

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

DANIEL MAYER FARIA

**CONTROLE DE TEMPERATURA UTILIZANDO O PROTOCOLO  
FOUNDATION FIELDBUS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA  
2014

DANIEL MAYER FARIA

**CONTROLE DE TEMPERATURA UTILIZANDO O PROTOCOLO  
FOUNDATION FIELDBUS**

Monografia de Especialização apresentada ao Curso de Especialização em Automação Industrial do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: M.Sc. Simone Massulini Acosta

CURITIBA  
2014

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, que sempre me apoia e me incentiva nos estudos.

Aos professores do curso de Especialização em Automação Industrial da UTFPR, por repassarem seus conhecimentos.

À minha orientadora Simone Massulini Acosta, pelo incentivo e suporte para a realização do projeto.

## RESUMO

FARIA, Daniel Mayer. **Controle de temperatura utilizando o protocolo Foundation Fieldbus**. 2014. 47f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Nesta monografia foi desenvolvido o controle de temperatura de uma câmara térmica utilizando o protocolo digital *Foundation Fieldbus*. Os equipamentos utilizados com esse protocolo foram um transmissor de temperatura e um conversor de *Fieldbus* para 4 a 20 mA. Foi realizada a configuração do protocolo *Foundation Fieldbus* e foi desenvolvido um sistema de supervisão para o processo. Após, foi realizada a sintonia dos parâmetros do controlador PID utilizando o método do modelo interno (IMC). Por último, foram realizados testes e verificou-se que a comunicação, controle e supervisão do processo funcionaram corretamente.

**Palavras chave:** *Foundation Fieldbus*. Supervisão de Processos. Controle de Temperatura.

## ABSTRACT

FARIA, Daniel Mayer. **Controle de temperatura utilizando o protocolo Foundation Fieldbus**. 2014. 47f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This project consists of a temperature control of a thermal chamber using the Foundation Fieldbus all-digital protocol. A temperature transmitter and a Fieldbus to 4-20 mA converter were used in the project's development. The Foundation Fieldbus protocol was configured successfully and a monitoring system was developed. To tune the controller with Internal Model Control (IMC) was performed. Tests were conducted and it was concluded that the communication, the controller and the process monitoring system functioned properly.

**Keywords:** Foundation Fieldbus. Monitoring System. Temperature Controller.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema com as redes H1 e HSE.....	12
Figura 2 – Codificação Manchester.....	12
Figura 3 – Camadas OSI do protocolo <i>Foundation Fieldbus</i> .....	13
Figura 4 – Blocos <i>Fieldbus</i> .....	14
Figura 5 – Exemplos de Blocos Funcionais. ....	15
Figura 6 – Exemplo de Blocos Funcionais inseridos em dispositivos <i>Fieldbus</i> . ....	16
Figura 7 – Diagrama em blocos de um sistema em malha aberta. ....	17
Figura 8 – Diagrama em blocos de um sistema em malha fechada.....	17
Figura 9 – Termoresistência Pt-100 a três fios.....	20
Figura 10 – Transmissor de temperatura TT302 da SMAR.....	20
Figura 11 – Conversor FI302 da SMAR .....	21
Figura 12 – Resistência Elétrica.....	22
Figura 13 – Resposta do processo de primeira ordem em malha aberta. ....	23
Figura 14 – Tela do sistema supervisório do projeto.....	26
Figura 15 – Imagem frontal da câmara térmica.....	28
Figura 16 – Relé de estado sólido.....	29
Figura 17 – Ventilador superior da câmara térmica.....	29
Figura 18 – Controlador de processos Novus N1100.....	30
Figura 19 – Tela do sistema supervisório da câmara térmica. ....	30
Figura 20 – Conjunto <i>Foundation Fieldbus</i> . ....	31
Figura 21 – Projeto H1 no <i>Syscon</i> .....	32
Figura 22 – Planta física do projeto.....	33
Figura 23 – Planta lógica do projeto.....	34
Figura 24 – Estratégia de controle. ....	34
Figura 25 – Tela de parametrização do bloco <i>Display</i> . ....	35
Figura 26 – Parametrização <i>online</i> do bloco PID. ....	36
Figura 27 – <i>Download</i> dos parâmetros. ....	36
Figura 28 – Monitoração realizada no <i>Syscon</i> . ....	37
Figura 29 – OPC da variável de processo.....	38
Figura 30 – Ferramenta TWXView32. ....	39
Figura 31 – Tela do sistema supervisório desenvolvido. ....	39
Figura 32 – Curva de reação do sistema. ....	41
Figura 33 – Resposta do sistema em malha fechada. ....	43
Figura 34 – Resposta do sistema em malha fechada com correções nos parâmetros PID. ....	43
Figura 35 – Resposta do sistema ao ciclo de variação de temperatura. ....	44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
1.1	TEMA	7
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	8
1.3	PROBLEMA	8
1.4	OBJETIVOS	8
1.4.1	Objetivo Geral	8
1.4.2	Objetivos Específicos	8
1.5	JUSTIFICATIVA	9
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	9
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO	9
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	10
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>11</b>
2.1	FOUNDATION FIELDBUS	11
2.1.1	Camadas do Protocolo <i>Foundation Fieldbus</i>	12
2.1.2	Camada do Usuário	13
2.2	SISTEMAS DE CONTROLE	15
2.2.1	Elementos de uma Malha de Controle	19
2.2.1.1	Elemento Primário	19
2.2.1.2	Transmissor	20
2.2.1.3	Controlador	21
2.2.1.4	Conversor	21
2.2.1.5	Elemento Final de Controle	22
2.2.2	Sintonia de Controladores	22
2.3	SISTEMAS SUPERVISÓRIOS	24
2.4	SYSTEM 302	26
2.4.1	Syscon	27
2.4.2	Process View	27
<b>3</b>	<b>PLANTA DE CONTROLE DE TEMPERATURA</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>31</b>
4.1	CONFIGURAÇÃO DO FOUNDATION FIELDBUS	32
4.1.1	Planta Física	32
4.1.2	Planta Lógica	33
4.1.3	Parametrização dos Blocos Funcionais	35
4.1.4	Comunicação com os Instrumentos	35
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	37
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>40</b>
5.1	SINTONIA UTILIZANDO O MÉTODO DO MODELO INTERNO	40
5.2	RESPOSTA DO SISTEMA EM MALHA FECHADA	42
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>45</b>
	REFERÊNCIAS	46

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados o tema, delimitação do estudo, problema, objetivos, justificativa, procedimentos metodológicos, embasamento teórico e estrutura do trabalho.

## 1.1 TEMA

A partir da década de 1940, os instrumentos pneumáticos permitiram a transmissão de sinal à distância. Nas décadas de 1950 e 1960, os instrumentos eletrônicos analógicos simplificaram o sinal e permitiram maior distância de transmissão. Posteriormente, nas décadas de 1970 e 1980, começaram a ser explorados os protocolos digitais, os quais revolucionaram a automação (ALVES, 2005).

Os protocolos digitais, além de transmitirem dados dos instrumentos, fornecem informações adicionais para o processo, dessa maneira podendo otimizar a segurança do processo e realizar uma manutenção proativa eficientemente, como é o caso do protocolo *Foundation Fieldbus* (SMAR, 2014e).

O *Foundation Fieldbus* é um sistema de comunicação digital em série e bidirecional que conecta equipamentos como sensores, atuadores e controladores. O *Fieldbus* é uma rede local (LAN) para automação e instrumentação de controle de processos, com capacidade de distribuir o controle no campo (SMAR, 2014a).

De acordo com a SMAR (2014a), o protocolo *Foundation Fieldbus* encontra-se em operação em mais de 25 países. Existe uma estimativa que aproximadamente 80% de todas as novas instalações de sistemas de controle das indústrias de processo são compatíveis com o protocolo *Foundation Fieldbus*.

Nas indústrias de processo as variáveis mais utilizadas são temperatura, pressão, vazão e nível (ALVES, 2005). A temperatura é uma das variáveis de processo mais importantes e sua medição e controle é fundamental numa vasta gama de aplicações, que abrange desde processos físicos e químicos até a proteção de equipamentos (BEGA, 2011).



## 1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Basicamente todos os instrumentos e aplicativos para a configuração e supervisão utilizados no projeto são da empresa SMAR. Dessa maneira não será explorada a interoperabilidade do protocolo *Foundation Fieldbus*.

## 1.3 PROBLEMA

O protótipo de uma câmara térmica desenvolvido por Souza e Beetz (2012) é controlado por um controlador da marca Novus e possui um sistema supervisório desenvolvido com a ferramenta Elipse Scada.

A proposta consiste em utilizar a mesma estrutura física utilizada por Souza e Beetz (2012) e substituir o controlador da marca Novus por um conjunto de instrumentos da marca SMAR. Em vez do sistema supervisório Elipse Scada é utilizado um aplicativo da própria SMAR para supervisionar o processo.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Realizar o controle de temperatura de um processo utilizando o protocolo de comunicação digital *Foundation Fieldbus*.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Analisar os equipamentos da empresa SMAR disponíveis no laboratório.
- Realizar a configuração do protocolo *Foundation Fieldbus*.
- Desenvolver um sistema de supervisão para o processo.
- Ajustar os parâmetros do controlador PID.
- Realizar testes e analisar os resultados.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

O projeto foi realizado no laboratório Q107 do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde se encontra uma câmara térmica para realizar experimentos com a variável de processo temperatura.

A câmara térmica foi o Trabalho de Conclusão de Curso de alunos do curso de graduação (SOUZA; BEETZ, 2012). Nessa foi utilizado um controlador de processos Novus N1100, que realiza o controle PID do processo, e foi desenvolvido um sistema supervisório com o Elipse Scada.

No projeto proposto, o controle de temperatura é realizado utilizando-se a ferramenta *System 302*, da marca SMAR e instrumentos da mesma empresa, em substituição ao controlador da marca Novus.

Nesse projeto foi utilizado o protocolo *Foundation Fieldbus* para controle de temperatura e supervisão da câmara térmica, sendo esse protocolo largamente utilizado nas indústrias de processos.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O projeto se trata de uma pesquisa aplicada com abordagem qualitativa, envolvendo apenas um caso de estudo.

Para isso, é feita uma análise dos equipamentos da marca SMAR do conjunto disponível no laboratório. Após realizar a configuração do protocolo *Foundation Fieldbus* e desenvolver o sistema supervisório são realizados testes e análise da sintonia do controlador PID.

## 1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Na abordagem do protocolo *Foundation Fieldbus* são utilizados como referencial teórico, principalmente, artigos e manuais de equipamentos da empresa SMAR e o livro de Verhappen e Pereira (2006).

Em relação a instrumentação e o controle de temperatura, são referenciados principalmente os autores Bega (2011), Fialho (2007), Campos (2006) e Alves (2005).

## 1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta tópicos introdutórios do documento, divididos em tema, delimitação do estudo, problema, objetivos, justificativa e procedimentos metodológicos.

O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica, cujos tópicos fornecem uma base teórica do protocolo *Foundation Fieldbus* e do controle de temperatura.

O Capítulo 3 apresenta detalhes sobre a câmara térmica utilizada no projeto.

O Capítulo 4 aborda o desenvolvimento do projeto, onde estão descritos o processo de configuração do protocolo *Foundation Fieldbus* e o desenvolvimento do sistema supervisor.

No Capítulo 5 são apresentados os testes e os resultados são analisados.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão teórica dos principais temas do trabalho, que são o protocolo *Foundation Fieldbus*, os sistemas de controle, os sistemas supervisórios e o *System 302* da SMAR.

### 2.1 FOUNDATION FIELDBUS

O *Foundation Fieldbus* é um protocolo de comunicação digital e bidirecional que conecta instrumentos de campo, processos e sistemas supervisórios (VERHAPPEN; PEREIRA, 2006). É diferente de qualquer outro protocolo de comunicação porque pode ser designado para resolver aplicações de controle de processos em vez de apenas transferir dados no modo digital (SMAR, 2014g).

Existem duas opções para este protocolo: H1 e HSE (*High Speed Ethernet*).

O H1 possui uma taxa de 31,25 kb/s e é voltado para instrumentos de campo, Figura 1. Pode comportar até 32 equipamentos não alimentados pelo barramento. O meio físico é um par trançado blindado, com a alimentação e a comunicação dadas pelo mesmo par. Possui uma codificação *Manchester*, Figura 2, que garante que o dado e o *clock* cheguem ao mesmo tempo (SMAR, 2014e).

O HSE possui uma taxa de 100 Mb/s e baseia-se no protocolo *Ethernet*. É voltado para integrar controladores e equipamentos mais complexos (SMAR, 2014e).

A comunicação entre o H1 e o HSE é feita pelo *Linking Device*, que é um dispositivo que estabelece a comunicação entre a rede HSE e um ou mais canais H1 (PANTONI, 2006). A Figura 1 mostra um sistema interligando as redes H1 e HSE com diversas topologias.

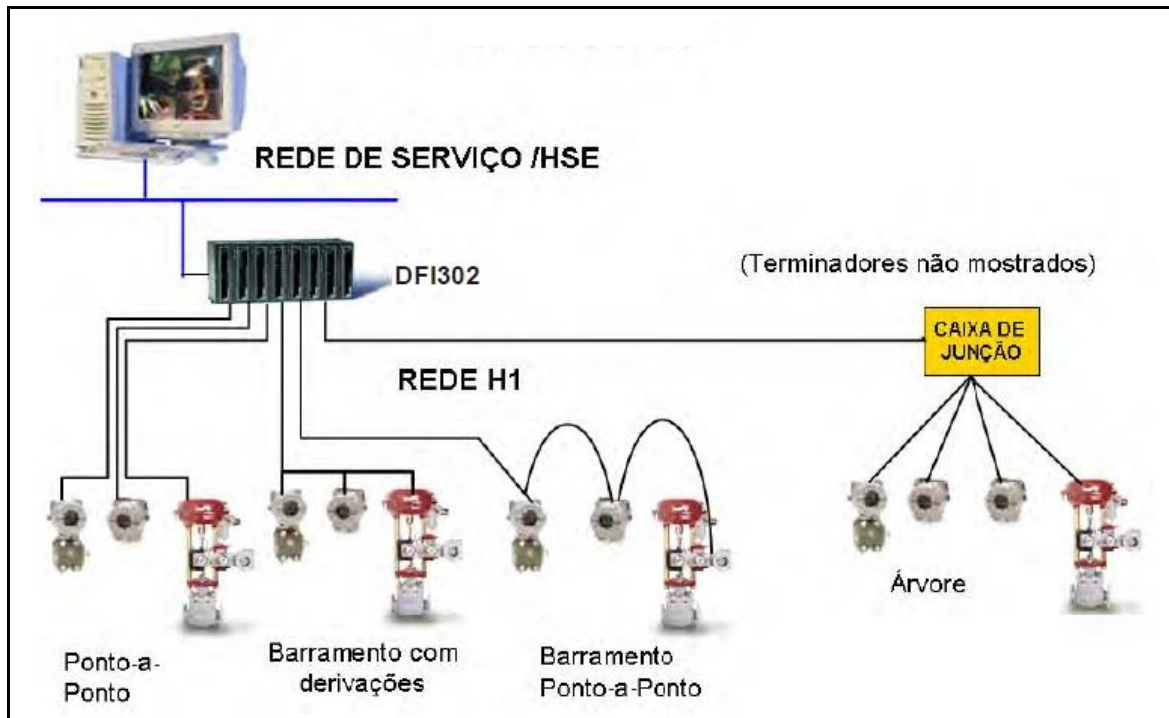


Figura 1 – Sistema com as redes H1 e HSE.  
Fonte: SMAR (2014e).

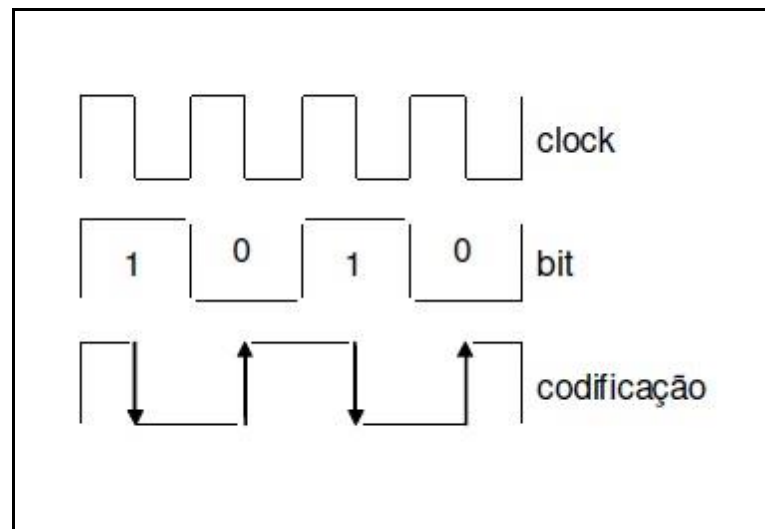


Figura 2 – Codificação Manchester.  
Fonte: Pantoni (2006).

### 2.1.1 Camadas do Protocolo *Foundation Fieldbus*

O *Foundation Fieldbus* é baseado nas camadas física, de enlace e de aplicação do modelo OSI (*Open Systems Interconnections*), como mostra a Figura 3.

De acordo com Verhappen e Pereira (2006), a camada física (nível físico) está relacionada com a conexão dos instrumentos. As camadas de enlace (nível de

*link* de dados) e de aplicação (nível de aplicação) formam uma pilha de comunicação, Figura 3, que está relacionada com a comunicação digital entre os dispositivos.

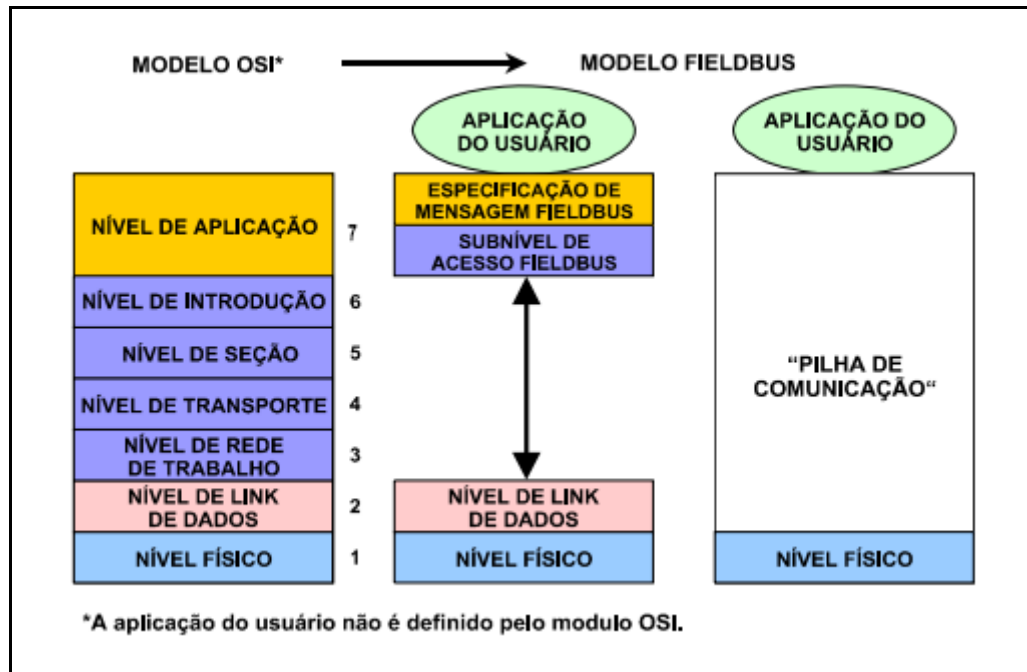


Figura 3 – Camadas OSI do protocolo *Foundation Fieldbus*.  
Fonte: SMAR (2014g).

De acordo com Pantoni (2006), o mestre da rede é o LAS (*Link Active Scheduled*). Não se trata de um mestre fixo, pois qualquer dispositivo configurado para ser um LAS pode assumir assim que o LAS corrente sair da rede. O LAS é responsável por agendar serviços cíclicos, que são responsáveis pelo controle, e também os serviços acíclicos, que podem ser a escrita e a leitura dos parâmetros dos Blocos Funcionais.

### 2.1.2 Camada do Usuário

A camada do usuário define a maneira que a informação é acessada pelos instrumentos de campo, então esta informação pode ser distribuída para outros equipamentos na rede (VERHAPPEN; PEREIRA, 2006). Essa camada não é definida pelo modelo OSI (SMAR, 2014g).

A arquitetura de um dispositivo *Fieldbus* é baseada em blocos funcionais, que são responsáveis por realizarem tarefas para aplicações como aquisição de dados, malha de realimentação etc. (VERHAPPEN; PEREIRA, 2006). A Figura 4 mostra os blocos do usuário e os blocos *Fieldbus*.

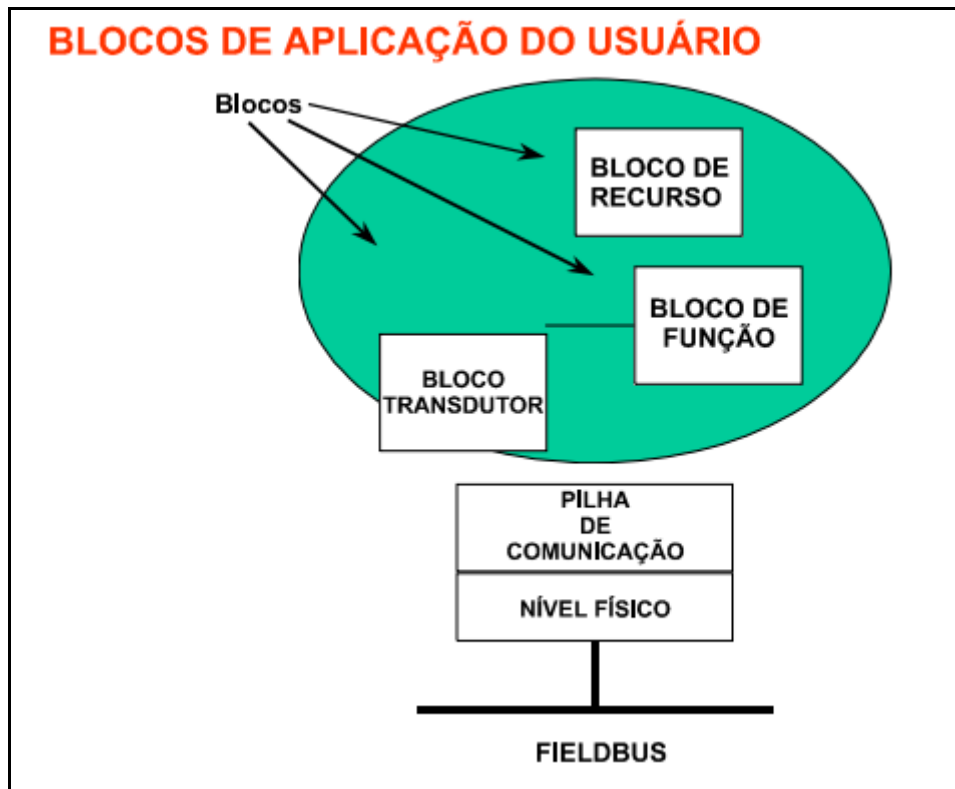


Figura 4 – Blocos *Fieldbus*.  
Fonte: SMAR (2014g).

O Bloco de Recurso, Figura 4, descreve características do dispositivo *Fieldbus* como o nome de dispositivo, fabricante e número de série. Existe apenas um bloco de recurso em cada dispositivo (SMAR, 2014d).

Os Blocos Transdutores, Bloco Transdutor na Figura 4, separam os blocos funcionais dos dispositivos específicos de entrada e saída (E/S), tal como sensores, atuadores e chaves. Esses blocos também executam funções, tais como calibração e linearização de dados de E/S, convertendo-os para uma representação independente do equipamento (SMAR, 2014d).

Os Blocos Funcionais, Bloco de Função na Figura 4, provêm o controle do comportamento do sistema. Cada bloco funcional processa parâmetros de entrada, de acordo com um algoritmo específico e um conjunto interno de parâmetros de controle (SMAR, 2014d). A execução de cada Bloco de Função é precisamente

agendada. Pode haver muitos blocos de função em uma única Aplicação de Usuário (SMAR, 2014g). A Figura 5 apresenta uma lista com dez exemplos de Blocos Funcionais.

<b>Função Bloco</b>	<b>Símbolo</b>
<b>Entrada analógica</b>	AI
<b>Saída analógica</b>	AO
<b>Bias</b>	B
<b>Seletor de Controle</b>	CS
<b>Entrada discreta</b>	DI
<b>Saída discreta</b>	FAZ
<b>Carregador manual</b>	ML
<b>Proporcional derivativo</b>	PD
<b>Proporcional integrativo e derivativo</b>	PID
<b>Relação</b>	RA

**Figura 5 – Exemplos de Blocos Funcionais.**  
**Fonte: SMAR (2014g).**

Com a intenção de criar uma malha de controle, os Blocos Funcionais AI (entrada analógica), AO (saída analógica) e PID (proporcional, integrativo e derivativo) podem ser construídos dentro dos dispositivos *Fieldbus*, como apresentado na Figura 6 (SMAR, 2014g).

## 2.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle são utilizados para o controle de variáveis de processos em sistemas industriais como, por exemplo, temperatura, pressão, vazão e nível (OGATA, 1998; CARVALHO, 2000).



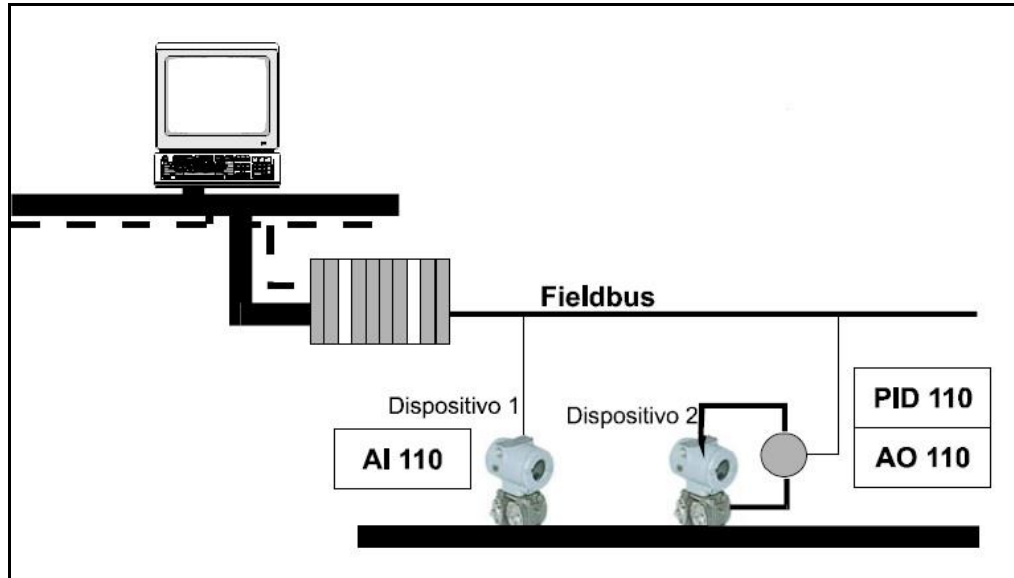


Figura 6 – Exemplo de Blocos Funcionais inseridos em dispositivos *Fieldbus*.  
Fonte: SMAR (2014g).

Segundo Ogata (1998), alguns termos utilizados em sistemas de controle são:

- Processo: é a atividade ou operação a ser controlada.
- Variáveis de processo: a variável controlada ou variável de processo (PV - *process variable*) é a grandeza ou a condição que é medida e controlada e a variável manipulada (MV – *manipulated variable*) é a grandeza ou a condição variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada.
- Distúrbio: um distúrbio ou perturbação é caracterizado por um sinal que vai de alguma maneira alterar o valor da variável de saída de um sistema.
- Controle com retroação: se refere a operação que irá compensar o distúrbio e agir no processo de maneira a manter o sinal de saída da forma desejada.

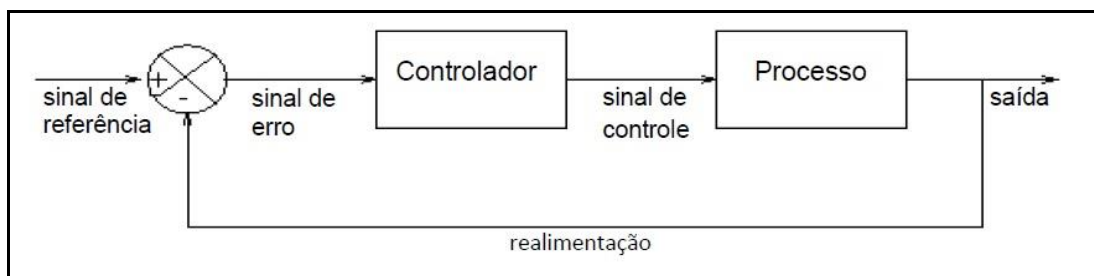
Os sistemas de controle podem ser de dois tipos (OGATA, 1998):

- Sistema de controle em malha aberta: este sistema consiste em aplicar um sinal de controle pré-definido, esperando-se que a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. A Figura 7 apresenta o diagrama em blocos de um sistema em malha aberta.



**Figura 7 – Diagrama em blocos de um sistema em malha aberta.**  
**Fonte: Ogata (1998).**

- Sistema de controle em malha fechada: nesse sistema as informações sobre como a saída controlada está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico, conforme Figura 8. O sinal de saída é comparado com um sinal de referência (SP, *set-point*) e o desvio (sinal de erro) entre estes dois sinais é utilizado no controlador para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo.



**Figura 8 – Diagrama em blocos de um sistema em malha fechada.**  
**Fonte: Ogata (1998).**

O controlador é um dispositivo que tem um sinal de saída que pode ser variado para manter a variável controlada (PV) dentro de um limite específico ou para alterá-la de um valor previamente estabelecido (BEGA, 2003).

As ações de controle básicas usadas em controladores industriais são as ações de controle: proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativa (PD) e proporcional-integral-derivativa (PID).

A ação de controle proporcional (P) atua no processo fazendo com que a ação na saída do controlador seja proporcional ao sinal de erro na entrada desse. Desta forma, quanto maior for o erro na entrada do controlador, maior será o sinal de correção na saída dele. O sinal de erro pode ser definido como o *set-point* menos a variável de processo ( $e(t) = SP - PV$ ) ou vice-versa (CAMPOS, 2006).

Quanto maior for o ganho proporcional do controlador ( $K_p$ ), maior será a ação do controlador a fim de evitar o erro no final do processo. Muitos fabricantes de controladores industriais usam a banda proporcional (BP ou  $P_b$ ) em vez do  $K_p$ , sendo  $BP = P_b = 100/K_p$  (NOVUS, 2012).

A ação de controle derivativa tem como finalidade antecipar a ação de controle, atuando na variação do erro conforme o tempo. Deve ser empregada em processos lentos onde o tempo de retorno ao *set-point* (SP) seja demorado e a ação derivativa antecipe esse acontecimento. A ação derivativa nunca é usada isoladamente, sendo combinada com a ação proporcional (PD) ou com as ações proporcional e integral juntas (PID). O tempo derivativo do controlador ( $T_d$  ou *rate*) pode ser utilizado em segundos ou minutos, de acordo com a especificação do fabricante do controlador (CAMPOS, 2006).

A ação de controle proporcional-integral (PI) gera na saída do controlador uma ação proporcional ao erro e proporcional à integral do erro. A função da ação do termo integral é eliminar o erro em regime permanente. Em geral esse controlador apresenta baixo sobressinal e tempo de subida e estabilidade elevado (OGATA, 1998).

O tempo integral do controlador ( $T_i$  ou *reset*) pode ser dado em segundos ou minutos. Alguns fabricantes utilizam a taxa de integração ( $1/T_i$ ) em número de repetições por minutos (CAMPOS, 2006).

O controlador proporcional, integral e derivativo (PID) gera a sua saída proporcionalmente ao erro, proporcionalmente à integral do erro e proporcionalmente à derivada do erro (BEGA, 2003).

O Quadro 1 apresenta, de maneira resumida, as características das três ações de controle que compõem o PID (NOVUS, 2014).

Ao unir as três técnicas de controle, consegue-se unir o controle básico do proporcional (P), com a eliminação do erro do integral (I) e com a redução de oscilações do derivativo (D), sendo que é necessário ajustar a intensidade de cada um dos termos através de um processo chamado de sintonia de controladores PID (NOVUS, 2014).

<b>P</b>	Correção proporcional ao erro	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
<b>I</b>	Correção proporcional ao produto erro x tempo	Erros pequenos, mas que existem há muito tempo, requerem correção mais intensa.
<b>D</b>	Correção proporcional à taxa de variação do erro	Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

**Quadro 1 – Características das ações do PID.**

Fonte: Novus (2012).

## 2.2.1 Elementos de uma Malha de Controle

Segundo Alves (2005), alguns dos instrumentos mais encontrados numa malha de controle são o elemento primário, transmissor, controlador, conversor e elemento final de controle.

### 2.2.1.1 Elemento Primário

O elemento primário representa o sensor da variável de processo (ALVES, 2005). No projeto, o elemento primário é uma termorresistência Pt-100.

A termorresistência é chamada de Pt-100 porque possui um elemento de platina com uma resistência padronizada de  $100\Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$  (BEGA, 2011).

De acordo com Fialho (2007), a Pt-100 é bastante utilizada nas indústrias, devido a sua estabilidade e alta precisão. Além destas vantagens, a termorresistência dispensa a utilização de fiação especial para a ligação e pode operar sem limites de distância.

A Pt-100 opera em conjunto com circuitos que convertem a sua variação de resistência em temperatura ou sinal padronizado (BEGA, 2011). No caso do projeto, o sinal é o H1 do *Foundation Fieldbus*.

A termoresistência Pt-100 pode ser conectada com dois, três ou quatro fios (FIALHO, 2007). No projeto a conexão da termoresistência é feita a três fios como é

mostrado na Figura 9. Esta conexão é sujeita a pequenos erros devidos à desigualdade dos condutores do cabo (BEGA, 2011).



**Figura 9 – Termoresistência Pt-100 a três fios.  
Fonte: Autoria própria.**

#### 2.2.1.2 Transmissor

O transmissor é o dispositivo que, através do elemento primário, sente a variável de processo e transmite uma saída proporcional ao valor da variável de processo (ALVES, 2005).

No projeto é utilizado o transmissor de temperatura TT302 da SMAR, responsável por converter o sinal da Pt-100 e disponibilizar em H1 do *Foundation Fieldbus*. O transmissor de temperatura TT302 pode ser visto na Figura 10.



**Figura 10 – Transmissor de temperatura TT302 da SMAR.  
Fonte: Autoria própria.**

### 2.2.1.3 Controlador

O controlador é um dispositivo que mantém a variável de processo num valor pré-determinado (ALVES, 2005). É um instrumento que compara o valor da variável de processo com o *set-point* (SP) e exerce uma ação corretiva na variável manipulada (MV) (BEGA, 2011). No projeto, a ação de controle é feita pelo bloco funcional PID do *Foundation Fieldbus*.

### 2.2.1.4 Conversor

O conversor é um instrumento que converte um sinal de entrada padronizado, vindo do controlador, em um sinal de saída de outro tipo, por exemplo o sinal de 4 a 20 mA (BEGA, 2011).

No projeto é utilizado o conversor FI302 da SMAR, mostrado na Figura 11, que converte o sinal H1 do *Foundation Fieldbus* em um sinal de corrente de 4 a 20 mA.

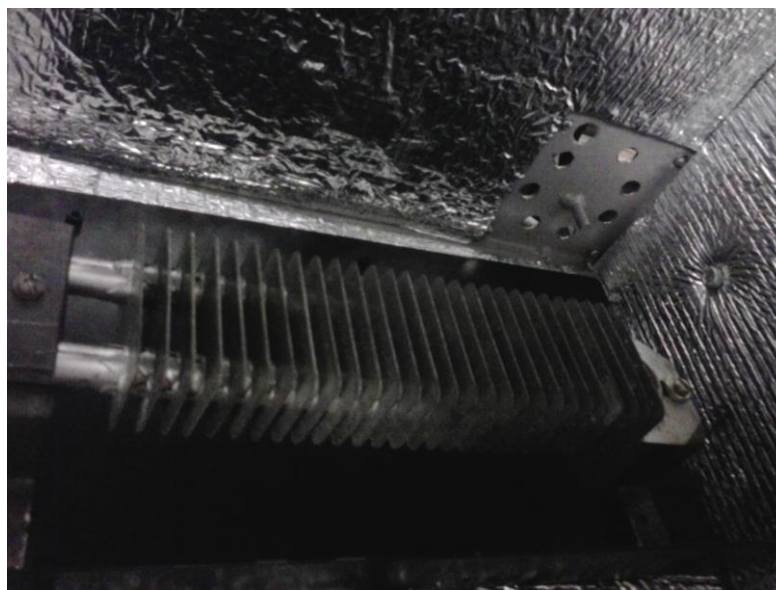


**Figura 11 – Conversor FI302 da SMAR.**  
Fonte: Autoria própria.

### 2.2.1.5 Elemento Final de Controle

O elemento final de controle é um equipamento que recebe o sinal do controlador e atua sobre o agente de controle (BEGA, 2011).

No projeto, o elemento final de controle é a resistência elétrica da câmara térmica, mostrada na Figura 12.



**Figura 12 – Resistência Elétrica.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 2.2.2 Sintonia de Controladores

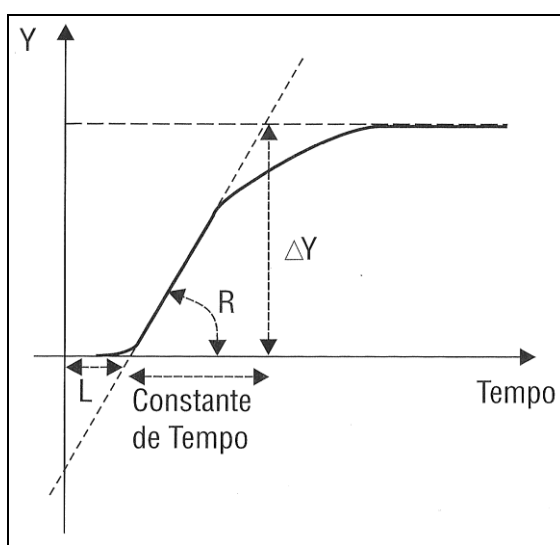
Sintonizar um controlador significa ajustar os parâmetros desse controlador para obter o melhor desempenho em relação ao comportamento desejado para o sistema.

Para a sintonia de controladores PID existem diversos métodos, tanto operando o processo em manual (malha aberta) quanto em automático (malha fechada). Dentre os diversos métodos de sintonia de controladores PID alguns utilizados são: o Método de Ziegler e Nichols, o Método Chien-Hrones-Reswick CHR, o Método de Cohen e Coon (CC) e o Método do Modelo Interno (IMC).

A sintonia pelo Método do Modelo Interno (IMC, *Internal Model Control*), utilizado nesse projeto, tem como objetivo determinar os parâmetros do controlador PID a partir do modelo do processo e dos critérios de desempenho. O modelo do

processo necessário nesse método pode ser obtido através da curva de reação do processo (CAMPOS, 2006).

A curva de reação do processo é uma identificação experimental obtida com o processo em malha aberta. Com o controlador em modo de operação manual, gera-se uma variação em degrau na variável manipulada (MV) na saída do controlador. Pela resposta do processo a esta variação na MV, calcula-se a taxa de variação (R), o tempo morto ( $L = \theta$ ) e a constante de tempo de malha aberta ( $\tau$ ), conforme apresentado na Figura 9 (CAMPOS, 2006).



**Figura 13 – Resposta do processo de primeira ordem em malha aberta.**

**Fonte: Campos (2006).**

A constante de tempo em malha fechada ( $\lambda$ ) do sistema é o critério de desempenho desse método de sintonia e define o quão rápido se deseja que a saída do processo acompanhe o *set-point* (SP).

No método IMC o desempenho de um controlador está associado com a razão da constante de tempo de malha fechada ( $\lambda$ ) e com a de malha aberta ( $\tau$ ). Quando a dinâmica do processo é representada por um modelo de primeira ordem ( $K, \tau$ ) em série com um tempo morto ( $\theta$ ), a sintonia sugerida pelo método é apresentada no Quadro 2 (CAMPOS, 2006). O ganho ( $K$ ) é dado por  $K = \Delta y(\%) / \Delta u(\%)$  para valores normalizados (0-100%) de  $\Delta y$  ( $\Delta PV$ ) e  $\Delta u$  ( $\Delta MV$ ).



Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$	Sugestão para o desempenho
PID	$\frac{2\tau + \theta}{K(2\lambda + \theta)}$	$\tau + \left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\frac{\tau\theta}{(2\lambda + \theta)}$	$\frac{\lambda}{\theta} > 0,8$
PI	$\frac{2\tau + \theta}{K 2\lambda}$	$\tau + \left(\frac{\theta}{2}\right)$	-	$\frac{\lambda}{\theta} > 1,7$

**Quadro 2 – Sintonia segundo o método IMC.**

Fonte: Campos (2006).

Em muitos casos, após a obtenção dos parâmetros do controlador utilizando algum dos métodos de sintonia, é necessário um ajuste manual da sintonia dos parâmetros do controlador PID. Este ajuste é empírico e deve ser feito por tentativa e erro, aplicando uma alteração nos parâmetros PID e verificando o desempenho do processo, até que o desempenho desejado seja obtido. Para isto é necessário conhecimento do efeito de cada parâmetro do PID sobre o comportamento do processo, conforme apresentado no Quadro 3 (NOVUS, 2012).

Parâmetro	Ao aumentar, o processo...	Ao diminuir, o processo...
$P_b$ ou $100/K_p$	Torna-se mais lento. Geralmente se torna mais estável ou menos oscilante. Tem menos <i>overshoot</i> .	Torna-se mais rápido. Fica mais instável ou mais oscilante. Tem mais <i>overshoot</i> .
$1/T_i$	Torna-se mais rápido, atingindo rapidamente o <i>set-point</i> . Fica mais instável ou mais oscilante. Tem mais <i>overshoot</i> .	Torna-se mais lento, demorando para atingir o <i>set-point</i> . Fica mais estável ou menos oscilante. Tem menos <i>overshoot</i> .
$T_d$	Torna-se mais lento. Tem menos <i>overshoot</i> .	Torna-se mais rápido. Tem mais <i>overshoot</i> .

**Quadro 3 – O efeito de cada parâmetro PID no comportamento do processo.**

Fonte: Novus (2012).

### 2.3 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Com a evolução tecnológica, os computadores assumiram um papel de gestão na coleta e no tratamento de dados, permitindo a sua visualização num monitor de vídeo e a geração de funções de controle complexas (ROSÁRIO, 2005).

De acordo com Moraes e Castrucci (2007), sistemas supervisórios são sistemas digitais de monitoração e operação da planta que gerenciam variáveis de processo. Estas são atualizadas continuamente e podem ser guardadas em bancos de dados locais ou remotos para fins de registro histórico.

O sistema de supervisão industrial também é conhecido como sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition* – Aquisição de Dados e Controle do Supervisório). Esses sistemas visam à integridade física das pessoas, equipamentos e produção, consistindo muitas vezes em sistemas redundantes de *hardware* e meio físico e permitindo pronta identificação de falhas (MORAES; CASTRUCCI, 2007).

Atualmente, os sistemas de supervisão podem ser definidos como uma interface homem-máquina (IHM) amigável que utilizam tecnologias de computação e comunicação que permitem a supervisão e/ou controle de sistemas automatizados (ROSÁRIO, 2005).

Ainda de acordo com Rosário (2005), algumas das principais características que um sistema supervisório deve ter são:

- Interface amigável com o operador;
- Geração automática de relatórios;
- Histórico de tendências;
- Acesso automático a banco de dados;
- Gerenciamento das condições de alarme.

Moraes e Castrucci (2007) recomendam nove etapas no desenvolvimento de um sistema supervisório:

- Entendimento do processo.
- Variáveis do processo.
- Planejamento da base de dados.
- Planejamento de alarmes.
- Planejamento da hierarquia da navegação entre telas.
- Desenho de telas.
- Gráfico de tendências.
- Planejamento do sistema de segurança.
- Padrão industrial de desenvolvimento.

A Figura 14 apresenta a tela do sistema supervisorio desenvolvido para o processo de controle de temperatura da câmara térmica.

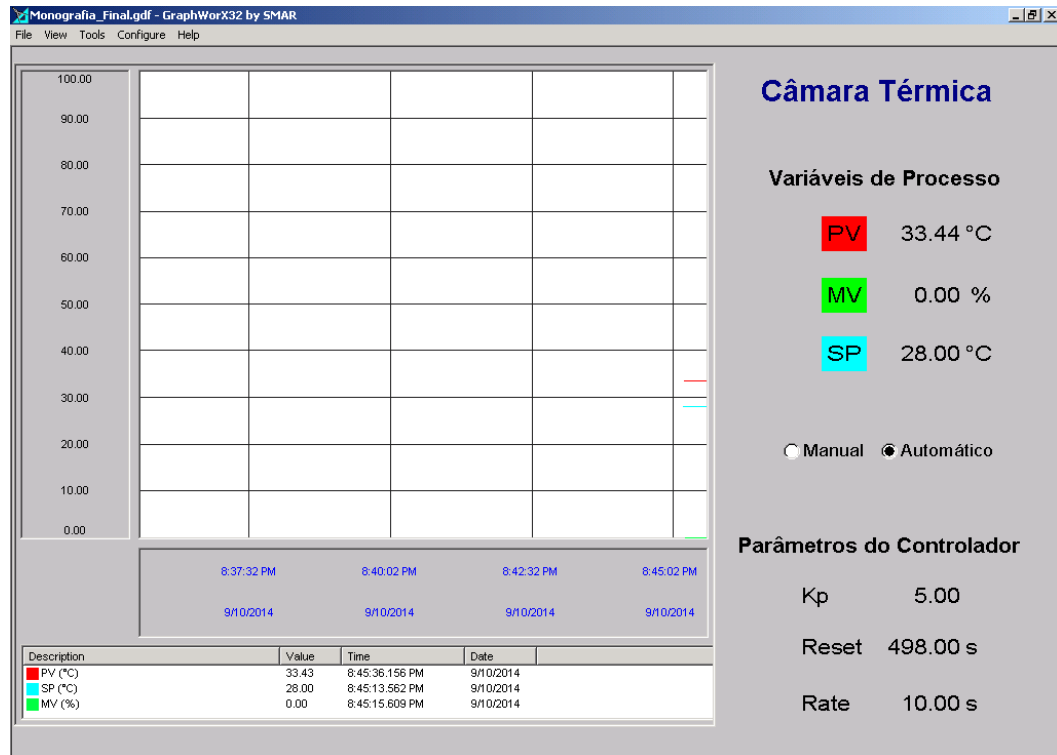


Figura 14 – Tela do sistema supervisorio do projeto.  
Fonte: Autoria própria.

## 2.4 SYSTEM 302

O *SYSTEM 302* é um sistema de automação de controle distribuído, desenvolvido pela SMAR. Esse sistema transforma dados de campo em inteligência de negócios (SMAR, 2014c).

Entretanto, no projeto foram utilizadas apenas as partes operacionais do *System 302* através dos aplicativos *Syscon* e *Process View*.

É utilizada a arquitetura de *software* OPC (*OLE For Process Control*), portanto não são utilizados *drivers* de instrumentos para a comunicação com *hardware* e *software* de terceiros (SMAR, 2014b).

### 2.4.1 Syscon

O *Syscon* (*System Configurator*) é uma ferramenta que configura, supervisiona e opera equipamentos *Fieldbus* através de um computador pessoal (SMAR, 2014f).

A versão do *Syscon* utilizada no projeto é a 6.0, desenvolvida para operar com o *Windows* 2000 (SMAR, 2014f).

Com uma IHM amigável, o *Syscon* possibilita uma interação produtiva e eficiente com o usuário. Possui uma extensa biblioteca de modelos pré-configurados e testados de equipamentos, estratégias de controle e símbolos gráficos. Esse aplicativo torna a engenharia do sistema mais simples e rápida de ser configurada (SMAR, 2014f).

### 2.4.2 Process View

O *Process View* é um conjunto de módulos que inclui aplicações para visualizar e operar o processo, visualizar alarmes, análise de tendências, relatórios, etc. Todo módulo de *software* no *Process View* é projetado para também ser capaz de operar como um produto individual, podendo ser substituído individualmente por uma aplicação de outro fabricante (SMAR, 2014b).

Para visualizar o processo é utilizado o módulo *GraphWorX* e para análise de tendências é utilizado o *TrendWorX*. A versão do *Process View* utilizada é a 6.14 (SMAR, 2014b).

### 3 PLANTA DE CONTROLE DE TEMPERATURA

O protótipo de uma câmara térmica, disponível no laboratório Q107 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná foi o resultado do trabalho de conclusão de curso realizado por Souza e Beetz (2012).

Este protótipo é constituído de um gabinete metálico cujas dimensões externas são de 350 mm de largura, 350 mm de altura e 220 mm de profundidade. Para o isolamento térmico, o gabinete foi forrado internamente com manta de polietileno expandido. A parte externa foi forrada com manta de polietileno expandido e com placas de poliestireno expandido. A porta possui vedação de borracha para evitar a perda de calor para o ambiente externo (SOUZA; BEETZ, 2012). A Figura 15 apresenta a imagem frontal da câmara térmica.

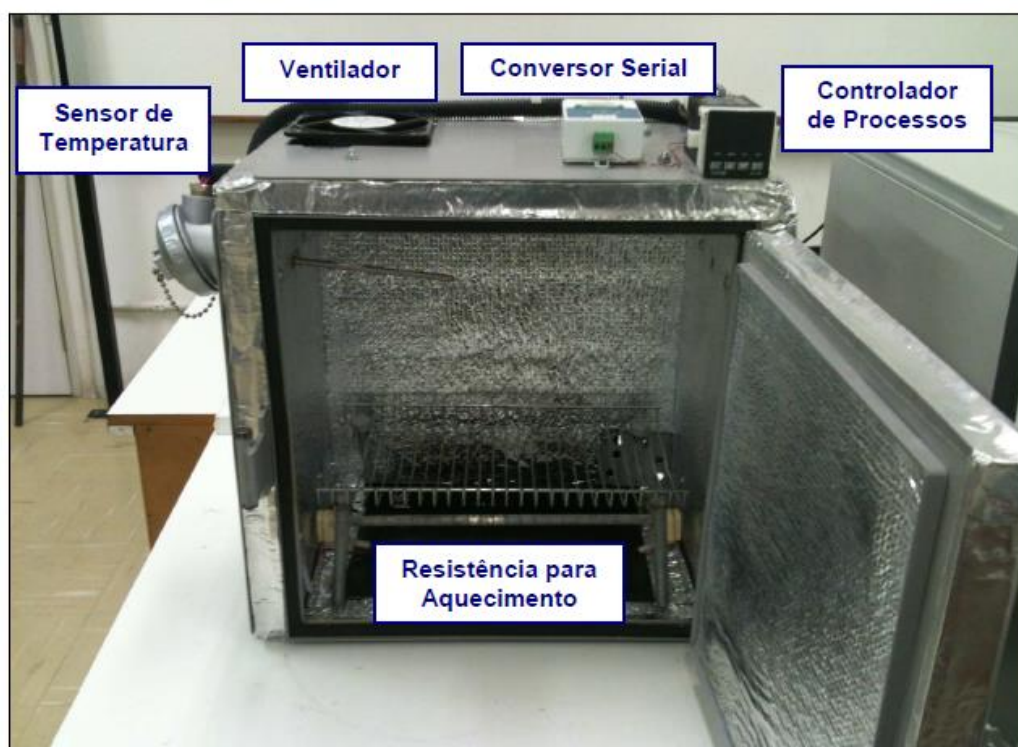


Figura 15 – Imagem frontal da câmara térmica.  
Fonte: Souza e Beetz (2012).

Para o aquecimento interno da planta é utilizado um resistor de 500 W e 220 V, cujo acionamento é realizado por um relé de estado sólido, mostrado na Figura 16, através do sinal de pulso do controlador.



**Figura 16 – Relé de estado sólido.**  
**Fonte: Souza e Beetz (2012).**

Para auxiliar no controle de temperatura da câmara térmica são utilizados dois ventiladores da marca Qualitas. Um deles está situado na parte superior da câmara e o outro na parte traseira. A Figura 17 mostra o ventilador superior da câmara térmica.



**Figura 17 – Ventilador superior da câmara térmica.**  
**Fonte: Souza e Beetz (2012).**

A câmara térmica possui um controlador de processos Novus N1100, que é responsável pelo controle PID e também por acionar os ventiladores. O controlador Novus N1100 é mostrado na Figura 18.

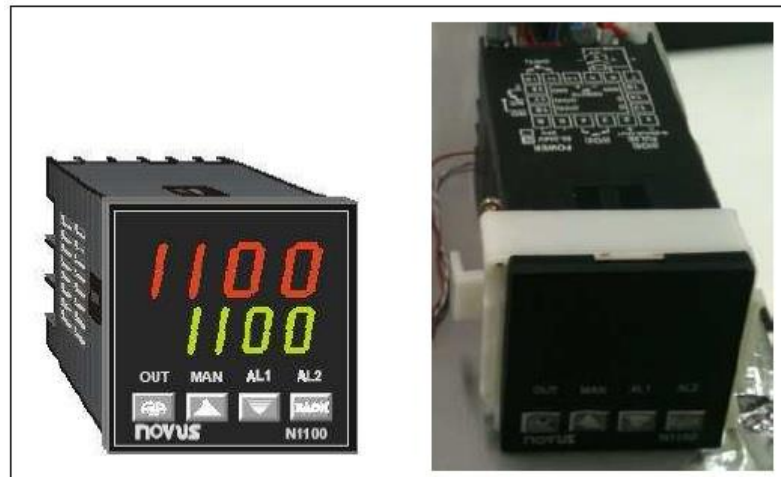


Figura 18 – Controlador de processos Novus N1100.  
Fonte: Souza e Beetz (2012).

O projeto possui um sistema supervisório desenvolvido no Elipse Scada, conforme Figura 19, que apresenta as variáveis *setpoint* (SP), variável de processo (PV), variável manipulada (MV), banda proporcional (Pb), taxa de integração (I<sub>r</sub>), tempo derivativo (Dt) e período do ciclo do PWM (Ct). Além de monitorar as variáveis, o sistema supervisório controla o modo em que o sistema opera (Automático ou Manual) e aciona os ventiladores (SOUZA; BEETZ, 2012).

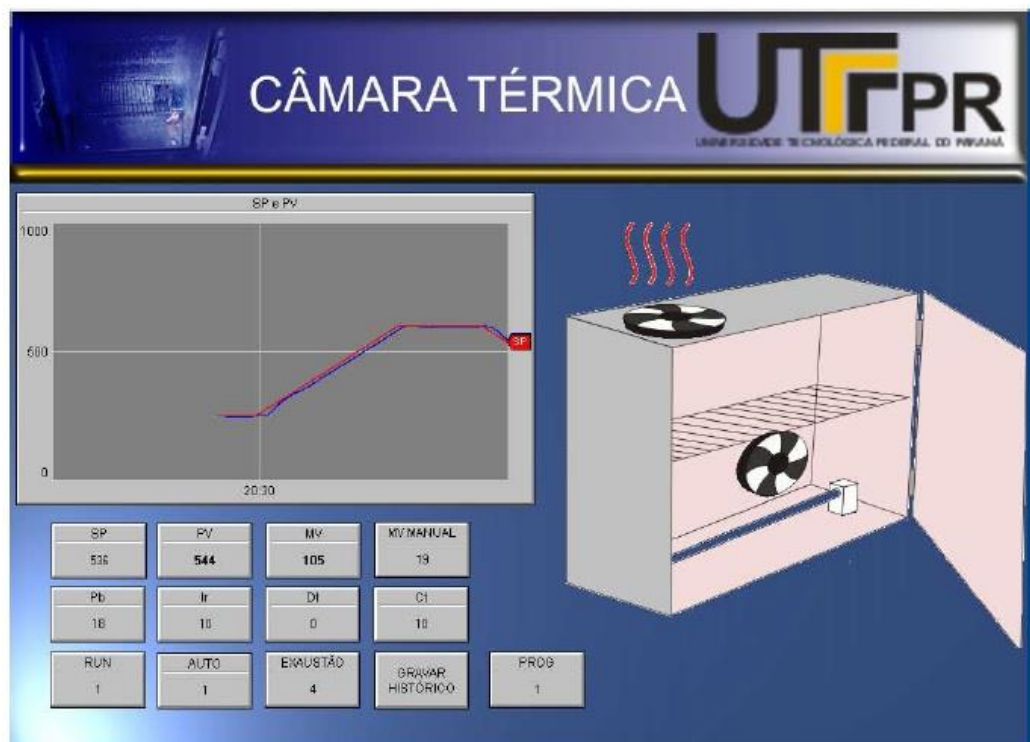


Figura 19 – Tela do sistema supervisório da câmara térmica.  
Fonte: Souza e Beetz (2012).

## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da configuração do protocolo *Foundation Fieldbus* no *Syscon* do *System 302* e do sistema supervisor no *Process View* do *System 302*.

Nesse projeto é utilizado o conjunto para *Foundation Fieldbus* disponível no laboratório Q107 do Departamento de Eletrônica da UTFPR. Esse conjunto possui a DFI, módulo principal de uma rede *Foundation Fieldbus*, um transmissor de pressão (LD302), um transmissor de temperatura (TT302) e um conversor de *Fieldbus* para 4 a 20 mA (FI302). A Figura 20 apresenta o conjunto *Foundation Fieldbus* utilizado.

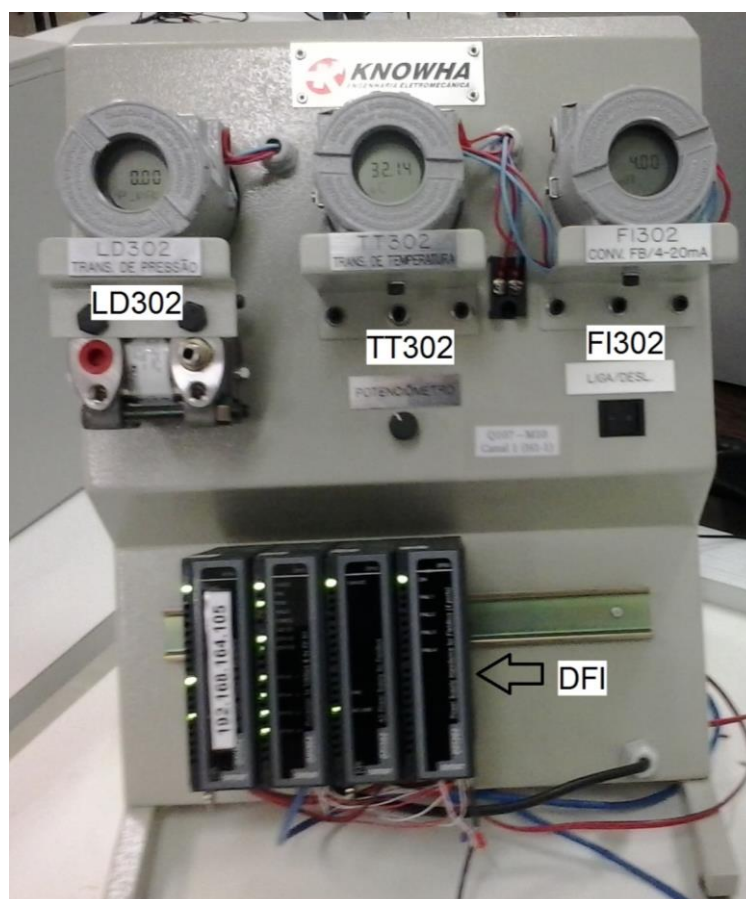


Figura 20 – Conjunto *Foundation Fieldbus*.  
Fonte: Autoria própria.

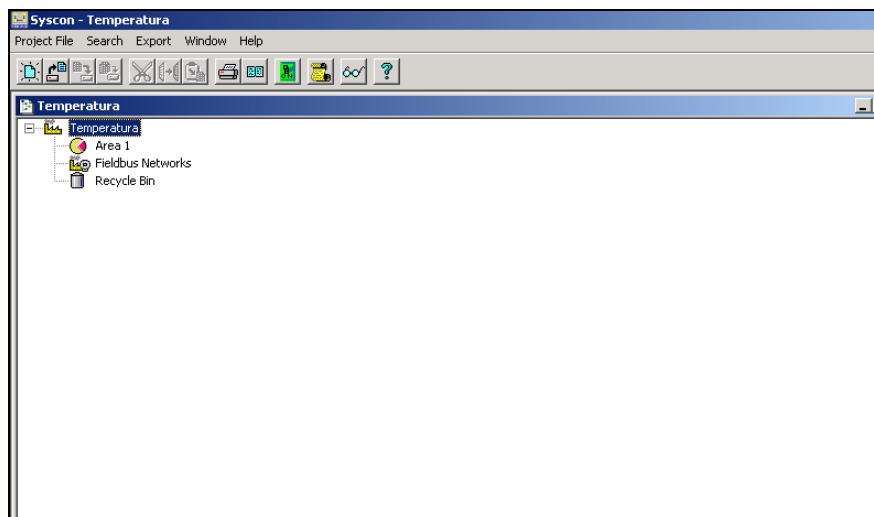


## 4.1 CONFIGURAÇÃO DO FOUNDATION FIELDBUS

A configuração do *Foundation Fieldbus* consiste em desenvolver as partes física e lógica do projeto, parametrizar os blocos funcionais e realizar a comunicação com os instrumentos.

### 4.1.1 Planta Física

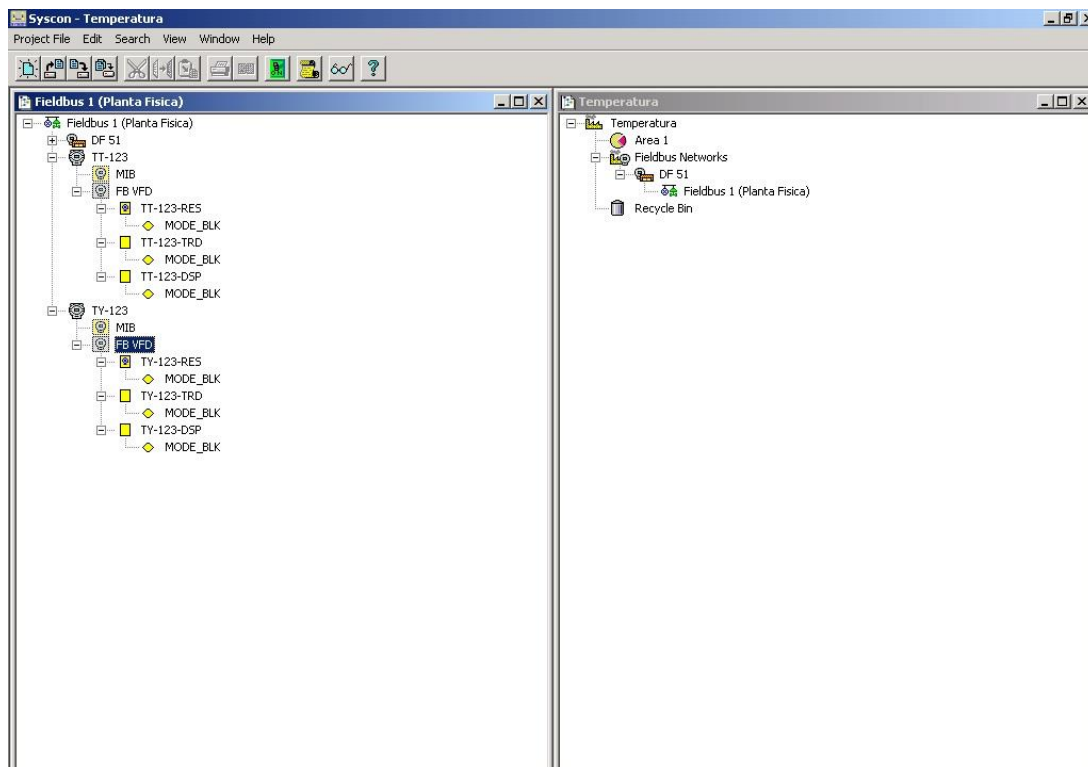
Primeiramente foi necessário criar um novo projeto H1 no *Syscon*, como é mostrado na Figura 21.



**Figura 21 – Projeto H1 no Syscon.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A parte física, criada a partir do *Fieldbus Networks*, é onde são adicionados os instrumentos e seus respectivos blocos funcionais, como mostra a Figura 22. Foi adicionada a *bridge* DF51 e ligados a essa estão o transmissor de temperatura TT302, denominado TT-123 na Figura 22, e o conversor FI302, denominado TY-123. É necessário especificar o fabricante e o modelo do instrumento durante a adição dos mesmos na planta física.

Para cada instrumento, o *Syscon* insere automaticamente os blocos *Resource* (RES), *Transducer* (TRD) e *Display* (DSP). Cada bloco foi renomeado individualmente para facilitar a identificação dos mesmos.



**Figura 22 – Planta física do projeto.**  
**Fonte: Autoria própria.**

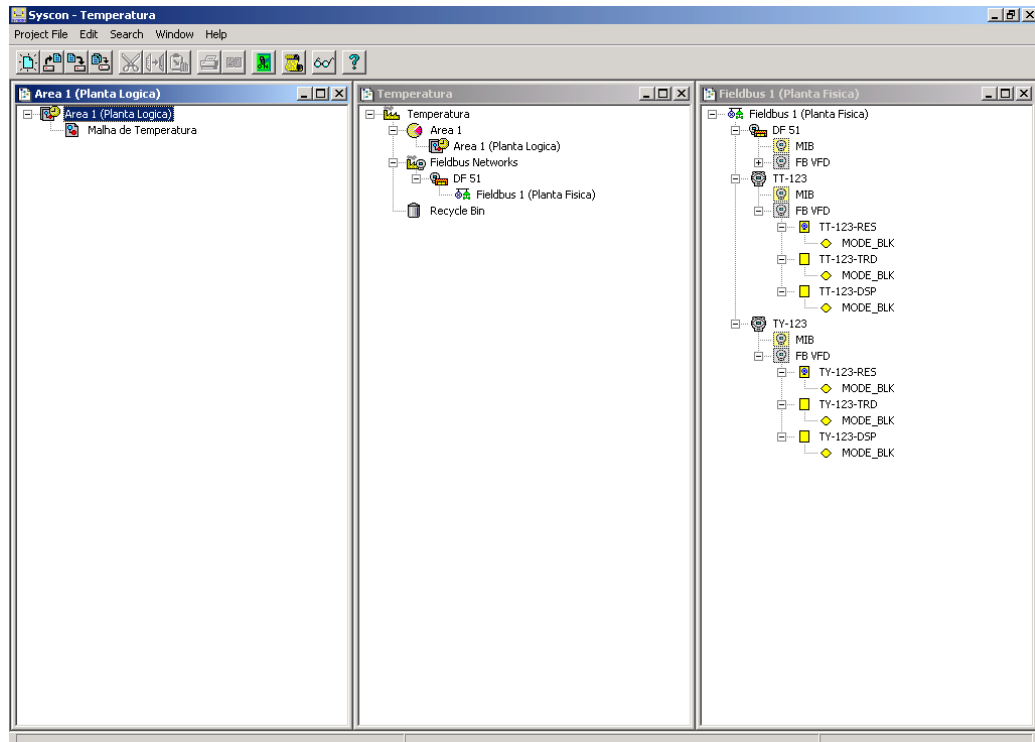
#### 4.1.2 Planta Lógica

A planta lógica, criada a partir da *Area 1*, é onde a estratégia de controle é definida, como mostra a Figura 23.

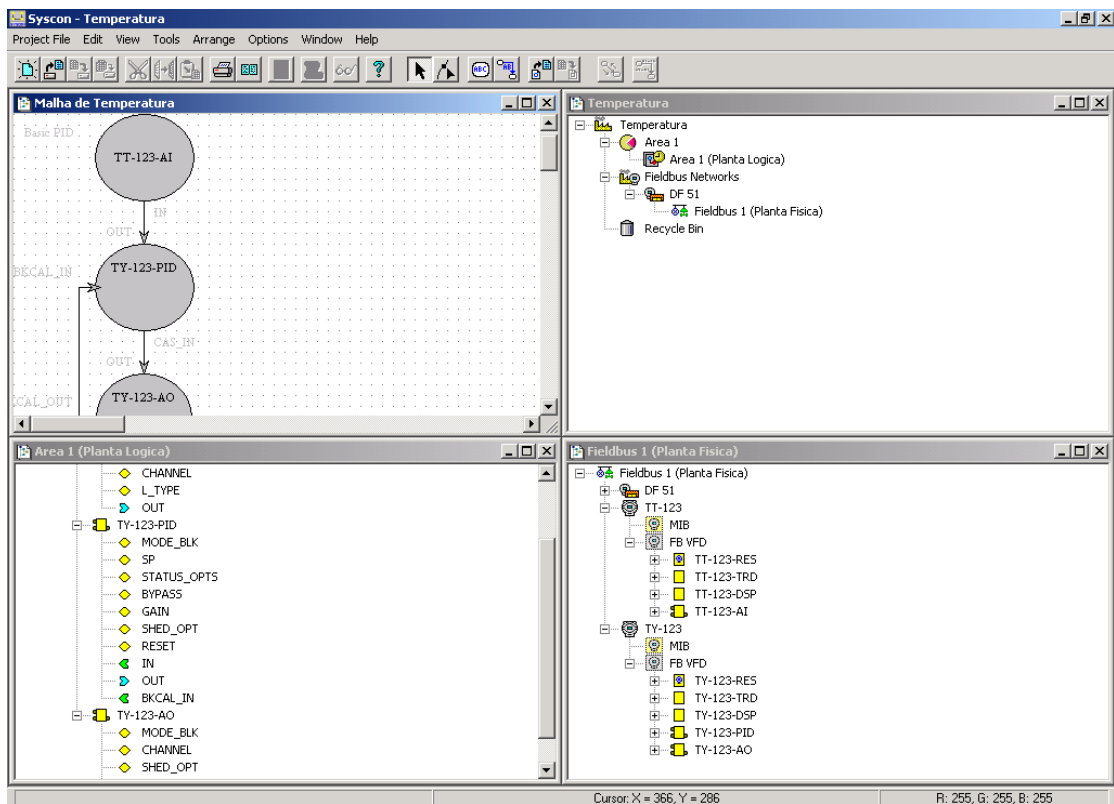
Malha de Temperatura foi o nome dado à *tag* do módulo de controle. Neste módulo é adicionada a estratégia de controle que foi importada do próprio Syscon através do *template basicpid.ftt*.

A estratégia de controle consiste em blocos funcionais AI (entrada analógica), PID (controle tipo PID) e AO (saída analógica) interligados, como é mostrado na Figura 24.

O bloco AI foi endereçado para o TT302 (TT-123) pois esse é o transmissor de temperatura de entrada, enquanto que os blocos PID e AO foram endereçados para o FI302 (TY-123). A estratégia de controle PID é realizada no conversor FI302, que é o equipamento que fornece o sinal de 4 a 20 mA que aciona a resistência da câmara térmica.



**Figura 23 – Planta lógica do projeto.**  
**Fonte: Autoria própria.**

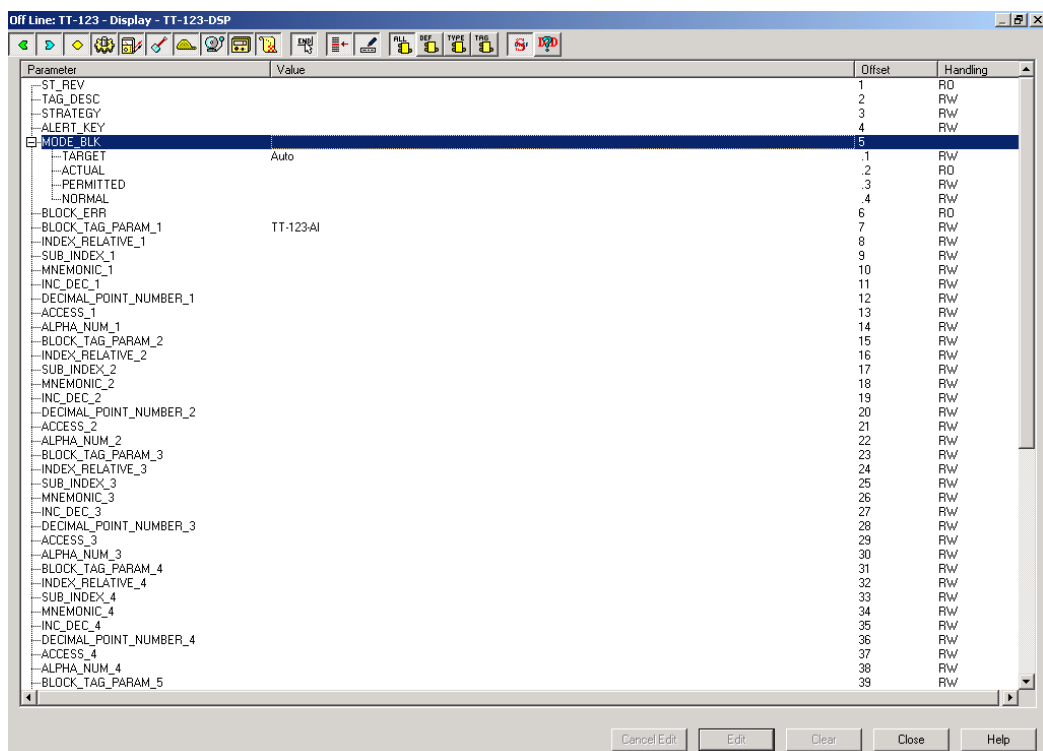


**Figura 24 – Estratégia de controle.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 4.1.3 Parametrização dos Blocos Funcionais

Cada bloco funcional pode ser acessado na opção *Off Line Characterization* para, então, serem definidos os parâmetros dos mesmos. A Figura 25 apresenta esta opção para o bloco *Display* (DSP) do TT302.

Os parâmetros também podem ser acessados no modo *Online* após ser estabelecida a comunicação com os instrumentos. A Figura 26 apresenta a tela de parametrização do bloco PID do FI302 (TY-123) no modo *Online*.



**Figura 25 – Tela de parametrização do bloco *Display*.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 4.1.4 Comunicação com os Instrumentos

Após realizar a parametrização dos blocos, o projeto do *Foundation Fieldbus* foi colocado em modo *Online* através do botão *Toggles Online Mode* da barra de ferramentas superior do *Syscon*. Após reconhecer o número de identificação do TT302 e do FI302 nos atributos de cada instrumento foi feito o *Download* dos parâmetros, como é mostrado na Figura 27.

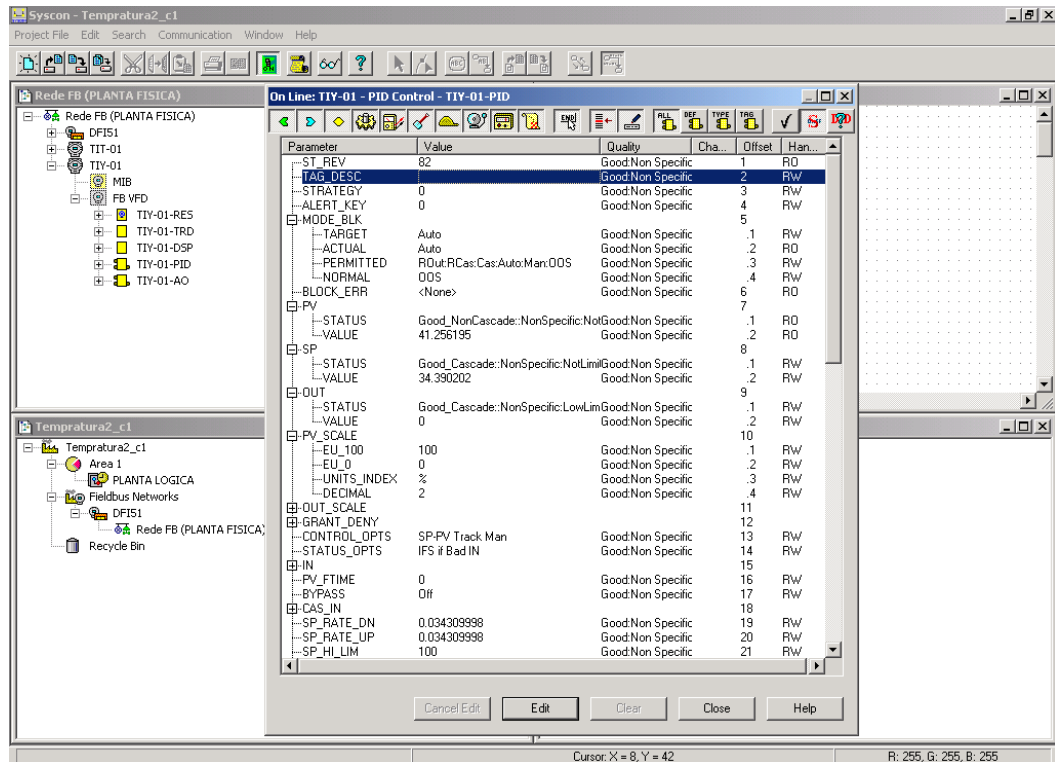


Figura 26 – Parametrização *online* do bloco PID.

Fonte: Autoria própria.

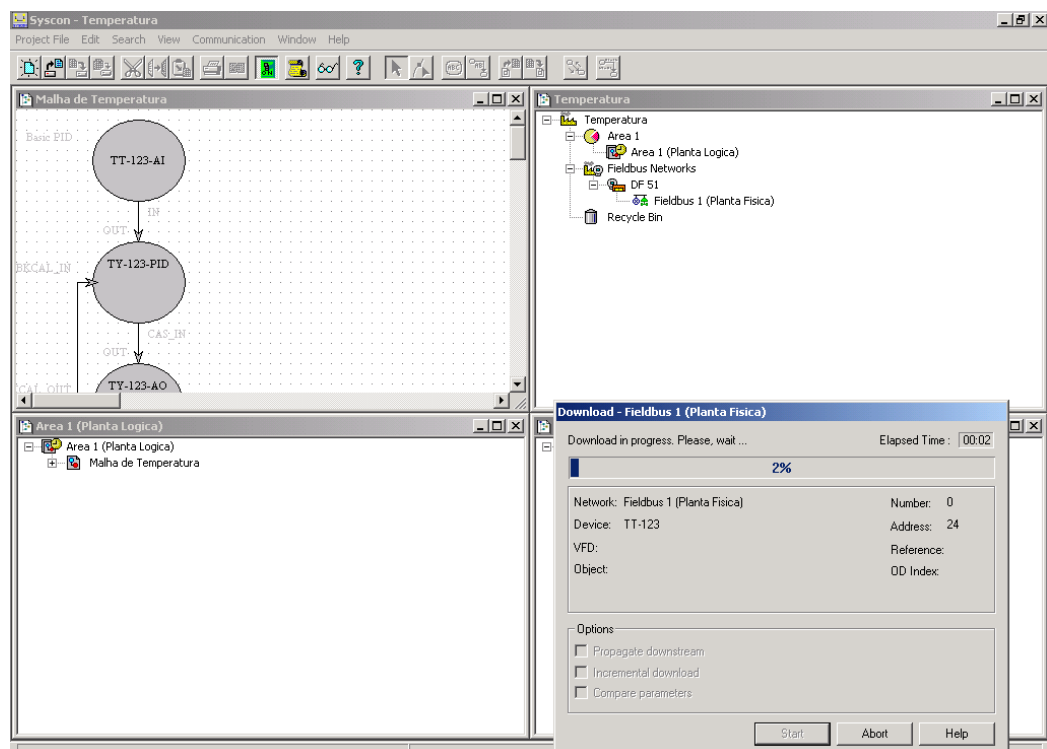
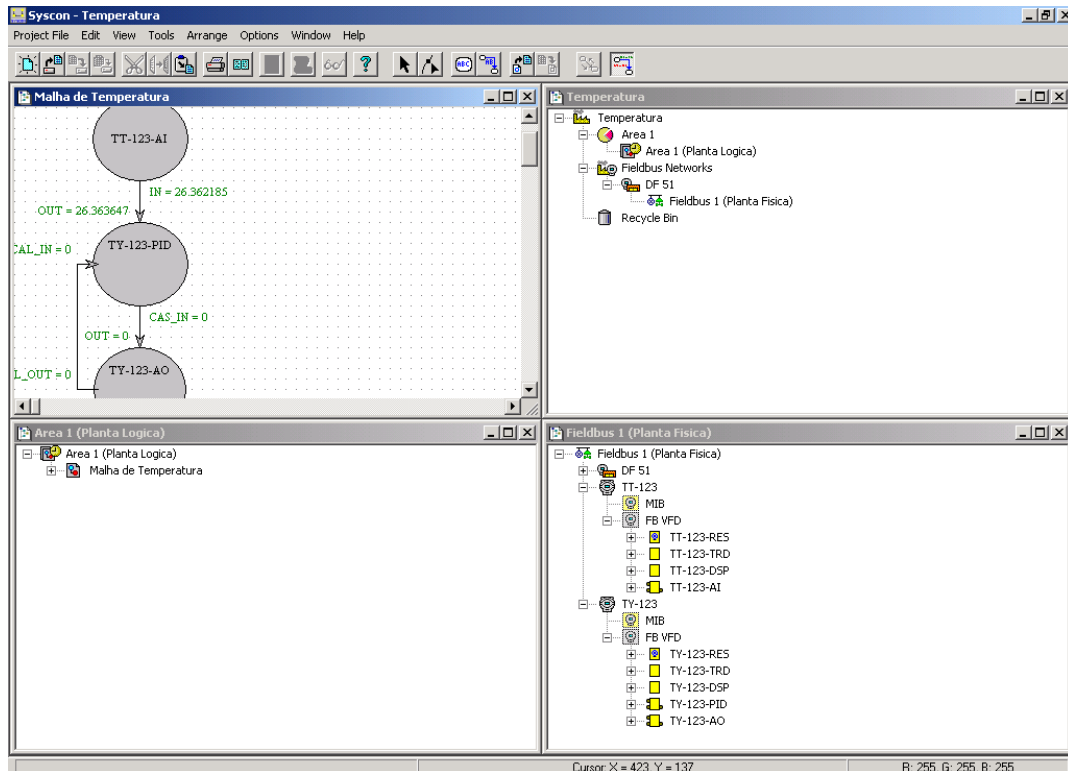


Figura 27 – *Download* dos parâmetros.

Fonte: Autoria própria.

Depois de concluir o *Download*, é realizada a exportação das *Tags* para a pasta *OleServers*. Então os valores podem ser monitorados via OPC pelo Syscon e pelo sistema supervisório. A Figura 28 apresenta um exemplo de monitoração realizada no Syscon.



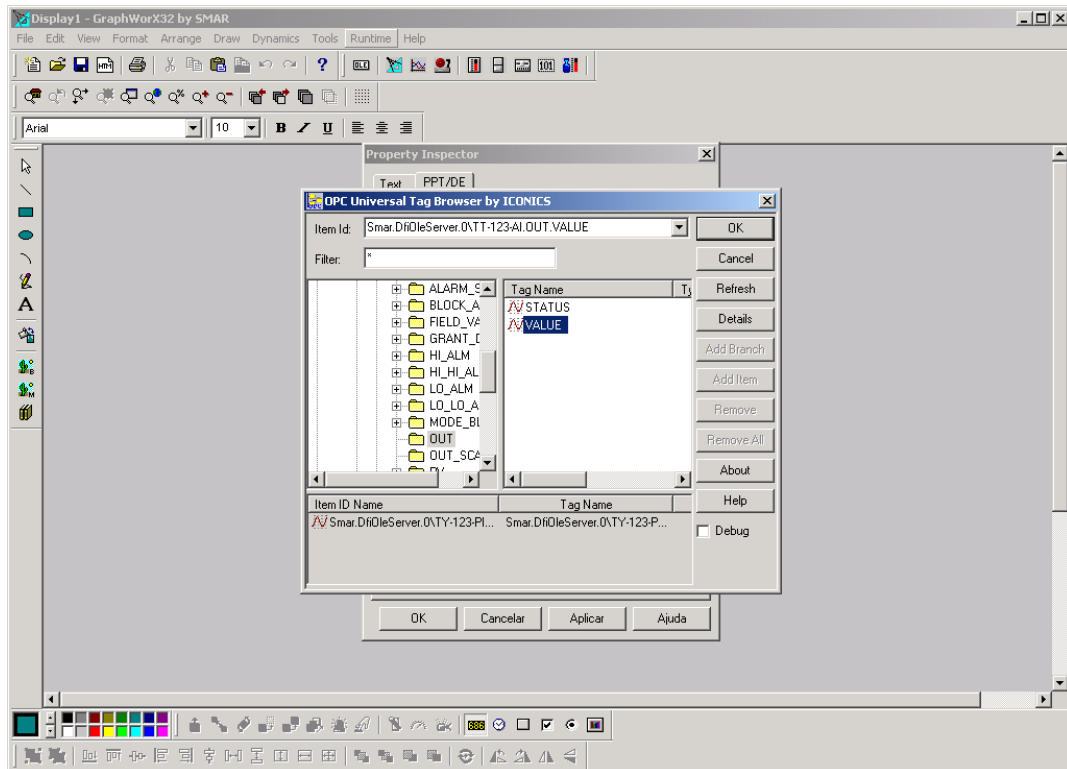
**Figura 28 – Monitoração realizada no Syscon.**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para desenvolver o sistema supervisório foi utilizado o aplicativo *GraphWorx32* do pacote *Process View* da SMAR.

Primeiramente é necessário relacionar as *tags* do servidor OPC correspondente a cada variável supervisionada. Isso é feito através do ícone *Property Inspector*. Então, localiza-se cada servidor OPC na pasta onde as *tags* foram exportadas durante a configuração do protocolo *Foundation Fieldbus*.

A Figura 29 apresenta a localização do OPC da variável de processo (PV) que está relacionada com a saída do bloco funcional AI.



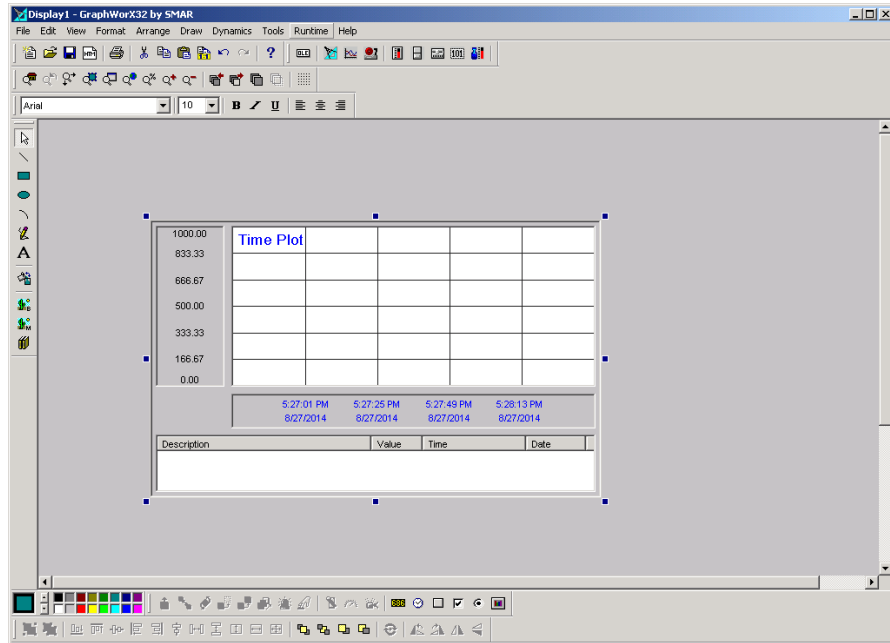
**Figura 29 – OPC da variável de processo.**  
**Fonte: Autoria própria.**

São inseridas seis variáveis no sistema supervisório: o valor da variável de processo (PV), da variável manipulada (MV) e do *setpoint* (SP), a constante proporcional (Kp), o tempo integral (*Reset*) e o tempo derivativo (*Rate*), parâmetros do controlador PID.

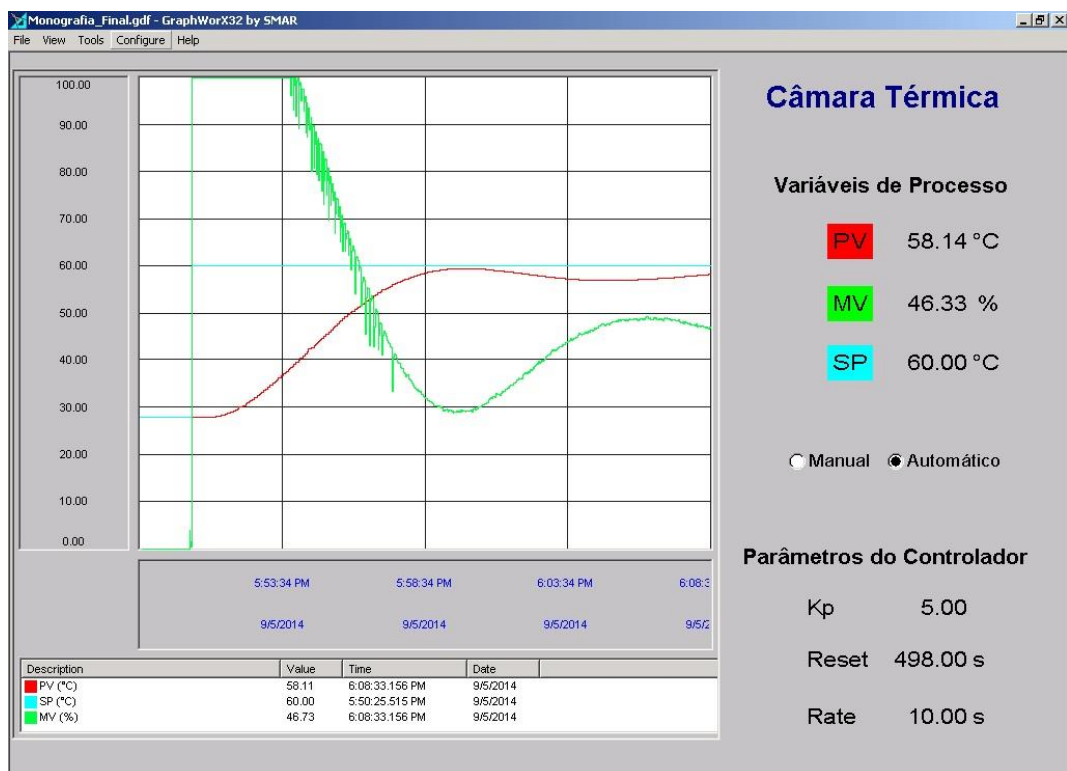
A IHM também possui um visualizador em forma de gráfico das variáveis, que foi inserido através da ferramenta *TWXView32*, como apresentado na Figura 30.

As variáveis PV, MV e SP são apresentadas no gráfico, cada uma com uma cor diferente para facilitar a visualização. A Figura 31 mostra a tela do sistema supervisório desenvolvido.

É inserido um botão para selecionar o modo de operação Manual ou Automático. No modo manual é permitida a escrita e a leitura da variável manipulada (MV) e no modo automático é apenas permitida a leitura da mesma. Os parâmetros *setpoint* (SP), a constante proporcional (Kp), o tempo integral (*Reset*) e o tempo derivativo (*Rate*) podem ser modificados tanto no modo manual quanto no modo automático.



**Figura 30 – Ferramenta TWXView32.**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 31 – Tela do sistema supervisório desenvolvido.**  
**Fonte: Autoria própria.**



## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente é realizada a sintonia dos parâmetros PID. Os parâmetros obtidos ( $K_p$ ,  $T_i$  ou *Reset*,  $T_d$  ou *Rate*) são parametrizados no programa do Syscon e podem ser modificados, também, através do sistema supervisorio desenvolvido.

### 5.1 SINTONIA UTILIZANDO O MÉTODO DO MODELO INTERNO

Como a dinâmica do processo da câmara térmica é representada por um modelo de primeira ordem em série com um tempo morto, a sintonia sugerida pelo método IMC é aquela apresentada no Quadro 2.

A Figura 32 apresenta a curva de reação do sistema, ou seja, a resposta da variável controlada (PV) quando ocorre uma variação em degrau na variável manipulada (MV). O procedimento realizado foi:

- A saída do controlador foi ajustada manualmente em  $MV = 40\%$ ;
- O estado estacionário da variável controlada foi atingido em  $PV = 55,3\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- O degrau foi dado de  $MV = 40\%$  para  $MV = 62,5\%$ , ou seja,  $\Delta MV = 12,5\%$ ;
- A variável controlada passou de  $PV = 55,5\text{ }^\circ\text{C}$  para  $PV = 70,6\text{ }^\circ\text{C}$ , ou seja,  $\Delta PV = 15,1\text{ }^\circ\text{C}$ , que corresponde a  $15,1\%$  pois os limites da variável controlada foram definidas de  $0$  a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  ( $0$  a  $100\%$ ) no controlador.

A partir da análise da curva de reação do sistema, Figura 32, o tempo morto ( $\theta$ ) desse sistema é de aproximadamente 67 segundos.

O valor da constante de tempo de malha aberta ( $\tau$ ) é o tempo decorrido entre o instante em que o degrau foi aplicado na saída do controlador (MV) e o instante em que a variável de processo (PV) atinge  $63,2\%$  de seu valor estabilizado. Na Figura 32 obtém-se o valor de aproximadamente 483 segundos para a constante de tempo de malha aberta.

A constante de tempo de malha fechada ( $\lambda$ ) define o quão rápido a saída do processo (PV) acompanha o *set-point* (SP). Essa constante de tempo foi obtida a partir da análise da resposta em malha fechada do sistema, resultando no valor de aproximadamente 100 segundos.

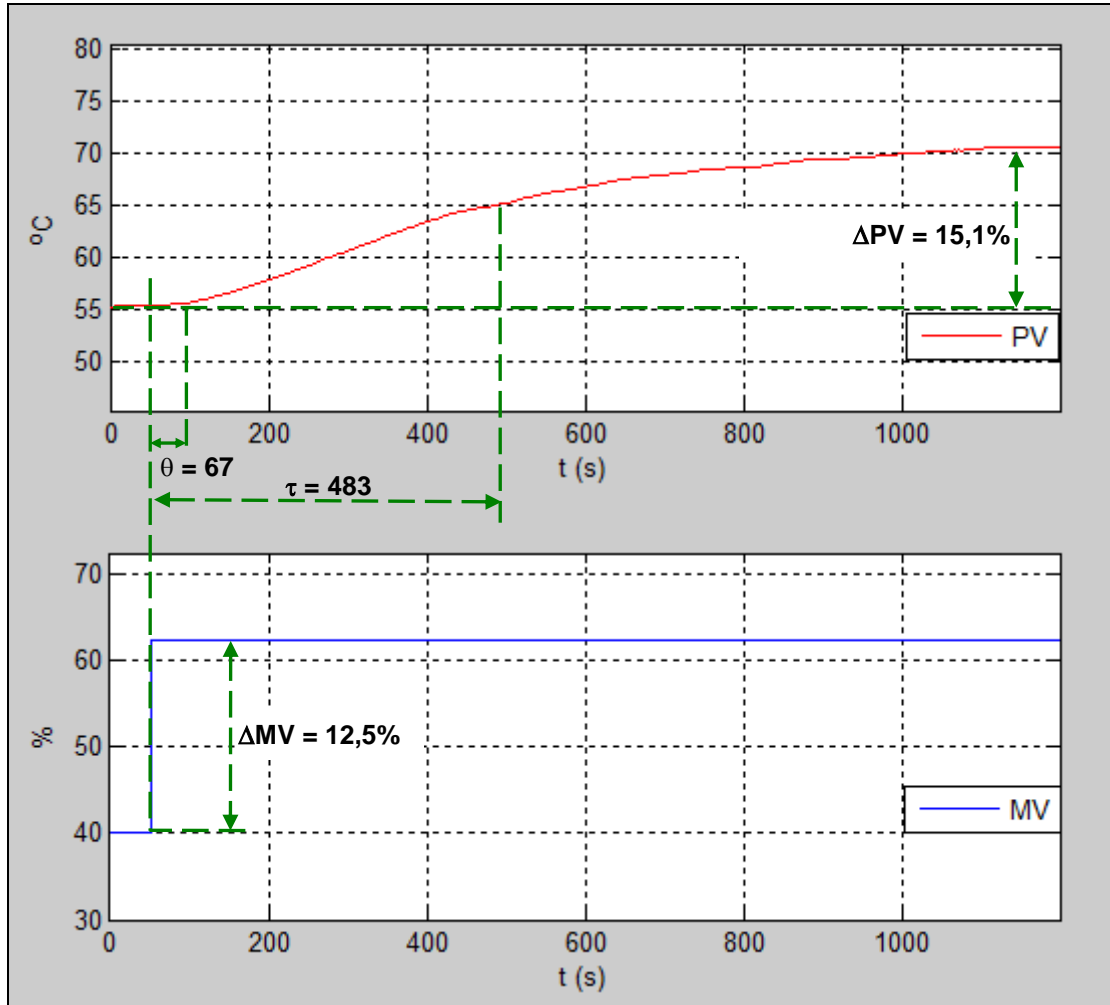


Figura 32 – Curva de reação do sistema.  
Fonte: Autoria própria.

Utilizando as equações apresentadas no Quadro 2 para a obtenção dos parâmetros do PID através do método IMC, tem-se:

- $K_p = \frac{2\tau + \theta}{K(2\lambda + \theta)} = 4,9$
- $T_i = Reset = \tau + \left(\frac{\theta}{2}\right) = 517,7$  segundos
- $T_d = Rate = \frac{\tau\theta}{(2\lambda + \theta)} = 122$  segundos

## 5.2 RESPOSTA DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

Para verificar a resposta do sistema em malha fechada utilizando os parâmetros do PID obtidos através da sintonia pelo método IMC foi realizado o seguinte procedimento:

- O controlador foi colocado em modo manual,
- A saída foi ajustada em  $MV = 40\%$  e esperou-se a temperatura estabilizar em  $PV = SP = 58,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- O controlador foi colocado em modo automático;
- Um degrau foi aplicado no SP, passando para  $SP = 68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Foi registrada a resposta do sistema.

Para o teste de variação de temperatura na câmara térmica utilizada no trabalho de Souza e Beetz (2012), a maior temperatura de trabalho foi de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Desta forma, para verificar o comportamento do sistema próximo dessa temperatura, a verificação da resposta do sistema em malha fechada foi realizada com um degrau do  $SP = 58,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $SP = 68\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 33 apresenta a resposta do sistema em malha fechada utilizando os parâmetros obtidos através do método de sintonia IMC:

- $K_p = 4,9$ ;  $T_i = 517,7\text{ s}$ ;  $T_d = 122\text{ s}$ .

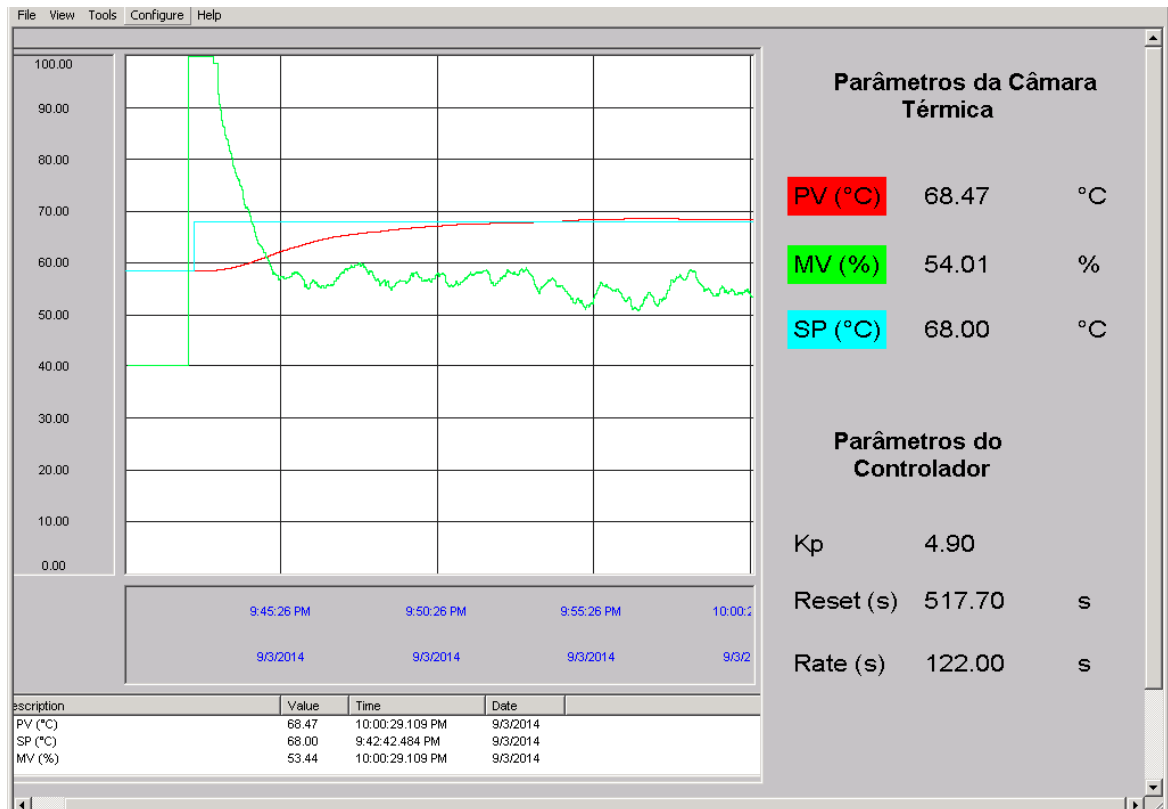
Verifica-se na Figura 33 que o sistema possui resposta lenta, ou seja, o tempo para PV atingir o SP utilizando os parâmetros obtidos pelo método IMC ficou elevado.

Se a sintonia não resulta em controle satisfatório, pode-se utilizar as informações apresentadas no Quadro 3. Para tornar a resposta do sistema mais rápida pode-se diminuir o  $T_d$ . Realizados alguns testes com a diminuição do  $T_d$  sendo obtido o valor de 10 segundos.

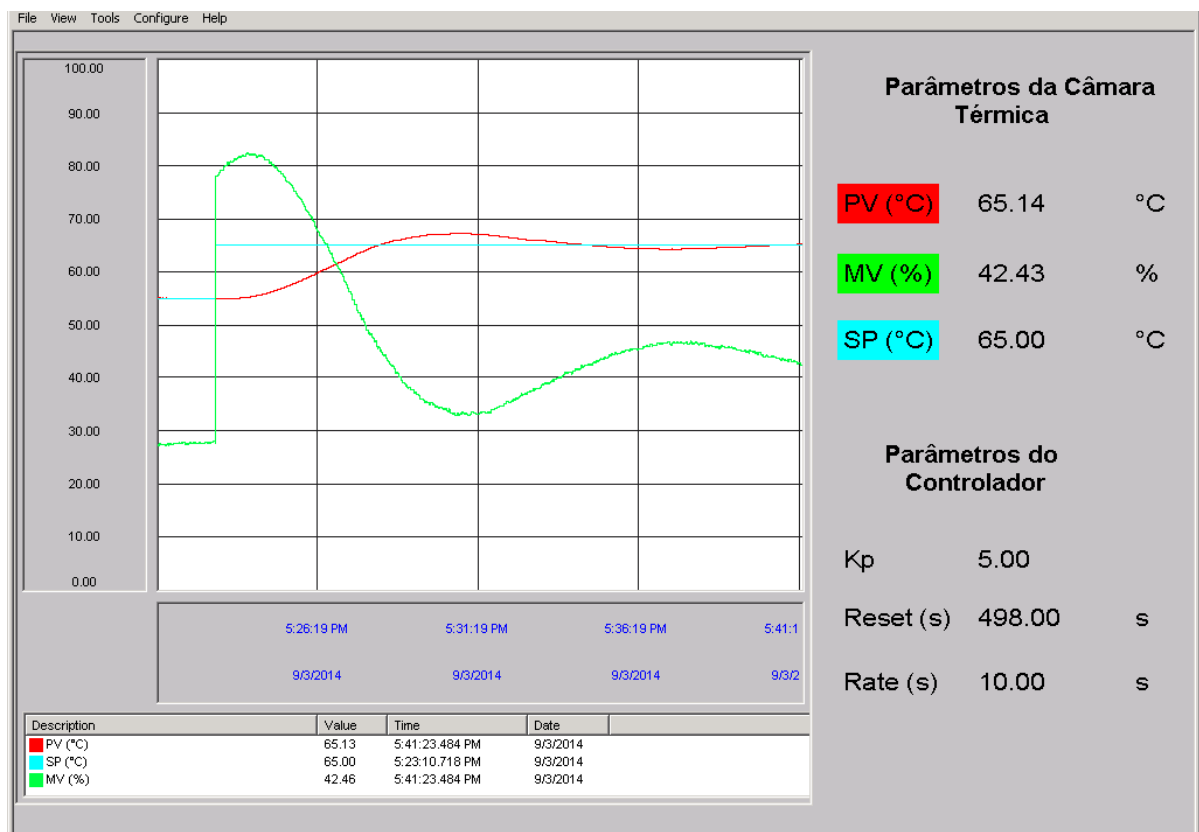
Após a correção no valor de  $T_d$  foram realizados novos testes e correções nos valores de  $K_p$  e  $T_i$  visando melhorar a resposta do controlador.

A Figura 34 apresenta a resposta do sistema em malha fechada utilizando os parâmetros do PID obtidos através do método IMC com a correção em  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ :

- $K_p = 5,0$ ;  $T_i = 498\text{ s}$ ;  $T_d = 10\text{ s}$ .



**Figura 33 – Resposta do sistema em malha fechada.**  
**Fonte: Autoria própria.**

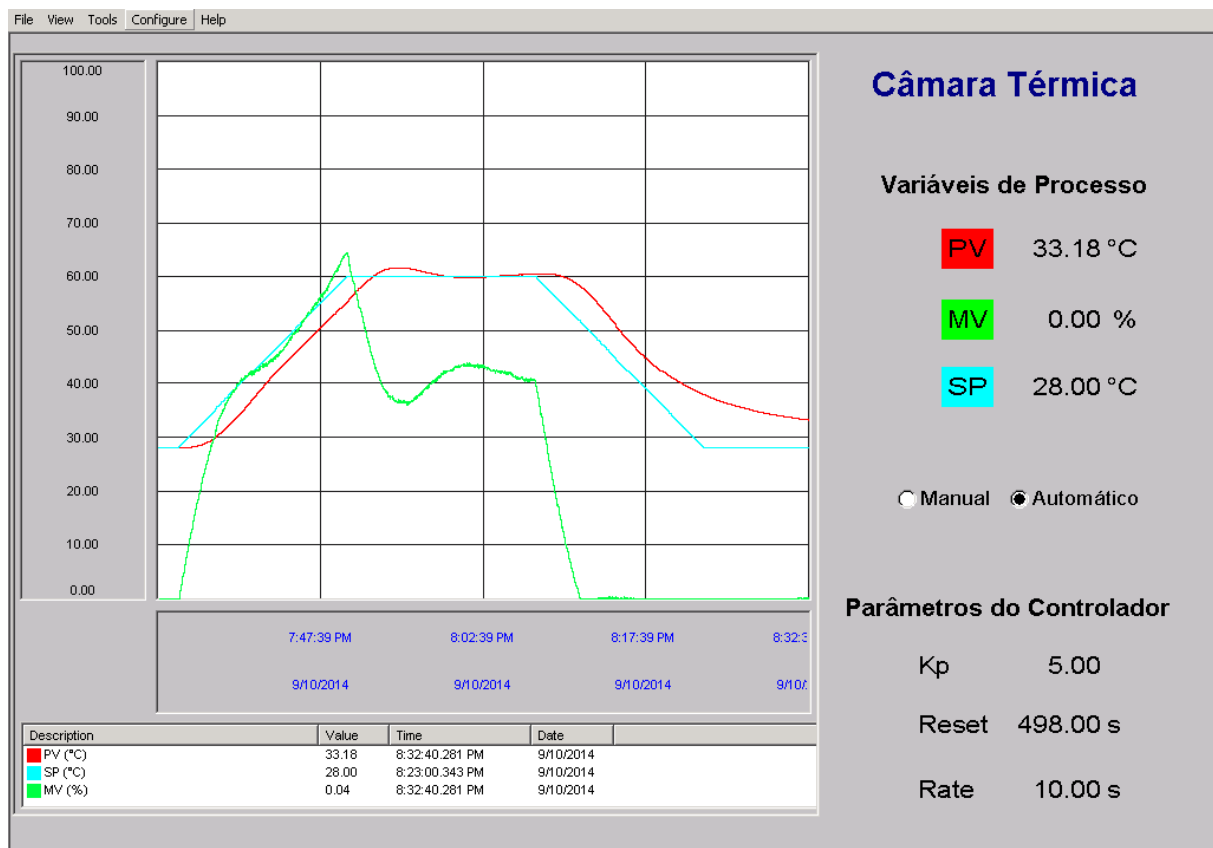


**Figura 34 – Resposta do sistema em malha fechada com correções nos parâmetros PID.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Verifica-se que a resposta do sistema apresentado na Figura 34 ficou mais rápida em relação ao da Figura 33 e a MV na saída do controlador possui menores oscilações.

Foi realizado um teste com um ciclo de variação de temperatura na câmara térmica similar ao realizado no trabalho de Souza e Beetz (2012). Como a câmara térmica não possui sistema de refrigeração forçada que faça com que a temperatura interna possua valores inferiores ao valor da temperatura ambiente, a temperatura inferior de teste foi a temperatura interna da câmara quando  $MV = 0\%$ . A temperatura superior de teste foi de  $60^{\circ}\text{C}$ , o tempo de aquecimento e de resfriamento foi de 17 minutos e o tempo com a temperatura constante foi de 15 minutos.

A Figura 35 apresenta a resposta do sistema ao ciclo de variação de temperatura utilizando os parâmetros obtidos através do método de sintonia IMC com a correção em  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ . Durante o período de resfriamento, a partir de aproximadamente  $40^{\circ}\text{C}$ , a PV não segue o SP. Mesmo com os ventiladores ligados, não é possível resfriar a câmara térmica rapidamente.



**Figura 35 – Resposta do sistema ao ciclo de variação de temperatura.**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando a mesma estrutura física de um projeto implementado em um trabalho de conclusão de curso, que utilizava um controlador de processos da marca Novus, foi realizado o controle de temperatura através dos instrumentos com protocolo *Foundation Fieldbus* da SMAR (DFI, TT302 e FI302).

A configuração do protocolo *Foundation Fieldbus* foi feita através do aplicativo *Syscon*, que faz parte do conjunto System 302 da empresa SMAR. A estratégia de controle consiste na interligação dos blocos funcionais AI, AO e PID.

Com o conjunto de aplicativos *Process View*, que também faz parte do System 302, foi desenvolvido o sistema supervisor. Foram utilizadas *tags* OPC para realizar a aquisição de valores das variáveis. Através da IHM é possível visualizar as variáveis PV, MV, SP, Kp, Ti (*Reset*) e Td (*Rate*), bem como um gráfico das variáveis PV, MV e SP no domínio do tempo.

A sintonia do controlador PID foi realizada utilizando o método IMC. Foram realizados testes em malha aberta para obter os valores do ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo. Em seguida, foram realizados testes em malha fechada e ajustados os parâmetros obtidos.

Todos os testes realizados de comunicação, controle e supervisão da câmara térmica funcionaram corretamente.

Nesse trabalho foi realizado o controle de temperatura de uma câmara térmica utilizando o protocolo de comunicação digital *Foundation Fieldbus* utilizado no ambiente industrial.

## REFERÊNCIAS

ALVES, José L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

BEGA, Egídio A. **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

CAMPOS, Mario M. de. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

CARVALHO, Jorge L. M. de. **Sistema de controle automático**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

FIALHO, Arivelto B. **Instrumentação industrial**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007.

MORAES, Cícero C.; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

NOVUS. **Artigo técnico – controle PID básico**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

PANTONI, Rodrigo P. **Desenvolvimento e implementação de uma descrição de dispositivos aberta e não-proprietária para equipamentos *Foundation Fieldbus*™ baseada em XML**. 2006. 164 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP – São Carlos – SP, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-07122006-084142/publico/Dissertacao-Pantoni.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

ROSÁRIO, João. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SMAR. **Arquitetura *Foundation Fieldbus***. 2014a. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/fieldbus.asp>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

SMAR. **Catálogo Process View**. 2014b. Disponível em:  
<<http://www.smar.com/brasil/produtos/view.asp?id=71>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

SMAR. **Catálogo System 302**. 2014c. Disponível em:  
<<http://www.smar.com/brasil/system302/index.asp>>. Acesso em: 25 Ago. 2014.

SMAR. **Manual de instruções dos blocos funcionais**. 2014d. Disponível em:  
<<http://www.smar.com/brasil/fieldbus.asp>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

SMAR. **Manual dos procedimentos de instalação, operação e manutenção Foundation Fieldbus**. 2014e. Disponível em:  
<<http://www.smar.com/pdfs/manuals/geral-ffmp.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

SMAR. **Manual Syscon**. 2014f. Disponível em:  
<<http://www.smar.com/brasil/produtos/view.asp?id=81>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

SMAR. **Tutorial Foundation Fieldbus**. 2014g. Disponível em:  
<<http://www.smar.com/brasil/fieldbus.asp>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

SOUZA, Juliano de; BEETZ, Tiago. **Protótipo de uma câmara térmica**. 2012. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica, modalidade Automação de Processos Industriais), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

VERHAPPEN, Ian; PEREIRA, Augusto. **Foundation Fieldbus**. 2. ed. Research Triangle Park: ISA, 2006.