



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO



# **Projeto e Controle de um Sistema de Aquecimento no Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo**

**José Alberto Díaz Amado**

Orientador: Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar

Co-orientador: Prof. Dr. Pablo Javier Alsina

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem PPgEE: M000  
Natal, RN, 5 Setembro de 2008

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da publicação na fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Amado, José Alberto Díaz .

Projeto e Controle de um Sistema de Aquecimento no Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo / José Alberto Díaz Amado - Natal, RN, 2008

93 f. : il.

Orientador: Andres Ortiz Salazar

Co-orientador: Pablo Javier Alsina

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Processo de Medição de Vazão e (*BS&W*) - Dissertação. 2. Sistema de aquecimento - Dissertação. 3. Laboratório de Avaliação de Medições em Petróleo - Dissertação. I. Salazar, Andrés Ortiz. II. Alsina, Pablo Javier. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 665.6(043.2)

# **Projeto e Controle de um Sistema de Aquecimento no Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo**

**José Alberto Díaz Amado**

Dissertação de Mestrado aprovada o 5 de Setembro de 2008 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Dr. Andres Ortiz Salazar (orientador) ..... DCA/UFRN

---

Prof. Dr. Pablo Javier Alsina (co-orientador) ..... DCA/UFRN

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Villacorta Cardoso ..... SEE/UFS

---

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli ..... DCA/UFRN

*A Deus e a meus pais pela força no  
transcorrer deste trabalho*

.....  
*"E difícil dizer o que é impossível, pois  
a fantasia de ontem é a esperança de  
hoje e a realidade do amanhã "Robert  
H. Goddard*

---

# Agradecimentos

---

À minha família, pelo apoio durante esta jornada.

Aos professores Andres Ortiz Salazar e Pablo Javier Alsina, pela orientação.

Aos professores do departamento de computação e automação da UFRN, pela ajuda.

Ao projeto do Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo (LAMP), pela oportunidade.

A meus colegas do mestrado, pelas sugestões no transcurso deste trabalho.

---

# Resumo

---

O Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo (LAMP) da Universidade Federal Rio Grande do Norte (UFRN) tem como meta principal avaliar medidores de vazão e *BS&W*, em que a utilização de um maior número de variáveis de operação garante uma avaliação com menor porcentagem de incertezas.

O objetivo deste trabalho foi projetar e implementar um sistema de aquecimento que dará cobertura ao controle de temperatura, de forma segura e eficiente, para fins de avaliação e medição.

A temperatura é uma das variáveis que exerce influência na hora de medir com exatidão a vazão e *BS&W*, afetando diretamente a viscosidade e a densidade do fluido. Para projetar o sistema de aquecimento foi de vital importância os requisitos do laboratório, como condições e restrições atuais. Três alternativas foram avaliadas: trocador de calor, resistências externas e resistências internas.

Depois da análise feita, a fim de escolher a melhor alternativa para o sistema de aquecimento do laboratório, foram determinadas estratégias de controle para o mesmo. Técnicas de controle PID combinadas com lógica *Fuzzy* foram implementadas. Os resultados mostraram um melhor desempenho desta estratégia de controle comparada com um PID clássico.

**Palavras-chave:** medidores de vazão e *BS&W*, sistema de aquecimento, resistências, controle *fuzzy*-PI.

---

# Abstract

---

The Oil Measurement Evaluation Laboratory (LAMP), located in the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), has as main goal to evaluate flow and *BS&W* meters, where the simulation of a bigger number of operation variable in field, guarantees a less uncertain evaluation.

The objective of this work is to purpose a heating system design and implementation, which will control the temperature safely and efficiently in order to evaluate and measure it.

Temperature is one of the variables which influence the flow and *BS&W* accurate measurement, directly affecting the fluid viscosity and density in the experiment. To project the heating system it is of great importance to take the laboratory requirements, conditions and current restrictions into consideration. Three alternatives were evaluated: heat exchanger, internal resistance and external resistance.

After the analyses are made in order to choose the best alternative for the heating system in the laboratory, control strategies were determined for it, PID control methods in combination with *fuzzy* logic were used. Results showed a better performance with *fuzzy* logic than with classic PID.

**Keywords:** flow and *BS&W* meters, heating system, resistance, *fuzzy* control.

---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.2 Organização do trabalho . . . . .	3
<b>2 Descrição do problema</b>	<b>4</b>
2.1 Influência da temperatura nos medidores de vazão e BS&W . . . . .	4
2.2 Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo . . . . .	6
2.2.1 Barramentos de Campo . . . . .	8
2.2.2 Instrumentação utilizada . . . . .	9
2.2.3 Sistema Supervisório . . . . .	10
2.2.4 Acreditação do LAMP . . . . .	12
2.3 Requisitos do Laboratório . . . . .	13
2.3.1 Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas . . . . .	13
2.3.2 Potência Elétrica . . . . .	13
2.3.3 Área de troca térmica . . . . .	14
2.3.4 Área para a instalação física . . . . .	14
2.3.5 Aspectos da instrumentação já instalada no laboratório . . . . .	14
<b>3 Projeção do Sistema de Aquecimento</b>	<b>15</b>
3.1 Trocador de calor . . . . .	15
3.1.1 Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas . . . . .	15
3.1.2 Potência Elétrica . . . . .	15
3.1.3 Área de troca térmica . . . . .	22



3.1.4	Área para a instalação física . . . . .	22
3.1.5	Simulação . . . . .	23
3.2	Resistências internas . . . . .	25
3.2.1	Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas . . . . .	25
3.2.2	Área de troca térmica . . . . .	25
3.2.3	Área para a instalação física . . . . .	26
3.2.4	Potência Elétrica . . . . .	27
3.2.5	Simulação . . . . .	28
3.3	Resistências externas . . . . .	32
3.3.1	Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas . . . . .	32
3.3.2	Área de troca térmica . . . . .	33
3.3.3	Área para a instalação física . . . . .	34
3.3.4	Potência Elétrica . . . . .	35
3.3.5	Aspectos da instrumentação existente no laboratório . . . . .	35
3.4	Conclusões . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Implementação do Sistema de Aquecimento</b>	<b>37</b>
4.1	Montagem mecânica . . . . .	37
4.2	Montagem elétrica . . . . .	40
4.3	Comunicação com o sistema já existente . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Controle do Sistema de Aquecimento</b>	<b>45</b>
5.1	Controles tradicionais . . . . .	45
5.1.1	Controlador PID . . . . .	45
5.2	Lógica <i>Fuzzy</i> . . . . .	48
5.2.1	Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i> . . . . .	50
5.2.2	Incertezas . . . . .	52
5.3	Controlador <i>Fuzzy</i> -PI . . . . .	52
5.4	Estrutura de um Controlador <i>Fuzzy</i> -PI . . . . .	53
5.4.1	Fuzzificação . . . . .	54
5.4.2	Inferência . . . . .	55
5.4.3	Regras <i>Fuzzy</i> . . . . .	58
5.4.4	Defuzzificação . . . . .	59
5.5	Sistema de aquecimento em pequena escala . . . . .	62
5.5.1	Controlador <i>Fuzzy</i> -PI . . . . .	64
5.5.2	Controlador PID . . . . .	68

5.6	Conclusão . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>70</b>
6.1	Controlador <i>Fuzzy</i> -PI . . . . .	73
6.2	Desempenho do Controlador PID e o <i>Fuzzy</i> -PI . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>78</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Código Fonte</b>	<b>85</b>
<b>B</b>	<b>Controlador Novus</b>	<b>89</b>

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo . . . . .	2
2.1	Interligação dos tanques do LAMP . . . . .	7
2.2	Topologia da Instrumentação no LAMP . . . . .	10
2.3	Tela principal do supervisor do processo do LAMP . . . . .	11
3.1	Trocador de calor Tubo Duplo com escoamento paralelo . . . . .	17
3.2	Trocador de calor Tubo Duplo com escoamento em contra corrente . . . . .	19
3.3	Instalação física do trocador de calor . . . . .	22
3.4	Simulação em HYSYS . . . . .	24
3.5	Resistência de Imersão . . . . .	25
3.6	Projeto do sistema de aquecimento na linha de recirculação: O trecho de preto é o sistema implementado e o trecho vermelho já existe . . . . .	26
3.7	Aquecimento de uma resistências utilizando água . . . . .	29
3.8	Aquecimento de uma resistências utilizando ar . . . . .	29
3.9	Aquecimento de duas resistências com uma vazão de $12m^3/h$ , utilizando água . . . . .	30
3.10	Aquecimento de duas resistências com uma vazão de $6m^3/h$ , utilizando água . . . . .	31
3.11	Modelos de resistências elétricas tipo coleira . . . . .	32
3.12	Instalação elétrica das resistências . . . . .	33
3.13	Resistências externas na tubulação . . . . .	33
3.14	Instalação física das resistências . . . . .	34
4.1	Linha de recirculação original . . . . .	38
4.2	Adjunção do sistema de aquecimento na linha de recirculação . . . . .	39
4.3	Esquema elétrico . . . . .	41
4.4	Esquema de comunicação . . . . .	43
4.5	Inclusão do sistema de aquecimento ao supervisor do LAMP . . . . .	44
5.1	Diagrama de blocos do sistema de controle PI . . . . .	47
5.2	Função de pertinência de um conjunto <i>crisp</i> ALTA . . . . .	49
5.3	Função de pertinência de um conjunto <i>Fuzzy</i> ALTA . . . . .	50

5.4	Representação gráfica dos operadores lógicos de <i>Zadeh</i> . . . . .	51
5.5	Diagrama de blocos do sistema de controle PI . . . . .	53
5.6	Estrutura de um controlador <i>Fuzzy</i> . . . . .	54
5.7	Exemplo de fuzzificação de uma variável de entrada $e(\text{erro})$ . . . . .	55
5.8	Aplicação da regra 1. . . . .	57
5.9	Aplicação da regra 2. . . . .	57
5.10	Resultado da união das regras 1 e 2. . . . .	57
5.11	Sistema de aquecimento em pequena escala . . . . .	63
5.12	Interface Gráfica do Controlador <i>Fuzzy-PI</i> . . . . .	64
5.13	Funções de pertinência para o erro . . . . .	66
5.14	Funções de pertinência para a variação do erro . . . . .	66
5.15	Interface Gráfica do Controle PID . . . . .	68
6.1	Sistema em pequena escala . . . . .	70
6.2	Sistema em pequena escala funcionando sem a caixa de madeira . . . . .	71
6.3	Funcionamento do controlador <i>Fuzzy-PI</i> . . . . .	72
6.4	Trajatória de controle <i>Fuzzy-PI</i> . . . . .	73
6.5	Trajatória de controle <i>Fuzzy-PI</i> . . . . .	74
6.6	Saída de variáveis de controle PID - 573 s . . . . .	75
6.7	Saída de variáveis de controle PID - 1002 s . . . . .	76
6.8	Saída de variáveis de controle <i>Fuzzy-PI</i> - 408 s . . . . .	76
6.9	Saída de variáveis de controle <i>Fuzzy-PI</i> - 1007 s . . . . .	77
A.1	Código fonte, parte 1 de 3 . . . . .	86
A.2	Código fonte, parte 2 de 3 . . . . .	87
A.3	Código fonte, parte 3 de 3 . . . . .	88
B.1	Folha de dados do controlador Novus n2000 . . . . .	90
B.2	Folha de dados do controlador Novus n2000 . . . . .	91
B.3	Folha de dados do controlador Novus n2000 . . . . .	92
B.4	Folha de dados do controlador Novus n2000 . . . . .	93

---

# Lista de Tabelas

---

3.1	Comparação de energia fornecida pelos trocadores de calor . . . . .	21
3.2	Composição do lubrificante em porcentagem volumétrica . . . . .	23
3.3	Comportamento do óleo com a variação da porcentagem de água. . . . .	23
5.1	Equações usadas no projeto de controladores digitais . . . . .	48
5.2	Sumário das equações usadas na implementação computacional de controladores convencionais P, PI, PD e PID . . . . .	48
5.3	Principais t-normas e t-conormas . . . . .	51
5.4	Principais operadores de implicação . . . . .	52
5.5	Matriz de Regras . . . . .	67

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

Com o propósito de realizar a calibração de diversos tipos de medidores, instalados em linha na indústria petroquímica, para a monitoração contínua da vazão e *Basic Sediments and Water (BS&W)* do óleo, foi construído o *Laboratório de Avaliação de Medições em Petróleo (LAMP)*, na Universidade Federal Rio Grande do Norte (UFRN), que permite a simulação de diferentes condições de operação dos medidores em campo, como simular misturas de água e óleo em proporções e vazões variadas. A figura 1.1 mostra a planta de testes do LAMP [Quintaes et al. 2007].

A temperatura é o parâmetro mais influente para uma exata medida de vazão, afetando diretamente a viscosidade e a densidade do fluido. Atualmente os testes no laboratório estão sendo realizados com fluidos a temperatura ambiente, em torno de  $30^{\circ}\text{C}$ , diferente do que ocorre em campo, onde os instrumentos trabalham com fluxos que se encontram em temperaturas próximas de  $60^{\circ}\text{C}$ .

Desta forma, de acordo com os requisitos para a calibração de medidores de vazão de óleo, estabelecidos pela portaria conjunta [ANP/INMETRO 2000], será desenvolvido um sistema de aquecimento com o objetivo de simular as condições térmicas reais das instalações de produção de petróleo atualmente. Esse sistema é um item de fundamental importância para que os equipamentos possam simular as condições térmicas de um campo de produção de petróleo. Considerando os valores máximos de vazão e temperatura de testes, o sistema requer uma considerável transferência de calor.

Serão avaliadas três alternativas para determinar o sistema de aquecimento utilizado de acordo com os requisitos do laboratório: trocador de calor, sistema largamente utilizado na indústria; resistências internas e, por ultimo, resistências externas, os quais são sistemas mais simples de implementar.

É de vital importância a implementação de um sistema de controle o qual tem que adequar-se ao sistema de aquecimento escolhido, já que este vai garantir o bom domínio de temperaturas durante os testes.



Figura 1.1: Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo

A natureza do raciocínio humano é de grande valia para a automatização dos processos convencionais de temperatura, haja vista a possibilidade de aproveitar a experiência dos operadores humanos na composição de regras de inferência computacional, evitando o esforço do operador em trabalhar com uma matemática geralmente para ele incompreensível [Rêgo 2002].

Normalmente, no projeto de um controlador, a modelagem do processo é realizada a partir de aproximações, visto que o sistema é não linear e invariante no tempo. Já no projeto do controlador *fuzzy*, a modelagem matemática do processo não é dispensável, pois esse é bastante robusto e não necessita do modelo do processo. A não-linearidade e a modelagem complexa dos sistemas térmicos são peculiaridades que tornam o controle *fuzzy* uma solução muito atraente para esse tipo de sistemas; é por isso que foi considerado como um método de solução para o controle do sistema de aquecimento.

## 1.1 Objetivos

A pesquisa foi direcionada para atingir os seguintes objetivos:

- Fornecer um sistema de aquecimento que se adeque às restrições do laboratório;
- Projetar a implementação do sistema de aquecimento no laboratório;
- Implementar o controle do sistema de aquecimento do laboratório;
- Interligar o sistema de controle com o sistema supervisor já existente.

## 1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho é dividido em mais 6 capítulos, sendo que o capítulo 2 apresenta inicialmente a abordagem da influência da temperatura nos medidores de vazão e *BS&W*, seguida de um resumo do funcionamento e dos requisitos do laboratório. No capítulo 3 está descrita a avaliação feita sobre os sistemas de aquecimento em relação aos requisitos do laboratório. No capítulo 4 descreve-se a projeção da implementação do sistema escolhido. No capítulo 5 apresentam-se a abordagem teórica de controles tradicionais e os princípios de operação com conjuntos para o controle *Fuzzy*, baseado em regras e as estratégias de controle utilizadas para o sistema de aquecimento; o capítulo 6 apresenta e discute os resultados finais obtidos; finalmente, no capítulo 7, algumas conclusões do trabalho.



---

## Capítulo 2

### Descrição do problema

---

O objetivo da implementação do sistema de aquecimento no LAMP é poder simular o que acontece em campo, onde os instrumentos trabalham com fluidos em temperaturas próximas a  $60^{\circ}\text{C}$ . Atualmente, os testes no laboratório estão sendo realizados com fluidos a temperatura ambiente, em torno de  $30^{\circ}\text{C}$ .

Neste capítulo, será abordada a influência da temperatura na calibração de medidores de vazão e *BS&W*. A seguir são descritos o funcionamento e os objetivos do LAMP; também são citados os requisitos do laboratório em relação à implementação do sistema de aquecimento.

#### 2.1 Influência da temperatura nos medidores de vazão e *BS&W*

Durante o processo de produção de um poço de petróleo, é comum a produção simultânea de água e óleo, pelas propriedades do reservatório de petróleo, ou como consequência da injeção de água utilizada no processo de recuperação secundária desse reservatório [E.Thomas 2001].

O conhecimento do *BS&W* é de grande importância para a engenharia de petróleo, uma vez que esse parâmetro representa a razão entre a vazão da mistura água e sedimentos e a vazão da mistura de óleo, água e sedimentos [Frick et al. 1962]. Com isso a partir da vazão bruta do petróleo, é possível determinar a vazão de óleo correspondente ao poço [Lima 2000].

A calibração de medidores de vazão e *BS&W* de petróleo é realizada para que se possa estabelecer, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes estabelecidos por padrões, de forma a garantir a rastreabilidade de medição.

Esta por sua vez, é a propriedade do resultado de uma medição ou valor de um padrão relacionado a referências estabelecidas. Geralmente são padrões nacionais ou internacionais através de uma cadeia contínua de comparações, todas com incertezas estabelecidas [Porteria

29 - *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia* 2007].

A temperatura é uma variável importante que influencia diretamente na calibração de medidores de vazão e *BS&W*, aumentando as incertezas; por isso tem que ser usada para corrigir as medições.

As correções têm que ser feitas para estimar a influência da temperatura normal no campo de trabalho, em relação à temperatura normal no teste ao qual são submetidos os medidores.

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos ao mensurando.

Um dos métodos de avaliação de incerteza relacionada à calibração de medidores de vazão e *BS&W* propõe determinar o verdadeiro valor convencional deles, a partir da altura total da coluna líquida armazenada em um tanque; da pressão hidrostática exercida pela coluna líquida; da gravidade local; da massa específica da água e da massa específica do óleo, além de outras grandezas, como a temperatura [Quintaes 2006].

Quando é feita a calibração de medidores *BS&W*, a temperatura influencia em diferentes parâmetros de avaliação nos cálculos de incertezas da massa específica do óleo e da água, [Quintaes 2006], em que é utilizado o processo de correção de temperatura sobre a densidade do óleo e da água, de acordo com um boletim técnico da Petrobrás [de F. Maciel 2001], aumentando-a assim.

Na calibração de medidores de vazão [Quintaes et al. 2007], é feita uma avaliação da temperatura devido à variação volumétrica da água e do óleo, em que também foi utilizado a tabela de correção de temperatura, de acordo com o boletim técnico da Petrobrás [de F. Maciel 2001].

No boletim “*Estudo teórico experimental do impacto de fontes de variações em quatro tipos de medidores de BS&W*”, [de Costa et al. 1998], é feita uma avaliação de diferentes variáveis, como a temperatura em quatro medidores de *BS&W*: Gama densitômetro, Sensor de Ultra-som, Mássico (coriolis), Sensor capacitivo, em que são citadas as conclusões finais dos medidores mencionados em relação à temperatura, como por exemplo, no caso do medidor com ultra-som, a velocidade do som nos hidrocarbonetos e na água possui uma forte dependência em relação à temperatura [Verral 1992].

No Brasil, a legislação definida por [ANP/INMETRO 2000] para sistemas de medição fiscal aprova as seguintes tecnologias de medição de vazão de óleo em tubulações, que é o caso do LAMP: Turbinas, Deslocamento positivo, Mássico e Ultra-som. As medições devem ser corrigidas com os seguintes fatores: Dilatação térmica entre a temperatura base e a temperatura nas condições de medição. Para fazer as correções devem-se utilizar as seguintes normas de cálculos de volume, *ISO 91.2/API 7.2* [ISO/API 2000].

É verdade que existem tabelas de correção de temperaturas na medição, mas o ideal seria não depender muito delas, já que podem aumentar o erro na medição final [Donald E. Beasley 2007].

## 2.2 Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo

O LAMP, tem por objetivo avaliar de forma automática medidores utilizados nos processos de medição de vazão e *BS&W*, permitindo a simulação de diferentes condições de operação dos medidores em campo, simulando misturas de água e óleo em proporções e vazões variadas. Para realizar estas simulações, o laboratório possui cinco tanques: óleo, água, misturador, auditor, e um tanque tratador para separação água/óleo, que possibilita a reutilização da água e do óleo em testes seguintes sem a necessidade de descartes a cada teste, veja a figura 2.1.

Com a existência deste laboratório será possível suprir algumas necessidades das empresas exploradoras de petróleo como também apoiar o desenvolvimento tecnológico das empresas na produção de medidores de vazão e *BS&W*, uma vez que suas instalações estão sendo adequadas para uma otimização da separação água e óleo, e controle da variável temperatura  $25^{\circ}\text{C}$  até  $60^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, o que tornará as condições dos ensaios mais semelhante às condições reais de operação.

Nesta seção será descrito o funcionamento e objetivos do laboratório, como também as atividades atuais desenvolvidas nele.

Para a avaliação de medidores de vazão e *BS&W* foi desenvolvido no laboratório um método de aferição de medidores, trata-se de um novo método de medição que se propõe a determinar o valor verdadeiro convencional do *BS&W* a partir da altura total da coluna líquida no tanque auditor, pressão hidrostática exercida pela coluna líquida, gravidade local, massa específica da água e a massa específica do óleo [Quintaes 2006]. A calibração realizada conta com um sistema automatizado de monitoração e aquisição de dados de algumas das grandezas de influência necessárias à determinação do *BS&W*, permitindo uma maior confiabilidade das medidas realizadas [Salazar et al. 2006].

O material de fabricação dos tanques e tubulações é aço carbono, o mais utilizado na prática, representando cerca de 90% na fabricação de tubulações industriais. Os tanques de água e óleo possuem volumes de  $12,57\text{m}^3$ , o tanque misturador e auditor possuem volumes de  $7,85\text{m}^3$  e  $7,35\text{m}^3$ , respectivamente e o tanque tratador volume de  $10,37\text{m}^3$ . A Figura 2.1 mostra o esquema de interligação entre os tanques.

O método proposto permite a simulação de diferentes condições de operação dos medidores em campo, ou seja, usar relações de água e óleo em proporções e vazões variadas.

O processo consiste inicialmente em tomar proporções desejadas dos tanques de água e óleo e homogeneizá-los no tanque misturador por um período previamente calculado. Em seguida, o líquido emulsionado é transferido através da tubulação por uma linha que mede  $22\text{m}$  onde estão localizados os instrumentos a serem testados. A emulsão é levada ao tanque auditor onde é possível medir com boa exatidão as variáveis utilizadas para determinação da vazão e do

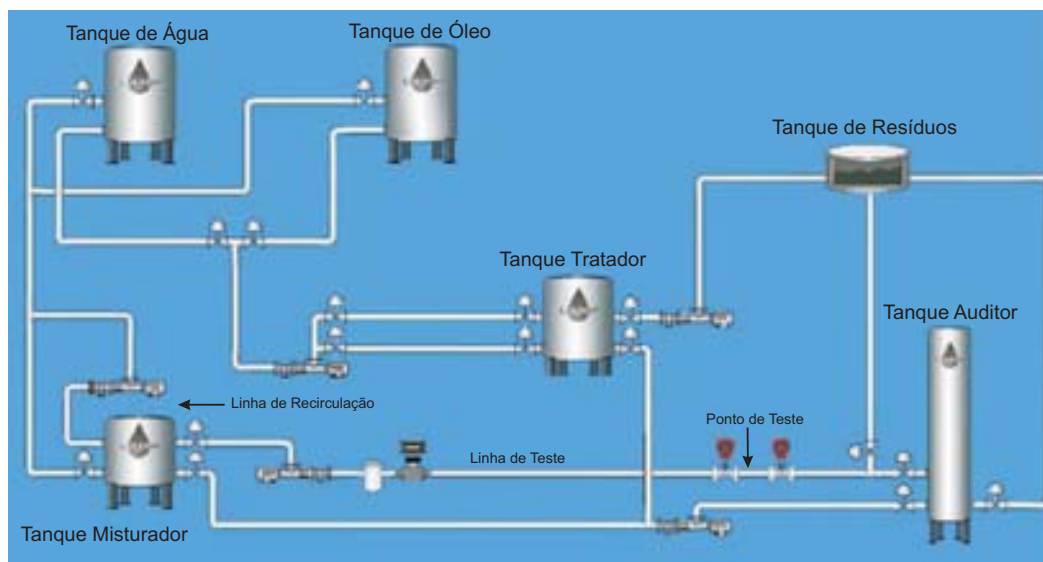


Figura 2.1: Interligação dos tanques do LAMP

*BS&W*. No final do processo, o líquido é transferido ao tanque tratador onde, por decantação, os líquidos são separados e bombeados para os tanques de origem.

Para aumentar a exatidão dos processos, é utilizado no laboratório um sistema de tecnologia industrial avançado, constituído por três tecnologias de barramento de campo utilizadas na indústria: *Foundation Fieldbus*, *Modbus RTU* e ponto-a-ponto.

A maioria dos dispositivos de campo e o controlador usados nesse processo utilizam tecnologia *Foundation Fieldbus*. As bombas, cuja função é realizar a sucção dos fluidos, são acionadas por inversores de frequência. Esses, por sua vez, comunicam-se com um co-processador, localizado no controlador, utilizando o protocolo de comunicação *Modbus RTU* e, através do protocolo *OPC*, as informações de controle e supervisão são disponibilizadas para um micro-computador localizado em uma sala de controle [Salazar et al. 2006].

Esse protocolo possibilita que dados sejam lidos e escritos no controlador, via PC. Já a comunicação ponto-a-ponto é utilizada para informar quando as chaves de nível, localizadas nos tanques, forem acionadas [Salazar et al. 2006].

### 2.2.1 Barramentos de Campo

Os Barramentos de Campo (também chamados de *Fieldbus*) são utilizados em automação e controle de processos industriais. Os dados coletados neste nível são fornecidos à rede de controle, possibilitando assim o controle em tempo real, bem como planejamento de ações de segurança. Pode-se distinguir entre *Fieldbus* proprietário e aberto [Maitelli et al. 2005].

A utilização dessa tecnologia permite a redução do sistema de controle em termos de hardware, pois muitos dispositivos podem ser conectados com um condutor, o que resulta em cabos menores, barras de segurança menores e gabinetes ordenados.

#### Foundation Fieldbus

O *Foundation Fieldbus* é um sistema de comunicação totalmente digital, serial e bidirecional que conecta equipamentos *Fieldbus*, tais como sensores, atuadores e controladores. Ao contrário dos protocolos de rede proprietários, o *Foundation Fieldbus* não pertence a nenhuma empresa, nem é regulado por um único organismo ou nação [*Fieldbus Foundation* n.d.].

Com as facilidades da comunicação digital, a quantidade de informações disponíveis é muito maior do que a dos sistemas de automação tradicionais, cuja quantidade de informações disponíveis não vai além das variáveis de controle.

Múltiplas variáveis de cada dispositivo podem ser trazidas ao sistema de controle da planta para arquivo, análise de tendência, estudos de otimização de processo e geração de relatórios.

#### Modbus RTU

O protocolo *Modbus* tem como objetivo estabelecer uma comunicação mestre-escravo/cliente-servidor entre dispositivos inteligentes. Hoje é um padrão de fato, verdadeiramente aberto, sendo um dos protocolos de rede mais largamente usado no ambiente industrial.

Os dispositivos que suportam esse protocolo normalmente possuem funções de monitoramento, configuração e módulo de controle *I/O*.

No modo RTU (*Remote Terminal Unit*), cada byte da mensagem possui dois caracteres hexadecimais (cada caractere representado por quatro bits) e a mensagem é transmitida de maneira contínua.

#### Ponto-a-Ponto

A comunicação ponto-a-ponto é uma tecnologia utilizada na alimentação, controle e supervisão dos dispositivos de campo. É largamente utilizada em aplicações que necessitam de alarmes para efetuar controle dos níveis dos reservatórios, dentre outras aplicações. O mecanis-

mo que controla esses alarmes é bastante simples, consistindo de um sinal de tensão constante que possui nível baixo 0V e nível alto 24V.

### 2.2.2 Instrumentação utilizada

Na constituição da planta do LAMP, foram utilizados os mais modernos instrumentos encontrados no mercado. São transmissores inteligentes de pressão (com sensores tipo célula capacitiva), de nível (com sensores tipo radar e ultra-som) e de temperatura (com sensores tipo PT-100). Esses transmissores são necessários para medir as grandezas direta e indiretamente envolvidas nos processos de medição de vazão e *BS&W* [Maitelli et al. 2005].

O principal motivo da escolha de medidores de nível dos tipos radar e ultra-som foi a necessidade de uma grande exatidão nas medidas. O radar é utilizado no tanque auditor, que terá o papel de medidor padrão na avaliação dos processos de medições em petróleo do LAMP.

Os principais instrumentos utilizados são: o IF302, conversor de corrente para fieldbus, o TT302, transmissor de temperatura e o LD302, que são transmissores de pressões manométrica e diferencial.

As chaves de níveis utilizadas são de montagem lateral; têm um sistema de bóia com haste contrabalançada e a chave de nível de montagem de topo, com um sistema uma ou duas bóias e hastes guias.

Na medição da vazão em linha, é utilizado o medidor de engrenagens ovais, do tipo deslocamento positivo, da fabricante METROVAL. Esse medidor é utilizado no controle, produção ou transferência de produtos no estado líquido, nas indústrias petrolíferas, petroquímicas e químicas.

Para fazer a transferência dos líquidos do sistema, é utilizado um conjunto motor/bomba que é acionando via inversores de frequência, possibilitando, assim, a variação das velocidades das bombas e a conseqüente variação das vazões. O motor utilizado é o trifásico da WEG á prova de explosão e os inversores são do modelo *CFW-09* da WEG; a bomba utilizada é rotativa de deslocamento positivo helicoidal *NEMO*®.

A figura 2.2 mostra a disposição dos instrumentos.

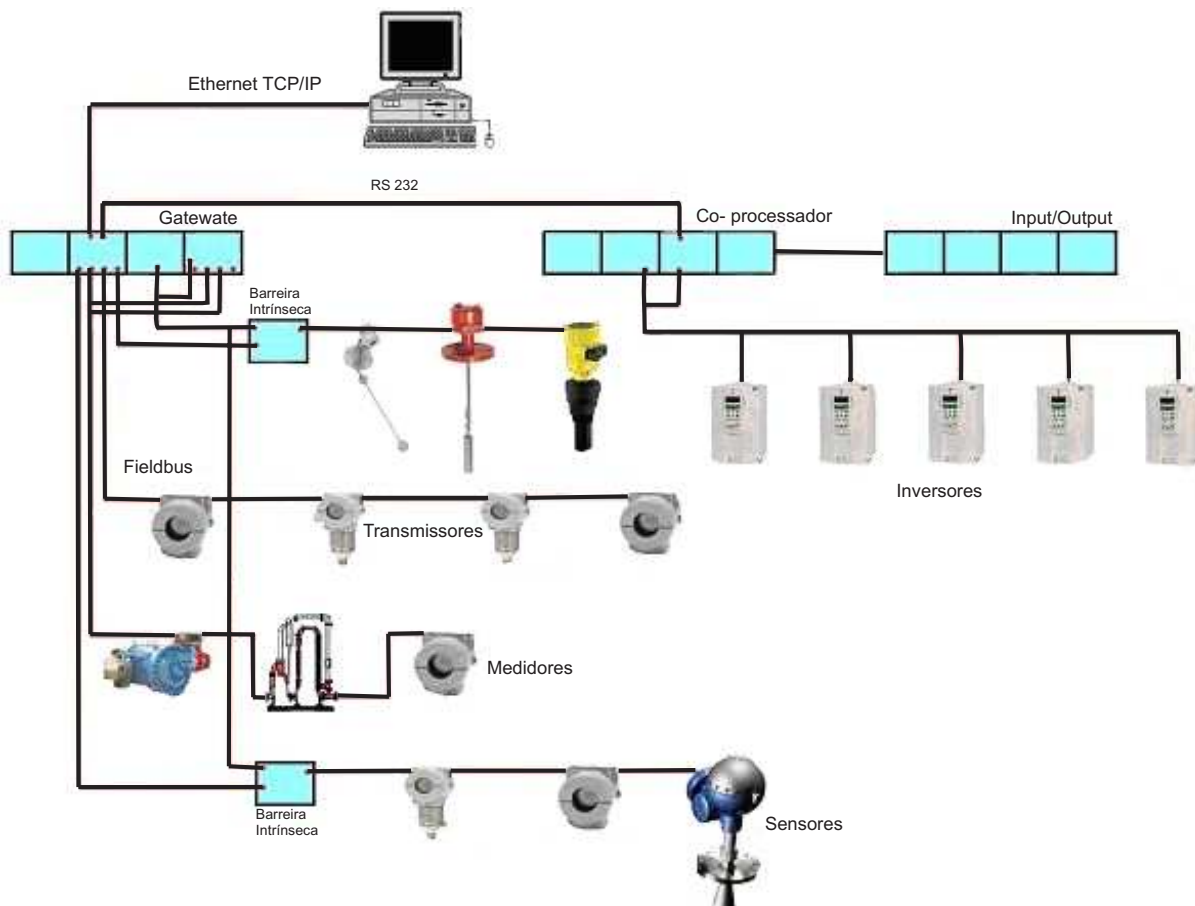


Figura 2.2: Topologia da Instrumentação no LAMP

### 2.2.3 Sistema Supervisório

Um sistema supervisório tem a função de monitorar, gerenciar e controlar uma determinada planta industrial de uma forma mais fácil e amigável para o operador, uma vez que, com a evolução dos equipamentos industriais e o crescente uso dos sistemas de automação, essas tarefas tornaram-se mais complexas.

O sistema desenvolvido no laboratório foi elaborado utilizando o software *ELIPSE/SCADA*. No Elipse, existe a ferramenta *ORGANIZER*, que torna mais fácil o acesso a todos os atributos da aplicação, possibilitando a alteração das propriedades dos componentes da aplicação de maneira fácil e rápida. Através dele é possível a importação das tags, via OPC, de uma determinada aplicação e visualizá-la nas telas de controle. A figura 2.3 mostra a tela principal dos processos realizados no LAMP.

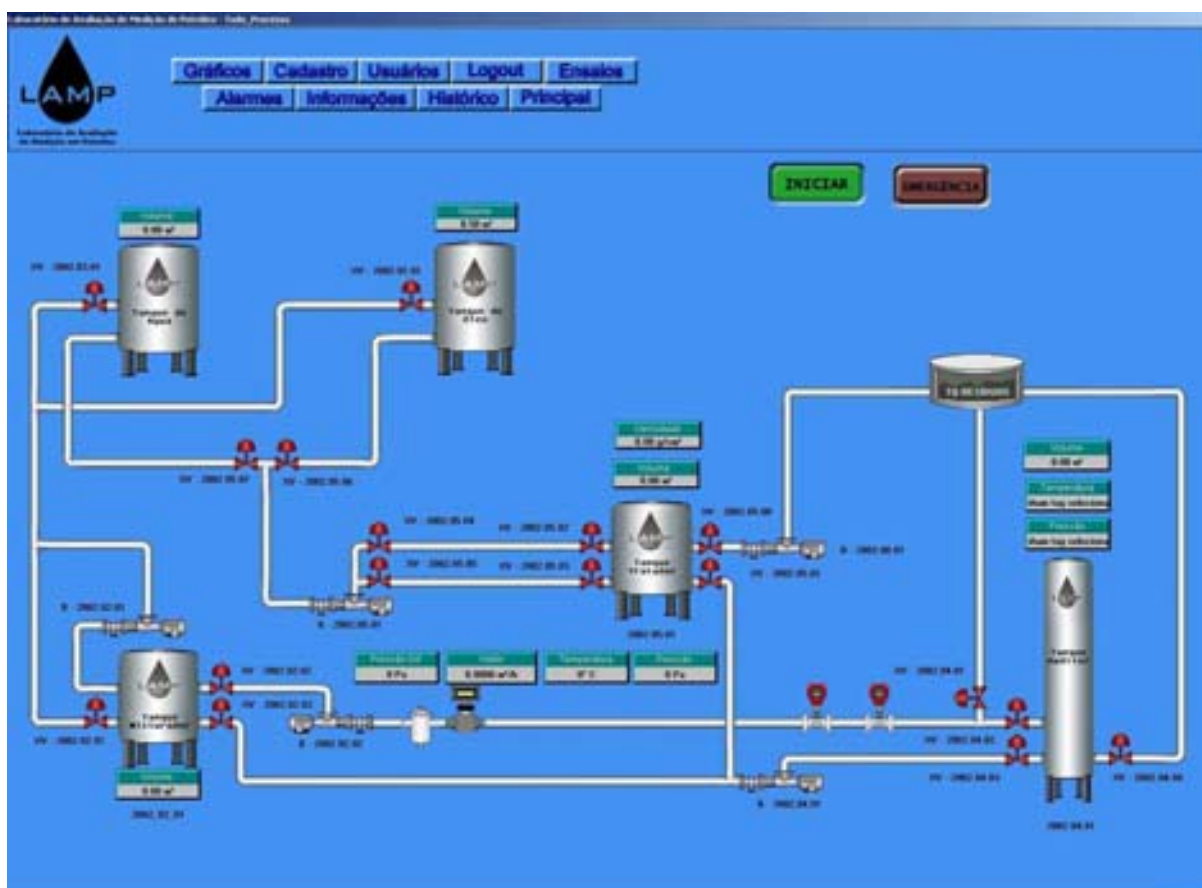


Figura 2.3: Tela principal do supervisor do processo do LAMP



### 2.2.4 Acreditação do LAMP

A primeira fase do Projeto LAMP, concluída com sucesso, tinha como objetivo a construção do laboratório, a montagem da planta e sua automação com a instrumentação mais moderna da época [Salazar et al. 2006].

Atualmente o projeto encontra-se na sua segunda etapa, que visa, entre outros objetivos, implementar a norma *NBR ISO/IEC 17025* [ABNT 2005], que trata dos requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração utilizados pelo *INMETRO* como norma base para a certificação laboratorial.

São vários os requisitos para implementá-la; dentre os principais, temos: manual da qualidade, avaliação da estimativa da incerteza de medição e os procedimentos de controle de documentos e equipamentos [Penha et al. 2007].

Outro objetivo é pertencer à *RBC (Rede Brasileira de Calibração)*, cuja adjunção e crédito, tornarão possível a prestação de serviços de calibração dos instrumentos de vazão e *BS&W* para as indústrias petroquímica, com a comprovação da competência técnica, da credibilidade e da capacidade operacional do laboratório.

Os documentos necessários para a acreditação do LAMP junto ao *INMETRO* estão em fase final de preparação, bem como o manual da qualidade, os procedimentos operacionais e administrativos, que conterão as políticas de funcionamento do laboratório. Paralelamente a esses documentos, está sendo desenvolvido um software que automatizará os procedimentos burocráticos do laboratório [Penha et al. n.d.].

## 2.3 Requisitos do Laboratório

O LAMP é um laboratório projetado para disponibilizar serviços de calibração e medição de medidores de vazão e *BS&W*. Também conta com instrumentação de última geração e trabalha com produtos altamente inflamáveis, como o petróleo. Então, para implementar um sistema de aquecimento no laboratório, foi feita uma relação dos requisitos mais importantes na projeção final do mesmo.

Os requisitos avaliadores constam de 5 itens:

### 2.3.1 Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas

O correto dimensionamento de uma instalação elétrica em áreas com risco de formação de atmosfera explosiva requer vários detalhes técnicos de projeto, sendo o principal deles a elaboração de um projeto executivo com sua classificação de área.

As áreas onde existe o risco de explosões são classificadas em zonas, com base na probabilidade da ocorrência da mistura de um combustível em forma de gás, vapor ou poeira, com oxigênio [Quintaes & Salazar 2006]. Essa classificação define que tipo de proteção o equipamento elétrico deve possuir para ser instalado na área, pois uma fonte de ignição, neste caso, poderia dar início a uma catástrofe. A chamada Zona 0 é a área onde existe uma mistura explosiva, aí encontrada permanentemente, ou por tempo prolongado. Na Zona 1, a presença da mistura explosiva é provável durante a operação normal de trabalho. Na Zona 2, a presença da mistura explosiva somente é encontrada em caso de falhas do equipamento de processo; nesse caso, o tempo de permanência da mistura é curto [Jordão 2002].

As instalações dos circuitos de segurança intrínseca devem atender à norma *NBR 5410* [*NBR 5410 - Instalações elétricas de Baixa Tensão* 2005], observando ainda que os equipamentos empregados nos circuitos devam ser aprovados para o uso na zona classificada e para o grupo de gases presentes nestas áreas. Além disso, são exigidos o aterramento e o isolamento dos fios e cabos.

O LAMP, onde existirá a presença de tanques metálicos para o armazenamento de petróleo, enquadra-se na zona 1. Além dos níveis de proteção, a norma também trata de três métodos de proteção contra descargas atmosféricas. Em virtude da estrutura do laboratório, a mesma obriga a utilização do método de proteção eletrogeométrico [Quintaes & Salazar 2006]

### 2.3.2 Potência Elétrica

A disponibilidade de potência elétrica necessária para a alimentação do sistema de aquecimento no laboratório é, como máxima  $100\text{kW}$ .

### 2.3.3 Área de troca térmica

Esse requisito verifica a área de transferência térmica disponível para a instalação dos sistemas de aquecimento até o ponto de medição, onde existe um trecho de  $22m$  na linha de teste, com mais  $8m$  na linha de recirculação. Entretanto, considerando os instrumentos e obstáculos instalados na linha de testes e de recirculação, o comprimento útil se reduz a apenas  $12m$  o que corresponde a uma área de  $3,35m^2$ , em que, dependendo do sistema avaliado, podem-se considerar outras alternativas físicas de solução.

### 2.3.4 Área para a instalação física

Esse item avalia o espaço físico necessário para a instalação do sistema de aquecimento, levando em consideração a estrutura atual do laboratório e as futuras construções, além de prédios vizinhos. Dentro da estrutura atual, já contamos com um parque de tanques, que estão dispostos dentro de um dique de contenção com área de  $382,31m^2$ , um abrigo para compressor, e, futuramente, a construção de um galpão e um sistema de movimentação de cargas.

### 2.3.5 Aspectos da instrumentação já instalada no laboratório

- A tubulação: é de aço carbono, com diâmetro interno de  $77.92mm$ , diâmetro externo de  $88.9mm$  e uma espessura de  $5.49mm$ . Influencia muito na troca de calor, quando se determina se a transferência de calor é maior ou menor. O mesmo acontecendo com o tempo de aquecimento.
- O tanque misturador: é importante porque, de acordo com o seu volume, será determinada a necessidade de uma proteção térmica em torno dele.
- Equipamentos: Foi importante uma avaliação para poder determinar a temperatura máxima dos equipamentos envolvidos no transcurso do teste:
  - Bomba: Da empresa *Netzsch*, modelo *NEMO “Y”*, ela é rotativa, de deslocamento positivo; foi verificado pelo manual e pela mesma empresa, que pode suportar uma temperatura até  $80^{\circ}C$ .
  - Válvula eletro-pneumática: Da empresa *Spirax-sarco*, modelo *VMF-3”*,suporta uma temperatura até  $200^{\circ}C$ .
  - Válvula Manual: Da empresa *MGA*, modelo esfera de 3, suporta uma temperatura até  $200^{\circ}C$ .
  - Medidor de Vazão: Da empresa *Metroval*, modelo *OAP-125*, suporta até uma temperatura de  $110^{\circ}C$ .

---

## Capítulo 3

# Projeção do Sistema de Aquecimento

---

Para a implantação de qualquer projeto de engenharia, é necessário um estudo minucioso do problema a ser resolvido e, mais indispensável ainda, uma correta análise de todas as possíveis soluções para o problema.

O projeto de um sistema de aquecimento na indústria é determinado de acordo com as necessidades e requisitos de trabalho da empresa.

Para projetar o sistema de aquecimento do LAMP, foram consideradas 3 alternativas, as quais são as mais importantes e utilizadas na indústria: trocador de calor, resistência de imersão e resistência tipo coleira.

Os sistemas de aquecimento serão avaliados de acordo com os requisitos do laboratório, mencionados no capítulo anterior.

### 3.1 Trocador de calor

Um dos sistemas de aquecimento mais utilizado na indústria e nas aplicações de engenharia térmica é o trocador de calor, um dispositivo que realiza o processo de transferência de calor entre fluidos.

#### 3.1.1 Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas

O trocador de calor é um equipamento que conta com certificado para trabalhar em zona de risco 1, ou seja, poderá ser instalado no laboratório sem nenhum problema.

#### 3.1.2 Potência Elétrica

Para essa avaliação, foram considerados três tipos de trocadores de calor, que são os mais utilizados na indústria: tubo duplo com escoamento paralelo, tubo duplo em contra corrente e

casco e tubo.

Para avaliar o desempenho dos trocadores de calor, os mesmos serão submetidos às mesmas condições:

- O líquido que fará a troca térmica no processo de aquecimento do fluido de teste será óleo virgem, uma vez que pode ser facilmente fornecido ao laboratório.
- Outra condição é a determinação do fluido a ser aquecido; foi considerado o pior caso, ou seja, um fluido com *BS&W* de 100%, isto é, apenas água; esta consideração é fundamentada no fato de que os poços de produção da região possuem elevados percentuais de *BS&W*.
- A Troca de temperatura é de 30°C para 60°C, como foi dito inicialmente.
- A vazão volumétrica da água,  $Q_c$ , de 12m<sup>3</sup>/h, é a máxima permitida para os testes no laboratório.
- Foram desprezadas as perdas de calor para o ambiente.

A partir das condições de contorno mencionadas, foram avaliados os 3 tipos de trocadores de calor em função do menor consumo de energia.

### **Tubo duplo: Escoamento Paralelo**

O trocador de tubo duplo consiste de dois tubos concêntricos. Um dos fluidos escoam pelo tubo interno e o outro pela parte anular entre os tubos isso pode ser em direção de contrafluxo ou em fluxos paralelos. Esse é talvez o mais simples de todos os tipos de trocador de calor, pela fácil manutenção envolvida. É geralmente usado em aplicações de pequenas capacidades. A figura 3.1 apresenta um exemplo desse tipo de trocador.

O método de efetividade - NUT [Incropera & Witt 1992] é utilizado para calcular as condições de saída de um trocador de calor simples, quando são conhecidas somente as temperaturas de entrada e as capacidades caloríficas.

A efetividade de um trocador de calor é definida como a razão entre a taxa real de transferência de calor nele e a taxa máxima possível de transferência de calor para uma dada condição de entrada de fluido [Incropera & Witt 1992].

Seguindo a metodologia de Efetividade - NUT, será obtida a temperatura de saída do óleo virgem para obter a temperatura média entre a entrada e a saída. E assim obter os valores de energia transmitida à água, que terá uma elevação de temperatura de 30°C ( $T_{ci}$ ), para 60°C ( $T_{co}$ ).

Inicialmente, são calculadas as vazões mássicas do fluido frio (água),  $\dot{m}_c$ , e do fluido quente (óleo),  $\dot{m}_h$ , através das equações 3.1 e 3.2 respectivamente. Para tanto, os valores das vazões volumétricas e as massas específicas devem ser conhecido. A Vazão volumétrica da água,  $Q_c$ , é

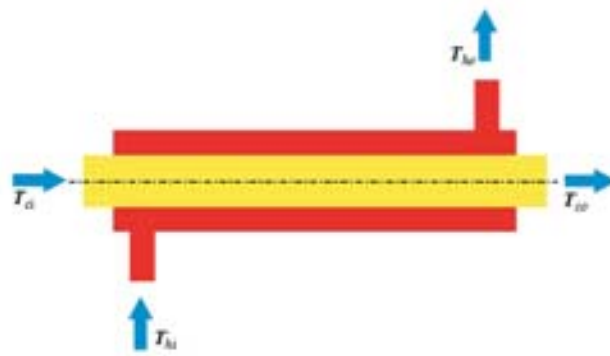


Figura 3.1: Trocador de calor Tubo Duplo com escoamento paralelo

de  $12\text{m}^3/\text{h}$ , é a máxima permitida para os testes no laboratório. Desse modo, o mesmo valor é atribuído também para a vazão do fluido quente,  $Q_h = 12\text{m}^3/\text{h}$ .

Para a determinação das massas específicas, seus valores são consultados no livro [Incropera & Witt 1992], de acordo com a média das temperaturas de entrada e saída de cada um dos fluidos. No caso do fluido frio, água, ele sofre uma elevação de temperatura de  $30^\circ\text{C}$  para  $60^\circ\text{C}$ ; portanto uma média de  $45^\circ\text{C}$ , o que corresponde a uma massa específica,  $\rho_c$ , de  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ .

Com relação ao fluido quente, óleo, a única temperatura conhecida é a de saída,  $T_{ho}$ , que deve ser igual à temperatura de saída do fluido frio, ou seja,  $60^\circ\text{C}$ . Dessa forma, a temperatura de entrada,  $T_{hi}$ , deve ser estimada em  $234^\circ\text{C}$ . Como a massa específica não tem uma variação considerável com relação à temperatura, a atribuição da temperatura de entrada do fluido quente não terá uma influência considerável na determinação do valor real dessa temperatura. A partir desses valores, obtém-se a massa específica do fluido quente,  $\rho_h = 884,1\text{kg}/\text{m}^3$ .

$$\dot{m}_c = \rho_c \cdot Q_c = 12000\text{kg}/\text{h} = 3,333\text{kg}/\text{s} \quad (3.1)$$

$$\dot{m}_h = \rho_h \cdot Q_h = 10609,2\text{kg}/\text{h} = 2,947\text{kg}/\text{s} \quad (3.2)$$

Uma vez encontradas as vazões mássicas, serão determinadas agora as capacidades caloríficas dos fluidos frio,  $C_c$ , e quente,  $C_h$ , através das equações 3.3 e 3.4 respectivamente. Mas, além da vazão mássica, são necessários também os calores específicos dos fluidos, que são obtidos

do livro [Incropera & Witt 1992], de forma semelhante às massas específicas, ou seja, a partir da média de suas temperaturas de entrada e saída. Dessa forma, tem-se que o calor específico da água,  $C_{pc}$ , é de  $4,180\text{kJ/kg.K}$ , e o calor específico do óleo,  $C_{ph}$ , é de  $1,909\text{kJ/kg.K}$ .

$$C_c = \dot{m}_c \cdot C_{pc} = 13,932\text{kJ/s.K} = 13932\text{W/s.K} \quad (3.3)$$

$$C_h = \dot{m}_h \cdot C_{ph} = 5,626\text{kJ/s.K} = 5626\text{W/s.K} \quad (3.4)$$

Em seguida, é calculada a quantidade de calor,  $q$ , necessária ao aquecimento do fluido frio:

$$q = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{co} - T_{ci}) = 417582\text{W/s} \quad (3.5)$$

Sabendo que o coeficiente global de troca térmica para transferência de calor de óleo para água, e considerando as áreas de troca térmica para o fluido quente  $A_h$  igual a  $11,8\text{m}^2$ , e para o fluido frio  $A_c$  com  $11,6\text{m}^2$ , é possível calcular os coeficientes globais de troca térmica para fluido frio ( $U_c$ ) e para o fluido quente ( $U_h$ ) através das equações 3.6 e 3.7 respectivamente:

$$U_c = U \cdot \frac{A}{A_c} = 237,97\text{W/m}^2.\text{K} \quad (3.6)$$

$$U_h = U \cdot \frac{A}{A_h} = 233,9\text{W/m}^2.\text{K} \quad (3.7)$$

Nessa equação,  $U$  é a combinação de óleo e água e, de acordo com o livro [Incropera & Witt 1992], ele estaria na faixa de  $110\text{W/m}^2.\text{K}$  e  $350\text{W/m}^2.\text{K}$ . Por isso foi considerado o valor meio dessa faixa,  $230\text{W/m}^2.\text{K}$ , onde  $A$  é a área total, que é  $12\text{m}^2$ .

De acordo com as capacidades caloríficas encontradas, verifica-se que o óleo corresponde à mínima capacidade calorífica do sistema ( $C_h = C_{min}$ ), enquanto a água corresponde à máxima ( $C_c = C_{max}$ ). Em seguida, é calculada sua relação ( $C_r$ ), que posteriormente será utilizada na determinação da efetividade. Portanto:

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = 0,4 \quad (3.8)$$

A seguir é calculado o número adimensional de  $NUT$ , determinado a partir do fluido quente, por este ter a capacidade calorífica menor para o sistema. Assim, tem-se uma área de troca térmica atribuída, ( $A_h$ ), de  $11,8\text{m}^2$ , o coeficiente global de troca térmica ( $U_h$ ), e o calor específico mínimo do sistema ( $C_{min}$ ).

$$NUT = \frac{U_h \cdot A_h}{C_{min}} = 0,49 \quad (3.9)$$

Agora, através da equação 3.10, é possível calcular a efetividade do trocador de calor.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r} = 0,354 \quad (3.10)$$

A partir do valor da efetividade, é possível saber a quantidade de calor máxima gerada pelo trocador ( $q_{max}$ ), uma vez que a quantidade de calor efetiva ( $q$ ) já é conhecida.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (3.11)$$

portanto,  $q_{max} = 1179457,62W/s$ .

Finalmente, a partir dos valores já encontrados, é possível determinar o valor da temperatura do fluido quente na entrada:

$$T_{hi} = \frac{q_{max}}{C_{min}} + T_{ci} = 239,64^{\circ}C \quad (3.12)$$

### Tubo Duplo: Escoamento em contra corrente

A estrutura física desse tipo de trocador é semelhante à daquele anteriormente mencionado; a diferença, como o próprio nome deixa claro, está no fluxo dos fluidos quente e frio que, nesse caso, estão em sentidos opostos. A figura 3.2 apresenta um exemplo desse tipo de trocador.

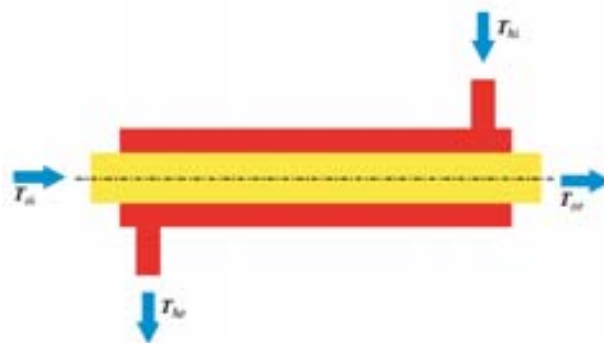


Figura 3.2: Trocador de calor Tubo Duplo com escoamento em contra corrente



Na determinação da efetividade deste trocador, serão considerados os dados encontrados para o anterior e utilizados na equação 3.13, [Incropera & Witt 1992].

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 - C_r \cdot \exp[-NUT(1 - C_r)]} = 0,363 \quad (3.13)$$

Em seguida, utilizando a equação 3.11, é encontrada a quantidade de calor máxima para este trocador,  $q_{max} = 1150214,8W/s$ , e, conseqüentemente, através da equação 3.12, é encontrada a temperatura de entrada do fluido quente,  $T_{hi} = 234,45^\circ C$ .

### Casco e tubo

Quando há necessidade de se trocarem grandes quantidades de calor, que é o caso do LAMP, o uso de trocadores de passo único, como os de tubo duplo, deixa de ser interessante, pelas grandes extensões necessárias. Nessas situações, o uso de outros tipos, mais eficientes, como os do tipo casco e tubo, passa a ser mais vantajoso. Por esse motivo, esse é o trocador de calor mais utilizado na indústria.

Para começar a avaliação desse trocador, determina-se a correção da vazão para o fluido frio que escoam internamente para os tubos  $\dot{m}_1$ , onde o número de tubos do trocador,  $N$ , é igual a 10.

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_c}{N} = 0,333Kg/s \quad (3.14)$$

Para esse tipo de trocador, o valor mais utilizado do diâmetro dos tubos,  $D$ , é de  $25mm$ , e a viscosidade,  $\mu_a$ , da água na temperatura média de  $45^\circ C$ , é  $548.10^{-6}Kg/s.m$ .

A partir desses valores, é possível obter o número de Reynolds ( $Re_D$ ) [Incropera & Witt 1992], através da equação 3.15:

$$Re_D = \frac{4 \cdot \dot{m}_1}{\pi \cdot D \cdot \mu_a} = 30948 \quad (3.15)$$

Como o número de Reynolds foi maior que 10000, de acordo com [Incropera & Witt 1992], esse tipo de escoamento é turbulento; conseqüentemente possui o número de Prandtl ( $Pr$ ), de 3,77. Através dele é possível obter o número de Nusselt  $Nu_D$ , de acordo com a equação 3.16:

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^{0,4} = 153,3 \quad (3.16)$$

De acordo com o tipo de material de fabricação do trocador, obtém-se o coeficiente laminar,  $h_o = 400W/m^2$ , e a condutividade térmica,  $k = 0,640W/m.K$  [Incropera & Witt 1992]. A partir daí, é possível calcular o coeficiente pelicular,  $h_i$  [Incropera & Witt 1992]:

$$h_i = \frac{k}{D} \cdot Nu_D = 3924,48 W/m^2 \cdot K \quad (3.17)$$

Utilizando esses dados na equação 3.18, obtém-se o coeficiente global de troca térmica:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right)} = 363 W/m^2 \cdot K \quad (3.18)$$

De acordo com a equação 3.9, tem-se que  $NUT$  vale 0,774. E utilizando a equação 3.19, determina-se o número adimensional de efetividade para este tipo de trocador:

$$\varepsilon = 2 \cdot \left( 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \cdot \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right)^{-1} = 0,54 \quad (3.19)$$

Em seguida, é calculado o valor de  $q_{max}$  através da equação 3.11,  $773300 W/s$ , e finalmente tem-se que a temperatura do fluido quente na entrada é  $T_{hi} = 167,45^\circ C$ , através da equação 3.12.

Uma vez encontradas as temperaturas reais de entrada do fluido quente ( $T_{hi}$ ), é possível calcular o consumo de energia para todos os trocadores, sabendo que a temperatura de saída do fluido quente ( $T_{ho}$ ), é de  $60^\circ C$  para todos os casos. Dessa forma, é possível saber em qual trocador ocorre a maior transferência de energia do fluido quente para o fluido frio e quanto se deve elevar a temperatura de entrada do fluido quente para que este possa aquecer a água.

De acordo com a relação fundamental de quantidade de calor necessária: [Incropera & Witt 1992]

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (3.20)$$

Tem-se os valores das temperaturas médias do fluido quente para cada trocador de calor na tabela 3.1.

Trocador	$T_{hi}$ ( $^\circ C$ )	$T_{ho}$ ( $^\circ C$ )	$\Delta T$ ( $^\circ C$ )	$T_{meio}$ ( $^\circ C$ )	$\rho$ ( $Kg/m^3$ )	$c_p$ ( $KJ/Kg \cdot K$ )	$q$ ( $kW$ )
Tubo duplo - Esc. Paralelo	239,64	60	209,64	134,82	818,9	2,38	1361,22
Tubo duplo - Esc. em contra corrente	234,45	60	204,45	132,22	822	2,36	1321,62
Casco e tubo	167,45	60	137,45	98,72	841,8	2,21	850,82

Tabela 3.1: Comparação de energia fornecida pelos trocadores de calor

A partir da análise da tabela 3.1, observa-se que o trocador de casco e tubo, possui um

menor consumo de energia em relação aos outros dois trocadores de calor, mas o consumo de eletricidade é muito alto para o laboratório, já que a potência máxima a ser utilizada é de  $100kW$ , sendo esta uma grande desvantagem deste sistema.

### 3.1.3 Área de troca térmica

A troca térmica do trocador de calor será feita na linha de recirculação do tanque misturador, aproveitando assim a passagem constante do fluido.

### 3.1.4 Área para a instalação física

Nessa seção, é feita uma abordagem mais elaborada da forma de implementação do trocador de calor no laboratório, além dos aspectos a serem consideradas para a montagem.

Como forma de diminuição da potência necessária para aquecimento, o trocador seria instalado na linha de recirculação do tanque misturador. Por falta de espaço físico dentro da bacia contidora, onde estão localizados os tanques, o *boiler* ficaria instalado fora da área classificada, o que seria mais um item para a redução de custos, já que não precisaria ser certificado, mas, pelo contrario, modificaria a infra-estrutura inicial do laboratório.

A figura 3.3 apresenta um esquema detalhado de como seria instalado na planta do LAMP o sistema de aquecimento, utilizando trocador de calor.

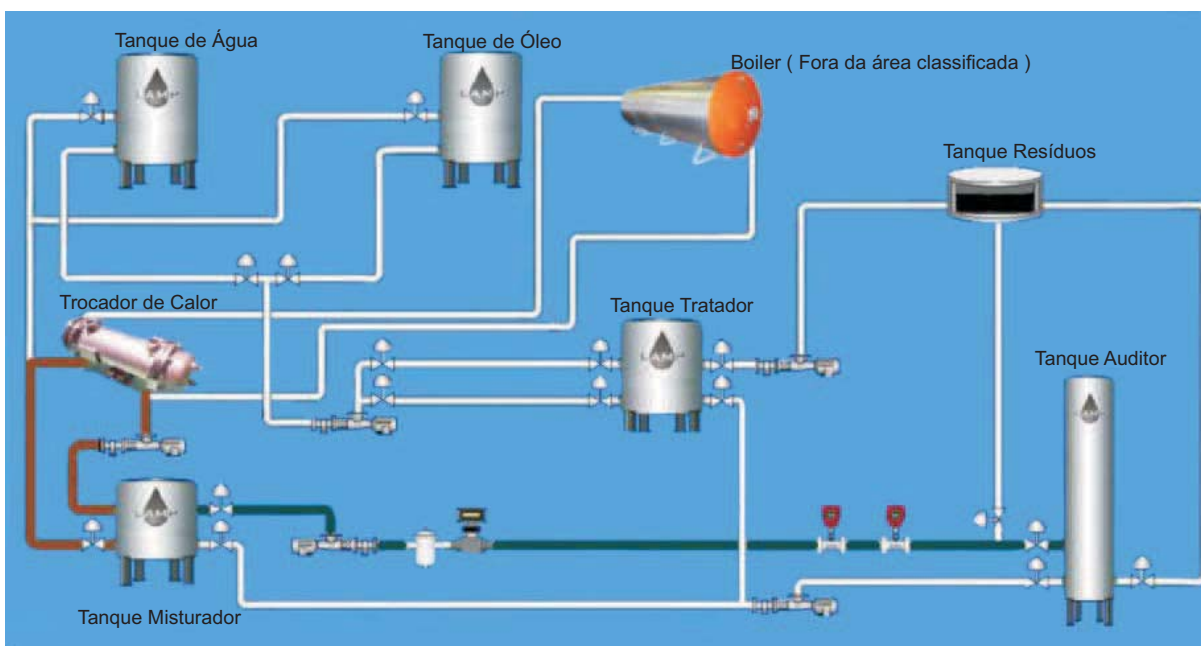


Figura 3.3: Instalação física do trocador de calor

### 3.1.5 Simulação

Depois de feita uma avaliação dos diferentes comportamentos dos trocadores de calor, quando foi determinado que a melhor opção é o trocador de casco e tubo, fez-se uma simulação, considerando esse tipo de trocador, utilizando como fluido de troca térmica as propriedades do óleo lubrificante disponível no laboratório, com viscosidade( $\mu_o$ ) igual a 30,9cP, densidade de 31°API e uma composição descrita na tabela 3.2.

Parafínicos	n-hexano	20
	n-heptano	25
Naftênicos	2,3 - dimetilpentano	13
	Metilciclopentano	20
Aromáticos	Etilbenzeno	10
	Tolueno	6
	Enxofre	6

Tabela 3.2: Composição do lubrificante em porcentagem volumétrica

Para fazer à simulação foi utilizado o software *HYSYS*, em que foi considerada a elevação da temperatura água-óleo, de 30°C para 60°C e a quantidade de água em óleo, em porcentagem volumétrica, variando entre 60%, 70% e 80%, onde as temperaturas de entrada e saída do fluxo de água e óleo são as mesmas para as três situações. Para o fluido frio, que passa nos tubos, e para o fluido quente, que passa no casco, o trocador apresenta um passagem no casco e oito passagens nos tubos.

Alcançam-se um resultado que indica em qual das três relações de proporção fluxo de água e óleo, ter-se-à a menor quantidade de calor fornecida ao óleo de aquecimento. Ou seja, quanto menor a temperatura do óleo que entra no casco, menor é o consumo de energia do trocador de calor.

Água em óleo ( %)	Temperatura na entrada ( °C)	Temperatura na saída ( °C)
60	312,3	182,4
70	285,2	165,4
80	253,5	151,8

Tabela 3.3: Comportamento do óleo com a variação da porcentagem de água.

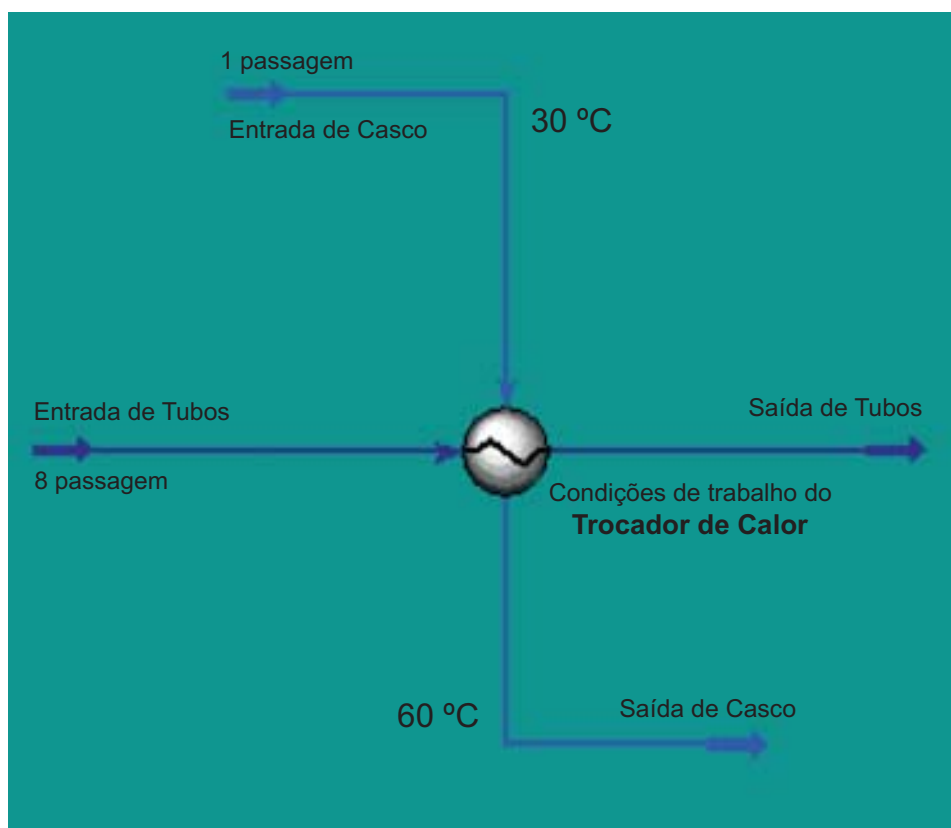


Figura 3.4: Simulação em HYSYS

## 3.2 Resistências internas

Trata-se de resistências elétricas tipo tubular flangeadas, as quais seriam instaladas nas paredes internas da tubulação, contacto direto com o fluido; a figura 3.5 mostra uma delas.



Figura 3.5: Resistência de Imersão

Esse tipo de resistência é largamente utilizado na indústria petroquímica, para soluções de sistemas de aquecimento, tanto para gases, como para líquidos. Elas normalmente são projetadas para serem utilizadas em tanques e tubos pressurizados, e sua instalação pode ser feita por parafusamento do conjunto aquecedor sobre uma flange lisa soldada na parede da tubulação, ou também pode ser projetada para utilizar rosca.

### 3.2.1 Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas

Como já foi descrito anteriormente, todos os equipamentos instalados na planta do LAMP devem ser certificados para poderem ser utilizados em áreas classificadas, uma vez que a área de testes do laboratório enquadra-se na Zona 1 de classificação de áreas. Nesse ponto, a utilização de resistências internas encaixa-se perfeitamente nas necessidades do laboratório, já que podem ser facilmente encontrados no mercado modelos com a certificação necessária.

### 3.2.2 Área de troca térmica

Uma vantagem desta resistência é em relação às perdas de energia, já que a resistência tubular flangeada, pelo fato de estar imersa na tubulação, ou seja, em contato direto com o fluido a ser aquecido, possui perdas de calor mínimas ou quase nulas, aumentando sua eficiência, e diminuindo o tempo de recirculação do fluido por ela.

### 3.2.3 Área para a instalação física

Apesar de as resistências serem certificadas para operação em áreas classificadas, a estrutura atual do laboratório não permite a instalação das mesmas, já que o diâmetro dos tubos é de 3", sendo muito pequeno para que as resistências sejam inseridas. Dessa forma, o projeto inclui uma adaptação da linha de recirculação, que será desviada para fora da área classificada e, nesse desvio, será inserida uma linha com 12", garantindo assim um espaço interno suficiente para a instalação das resistências.

O projeto de modificação da linha de recirculação é mostrado na figura 3.6.

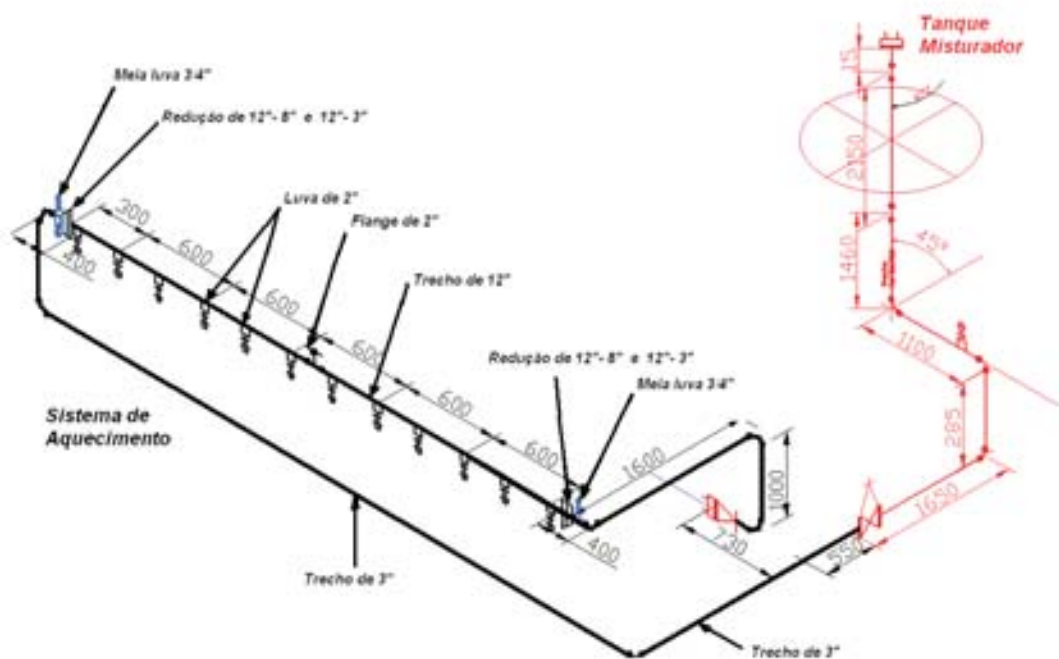


Figura 3.6: Projeto do sistema de aquecimento na linha de recirculação: O trecho de preto é o sistema implementado e o trecho vermelho já existe

### 3.2.4 Potência Elétrica

O cálculo da potência necessária para a instalação do sistema de aquecimento foi baseado em alguns requisitos do projeto, considerando a viabilidade técnica da instalação, em virtude da potência disponível no laboratório para essa aplicação, que é de 100kVA.

A vazão máxima de teste foi escolhida a partir da capacidade máxima dos medidores utilizados na região, sendo da ordem de  $12m^3/h$ . A vazão mássica, que é a massa de fluido que atravessa uma determinada seção por unidade de tempo, é dada pela Equação 3.21.

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot \frac{12m^3}{h} = 3,33kg/s \quad (3.21)$$

Onde:

$Q$ : Vazão volumétrica do fluido;

A quantidade de calor necessária para variar a temperatura do fluido é dada pela Equação 3.22.

$$q_1 = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3.22)$$

Onde:

$q_1$ : Calor de convecção transferido ao fluido;

$c_p$ : Calor específico do fluido;

$\Delta T$ : Gradiente de temperatura do fluido;

De acordo com a equação 3.22, a potência elétrica necessária para produzir o gradiente de temperatura desejado em um passagem pela linha de recirculação é de 417,58kW.

As perdas de energia fornecidas pela resistência ocorrem através de dissipação direta para o ambiente e da tubulação, podendo ser minimizadas por isolamento térmico adequado.

A temperatura externa do tubo pode ser estimada a partir da conservação de energia de entrada.

Condições de contorno: desprezando-se as perdas de calor para o ambiente, a conservação de energia pode ser obtida a partir da equação (3.23), considerando-se a temperatura interna do tubo ( $T_i$ ) igual à temperatura de operação ( $T_o$ ),  $T_i = T_o = 60^\circ C$ .

$$q_1 = q_2 = 417,58kW \quad (3.23)$$

Utilizando as condições de contorno na equação da transferência de calor por condução,



considerando o diâmetro externo  $d_e = 0,0889m$  e o diâmetro interno  $d_i = 0,0779m$ , o comprimento total das resistências  $L = 12m$ , a condutividade térmica para o tubo de aço-carbono ( $k$ ) de  $60,5W/m.K$  [Incropera & Witt 1992], e substituindo-se a Equação 3.23 na Equação 3.24, obtém-se o valor estimado de  $T_e$ .

$$q_2 = \frac{T_e - T_i}{\frac{\ln \frac{d_e}{d_i}}{2\pi k L}} \quad (3.24)$$

Portanto a temperatura externa do tubo é estimada em  $T_e = 72^\circ C$ .

Como forma de avaliar a influência da recirculação na diminuição da potência necessária, foi realizado um cálculo, fixando a potência a ser utilizada. O valor de potência é de  $100kW$ , que é a potência disponível hoje no laboratório. Portanto, sabendo que a massa específica da água ( $\rho$ ) vale  $1000kg/m^3$ , o calor específico ( $c_p$ ), vale  $4,18kJ/kg.K$ , a variação de temperatura é  $30^\circ C$ ; e considerando um volume médio utilizado nos testes, que vale  $4m^3$ , é possível calcular o tempo necessário para aquecimento através da equação 3.22, logo:

$$100kW = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4 \frac{m^3}{t(s)} \cdot 4,18 \frac{kJ}{kg.K} \cdot 30K$$

$$t(s) = 1672,3s = 83,6min$$

### 3.2.5 Simulação

Os resultados obtidos nas simulações, utilizando o software *CFX* [ANSYS CFX software delivers powerful computational fluid dynamics (CFD) n.d.], ajudaram a entender melhor o efeito da potência fornecida pelas resistências elétricas a uma determinada área de fluido [Creech 1998], [Galeazzo 2005], [Pratt 2003].

Foram utilizadas as mesmas condições formuladas no desenvolvimento analítico: fluido (água e ar), temperatura inicial ( $30^\circ c$ ), vazão ( $6m^3/h$  e  $12m^3/h$ ), pressão de trabalho ( $0.5bar$ ), quantidade de calor fornecido pelas resistências elétricas ( $100kW$  como máximo) e a especificação do material da tubulação (aço carbônico) [S.V. Mokamati 2000].

A figura 3.7, apresenta uma imagem da simulação, utilizando apenas uma resistência; o fluido utilizado é água, e as setas indicam o sentido do fluxo que passa na tubulação; a região vermelha indica o local onde está havendo um maior aquecimento através das resistências. A

temperatura mostrada na figura de abaixo faz um incremento de 300 para 305 Kelvin.

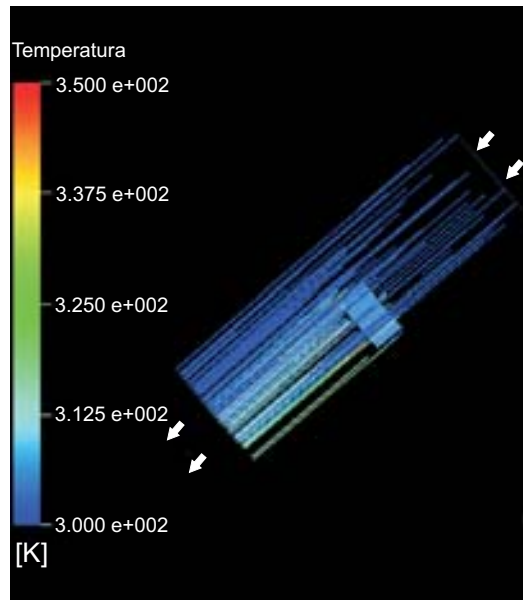


Figura 3.7: Aquecimento de uma resistências utilizando agua

A figura 3.8 simula o aquecimento de uma resistência, mas, nesse caso, o fluido utilizado é ar, e o incremento de temperatura é de 300 para 360 Kelvin.

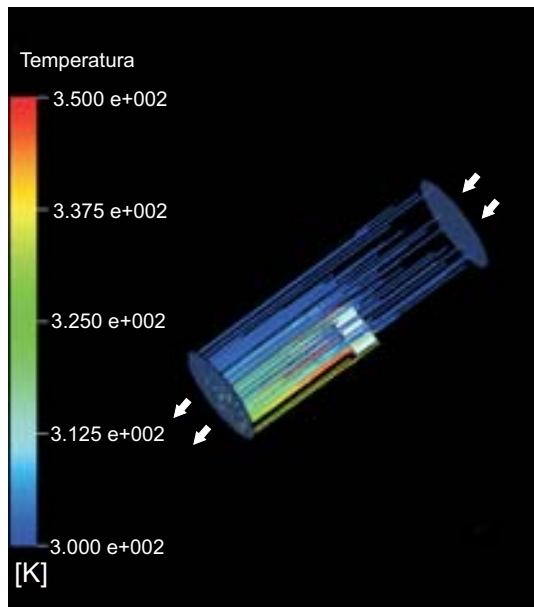


Figura 3.8: Aquecimento de uma resistências utilizando ar

O aquecimento da água e do ar está nas mesmas condições e pode-se verificar uma maior influência de calor no ar.

Para as seguintes simulações, serão consideradas como fontes de avaliação a vazão do fluido da água, sendo a vazão máxima utilizada no LAMP (  $12\text{m}^3/h$  ), e a vazão meia, (  $6\text{m}^3/h$  ).

A figura 3.9 mostra o aquecimento de duas resistências, utilizando uma vazão de  $12\text{m}^3/h$  e na figura 3.10 é utilizada uma vazão de  $6\text{m}^3/h$ .

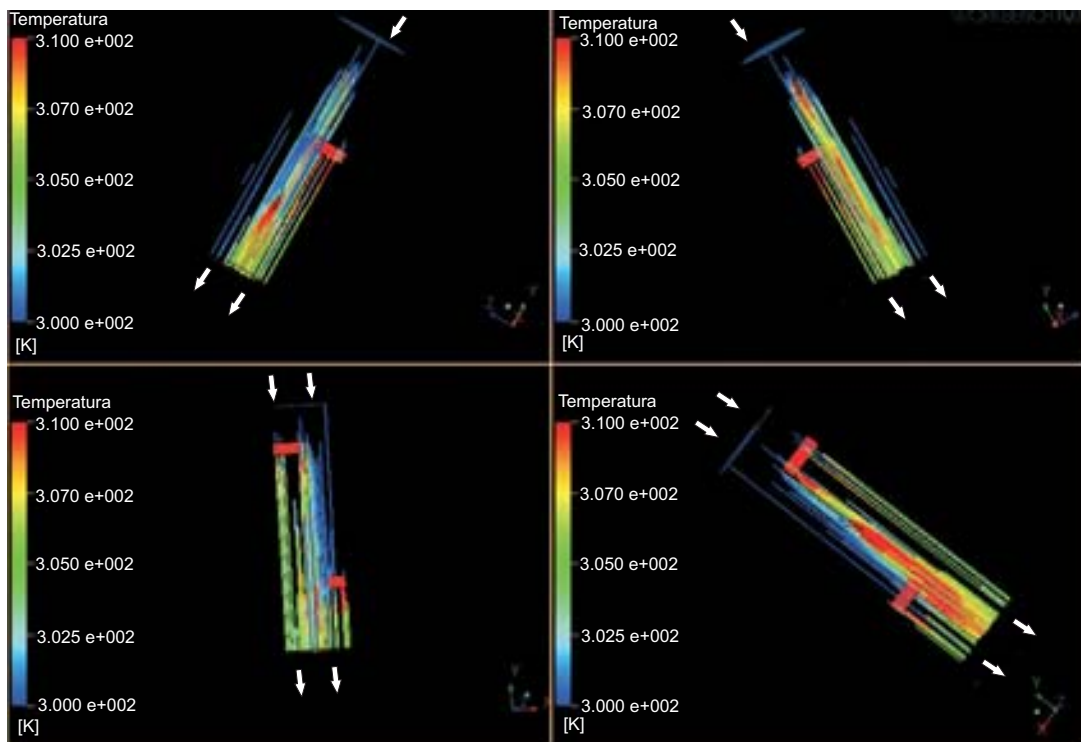


Figura 3.9: Aquecimento de duas resistências com uma vazão de  $12\text{m}^3/h$ , utilizando água

A influência da vazão no sistema de aquecimento é de vital importância, já que para a maior vazão utilizada num teste, tinha-se menor aquecimento no fluido, em relação a uma vazão menor.

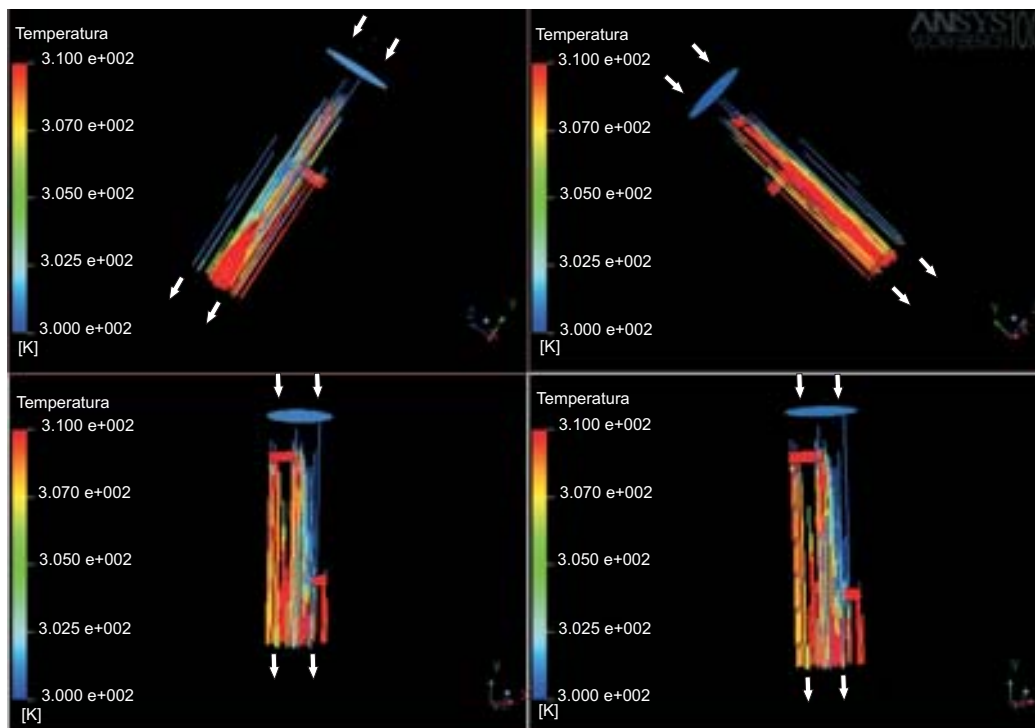


Figura 3.10: Aquecimento de duas resistências com uma vazão de  $6m^3/h$ , utilizando água

### 3.3 Resistências externas

Como terceira alternativa, tem-se a utilização de resistências elétricas externas do tipo coleira, distribuídas ao longo da superfície da tubulação; as resistências desse tipo são normalmente projetadas e fabricadas, principalmente para serem utilizadas no aquecimento de máquinas transformadoras de plásticos, como injetoras, sopradoras, extrusoras e recuperadoras, a figura 3.11, mostra uma delas.



Figura 3.11: Modelos de resistências elétricas tipo coleira

#### 3.3.1 Instalações elétricas em áreas potencialmente explosivas

A partir da classificação de área da planta, foram especificadas as resistências considerando sua localização dentro da instalação. Foram escolhidas caixas de passagem, unidades seladoras, nipples à prova de explosão para a instalação elétrica do sistema de aquecimento. A Figura 3.12 mostra o circuito elétrico de ligação das resistências.

Foi escolhida a resistência elétrica com isolamento de revestimento cerâmico pelo fato de ser mais resistente a manuseios na sua montagem e posterior manutenção, evitando que a estrutura seja danificada. Os fios condutores de alimentação das resistências são do tipo rabicho, ligados a uma unidade seladora, ligada a uma caixa a prova de explosão, onde será feita a alimentação elétrica externa, evitando a propagação de ignição no meio.

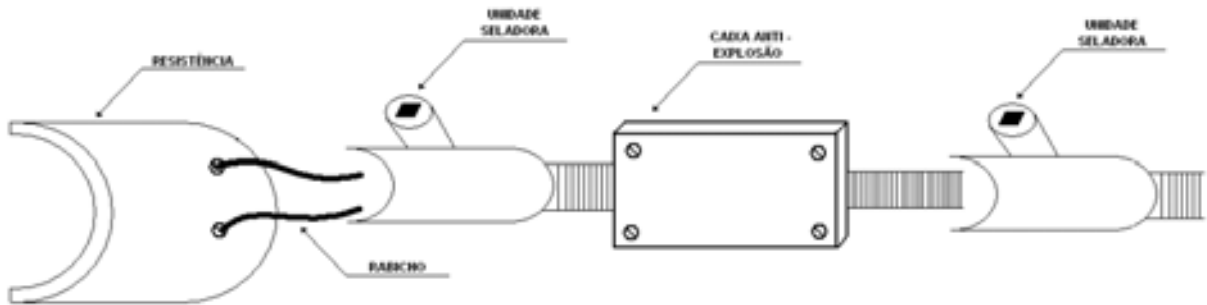


Figura 3.12: Instalação elétrica das resistências

### 3.3.2 Área de troca térmica

Uma das grandes vantagens das resistências elétricas de tipo coleira, em relação às demais alternativas, é que a área extra para instalação constitui-se apenas de um quadro elétrico, uma vez que as resistências serão instaladas diretamente sobre a tubulação.

A Figura 3.13, extraída do software [SolidWorks n.d.], apresenta a forma de ligação física das resistências na tubulação.



Figura 3.13: Resistências externas na tubulação

A área necessária para a troca térmica é aquela do trecho de recirculação do tanque de mistura combinado com o aquecimento de ajuste e a estabilização da linha de testes. Dessa forma, isso ajuda que o fluido atinja mais rápido a temperatura desejada,  $60^{\circ}\text{C}$ , no ponto de teste, além de reduzir a potência instalada do sistema.

Como forma de minimizar as perdas, torna-se necessário o isolamento térmico adequado das tubulações e do tanque de mistura.

### 3.3.3 Área para a instalação física

A Figura 3.14 apresenta a planta do laboratório, indicando a linha de recirculação do tanque de mistura e a linha de teste, onde seriam instaladas as resistências tipo coleira, como também mostra o ponto de teste, que é o limite para que o fluido esteja na temperatura desejada.

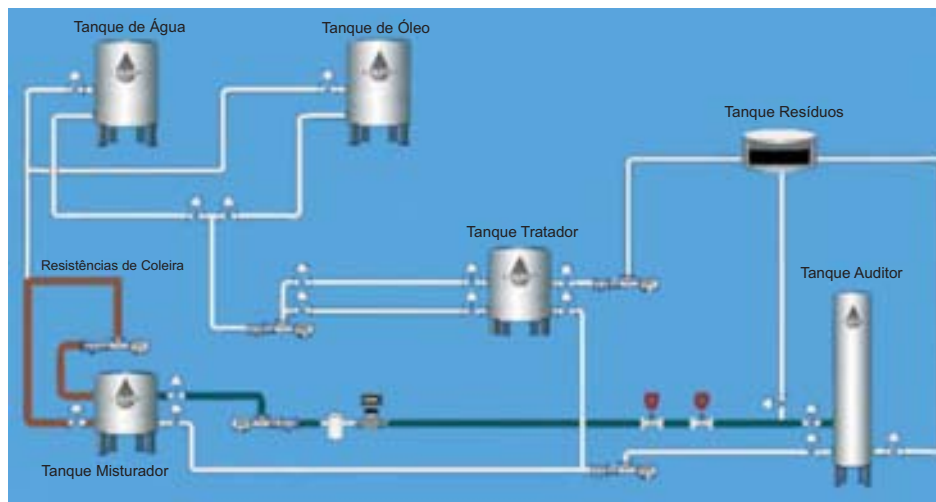


Figura 3.14: Instalação física das resistências

### **3.3.4 Potência Elétrica**

O cálculo de potência necessária seria o mesmo para as resistências de imersão, consideradas as mesmas condições de contorno.

### **3.3.5 Aspectos da instrumentação existente no laboratório**

Esse item foi considerado nesta alternativa porque o aquecimento do sistema, tanto na linha de recirculação como na linha testes, de forma simultânea, poderia danificar os equipamentos, sendo uma desvantagem a levar em conta.



### 3.4 Conclusões

- O ponto negativo na implementação das resistências elétricas tipo coleira diz respeito à classificação de área, uma vez que a planta do LAMP enquadra-se na zona 1 das áreas potencialmente explosivas, e não foi encontrada nenhuma resistência que se adequasse à necessidade dessa certificação. Assim, teria que se fazer uma adaptação com as que foram encontradas no mercado, o que não seria interessante para o laboratório.
- Embora o trocador de calor não apresente o problema de certificação para operação em áreas classificadas, a sua instalação mostra-se desfavorável. Quando são analisados os aspectos físicos do laboratório, uma vez que seria necessária uma alteração considerável na planta para adaptar tanto o trocador como o boiler de aquecimento do fluido no processo, exigir-se um elevado consumo de potência, como foi constatado.
- A melhor solução encontrada para resolver esses problemas foi uma modificação simples na linha de recirculação, utilizando resistências de imersão, de forma que esse novo trecho possuísse um espaço interno suficiente para a inserção das resistências, além de estar localizado fora da área classificada, o que descarta a necessidade de uma proteção extra para o equipamento. Além disso, outra vantagem é em relação à economia energética do sistema, pelo fato de estar localizada no trecho de recirculação. Pode-se utilizar somente a potência elétrica disponível, de forma que o fluido fique circulando pelas resistências até que a temperatura desejada seja atingida.
- As simulações feitas nas alternativas avaliadas ajudaram a entender diferentes comportamentos, levando em conta que as circunstâncias são as mesmas para todos.

---

## Capítulo 4

# Implementação do Sistema de Aquecimento

---

Como foi especificado na conclusão do capítulo 3, o sistema de aquecimento que melhor se adequa ao LAMP são as resistências de imersão; por isso, neste item, será descrita a projeção implementar do sistema escolhido no laboratório.

A implementação do sistema foi dividida em três partes: montagem mecânica, montagem elétrica e comunicação com o sistema já existente.

### 4.1 Montagem mecânica

A implementação do sistema está localizada fora da área de perigo, ou seja, fora da zona 1, onde a presença da mistura explosiva não é provável durante a operação normal de trabalho.

Para fazer a montagem mecânica, tem que ser feita uma adaptação do sistema de tubulações já existente no laboratório, localizado na área de recirculação do tanque misturador.

A linha original de recirculação é mostrada na figura 4.1.



Figura 4.1: Linha de recirculação original

A figura 4.2 mostra a adaptação do sistema de aquecimento na linha de recirculação. Dentre os componentes utilizados para essa implementação, os mais importantes são mencionados abaixo:

- 4m de tubulação de 12"
- 8m de tubulação de 3"
- Flanges de 3" e 7"
- 1 válvula de alívio de pressão de 5bar



Sistema de aquecimento com resistências de imersão



Figura 4.2: Adjunção do sistema de aquecimento na linha de recirculação

## 4.2 Montagem elétrica

Para fornecer energia às resistências de forma controlada e independente, foram necessários dois quadros elétricos; o quadro de comando e o quadro de controle.

O quadro de comando está formado por doze disjuntores de 16A, que farão um acionamento manual de forma individual a cada resistência; já o quadro de controle está projetado com quatro disjuntores de maior potência ( 50A ) e cada um deles fará o controle de três resistências de forma simultânea (as resistências são ligadas em paralelo) formando assim quatro grupos, cada um deles de três resistências. Uma sub-estação fornecerá o total de energia necessária.

A figura 4.3 mostra como foi feita as ligações do sistema.

Aspectos importante na montagem elétrica.

- O fornecimento de energia ao sistema é trifásico.
- Foi utilizada uma configuração estrela para as ligações das resistências.
- Consumo de potencia total é de  $100Kw$ .
- Cada resistência de imersão tem um consumo de  $8Kw$ .
- Os dois quadros contam com um sistema de barramento.
- Foram utilizados quatro relés de estado sólido para gerar interação de controle ao fluxo de energia fornecida às resistências.

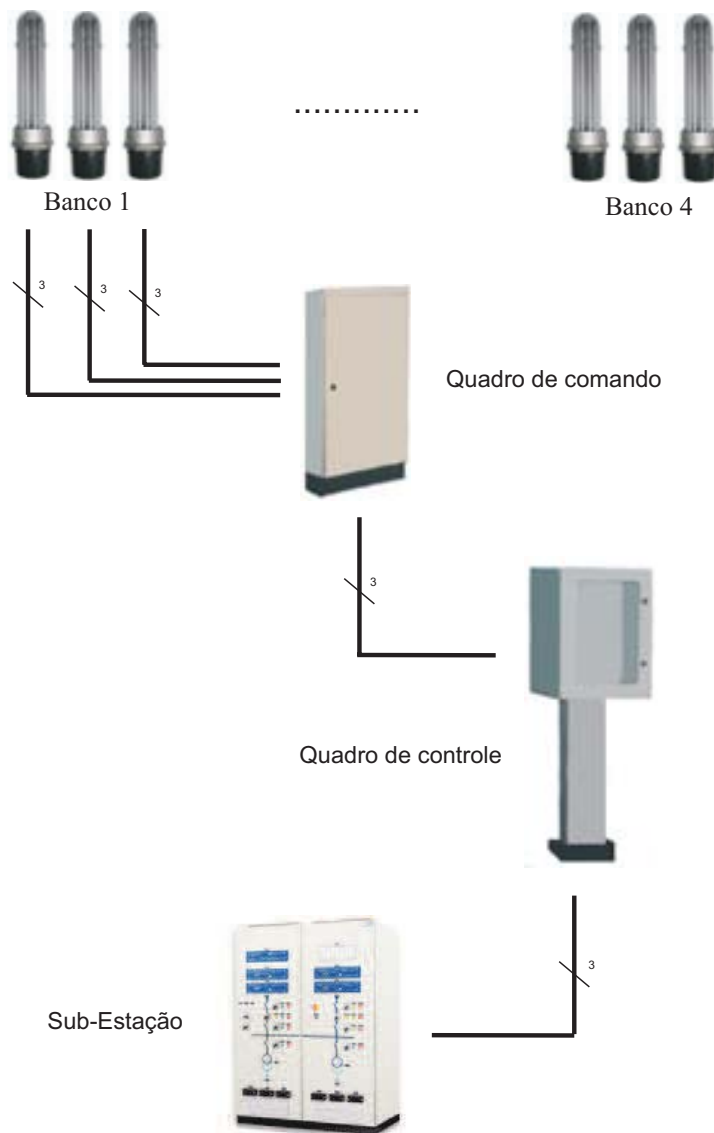


Figura 4.3: Esquema elétrico

### 4.3 Comunicação com o sistema já existente

Neste item, será discutido como se dará a comunicação de dados do sistema de aquecimento com a sala de controle (onde é feita a monitoração do laboratório).

Para adquirir a informação correta do sistema, foi utilizado um controlador de processos [Novus n.d.], o qual tem como principais características: 4 saídas *On/Off*, uma saída de controle PID com auto-sintonia, uma entrada análoga, comunicação RS-485 e utiliza o protocolo *Modbus*.

A transferência dessas variáveis para a sala de controle será feita utilizando comunicação RS-485, que é um meio muito empregado na indústria; a aquisição de dados é distribuída pelo protocolo *Modbus*, que tem como objetivo estabelecer uma comunicação *mestre-escravo/cliente-servidor* entre dispositivos inteligentes.

A comunicação será feita como é mostrado na figura 4.4.

Aspectos importantes na comunicação com o sistema já existente:

- O controlador de processos e os relés de estado sólido, estarão localizados no quadro de controle.
- O sensor PT100 é utilizado para adquirir dados do sistema.
- Inclusão de estratégias de controle para o sistema de aquecimento na lógica *ladder* já existente do laboratório.
- Inclusão da variável de controle (Temperatura), no sistema supervisório *ELIPSE/SCADA*, Ver figura 4.5.



Figura 4.4: Esquema de comunicação



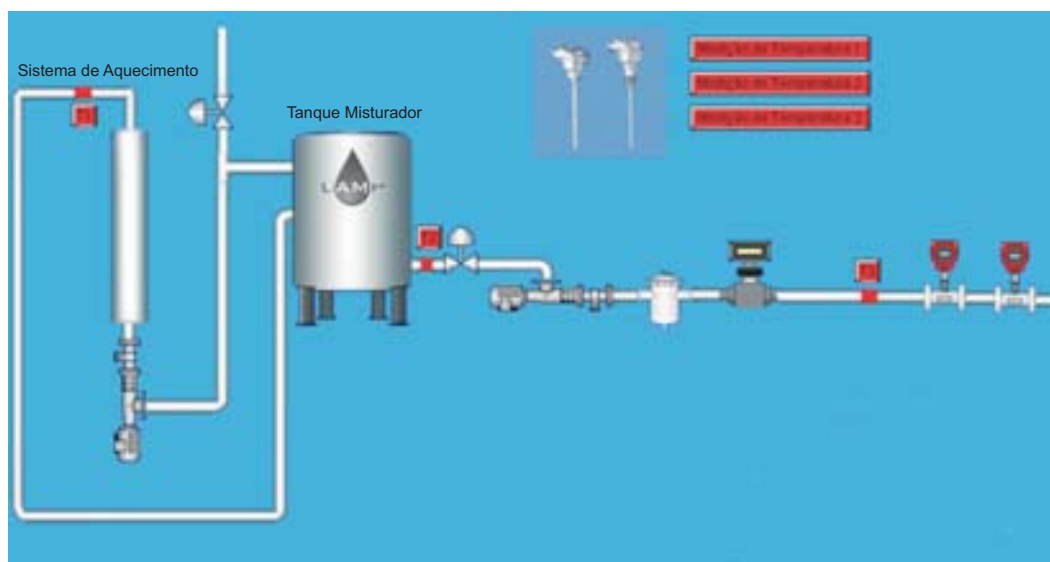


Figura 4.5: Inclusão do sistema de aquecimento ao supervisorio do LAMP

---

# Capítulo 5

## Controle do Sistema de Aquecimento

---

Sistemas de controle tradicionais (P, PD, PID, etc) são o resultado de décadas de pesquisa, sendo um dos enfoques utilizado a obtenção de um modelo matemático idealizado do processo a ser controlado. Geralmente são feitas restrições, como por exemplo, linearizar o processo, ou seja, variações nas entradas produzem variações proporcionais nas saídas. O controle *fuzzy* oferece uma alternativa para processos que não têm modelagem matemática ou são complexos (não lineares). Nesse caso, o sistema baseado em regras empíricas pode ser mais eficaz que outro baseado em expressões puramente analíticas [Shaw & Simões 1999].

Neste capítulo, apresenta inicialmente uma abordagem teórica dos tipos de controle tradicionais, lógica *fuzzy* e controle *fuzzy*, para seguidamente descrever como foram feitos o controle *fuzzy*-PI e a implementação do sistema de aquecimento em pequena escala.

### 5.1 Controles tradicionais

O erro em sistemas de controle é definido como a diferença entre a referência, também chamada de saída desejada ou *set point*, e a saída real da planta ou processo [Berto et al. n.d.]. Para um dado instante  $t$ , seja  $r(t)$  a referência e  $y(t)$ , a saída da planta, então o erro  $e(t)$  é dado por:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (5.1)$$

É interessante apresentar alguns conceitos da teoria de controle relativos ao controlador PID, dos mais utilizados na indústria para o controle de temperatura [Bazanella & da silva 2005].

#### 5.1.1 Controlador PID

A ação proporcional consiste em aplicar à planta um sinal de controle  $u(t)$  proporcional à amplitude do sinal de erro  $e(t)$  [Pereira & Shirahige n.d.].

Assim, se o valor da saída do processo é menor (maior) que o desejado, então o sinal de controle a ser aplicado deverá ser positivo (negativo) e proporcional à magnitude do erro. A ação proporcional é dada pela equação 5.2, na qual  $K_p$  é o ganho ou constante de proporcionalidade.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (5.2)$$

Quanto maior for o ganho  $K_p$ , menor será o erro em regime e, conseqüentemente, melhor será a exatidão do sistema em malha fechada. Entretanto não é possível zerar o erro e, por outro lado, um aumento excessivo de  $K_p$  torna o comportamento transitório do sistema mais oscilatório, no limite, levando o sistema à instabilidade [Bazanella & da silva 2005].

A ação de controle integral consiste em aplicar à planta um sinal de controle  $u(t)$  proporcional à integral do sinal de erro  $e(t)$ . Na equação 5.3, é definido o ganho da ação integral  $K_i$ , onde  $\tau_i$  é a constante de tempo integral.

A ação integral é dada pela equação 5.4.

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (5.3)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5.4)$$

A ação integral tem função “armazenadora de energia”, pois  $u(t)$  é igual a um valor proporcional à “energia armazenada” até o instante  $t$ . Esse fato permite ao sistema em malha fechada manter o erro nulo em regime permanente [Bazanella & da silva 2005].

Portanto a ação integral está diretamente ligada à melhoria da precisão do sistema, mas o uso isolado da ação integral, em geral, não é aplicado, pois introduz um pólo na origem, tendendo a piorar a estabilidade relativa do sistema em malha fechada. O princípio estrutural de um PI convencional é mostrado na figura 5.1,

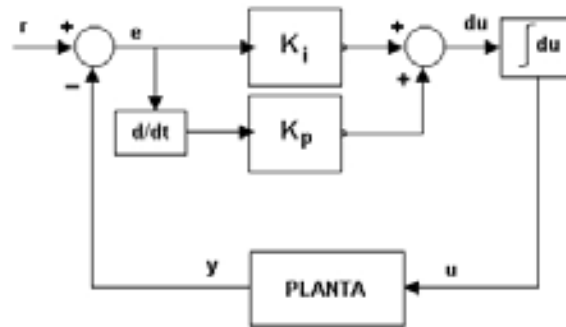


Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema de controle PI

A ação de controle derivativo corresponde à aplicação de um sinal de controle proporcional à derivada do sinal de erro  $e(t)$ :

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.5)$$

Nas tabelas 5.1e 5.2 é mostrado um resumo das equações usadas no projeto de controladores convencionais, incluindo as equações discretizadas, práticas para a implementação em computador digital. Onde:

- FT significa Função de Transferência.
- $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  são os ganhos das ações de controle.
- $T_s$  é o período de amostragem.
- $-N$  é um pólo para limitar o ganho de alta frequência da ação derivativa.
- $k$  é o instante de amostragem e indica a iteração  $k = 1, 2, 3, \dots$
- $e(k)$  é o erro no instante  $k$ .
- $u_p(k)$ ,  $u_i(k)$ ,  $u_d(k)$  indicam a parcela de cada ação no instante  $k$  na composição do sinal de controle; por fim.
- $u(k)$  é o sinal de controle.

Ação	Proporcional (P)	Integral (I)	Derivativa (D)
Equação	$u_p(t) = K_p e(t)$	$u_i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$	$u_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$
FT no domínio S	$\frac{U_p(s)}{E(s)} = K_p$	$\frac{U_i(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$	$\frac{U_d(s)}{E(s)} = \frac{K_d s}{1 + \frac{s}{N}}$
Aproximação para derivada	Não precisa	Aproximação de Euler ( $s = \frac{z-1}{T_s}$ )	Aproximação para trás ( $s = \frac{z-1}{zT_s}$ )
FT no domínio Z	$\frac{U_p(z)}{E(z)} = K_p$	$\frac{U_i(z)}{E(z)} = \frac{K_i T_s z^{-1}}{1 - z^{-1}}$	$\frac{U_d(z)}{E(z)} = \frac{K_d (1 - z^{-1})}{T_s + \frac{1-z^{-1}}{N}}$
Equação discretizada (anti-transformada Z)	$u_p(k) = K_p e(k)$	$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i T_s e(k-1)$	$u_d(k) = \frac{u_d(k-1)}{NT_s + 1} + \frac{K_d N [e(k) - e(k-1)]}{NT_s + 1}$

Tabela 5.1: Equações usadas no projeto de controladores digitais

Controladores práticos	Computação do sinal de controle
P	$u(k) = u_p(k)$
PI	$u(k) = u_p(k) + u_i(k)$
PD	$u(k) = u_p(k) + u_d(k)$
PID	$u(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k)$

Tabela 5.2: Sumário das equações usadas na implementação computacional de controladores convencionais P, PI, PD e PID

## 5.2 Lógica Fuzzy

A palavra *fuzzy* significa indistinto, vago ou nebuloso; logo a lógica *fuzzy* parece implicar uma metodologia imprecisa, que seria útil somente quando a precisão não é necessária ou importante. Contudo isso não é verdade, pois a lógica fuzzy pode solucionar complexos problemas de controle, tais como movimento de um braço robótico [Pires & Júnior 2003], [Ponce et al. 2007], controle de processos químicos, controle de processos elétricos [Leclercq et al. 2003], sistemas de freio antiderrapante e controle de transmissão automobilística com maior precisão e exatidão que as tradicionais técnicas de controle [Bazanella & da silva 2005].

Em geral, operadores humanos experientes são capazes de controlar processos demasiadamente complexos, baseados em informações imprecisas e aproximadas, bem como por suas próprias observações acerca desses processos. A estratégia adotada pelos operadores, apesar de ter natureza imprecisa, é passível de ser expressa em termos lingüísticos.

Assim, o papel da lógica *fuzzy* é traduzir um conjuntos de regras lingüísticas em termos matemáticos. Desse modo, um algoritmo de controle fuzzy realiza a inferência com base em regras do tipo: *Se temperatura = BAIXA, então aquecimento = ALTO* [Miranda 2000].

Formalmente, um conjunto *fuzzy*  $A$  do universo de discurso  $U$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$ , a qual associa cada elemento  $x$  de  $U$  ao valor ou grau  $\mu_A(x)$  relativo à pertinência de  $x$  em  $A$  [Baumkarten et al. 2006].

Portanto:

- $\mu_A(x) = 1 \Rightarrow x$  é totalmente compatível com  $A$ .
- $\mu_A(x) = 0 \Rightarrow x$  é incompatível com  $A$ .
- $0 < \mu_A(x) < 1 \Rightarrow x$  é parcialmente compatível com  $A$ , com grau  $\mu_A(x)$ .

Então, um conjunto  $A$  da teoria clássica de conjuntos pode ser entendido como um conjunto *fuzzy* peculiar, chamado de *crisp*, para o qual  $\mu_A : U \rightarrow \{0; 1\}$ , isto é, a pertinência de tipo “tudo ou nada” e não gradual.

Nas figuras 5.2 e 5.3 retratam-se os conceitos supracitados com relação à variável  $x$  (temperatura em graus Celsius).

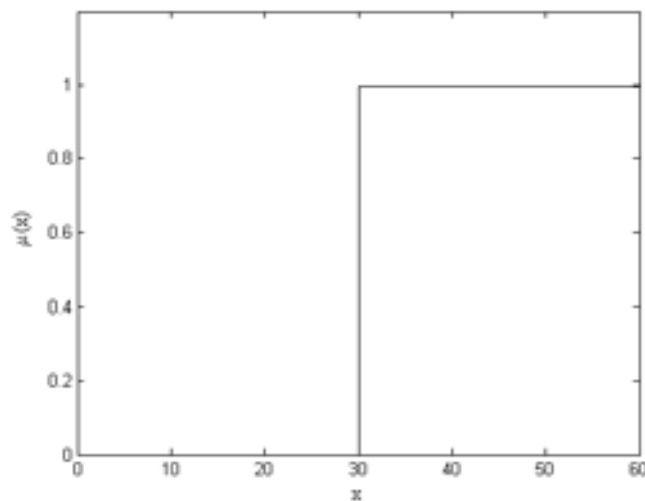


Figura 5.2: Função de pertinência de um conjunto *crisp* ALTA

No caso da figura 5.2, uma temperatura igual ou superior a  $30^{\circ}\text{C}$  é considerada alta. Note, porém, que uma temperatura de  $29,99^{\circ}\text{C}$  não é alta. A conclusão paradoxal obtida decorre do descompasso que existe entre o que acontece no mundo real e a visão bivalente enraizada na teoria clássica de conjuntos. Por outro lado, a lógica *fuzzy* trabalha com verdades parciais, levando em conta a graduação que existe na natureza, ou seja, sem esquecer o que existe entre o quente e o frio, o claro e o escuro, o sim e o não. Desse modo, pode ser visto na figura 5.3 que a temperatura de  $29,99^{\circ}\text{C}$  seria classificada como alta com grau de pertinência de 49,95%.

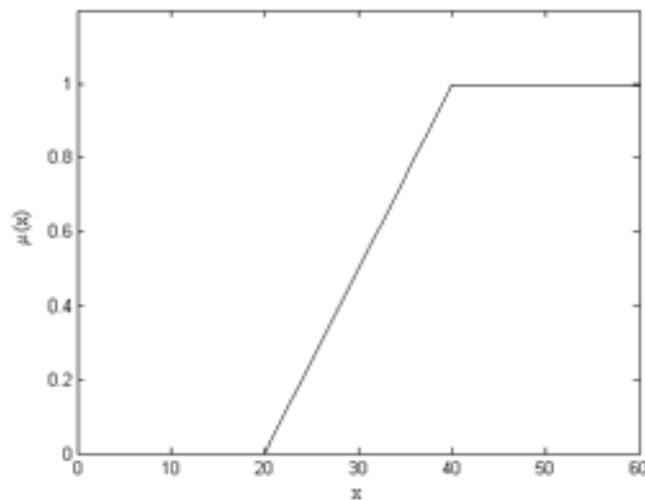


Figura 5.3: Função de pertinência de um conjunto *Fuzzy* ALTA

A título de ilustração, considere-se um problema de controle, em que se pretende climatizar um ambiente a uma temperatura  $x$  de  $20^{\circ}\text{C}$ . Como solução, pode-se adotar um controlador *crisp* incorporado a um condicionador de ar, seguindo as seguintes regras:

- Se  $x > 20$ , então 1 (liga);
- Se  $x \leq 20$ , então 0 (desliga).

Facilmente, nota-se que, mesmo solucionando o problema, haveria um funcionamento inadequado e prejudicial ao equipamento, pois, se a temperatura ficasse flutuando em torno de  $20^{\circ}\text{C}$ , por exemplo, entre  $19$  e  $21^{\circ}$ , o mesmo seria ligado e desligado excessivamente. Na prática, o problema seria parcialmente resolvido aplicando-se uma histerese.

Se é possível variar a intensidade de esfriamento através de outras técnicas de controle, como o uso de um controlador PI (Proporcional Integrativo), pode-se resolver o problema de forma mais elegante. Contudo, devido à planta (modelo matemático do ambiente no qual se deseja estabilizar a temperatura) ser inerentemente não-linear, e possivelmente variante no tempo, um controlador *fuzzy* poderia aumentar a qualidade, eficiência e confiabilidade do sistema.

### 5.2.1 Operações com Conjuntos *Fuzzy*

Na teoria de conjuntos *fuzzy*, a interseção é implementada por uma família de operadores chamados de t-normas, enquanto que a união é implementada por outra família de operadores chamados de t-conormas.

Dada uma função  $f : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ , ela é dita comutativa, associativa e monotônica se satisfaz, respectivamente, às seguintes propriedades, para  $\forall a, b \in [0, 1]$ :

- Comutatividade:  $f(a, b) = f(b, a)$ .
- Associatividade:  $f(a, f(b, c)) = f(f(a, b), c)$ .
- Monotonicidade:  $f(a, b) \leq f(c, d)$  se  $a \leq c$  e  $b \leq d$ .

Um operador  $\top : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$  é uma t-norma se é comutativo, associativo, monotônico e verifica a seguinte propriedade, para  $\forall a \in [0, 1]$ :  $\top(a, 1) = a$  (elemento neutro).

De modo semelhante,  $\perp : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$  é uma t-conorma se é comutativo, associativo, monotônico e verifica a seguinte propriedade, para  $\forall a \in [0, 1]$ :  $\perp(a, 0) = a$  (elemento neutro).

O principal operador de negação é dado por  $\neg : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ , tal que  $\neg(a) = 1 - a$ . Uma t-norma e uma t-conorma são duais em relação a uma operação de negação se satisfazem as regras de De Morgan:

- $\neg(\top(a, b)) = \perp(\neg a, \neg b)$ ;
- $\neg(\perp(a, b)) = \top(\neg a, \neg b)$

Na tabela 5.3, são indicadas as principais t-normas e t-conormas duais.

Nome	t-norma	t-conorma
Zadeh	$\min(a, b)$	$\max(a, b)$
Probabilística	$ab$	$a + b - ab$
Lukasiewicz	$\max(a + b - 1, 0)$	$\min(a + b, 1)$
Weber	$a$ , se $b = 1$ $b$ , se $a = 1$ $0$ , senão	$a$ , se $b = 0$ $b$ , se $a = 0$ $1$ , senão

Tabela 5.3: Principais t-normas e t-conormas

Na figura 5.4, são exemplificadas as operações lógicas E (interseção) e OU (união) de Zadeh, t-norma e t-conorma, respectivamente.

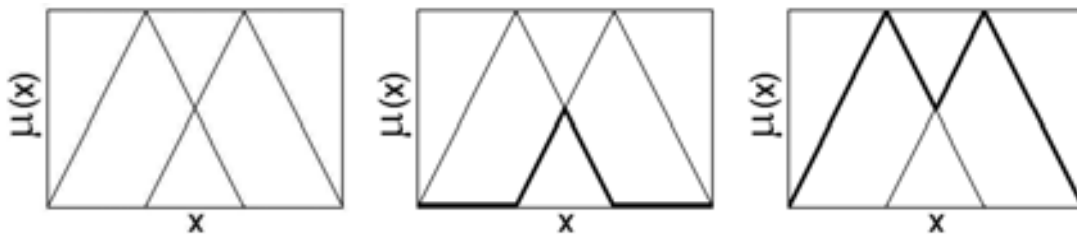


Figura 5.4: Representação gráfica dos operadores lógicos de Zadeh  
Da esquerda para direita, tem-se: duas funções de pertinência; operação E (t-norma de Zadeh); e operação OU (t-conorma de Zadeh).



Os operadores de implicação  $I : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$  são usados na construção de regras de inferência do tipo *Se (premissa), então (conclusão)*. Considerando dois conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$ , tais que  $\mu_A : a \mapsto [0, 1]$  e  $\mu_B :$

$b \mapsto [0, 1]$ , a relação  $A \rightarrow B$  é expressa como:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)) = I(a, b) \quad (5.6)$$

Na tabela 5.4, são mostrados os principais operadores de implicação.

Nome	Implicação
Kleene-Dienes	$\max(1 - a, b)$
Lukasiewicz	$\min(1 - a + b, 1)$
Rescher-Gaines	1, se $a \leq b$ 0, senão
Reichenbach	$1 - a + ab$
Zadeh-Wilmott	$\max(1 - a, \min(a, b))$
Mamdani	$\min(a, b)$
Larsen	$ab$

Tabela 5.4: Principais operadores de implicação

### 5.2.2 Incertezas

Quando os conceitos de lógica *fuzzy* são aplicados para solucionar um certo problema, há basicamente três tipos de incertezas envolvido: estocástica, informal e lingüística. A incerteza de natureza estocástica decorre da probabilidade de ocorrência de um dado evento; a informal advém da falta de informação ou do pouco conhecimento que se tem sobre uma situação específica. Já a lingüística é resultante da imprecisão e subjetividade da linguagem, pois termos como “muito quente”, “moderado” e “frio”, por exemplo, têm significados dependentes do contexto.

## 5.3 Controlador *Fuzzy*-PI

O controlador *fuzzy*-PI é baseado no mesmo princípio estrutural de um PI convencional, cuja ação de controle tende a eliminar o erro em regime permanente. Ambos possuem 2 entradas e 1 saída, sendo uma entrada o sinal de erro e a outra sua taxa de variação, cuja ação de controle tende a zerar o erro em regime permanente.

Embora tenham muitas semelhanças, no controlador *fuzzy*-PI são as regras que avaliam o sinal de erro, a diferença entre o valor medido e a referência, e sua tendência, de modo

a incrementar o sinal de controle. Assim, com base nas regras, o controlador *fuzzy*-PI pode incorporar estratégias de controle não-linear; este é seu grande mérito, pois ele não tem um ponto de operação específico [de Medeiros et al. 2006].

Na figura 5.5, pode-se ver a estrutura do controlador e o fluxo de sinais. Note que o esquema de controle é composto de três passos principais e bastante simples. No primeiro passo, um sinal de referência ( $r$ ) é comparado com a saída da planta ou processo ( $y$ ), gerando um erro ( $e$ ); esse sinal e sua taxa de variação são injetados no controlador via interface de fuzzificação; a partir desse ponto, as variáveis passam para o domínio *fuzzy*. No segundo, as regras são avaliadas para gerar uma correção incremental no sinal de controle ( $du$ ). No terceiro, essa variável é passada para o domínio real via interface de defuzzificação. Em seguida, passa por um integrador que gera o sinal de controle ( $u$ ) para a planta [Rêgo 2002].

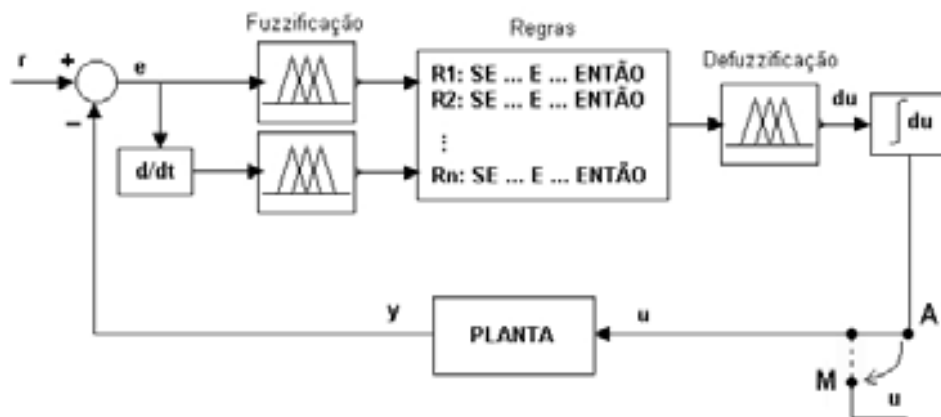


Figura 5.5: Diagrama de blocos do sistema de controle PI

## 5.4 Estrutura de um Controlador *Fuzzy*-PI

A estratégia de controle *fuzzy*-PI baseia-se na experiência do operador através de expressões linguísticas que são integradas na chamada base de regras do controlador. Um controlador *fuzzy*-PI é composto essencialmente de três estágios: fuzzificação, inferência e defuzzificação.

Uma estrutura determinística de um controlador *fuzzy* é mostrada na figura 5.6. É importante ressaltar que diversas variações nessa estrutura básica são propostas na literatura; contudo esse modelo é genérico o suficiente para se ter uma idéia do fluxo da informação.

Sucintamente, a função de cada bloco é relatada a seguir:

- Planta - é o processo que se deseja controlar.

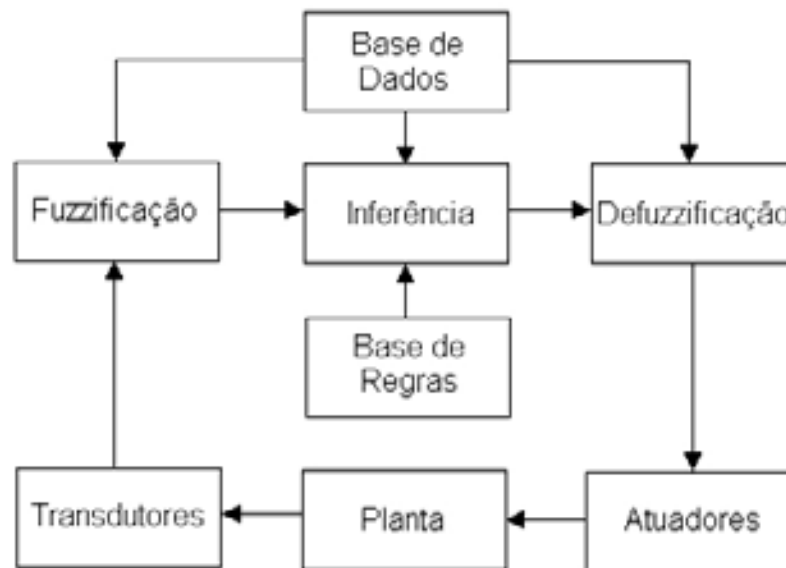


Figura 5.6: Estrutura de um controlador *Fuzzy*

- Transdutores - geram sinais de tensão proporcionais a grandezas físicas (variáveis de saída) características da planta.
- Base de dados - armazena as definições sobre discretização, normalização dos universos de discurso e funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy*.
- Base de regras - contém os objetivos e a estratégia de controle, utilizado por especialistas na área, por meio de instruções linguísticas.
- Fuzzificação - converte as variáveis que caracterizam o estado do sistema do domínio real/discreto para o domínio *fuzzy*.
- Inferência - é a lógica de tomada de decisões que agrega a contribuição das regras para gerar as ações de controle.
- Defuzzificação - converte as ações de controle do domínio *fuzzy* para o domínio real/discreto.
- Atuadores - conformam ações de controle em variáveis de entrada, características da planta.

### 5.4.1 Fuzzificação

Fuzzificação é o processo de mapeamento de determinada variável do domínio dos números reais para o domínio *fuzzy*. Cada variável de entrada recebe uma atribuição linguística qualitativa, definida por funções de pertinência do universo de discurso correspondente.

Nesse estágio, as grandezas físicas medidas por transdutores e digitalizadas via conversor analógico-digital podem sofrer um ajuste de escala para serem transportadas a universos de

discurso definidos. Em seguida, a interface de fuzzificação usa funções de pertinência contidas na base de dados, associando a cada variável graus de pertinência relativos aos conjuntos *fuzzy*. Portanto esse processo pode ser entendido como um pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada.

Considere o universo de discurso mostrado na figura 5.7, com 5 conjuntos *fuzzy* usados, por exemplo, para avaliar o erro de temperatura em um determinado sistema de controle. Cada conjunto é nomeado com um termo linguístico apropriado.

- **ENG**, Erro Negativo Grande.
- **ENM**, Erro Negativo Mediano.
- **EZ**, Erro Zero.
- **EPM**, Erro Positivo Mediano.
- **EPG**, Erro Positivo Grande.

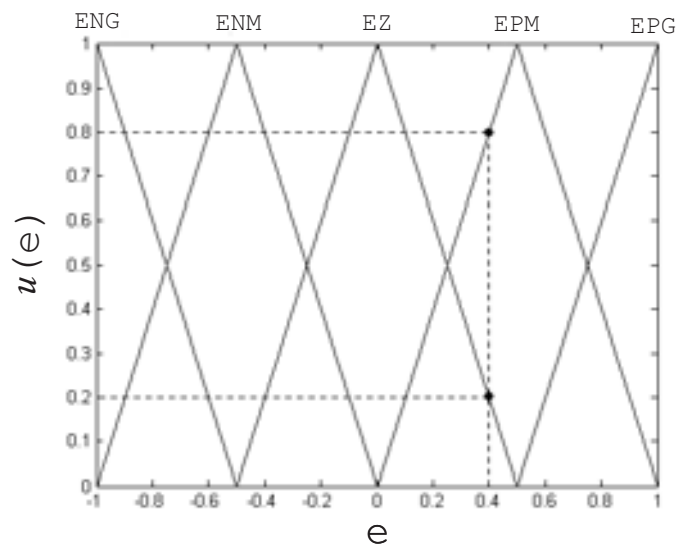


Figura 5.7: Exemplo de fuzzificação de uma variável de entrada  $e$ (erro)

Em um dado instante, uma entrada  $e = 0,4$  está associada somente a dois conjuntos, **EZ** e **EPM**, com graus de pertinência iguais a 0,2 e 0,8, respectivamente.

### 5.4.2 Inferência

O processo de inferência utiliza a base de dados e de regras segundo uma lógica de tomada de decisões para computar a ação de controle. É interessante notar que a base de conhecimento (base de dados e de regras) contém as definições numéricas necessárias às funções de pertinência e a estratégia de controle usada por um operador experiente.

A lógica de tomada de decisões, incorporada à estrutura de inferência, utiliza implicações *fuzzy* para simular o raciocínio do operador e gerar a ação de controle conveniente, a partir de uma combinação de condições de entrada. A avaliação das regras por meio das implicações pode ser resolvida por processamento paralelo, através de *hardware*, ou por processamento seqüencial.

Em um controlador *fuzzy*, baseado em regras, o processo de inferência pode ser dividido nas três etapas seguintes:

1. Determinação do grau de pertinência global da premissa de cada regra.
2. Determinação da conclusão, para cada regra, em função do grau de pertinência e em função de seu peso.
3. União das contribuições das regras, a fim de determinar a ação de controle global.

O processo de inferência é bastante simples; basta seguir os passos já mencionados. Por exemplo, considere-se um controlador de duas entradas ( $e$  e  $de$ ) e uma saída ( $du$ ) constituído de apenas duas regras:

1. SE ( $e = EZ$ ) E ( $de = EZ$ ) ENTÃO  $du = EZ$ .
2. SE ( $e = EPM$ ) E ( $de = EZ$ ) ENTÃO  $du = ED$ ;

Supondo que em um dado instante se tenha  $e = 0,4$  e  $de = 0,3$ , então o processo de inferência *fuzzy* pode ser retratado graficamente pelas figuras 5.8, 5.9 e 5.10. Nas figuras 5.8 e 5.9, é mostrada a etapa de fuzzificação, seguida da aplicação das duas regras de controle, usando-se o operador de implicação de *Mamdani* (tabela 5.4:  $\min(a,b)$ ) para determinar a conclusão de cada regra. Na figura 5.10, tem-se a agregação das contribuições individuais de cada regra pela t-conorma de *Zadeh* (tabela 5.3). Esse processo de inferência é também conhecido como método *min-max*. A ação global de controle é calculada na etapa de defuzzificação, a partir do grau de pertinência associado a cada conjunto do universo de discurso da saída. Para esse exemplo, o valor defuzzificado da saída pelo método do centróide está indicado com uma seta na figura 5.10 ( $du = -0,32$ ).

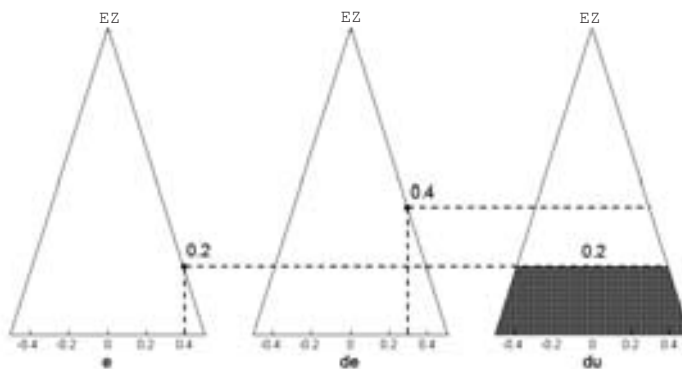


Figura 5.8: Aplicação da regra 1.

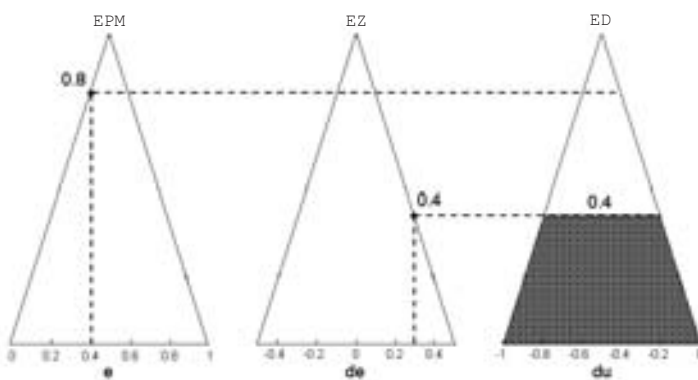


Figura 5.9: Aplicação da regra 2.

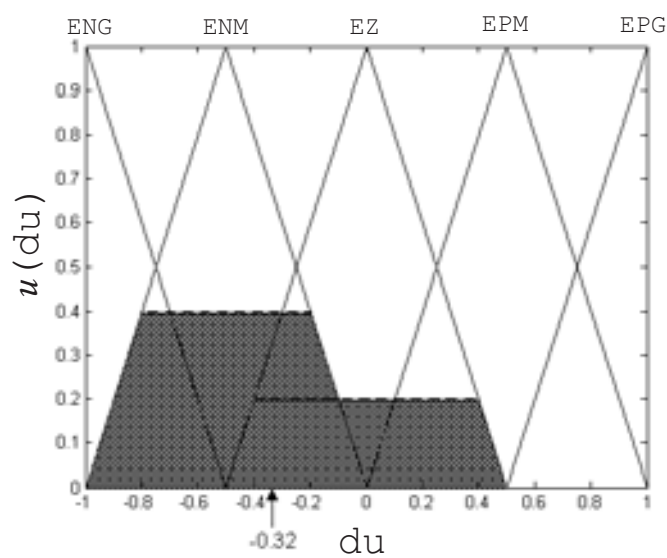


Figura 5.10: Resultado da união das regras 1 e 2.

### 5.4.3 Regras *Fuzzy*

As técnicas de controle *fuzzy* encontradas na literatura diferem quanto à forma de representação dos termos das premissas, quanto à representação das ações de controle e quanto aos operadores utilizados na implementação do controlador. E, dentre as principais abordagens, encontram-se os controladores *fuzzy*, baseados em regras, os paramétricos e os baseados em equações relacionais.

No entanto, no modelo geral, a conclusão de cada regra especifica um rótulo ou conjunto de saída. Em seguida, uma ação de controle global é computada com base nas conclusões aceitáveis.

Definindo:

$m$ , número total de regras;

$R_j$ , regra  $j$  ( $1 \leq j \leq m$ );

$n$ , o número de variáveis de estado;

$x_i$ , a  $i$ -ésima variável de estado;

$A_{ij}$ , o conjunto *fuzzy* (ou função de pertinência rotulada, por exemplo: *POSITIVO GRANDE*, *ZERO*, *NEGATIVO PEQUENO*, ...) que caracteriza  $x_i$  para a regra  $j$ ;

$y_j$ , o  $j$ -ésimo conseqüente ou contribuição da regra  $j$  para o resultado global;

$C_j$ , o conjunto *fuzzy* (ou função de pertinência rotulada) que caracteriza  $y_j$  para a regra  $j$ .

Assim, as regras são codificadas como:

$$R_j : SE \ x_1 = A_{1j} \ E \ \dots \ E \ x_i = A_{ij} \ \dots \ E \ x_n = A_{nj} \ ENTÃO \ y_j = C_j \quad (5.7)$$

O processamento é realizado da seguinte maneira:

1. Seja  $x_i$  uma variável de estado no universo de discurso  $X_i$ , a realização de  $x_i$  é definida como o valor  $x_i^*$  que assume  $X_i$  em um dado momento, ou seja, aplica-se a fuzzificação das variáveis;
2. Cálculo do grau de pertinência da  $i$ -ésima premissa da  $j$ -ésima regra  $\alpha_{ij}$  para  $x_i^*$ , seja  $1 \leq i \leq n$  e  $1 \leq j \leq m$ ;

$$\alpha_{ij} = \mu_{A_{ij}}(x_i^*) \quad (5.8)$$

3. Com as premissas de cada regra avaliadas, o cálculo do grau de pertinência global  $\alpha_j$  da regra  $R_j$ , segundo uma t-norma é:

$$\alpha_j = \top(\alpha_{1j}, \dots, \alpha_{nj}) \quad (5.9)$$

4. O  $\alpha_j$  obtido é relacionado ao respectivo conjunto  $C_j$  do conseqüente da regra  $R_j$  para dar origem ao conjunto  $C'_j$ , através do operador de implicação  $I$ ;

$$\mu_{C'_j}(y) = I(\alpha_j, \mu_{C_j}(y)), \forall y \in Y \quad (5.10)$$

5. Uma t-conorma integraliza a contribuição das várias regras acionadas em um único conjunto *fuzzy*  $C'$ ;

$$\mu_{C'}(y) = \perp(\mu_{C'_1}(y), \dots, \mu_{C'_m}(y)), \forall y \in Y \quad (5.11)$$

6. Por fim, aplica-se um método de defuzzificação da variável  $y$ , dada a função  $\mu_{C'}(y)$ .

#### 5.4.4 Defuzzificação

Quando é preciso apenas uma saída *fuzzy* a ser interpretada de modo qualitativo, a defuzzificação é desnecessária, mas na maioria dos casos precisa-se de um valor discreto utilizável como sinal de controle no mundo real; então a conversão do sinal de saída *fuzzy* para um valor *crisp* é o objetivo desse estágio.

Os métodos de defuzzificação mais usados são:

- Centro da Área (COA).
- Centro dos Máximos (COM).
- Média do Máximo (MOM).

#### Defuzzificação Centro da Área (COA)

O método COA é também conhecido como *método do centróide*, pois calcula o centro da área que representa o termo de saída *fuzzy* composto pela união de todas as regras.

O cálculo do centróide é determinado pela equação 5.12.

$$du^* = \frac{\sum_{i=1}^m du_i \bar{\mu}(du_i)}{\sum_{i=1}^m \bar{\mu}(du_i)} \quad (5.12)$$

onde  $m$  é o número de funções de pertinência,  $\bar{\mu}(du_i)$  é a área da função de pertinência  $i$  modificada pelo resultado da inferência, e  $du_i$  é posição do centróide da função de pertinência  $i$ ,  $du^*$  é o valor defuzzificado.

Para o exemplo da figura 5.10, tem-se:



$$du^* = \frac{-0,5(0,32) + 0(0,18)}{0,32 + 0,18} = -0,32 \quad (5.13)$$

### Centro dos Máximos (COM)

No método COM, apenas os picos das funções de pertinência são usados, ignorando as áreas e considerando as contribuições de múltiplas regras, o que o torna bastante rápido computacionalmente. Esse método é também conhecido como *método das alturas*, pois a defuzzificação é obtida pela média ponderada dos máximos.

O cálculo é realizado pela equação 5.14.

$$du^* = \frac{\sum_{i=1}^m du_i \mu(du_i)}{\sum_{i=1}^m \mu(du_i)} \quad (5.14)$$

onde  $m$  é o número de funções de pertinência, cada  $\mu(du_i)$  indica o grau de pertinência no ponto de máximo da função de pertinência  $i$ , e  $du_i$  é o valor discreto de  $du$  nesse ponto de máximo,  $du^*$  é o valor defuzzificado.

Para o exemplo da figura 5.10, tem-se:

$$du^* = \frac{-0,5(0,4) + 0(0,2)}{0,4 + 0,2} = -0,33 \quad (5.15)$$

No caso em que se utiliza o método COM, geralmente os conjuntos *fuzzy* da variável de saída são *fuzzy tons*, funções do tipo impulso unitário, porque, se fossem usadas funções com quaisquer outras formas, apenas seus pontos de máximo seriam armazenados e usados no processamento.

Quando não há restrição, talvez o método COM, por sua simplicidade, seja o mais aconselhado, pois, no projeto de um controlador *fuzzy*, encontram-se muitas heurísticas, como quantidade, forma e sobreposição de conjuntos *fuzzy*, além da possibilidade de incluir, excluir ou atribuir pesos às regras [Shaw & Simões 1999]. De fato, não há necessidade de se investir tanto em um método de defuzzificação mais complexo para fins de ajuste. Se for o caso, é melhor trabalhar com as outras heurísticas já mencionadas.

### Média do Máximo (MOM)

No método MOM, após a inferência, o valor defuzzificado da saída é aquele cujo grau de pertinência é o maior. No caso de haver empate, ou quando a função de pertinência tem mais de um máximo, é realizada a média aritmética de todos máximos.

O cálculo é realizado pela equação 5.16.

$$du^* = \sum_{i=1}^N \frac{du_i}{N} \quad (5.16)$$

Onde cada  $du_i$  é o  $i$ -ésimo elemento do universo de discurso, em que a de função de pertinência tem valor máximo,  $N$  é o número total desses elementos e  $du^*$  é o valor defuzzificado.

Para o exemplo da figura 5.10, tem-se:

$$du^* = \frac{-0,5}{1} = -0,5 \quad (5.17)$$

O método MOM, ao contrário dos métodos COA e COM, é descontínuo, pois uma mudança muito pequena de uma variável de entrada pode causar uma alteração abrupta na variável de saída. Entretanto é importante ressaltar que um integrador colocado entre o controlador e o processo pode impedir que o sinal de controle dê grandes saltos. É o que ocorre em controladores *fuzzy*-PI.

## 5.5 Sistema de aquecimento em pequena escala

O objetivo deste item é mostrar as considerações tomadas para implementar o sistema de aquecimento em pequena escala.

A figura 5.11 especifica as ligações do sistema de aquecimento em pequena escala, interagindo com o controle supervisionado.

Seguidamente será feita uma descrição de cada etapa do sistema em pequena escala. O controlador de processos utilizado tem três saídas de controle com acionamento relé aberto e fechado; ou seja, controle *On/Off*, que são as saídas 2, 3 e 4 do controlador de processos. Para este trabalho eles são utilizados como alarmes do sistema. Por meio da saída 1, são feitos os controles PID ( do controlador de processos ) e *Fuzzy-PI*, (o qual foi implementado). As saídas do controlador de processos são ligados aos quatro relés de estado sólido, os quais farão controle de energia para os quatro bancos de resistências do sistema de aquecimento. Quatro lâmpadas incandescentes simularão os quatro bancos de resistências do sistema.

Para adquirir dados do sistema em pequena escala ao controlador de processos, foi utilizado um termopar tipo *K*. Para que o sistema seja mais real, o termopar fica no meio das quatro lâmpadas, como é especificado na figura abaixo, as quais estarão cobertas por uma caixa de madeira para manter o calor. Foi utilizado um conversor RS485 - RS232 para a comunicação entre o controlador de processos e o supervisor, implementado em Labview.

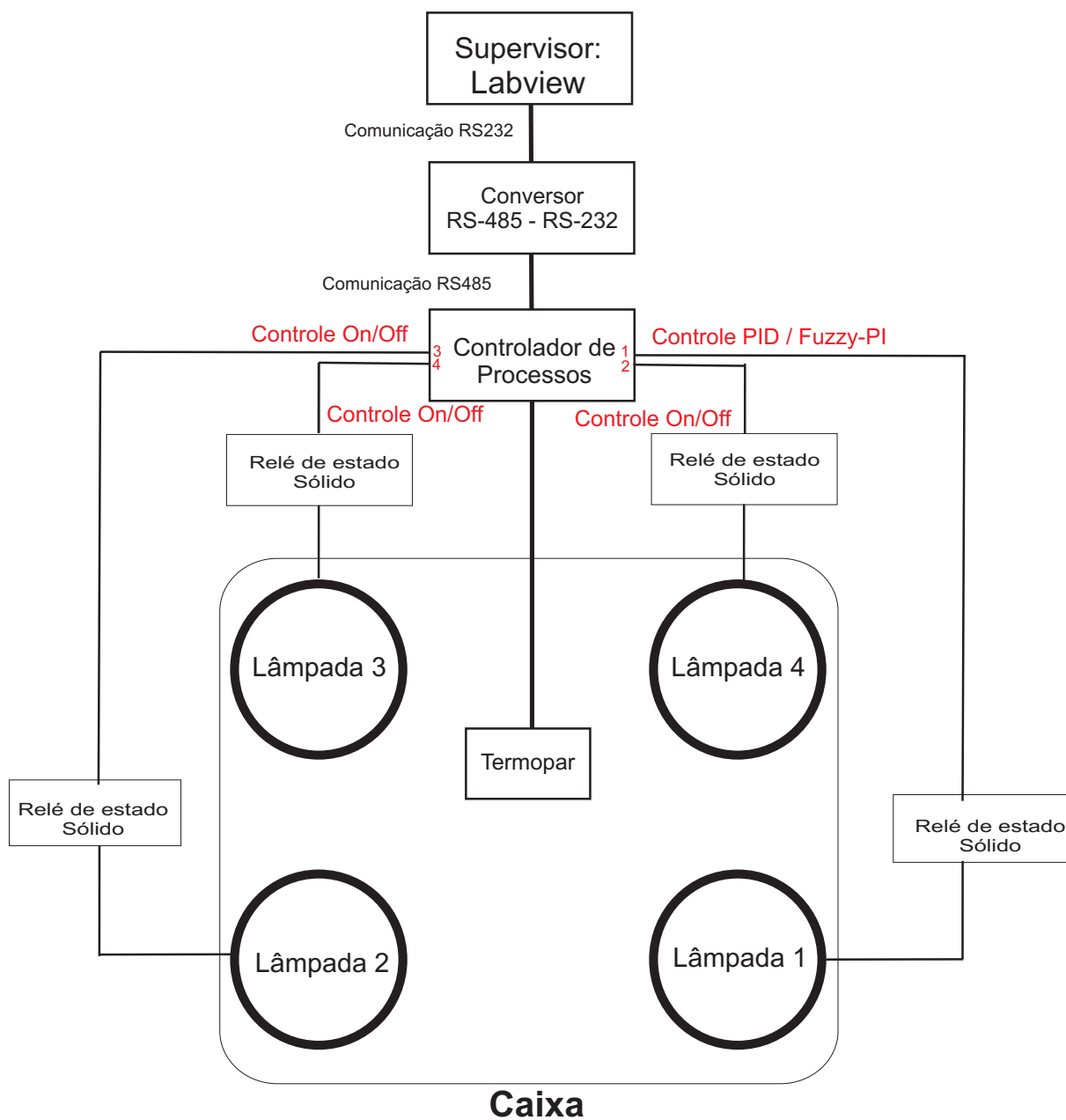


Figura 5.11: Sistema de aquecimento em pequena escala

### 5.5.1 Controlador *Fuzzy*-PI

A Interface gráfica foi desenvolvida em linguagem de programação gráfica LabVIEW [Manual Labview 2005], [Jurizato & Pereira 2003]. O programa é responsável pela supervisão das variáveis de processo: Variável do processo, *set Point*, Regras *fuzzy*, Alarmes, comunicação serial, protocolo *Modbus*, além do controle *fuzzy*-PI de temperatura. Após cada amostragem da temperatura, o controlador gera uma correção do sinal de controle para o atuador.

O código fonte está no Apêndice A, já a Interface gráfica é mostrado na figura 5.12.

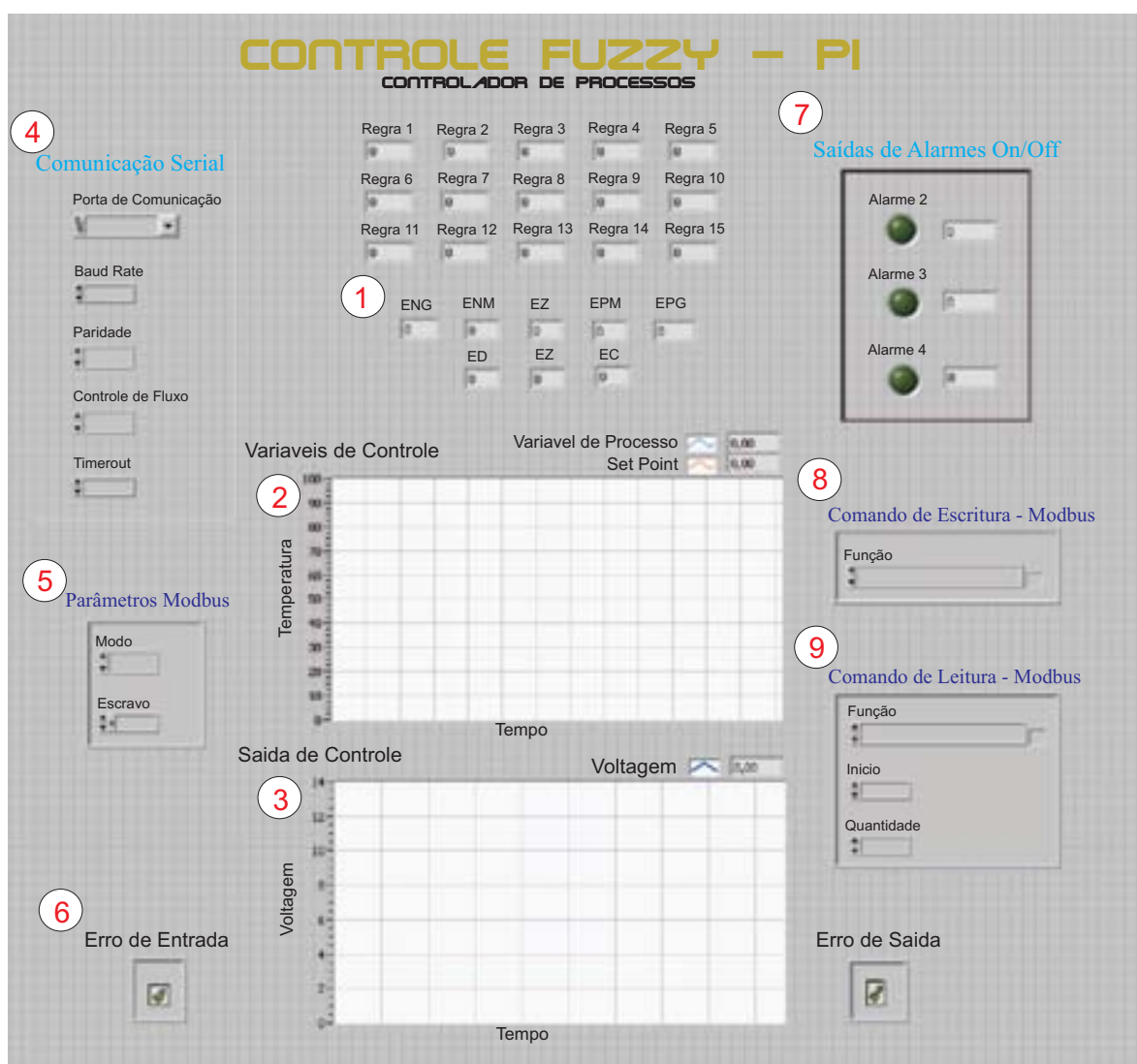


Figura 5.12: Interface Gráfica do Controlador *Fuzzy*-PI

Os campos indicados com os números de 1 a 9 apresentam as seguintes funções específicas:

1. São mostrados os resultados das funções de pertinência e as regras fuzzy.
2. Visualização das variáveis de controle: Variável de processo ( PV ) e o *set point*.
3. A variável de saída de controle (MV) será monitorada neste ponto.
4. Configuração da comunicação serial: Porta de comunicação: COM 1; Baud rate:9600; Paridade: não tem; Controle de fluxo:não tem; Timeout:1000.
5. Definição do modo de comunicação modbus (RTU ou ASCII) e especificação do endereço do equipamento escravo.
6. Verificação de erro na transferência de dados na entrada e saída do programa.
7. Supervisão das saídas 2, 3 e 4 do controlador de processos, que está sendo utilizado como alarmes *On/Off* de acompanhamento, ou seja, quando for atingido o valor dado para cada um deles, deixará de funcionar. Os valores especificados nos alarmes podem ser mudados utilizando comunicação Modbus. O alarme 2 é 56, alarme 3 é 57 e o alarme 4 é 59.
8. Especificação para escrever dados modbus.
9. Especificação para ler dados modbus, onde é determinada a quantidade de dados que se podem ler.

**Fuzzificação**

Na interface de fuzzificação, foram adotadas funções de pertinência triangulares, sendo cinco para a entrada erro  $e$ , e três para a entrada variação do erro  $de$ . Como método de fuzzificação, foi usado o *min-max* de Mamdani. As funções de pertinência são mostradas nas figuras 5.13 e 5.14.

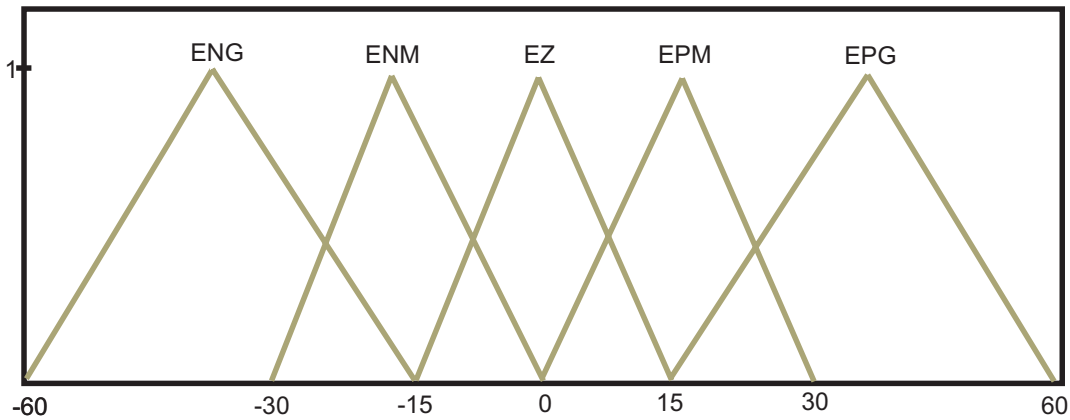


Figura 5.13: Funções de pertinência para o erro

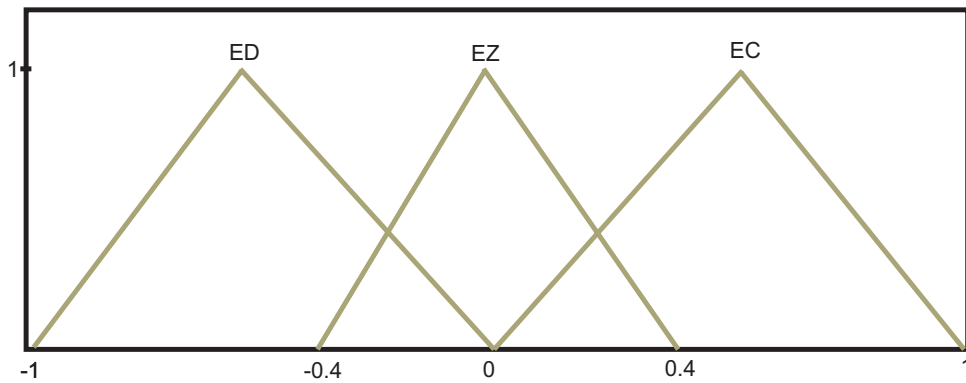


Figura 5.14: Funções de pertinência para a variação do erro

Cada conjunto é nomeado com o termo lingüístico apropriado:

- **ENG**, Erro Negativo Grande;
- **ENM**, Erro Negativo Mediano;
- **EZ**, Erro Zero;
- **EPM**, Erro Positivo Mediano;
- **EPG**, Erro Positivo Grande.
- **ED**, Erro Decrescente ;
- **EZ**, Erro Zero;
- **EC**, Erro Crescente.

### Inferência - Regras *Fuzzy-PI*

Este controlador *fuzzy-PI* tem duas entradas, o erro e sua primeira derivada, e apenas uma saída, a sinal de controle.

Foram analisadas todas as possíveis situações e chegou-se, empiricamente, à base de regras dada pela tabela 5.5. A base de regras também é chamada de matriz de regras ou memória associativa *fuzzy* (FAM - *Fuzzy Associative Memory*).

$e \setminus \frac{de}{dt}$	ED	EZ	EC
ENG	SB	SB	SB
ENM	SB	SB	SN
ZE	SN	SN	SN
EPM	SN	SN	SA
EPG	SA	SA	SA

Tabela 5.5: Matriz de Regras

Termos lingüísticos da saída:

- **SB**, Saída Baixa;
- **SN**, Saída Nominal;
- **SA**, Saída Alta;

Através dessa matriz, pode-se compor lingüísticamente todas as 15 regras da base de conhecimento do controlador. As regras são compostas para cada combinação de linha e coluna da matriz.

### Defuzzificação

A defuzzificação foi feita com o método do Centro dos Máximos (COM).



### 5.5.2 Controlador PID

Para poder interagir com o controle PID próprio do controlador de processos, foi necessário utilizar o protocolo *Modbus*, o qual facilitou a interação entre o controle e o supervisorio que foi implementado em Labview.

A interface gráfica é mostrada na figura 5.15.

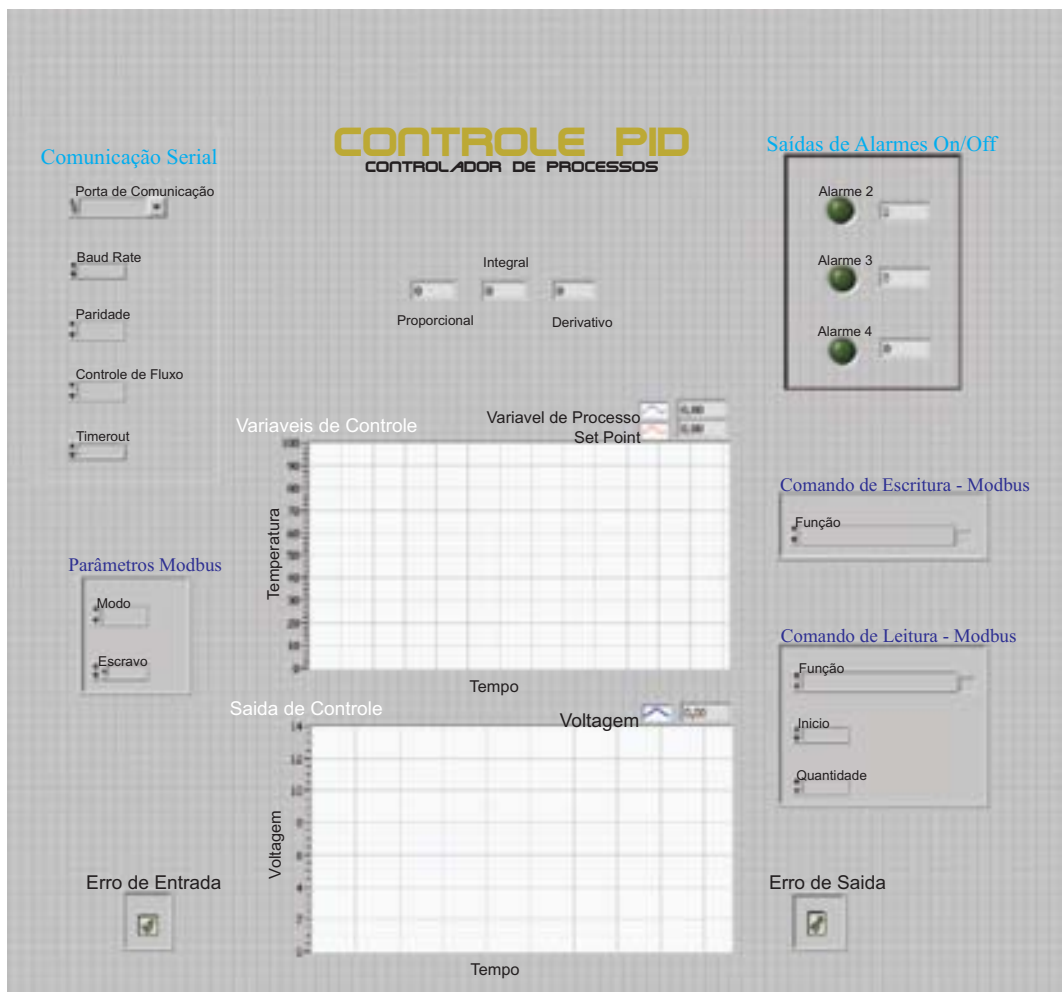


Figura 5.15: Interface Gráfica do Controle PID

A interface gráfica do controlador PID tem as mesmas funcionalidades que o controlador *Fuzzy-PI*. A única diferença entre eles é que o controle PID não tem os resultados das funções de pertinência e das regras do controlador já mencionado, em vez disso, tem os ganhos propor-

cional, integral e derivativo os quais são sintonizados de forma manual ou pelo mesmo controlador de processos.

## 5.6 Conclusão

- Foram constatados o papel da lógica *fuzzy* em aplicações de engenharia de controle e a sua viabilidade técnica.
- Descreveram-se as principais operações com conjuntos *fuzzy*, apresentou-se a estrutura de um controlador *fuzzy*, bem como detalharam-se suas três etapas de computação: fuzzificação, inferência e defuzzificação.
- A potencialidade do controle *fuzzy*, no contexto da atual engenharia de controle, torna-se evidente à medida que há uma busca contínua no aperfeiçoamento ou na solução de problemas não contemplados pela teoria clássica de controle.
- Foi visto o controlador *fuzzy* aplicado ao sistema de aquecimento em pequena escala, viu-se a metodologia adotada, a estrutura do controlador *fuzzy*-PI, o projeto propriamente dito e a interface desenvolvida.

---

# Capítulo 6

## Resultados

---

Resultados experimentais são analisados neste capítulo. Foram realizadas diversas simulações com o intuito de comprovar o funcionamento do sistema. O sistema em pequena escala é mostrado na figura 6.1.

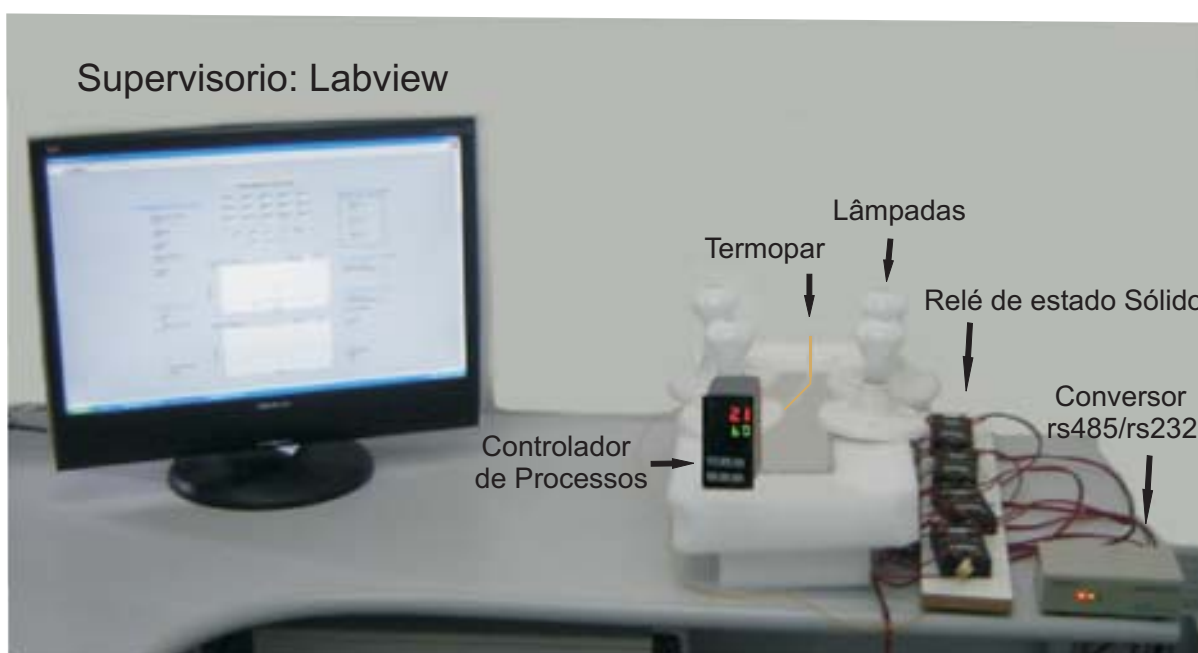


Figura 6.1: Sistema em pequena escala

A figura 6.2, mostra o sistema em pequena escala, funcionando sem a caixa de madeira.



Figura 6.2: Sistema em pequena escala funcionando sem a caixa de madeira

No decorrer dos testes, efetuaram-se alguns ajustes no controlador *fuzzy*-PI para tentar melhorar a resposta do sistema. Entretanto não houve necessidade de variar o número de funções de pertinência para  $e$  ou  $de$ , mas foram feitas modificações para ajustar os vértices dos triângulos para cada função.

A figura 6.3 mostra a interface gráfica do controle *fuzzy*-PI, enquanto supervisiona o sistema em pequena escala.

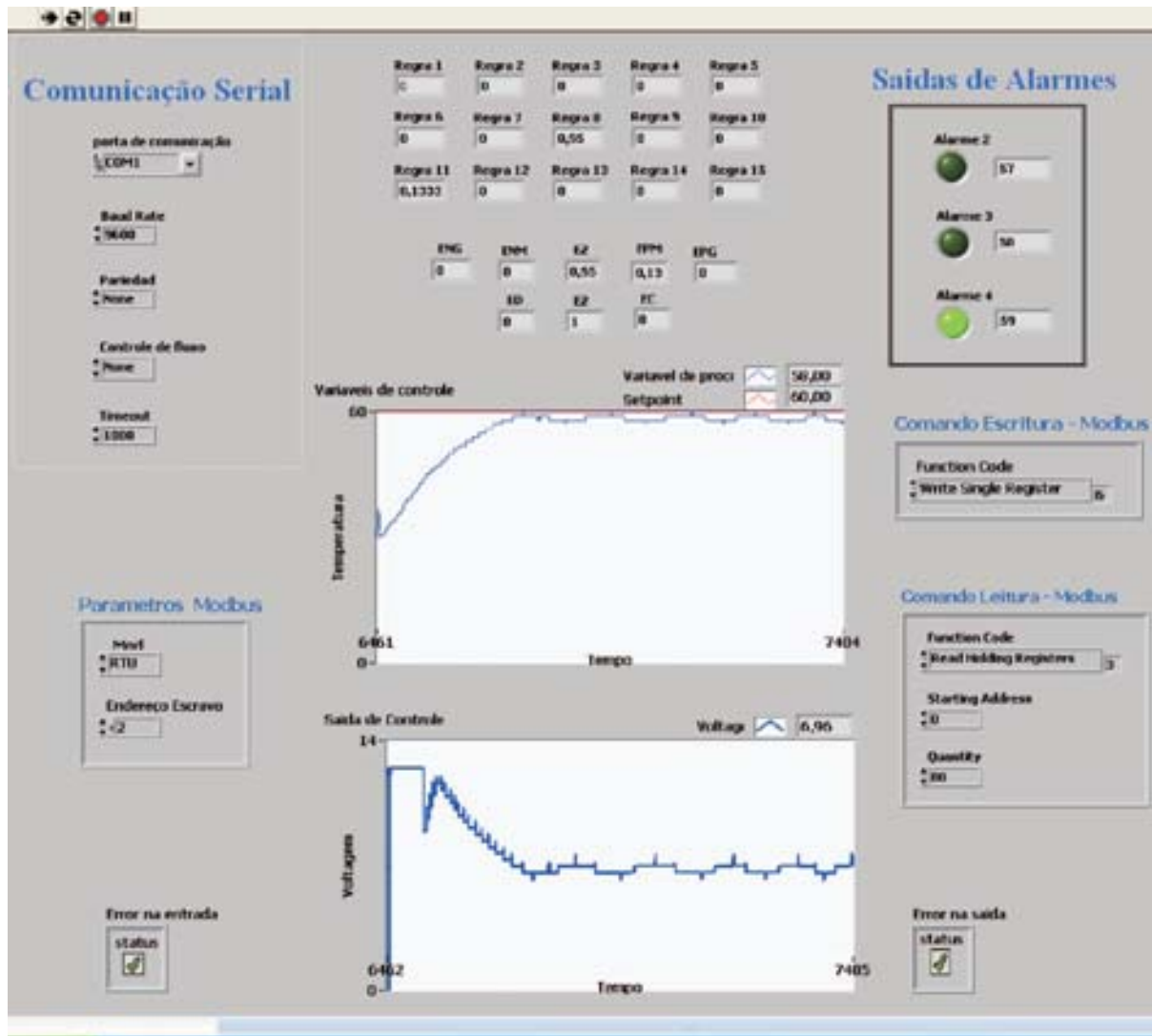


Figura 6.3: Funcionamento do controlador *Fuzzy*-PI

## 6.1 Controlador *Fuzzy*-PI

Nas figuras 6.4 e 6.5 pode-se acompanhar o comportamento progressivo do sistema para atingir o alvo de temperatura, no caso  $60^{\circ}\text{C}$ , e também verificar o comportamento do sinal de controle.

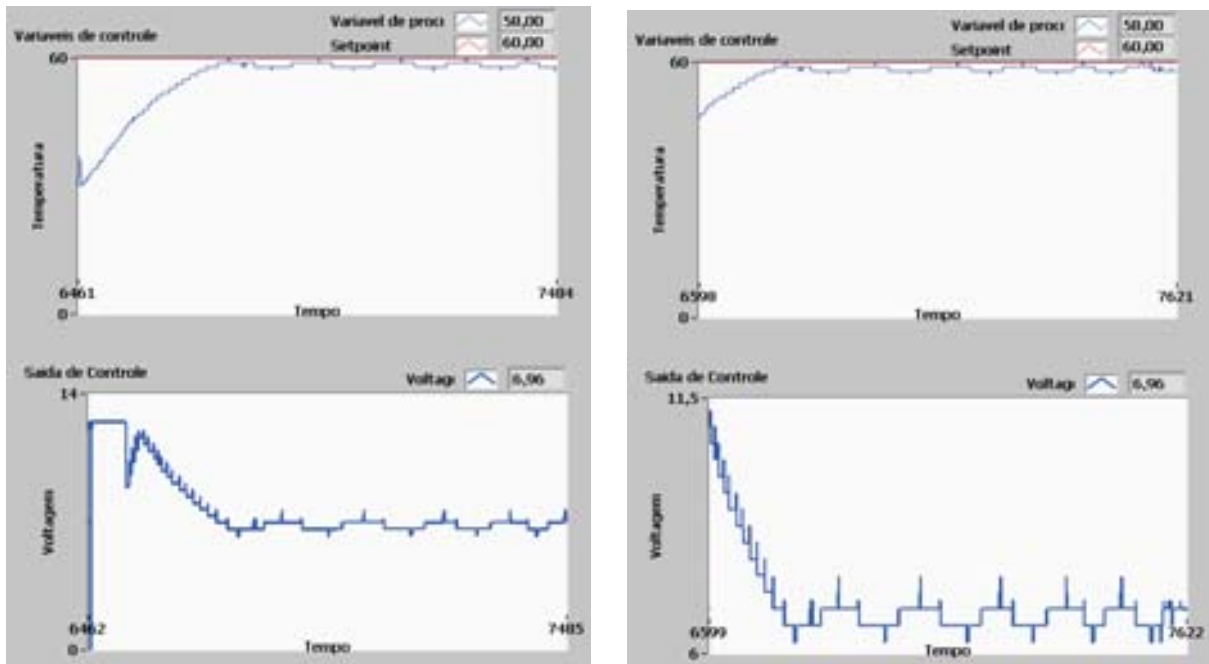


Figura 6.4: Trajetória de controle *Fuzzy*-PI

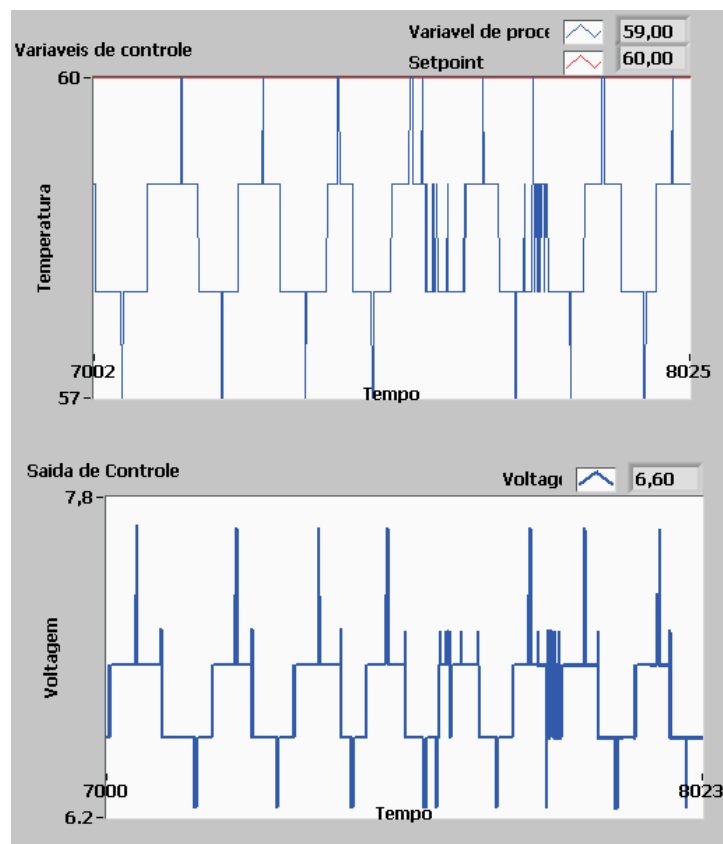


Figura 6.5: Trajetória de controle *Fuzzy-PI*

## 6.2 Desempenho do Controlador PID e o *Fuzzy*-PI

Neste item analisar-se-á o desempenho do controlador PID e do controlador *fuzzy*-PI. O controlador PID é implementado no controlador de processos, em que se trabalha com parâmetros auto sintonizados, ou seja, sintonia automática.

Para poder comparar adequadamente os controladores foram realizadas cerca de 100 avaliações constantes no sistema de aquecimento em pequena escala, a fim de validar os controladores PID e *fuzzy*-PI, trabalhando com um amostragem de 5 medidas por segundo.

Convém ressaltar a importância do sistema em pequena escala para a avaliação dos controles, já que ajudou a entender o comportamento deles em diferentes circunstâncias, como por exemplo, o tempo de resposta de subida para atingir o *set point*.

As figura 6.6 e 6.7 mostra o comportamento das variáveis do controlador PID, quando se pôde verificar que o tempo de subida foi de aproximadamente 573 s (9 min 55 s) para uma temperatura de 56 °C, manifestada na primeira figura. A segunda figura mostra o tempo total do teste, 1002 s (16 min 7 s) para uma temperatura de 57°C.

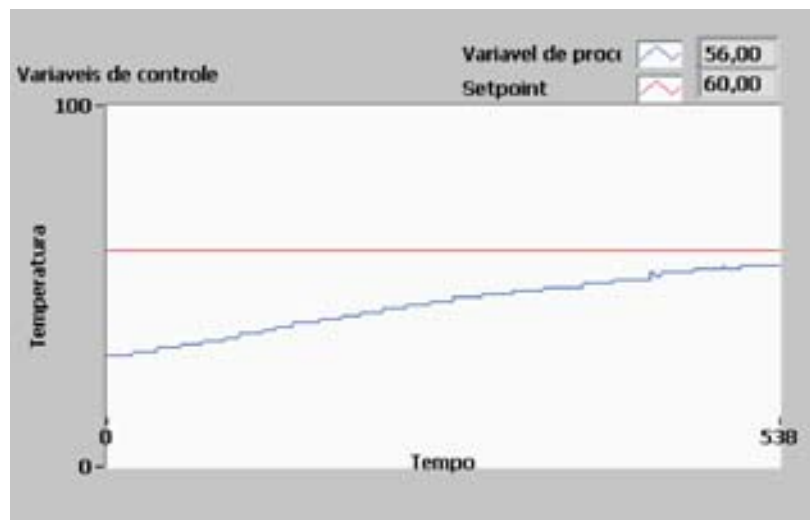


Figura 6.6: Saída de variáveis de controle PID - 573 s



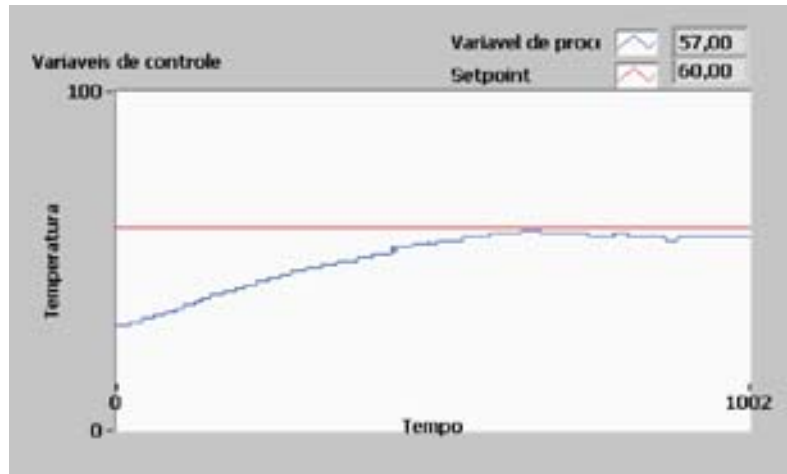
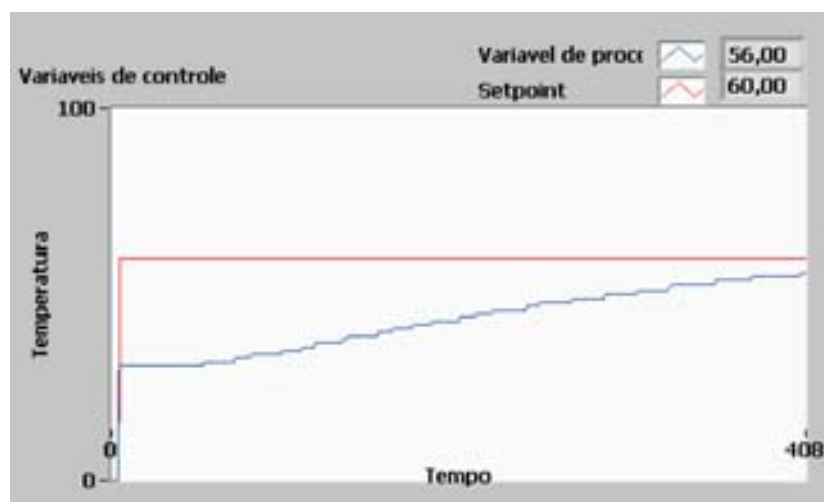


Figura 6.7: Saída de variáveis de controle PID - 1002 s

O desempenho do controlador *fuzzy*-PI em relação ao tempo de subida é mostrado na figura 6.8, que 408 s (6 min 8 s) para uma temperatura de 56 °C. A segunda figura mostra o tempo total do teste, 1007 s (16 min 78 s) para um temperatura de 57 °C.

Figura 6.8: Saída de variáveis de controle *Fuzzy*-PI - 408 s

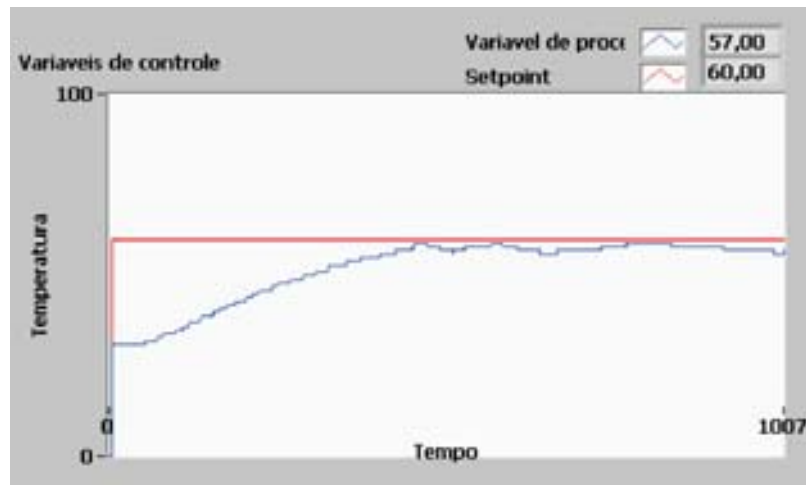


Figura 6.9: Saída de variáveis de controle *Fuzzy-PI* - 1007 s

O controlador *fuzzy-PI* foi mais rápido que o controlador PID em relação ao tempo de subida para atingir o *set point*, quando se fez num tempo menor de 165 s em relação ao PID.

Os resultados até agora obtidos na implementação do supervisório e do controlador *fuzzy-PI* mostraram-se satisfatórios do ponto de vista de estabilidade e regulação.

---

# Capítulo 7

## Conclusões

---

A temperatura é uma variável importante que influencia diretamente na calibração de medidores de vazão e *BS&W*, e muitas vezes tem que ser corrigida para minimizar a incerteza. As correções têm que ser feitas para poder estimar a influência da temperatura normal no campo de trabalho, em relação à temperatura normal no teste a que são submetidos os medidores.

Foram avaliadas três alternativas para determinar o sistema de aquecimento que será utilizado de acordo com os requisitos do laboratório: resistências externas, trocador de calor e resistências internas.

As resistências elétricas de tipo coleira possuem a vantagem de terem fácil implementação e controle. Uma vez que se trata de um equipamento elétrico, têm baixo custo de instalação e manutenção se comparados a sistemas de aquecimento mais complexos. O espaço físico é outra grande vantagem desse sistema, uma vez que não é necessária nenhuma alteração na estrutura já existente, como uma secção na tubulação por exemplo.

Considerando uma passagem única do fluido através das resistências, foi constatado que seria necessária uma considerável potência elétrica para que fosse gerada a transferência de calor, necessária para atender ao gradiente térmico desejado no fluido de trabalho. Entretanto é certo que a instalação das resistências na linha de recirculação do tanque misturador poderá diminuir a potência necessária em níveis que poderão ser fornecidos pelo laboratório, sem que seja necessária nenhuma adaptação, utilizando-se o sistema de recirculação por um maior intervalo de tempo, acumulando carga térmica no fluido contido no tanque misturador, acarretando a diminuição do gradiente térmico necessário na linha de teste.

O ponto negativo analisado na alternativa da implantação das resistências elétricas tipo coleira, diz respeito à classificação de área, uma vez que a planta do LAMP se enquadra na zona 1 das áreas potencialmente explosivas, e não foi encontrada nenhuma resistência que se adequasse à nossa necessidade que tivesse essa certificação. Dessa forma, teria que se fazer uma adaptação com as que foram encontradas no mercado, o que não seria interessante para o laboratório.

Um dos sistemas de aquecimento de fluidos mais utilizados na indústria é o trocador de calor, inclusive na indústria petroquímica, como é o caso do LAMP, um sistema com eficiência comprovada, que não apresenta o problema de classificação de área como as resistências, sendo um produto certificado e seguro para operar no laboratório.

Foram avaliados três tipos de trocadores de calor: tubo duplo com escoamento paralelo, tubo duplo com escoamento em contra corrente e do tipo carcaça e tubos. Foi levada em consideração principalmente a quantidade de energia necessária para que cada um desses três tipos de trocadores aquecesse o fluido de trabalho até a temperatura desejada,  $60^{\circ}\text{C}$ . Assim, verificou-se que o trocador do tipo casco e tubos é o que necessita de menor energia para realizar o aquecimento necessário.

Embora o trocador de calor não apresente o problema de certificação para operação em áreas classificadas, sua instalação se mostra desfavorável quando são analisados os aspectos físicos do laboratório, uma vez que seria necessária uma alteração considerável na planta, para adaptar tanto o trocador, como o boiler de aquecimento do fluido no processo, além de exigir um consumo de potência elevado.

A melhor solução encontrada para resolver esses problemas foi uma modificação na linha de recirculação, utilizando resistências de imersão, de forma que esse novo trecho possuísse um espaço interno suficiente para a inserção das resistências e estive-se localizado fora da área classificada, o que descartaria a necessidade de uma proteção extra para o equipamento. Além disso, há economia energética do sistema, pois, pelo fato de estar localizado no trecho de recirculação, permite utilizar somente a potência elétrica disponível, de forma que o fluido fique circulando pelas resistências até que a temperatura desejada seja atingida.

Para poder controlar o sistema de aquecimento escolhido, foram projetadas duas alternativas; a primeira é a implementação total de um controlador *fuzzy*-PI avaliado junto com a segunda alternativa, um controlador PID auto-sintonizado, implementado no controlador de processos (novus).

Convém ressaltar a importância do sistema em pequena escala para a avaliação dos controles, já que ajudaram a entender o comportamento deles em diferente circunstâncias.

Os sistemas de supervisão *fuzzy*-PI e PID permitem a visualização, variação e gravação das variáveis do processo do sistema de aquecimento ( temperatura, set point, variável de processo, regras fuzzy, funções de pertinência, ganhos de controle, alarmes ).

Os arquivos gerados possibilitam o estudo de desempenho do sistema, constituindo-se uma importante ferramenta de desenvolvimento de pesquisa (Labview).

O desempenho de sistemas de inferência *fuzzy* depende diretamente de vários aspectos relacionados à sua estrutura de implementação. O número de conjuntos associados a cada variável, as formas das funções de pertinência, funções de implicação, operadores t-normas e t-conormas,

método de defuzzificação, além de fatores de escala permitem que controladores *fuzzy* tenham um campo de actuação vasto, devido à sua inerente não-linearidade. Essa capacidade associada à sua robustez, está sendo ressaltada mais uma vez, pois o controlador *fuzzy*-PI implementado desempenha um papel importante em um processo de aquecimento, reduzindo o tempo de resposta ao sistema. Comparada com um controlador PID sintonizado pelo mesmo controlador de processos, promove um controle mais uniforme e, é claro, fornece condições para que o produto final tenha uma melhor qualidade.

Comercialmente, a técnica de controle *fuzzy*-PI é bem adaptada para implementações de baixo custo, baseadas em sensores baratos, conversores A/D de baixa resolução e microcontroladores de 4 ou 8 bits. Tais sistemas podem ser facilmente atualizados, acrescentando-se mais regras para aperfeiçoar o desempenho ou somar novas características. Em muitos casos, a lógica *fuzzy*-PI pode ser usada para melhorar um sistema de controle já existente em um grau hierarquicamente superior, adicionando uma supervisão inteligente.

É importante ressaltar que as mudanças estruturais no sistema de aquecimento (pequena escala para escala real), não implicam necessariamente um novo controlador para o sistema ou mesmo sintonia de parâmetros, pois o controlador *fuzzy*-PI é bastante robusto e, de certo modo, independente da função de transferência da planta.

---

## Referências Bibliográficas

---

ABNT (2005), Nbr iso/iec 17025 "requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração", Relatório técnico, ABNT "Associação Brasileira de Normas Técnicas", Brasil.

ANP/INMETRO (2000), Portaria conjunta anp/inmetro n. 1, Página na internet, ANP/INMETRO, Brasil.

\*<http://www.anp.gov.br/leg/inmetro.asp>

*ANSYS CFX software delivers powerful computational fluid dynamics (CFD)* (n.d.), Relatório técnico, ANSYS, Inc., USA.

Baumgarten, R., D. Zander & R. Rocha (2006), Lógica fuzzy, Relatório técnico, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, São Leon, Brasil.

Bazanella, Alexandre S. & João M. Gomes da Silva (2005), *Sistemas de Controle*, Ed. UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil.

Berto, Maria I., Fabiana R. de Sá & Vivaldo S. Jr (n.d.), Avaliação de controles pid adaptativos para um sistema de aquecimento resistivo de água.

Creech, D. (1998), Computational modeling of multiphase turbulent fluid flow and heat transfer in the continuous slab casting mold, Dissertação de mestrado, University of Illinois, Chicago, USA.

de Costa, Claudio B., Marcelo de A. L. Gonçalves, Alcenir C. de Souza, Francisco J. S. Neto & José A. Pinheiro (1998), Estudo teórico experimental do impacto de fontes de variações em quatro tipos de medidores de bsw, Relatório técnico, Boletim técnico - PETROBRAS, Brasil.

de F. Maciel, Itamar (2001), Correção de densidade e volumen tabelas api 2540 e astm d-1250, Relatório técnico, PETROBRAS, Brasil.

de Medeiros, Thiago Q., Alexandre M. F. Guimarães, Jader F. Sousa, Jurandir de O. Neto, Antônio H. F. de Moraes, Andrés O. Salazar & André L. Maitelli (2006), Automation system

applied to a plasma inertization plant, *em* UFRN, ed., 'Revista Eletrônica de Potência da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência'.

Donald E. Beasley, Richard S. Figliola (2007), *Teoria e Projeto para Medições Mecânicas*, LTC.

E.Thomas, Jose (2001), Fundamentos de engenharia de petróleo, Relatório técnico, PETROBRAS, Brasil.

*Fieldbus Foundation* (n.d.), Relatório técnico, Fieldbus, Brasil.

Frick, Thomas C., Taylor & Willaim R. (1962), *Petroleum Production Handbook*, Volume I.

Galeazzo, Flavio C. (2005), Modelagem de um reator com serpentinas axiais utilizando a fluido dinâmica computacional - cfd, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

Incropera, F.P. & D. P. Witt (1992), *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

ISO/API (2000), Iso 91.2/api 7.2 - temperature-dynamic temperature determination, Relatório técnico, Brasil.

Jordão, Dacio (2002), *Manual de Instalações Elétricas na Indústria do Petróleo*, 3ª edição, Ed. Qualitymark, Brasil.

Jurizato, Luís A. & Paulo S. R. Pereirar (2003), Sistemas supervisórios, *em* 'Network Technologies', Nova Odessa, Brasil.

Leclercq, L., B. Robyns & J. Grave (2003), Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators, *em* 'ELSEVIER'.

Lima, C. E. G. (2000), Automação de testes de produção e determinação do bsw de poços produtores de petróleo, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, Brasil.

Maitelli, André L., Andrés O. Salazar, Filipe O. Quintaes, Danielle S. Silva, Priscilla T. A. F. Jesus, Gustavo D. Torres, Lucas M. Castro & Eudes G. A. Júnior (2005), Automação dos processos de medição de vazão e bsw, *em* 'ENQUALAB - Encontro para a Qualidade de Laboratórios', Rede Metrológica do Estado de São Paulo - REMESP, São Paulo, SP.

*Manual Labview* (2005), National Instruments, <http://www.ni.com>.

- Miranda, V. (2000), *Uma abordagem Sobre Redes Neurais, Lógica Difusa e Algoritmos Evolucionários*. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- NBR 5410 - *Instalações elétricas de Baixa Tensão* (2005), Relatório técnico, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Brasil.
- Novus (n.d.), *Controlar de processos n2000*, Relatório técnico, Novus, Brasil.
- Penha, Janaina K. M., Filipe O. Quintaes, José A. D. Amado, Andrés O. Salazar, Walter Link, Iuri A. C. Dantas & Mario Cia (n.d.), *Adequação do laboratório de avaliação de medição em petróleo - lamp aos requisitos da norma nbr iso/iec 17025:2005*.
- Penha, Janaina K. M., Filipe O. Quintaes, José A. D. Amado, Andrés O. Salazar, Walter Link & José F. Gomes (2007), *Padronização segundo a anbt nbr iso/iec 17025:2005 do laboratório de avaliação de medição em petróleo - lamp, em '5to congreso Latino Americano de Metrologia'*, Parana, Brazil.
- Pereira, Sérgio L. & Alessandro B. Shirahige (n.d.), *Metodologia para aferição de ação de controle proporcional integral derivativa implementado em controladores industriais*.
- Pires, João R. C. & Cairo L. N. Júnior (2003), *Controle fuzzy para braço robótico utilizando a abordagem adaptativo neuro-fuzzy (anfis) do matlab*.
- Ponce, P., R. Fernandez, F. Ramirez & D. Méndez (2007), *Neuro-fuzzy controller using lab-view, em 'Proceedings of the 10th Lasted international Conference Intelligent Systems and Control'*.
- Porteria 29 - Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia* (2007), Relatório técnico, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO, Rio de Janeiro, Brazil.
- Pratt, Preston P. (2003), *A three dimensional simulation of a thermal experiment conducted on an accelerator driven system target model concept*, Dissertação de mestrado, Texas A M University, Texas, USA.
- Quintaes, Filipe (2006), *Estudo da estimativa da incerteza de medição para determinação do bsw e da vazão aplicado no laboratório de avaliação de medição em petróleo*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, Brasil.



- Quintaes, Filipe & Andres O. Salazar (2006), Sistema de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento em Áreas classificadas, em 'V Encontro Petrobras sobre Instalações Elétricas em Atmosferas Explosivas', Universidade Petrobras e SMS/ Corporativo, Rio de Janeiro, RJ.
- Quintaes, Filipe, Andres O. Salazar, André L. Maitelli & Walter Link (2007), Cálculo da incerteza da medição para determinação do bsw e da vazão, em 'IV Congresso Rio Automação', Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, Rio de Janeiro, RJ.
- Rêgo, D. F. (2002), Projeto de um sistema supervisorio com controlador fuzzy aplicado a um secador elétrico-solar de alimentos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, Brasil.
- Salazar, Andres O., Andre L. Maitelli, Filipe de O. Quintaes, Eudes G. A. Júnior, Luis A. A. de Assis Iuri A. C. Dantas, Danielle S. da Silva & Jose A. D. Amado (2006), Automação, controle e supervisão de uma planta industrial utilizando tecnologias em redes industriais, em 'XVI Brazilian Congress of Automatics', Sociedade Brasileira de Automática, Salvador, BA.
- Shaw, Ian S. & Marcelo G. Simões (1999), *Controle e modelagem fuzzy*, Edgar Blücher Ltda, São paulo, Brasil.
- SolidWorks (n.d.), Relatório técnico, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Brasil.
- S.V. Mokamati, R.C. Prasad (2000), Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a concentric tube heat exchanger, em 'Hemisphere Publishing Corporation,'.
- Verral, R. E. (1992), Sound velocity studies of pipelines oils as a fuction of viscosity, density and water content, em '4Th CIM Petroleum Society'.

Apêndice A

---

# **Apêndice A**

## **Código Fonte**

---

Como o programa foi desenvolvido em linguagem de programação gráfica, o código fonte do sistema supervisor é mostrado, em partes, nas figuras A.1, A.2, A.3.

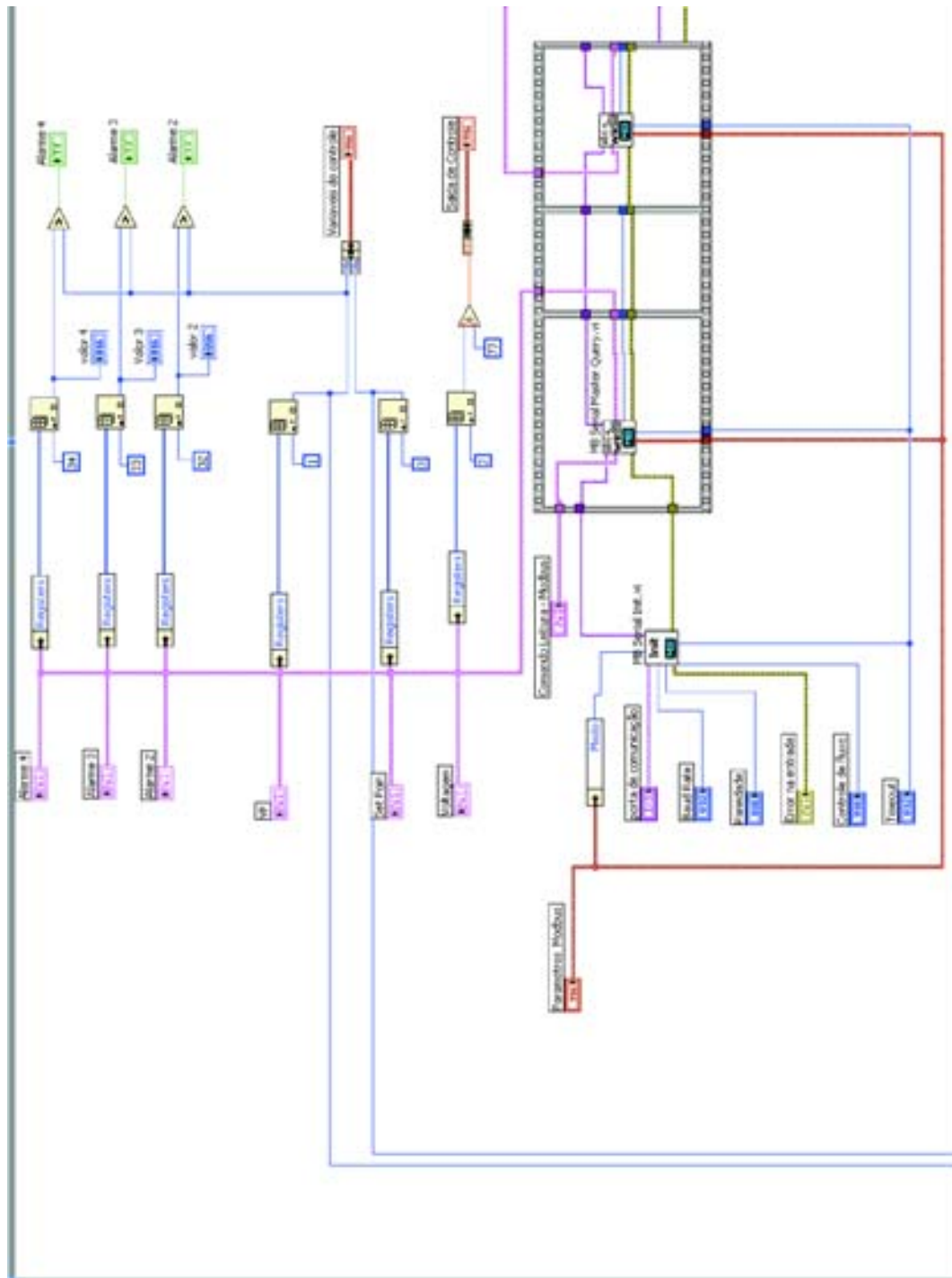


Figura A.1: Código fonte, parte 1 de 3

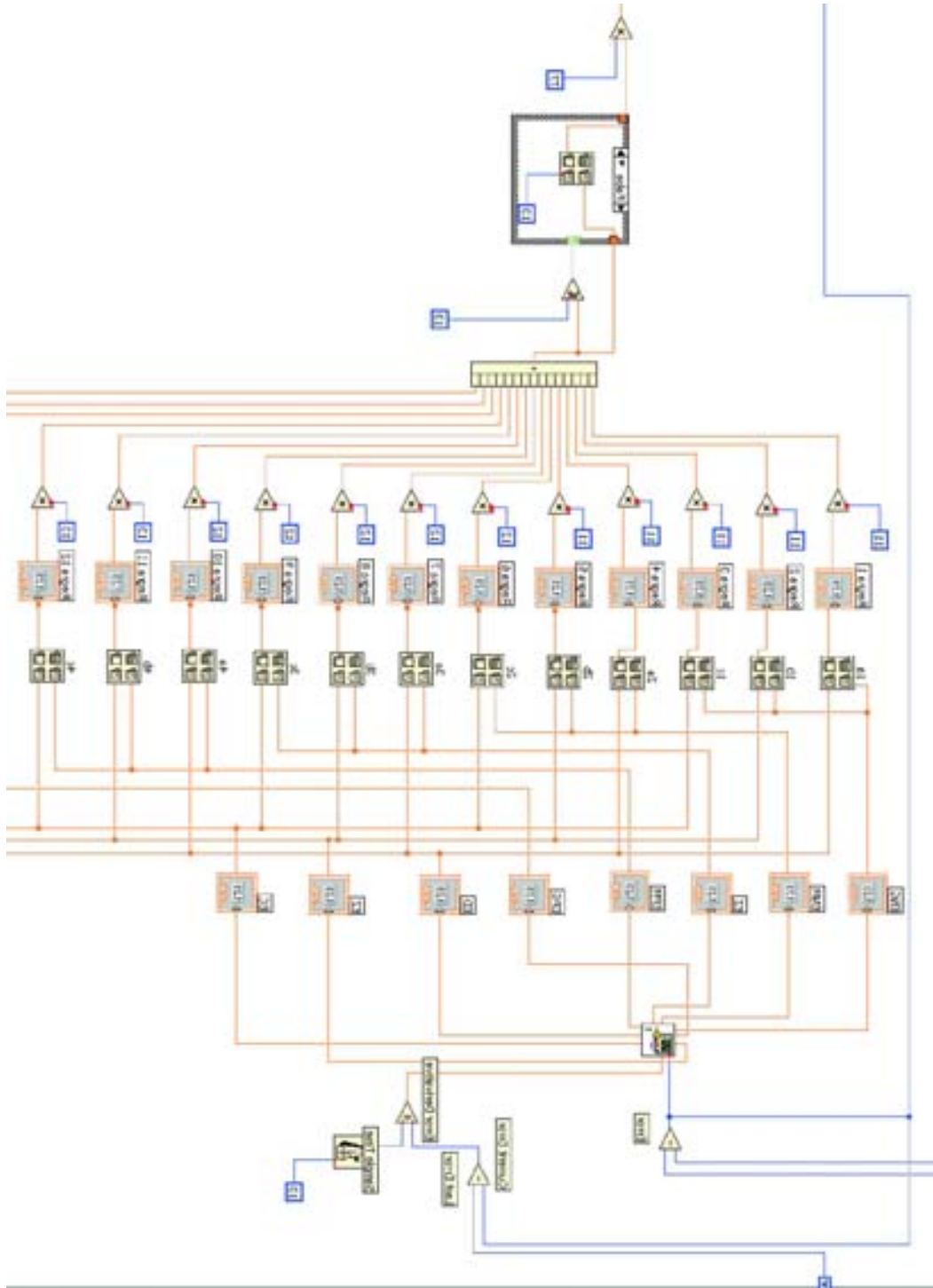


Figura A.2: Código fonte, parte 2 de 3

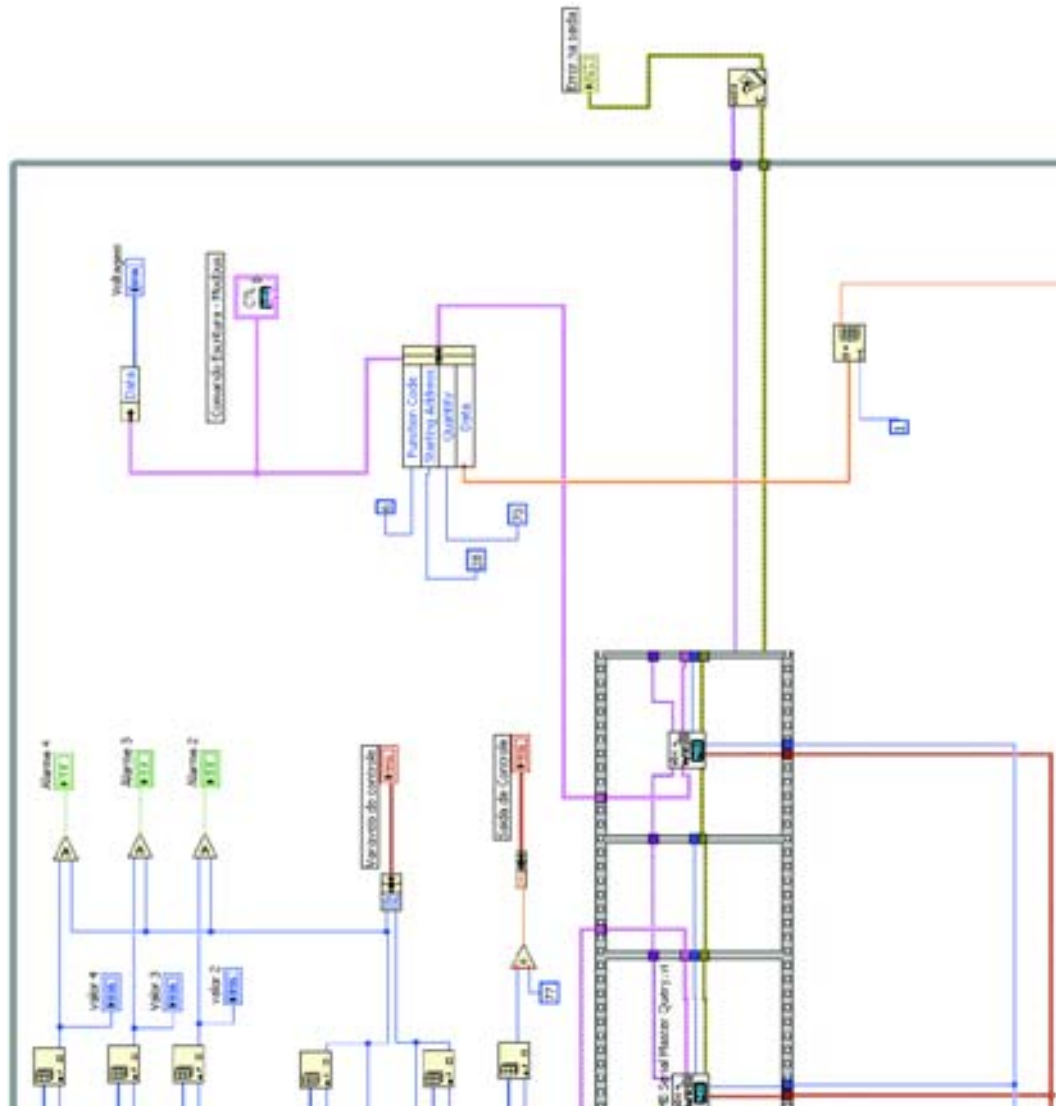


Figura A.3: Código fonte, parte 3 de 3

---

## **Apêndice B**

### **Controlador Novus**

---

## CONTROLADOR N2000

CONTROLADOR UNIVERSAL - MANUAL DE INSTRUÇÕES - V2.0x



### 1 INTRODUÇÃO

Controlador de características universais, aceita em um único modelo a maioria dos sensores e sinais utilizados na indústria e proporciona todos os tipos de saída necessários à atuação nos diversos processos.

Toda a configuração do controlador é feita através do teclado, sem qualquer alteração no circuito. Assim, a seleção do tipo de entrada e de saída, da forma de atuação dos alarmes, além de outras funções especiais, são todas acessadas e programadas via teclado frontal.

É importante que o usuário leia atentamente este manual antes de utilizar o controlador. Verifique que a versão desse manual concorda com a do seu instrumento (o número da versão de software é mostrado quando o controlador é energizado).

#### 1.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

- Proteção para sensor aberto em qualquer condição;
- Entrada universal multi-sensor, sem alteração de hardware;
- Saídas de controle do tipo relé, 4-20mA e pulso, todas disponíveis;
- Auto-sintonia dos parâmetros PID;
- Função Automático/Manual com transferência "bumpless";
- Quatro saídas de alarme, com funções de mínimo, máximo, diferencial (desvio), sensor aberto e evento;
- Temporização para dois alarmes;
- Retransmissão de PV ou SP em 0-20mA ou 4-20mA;
- Entrada para setpoint remoto;
- Entrada digital com 5 funções;
- Soft-start programável;
- Rampas e patamares com 7 programas de 7 segmentos, concatenáveis;
- Comunicação serial RS-485, protocolo MODBUS RTU;
- Senha para proteção do teclado;
- Alimentação bi-Volt.

### 2 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

- Alimentação: 85 a 250Vac ou 24V/câdc, 50/60 Hz;  
Nota: Verificar na caixa do controlador a tensão de alimentação aceita por este modelo;
- Consumo máximo: 3VA;
- Todos os tipos de entrada calibrados de fábrica. Termopares conforme norma NBR 12771/99, RTD's NBR 13773/97;
- Taxa de amostragem: 5 medidas por segundo;
- Precisão: Termopar J, K e T: 0,25% da faixa máxima  $\pm 1^\circ\text{C}$ ;  
Termopar N, R, S: 0,25% da faixa máxima  $\pm 3^\circ\text{C}$ ;  
Pt100, Corrente ou tensão: 0,2% da faixa máxima;
- Resistência de entrada: 0-50mV, Pt100 e termopares:  $>10\text{M}\Omega$   
0-5Vdc:  $>1\text{M}\Omega$   
4 a 20mA: 100 $\Omega$ .

- Medição de Pt100: Circuito a 3 fios. Corrente de excitação de 170 $\mu\text{A}$ . Compensação da resistência do cabo;
- Resolução interna: 19500 níveis; visor: 12000 níveis (-1999 a 9999);
- Duas saídas tipo Relé SPDT: 3A / 250Vac;
- Duas saídas tipo Relé SPST: 3A / 250Vac;
- Resolução da saída analógica: 1500 níveis, 550 $\Omega$  máx.;
- Tensão de isolamento da saída analógica: 250Vac;
- Fonte para transmissores de campo: 24 Vdc  $\pm 10\%$  / 25 mA;
- Ambiente de operação: 0 a 55°C, umidade 20 a 85%;
- Grau de proteção: Frontal: IP65, Caixa: IP30;
- Peso aproximado: 150g (para o modelo básico);
- Dimensões: 48x96x92 mm;
- Recorte para fixação em painel: 45x93mm;
- Gabinete em policarbonato e ABS, auto-extingüíveis.

### 3 OPERAÇÃO

O painel frontal do controlador, com as suas partes, pode ser visto na Figura 1.

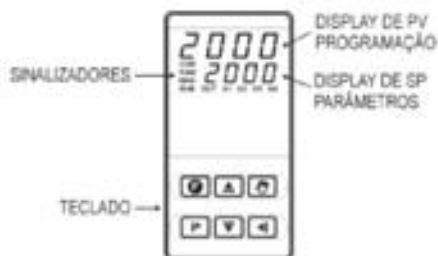


Figura 1 - Identificação das partes do painel frontal

**Display de PV/Programação:** Apresenta o valor atual da PV (Process Variable). Quando no modo de operação ou programação, mostra o número do parâmetro que está sendo apresentado.

**Display de SP/Parâmetros:** Apresenta o valor de SP (Setpoint) e dos demais parâmetros programáveis do controlador.

**Sinalizador COM:** Pisca toda vez que o controlador troca dados com o exterior.

**Sinalizador TUNE:** Acende enquanto o controlador executa a operação de sintonia automática.

**Sinalizador MAN:** Sinaliza que o controlador está no modo de controle manual.

**Sinalizador RUN:** Indica que o controlador está ativo, com a saída de controle e alarmes habilitados.

**Sinalizador OUT:** Para saída de controle Relé ou Pulso, o sinalizador OUT representa o estado instantâneo desta saída. Quando a saída de controle é definida com analógica (0-20mA ou 4-20mA) este sinalizador permanece constantemente aceso.

Figura B.1: Folha de dados do controlador Novus n2000

**Sinalizadores A1, A2, A3 e A4:** sinalizam a ocorrência de situação de alarme.

**[P] Tecla PROG:** Tecla utilizada para apresentar os sucessivos parâmetros programáveis do controlador.

**[◀] Tecla Back:** Tecla utilizada para retroceder ao parâmetro anteriormente apresentado no display de parâmetros.

**[▲] Tecla de incremento e [▼] - Tecla Decremento:** Estas teclas permitem alterar os valores dos parâmetros.

**[F] Tecla Auto/Man:** Tecla de função especial que executa imediatamente a função 6 mostrada na Tabela 2. Altera modo de controle entre manual e automático.

**[E] Tecla Função Especiais:** Pode executar as funções 7, 8, 9 e 10 mostradas na Tabela 2.

Ao ser energizado, o controlador apresenta por 3 segundos o número da sua versão de software, quando então passa a operar normalmente, mostrando no visor superior a variável de processo (PV) e no visor de parâmetros/SP o valor do Setpoint de controle. A habilitação das saídas também é feita neste instante.

Para operar adequadamente, o controlador necessita de uma configuração inicial mínima, que compreende:

- Tipo de entrada (Termopares, Pt100, 4-20mA, etc.).
- Valor do Setpoint de controle (SP).
- Tipo de saída de controle (relé, 0-20mA, 4-20mA, pulso).
- Parâmetros PID (ou histerese para controle ON/OFF).

Outras funções especiais, tais como rampas e patamares, temporização dos alarmes, entradas digitais, etc., também podem ser utilizadas para se obter um melhor desempenho para o sistema.

Os parâmetros de configuração estão agrupados em ciclos, onde cada mensagem apresentada é um parâmetro a ser definido. Os 7 ciclos de parâmetros são:

Ciclo	Acesso
1- Operação	acesso livre
2- Sintonia	acesso reservado
3- Programas	
4- Alarmes	
5- Configuração de entrada	
6- I/Os	
7- Calibração	

O ciclo de operação (1º ciclo) tem acesso livre. Os demais ciclos necessitam de uma combinação de teclas para serem acessados. A combinação é:

**[◀] (BACK) e [P] (PROG) pressionadas simultaneamente**

Estando no ciclo desejado, pode-se percorrer todos os parâmetros desse ciclo pressionando a tecla [P] (ou [◀], para retroceder no ciclo). Para retornar ao ciclo de operação, pressionar [P] várias vezes até que todos os parâmetros do ciclo atual sejam percorridos.

Todos os parâmetros configurados são armazenados em memória protegida. Os valores alterados são salvos quando o usuário avança para o parâmetro seguinte. O valor de SP é também salvo na troca de parâmetro ou a cada 25 segundos.

**3.1 PROTEÇÃO DE CONFIGURAÇÃO**

É possível fazer com que os valores dos parâmetros não possam ser alterados depois da configuração final, impedindo que alterações indevidas sejam feitas. Os parâmetros continuam sendo visualizados, mas não podem mais ser alterados. A proteção acontece com a combinação de uma sequência de teclas e uma chave interna.

A sequência de teclas para proteger é [▲] e [◀], pressionadas simultaneamente por 3 segundos, no ciclo de parâmetros que se deseja proteger.

Para desproteger um ciclo basta pressionar [▼] e [◀] simultaneamente por 3 segundos.

Os displays piscarão brevemente confirmando o bloqueio ou desbloqueio.

No interior do controlador, a chave **PROT** completa a função de proteção. Na posição **OFF** o usuário pode fazer e desfazer a proteção dos ciclos. Na posição **ON** não é possível realizar alterações: se há proteções a ciclos estas não podem ser removidas; se não há, não podem ser promovidas.

**4 CONFIGURAÇÃO / RECURSOS**

**4.1 SELEÇÃO DA ENTRADA**

O tipo de entrada a ser utilizado pelo controlador deve ser programado pelo usuário no parâmetro "TYPE", via teclado (ver lista de tipos na Tabela 1).

TIPO	COD.	CARACTERÍSTICAS
J	0	faixa: -50 a 760 °C (-58 a 1400°F)
K	1	faixa: -90 a 1370 °C (-130 a 2498°F)
T	2	faixa: -100 a 400 °C (-148 a 752°F)
N	3	faixa: -90 a 1300 °C (-130 a 2372°F)
R	4	faixa: 0 a 1760 °C (32 a 3200°F)
S	5	faixa: 0 a 1760 °C (32 a 3200°F)
Pt100	6	faixa: -199.9 a 530.0 °C (-199.9 a 986.0°F)
Pt100	7	faixa: -200 a 530 °C (-328 a 986°F)
4-20 mA	8	Linearização J. Faixa prog.: -110 a 760°C
4-20 mA	9	Linearização K. Faixa prog.: -150 a 1370°C
4-20 mA	10	Linearização T. Faixa prog.: -160 a 400°C
4-20 mA	11	Linearização N. Faixa prog.: -90 a 1370°C
4-20 mA	12	Linearização R. Faixa prog.: 0 a 1760°C
4-20 mA	13	Linearização S. Faixa prog.: 0 a 1760°C
4-20 mA	14	Linearização Pt100. Faixa prog.: -200.0 a 530.0°C
4-20 mA	15	Linearização Pt100. Faixa prog.: -200 a 530°C
0 - 50mV	16	Linear. Indicação programável de -1999 a 9999
4-20 mA	17	Linear. Indicação programável de -1999 a 9999
0 - 5Vdc	18	Linear. Indicação programável de -1999 a 9999
4-20mA	19	Extração da Raiz Quadrada da entrada

Tabela 1 - Tipos de entradas

Notas: Todos os tipos de entrada disponíveis já vêm calibrados de fábrica.

**4.2 SELEÇÃO DE SAÍDAS, ALARMES E ENTRADAS DIGITAIS**

O controlador possui canais de entrada e saída que podem assumir múltiplas funções: saída de controle, entrada digital, saída digital, saída de alarme, retransmissão de PV e SP. Esses canais são identificados como **I/O 1, I/O 2, I/O 3, I/O 4, I/O 5 e I/O 6**.

O controlador básico (standard) apresenta os seguintes recursos:

- I/O 1 e I/O 2 - Saída a Relé SPDT;
- I/O 3 e I/O 4 - Saída a Relé SPST;
- I/O 5 - Saída de Corrente (0-20mA ou 4-20mA), Saída Digital, Entrada Digital;
- I/O 6 - Entrada Digital.

A função a ser utilizada em cada canal de I/O é definida pelo usuário de acordo com as opções mostradas na Tabela 2. Somente são mostradas no display as opções válidas para cada canal. Estas funções são descritas a seguir:

**Nota: Quando selecionada a execução de uma função via Entrada Digital, o controlador deixa de responder ao comando da função equivalente feito pelo teclado frontal.**

- Código **0** - Sem função  
O canal I/O programado com código 0 não será utilizado pelo controlador. Embora sem função, este canal poderá ser acionado através de comandos via comunicação serial (comando 5 MODBUS).

- Códigos **1 a 4** - Saída de Alarme  
Disponível para todos os canais I/O, exceto I/O 6. Define que o canal I/O programado atue como uma das 4 saídas de alarme.

Figura B.2: Folha de dados do controlador Novus n2000



- **Código 5** - Saída de Controle (PWM)  
Disponível para todos os canais I/O, exceto I/O5. Define o canal I/O a ser utilizado como saída de controle principal, podendo ser relé ou pulso digital (para relé de estado sólido). A saída pulso é feita através do I/O 5).
  - **Código 6** - Entrada Digital  
Define canal para atuar como Entrada Digital que Alterna modo de controle entre Automático e Manual.  
Fechado = controle Manual;  
Aberto = controle Automático
  - **Código 7** - Entrada Digital  
Disponível para I/O5, I/O6 e tecla [F]. Define canal para atuar como Entrada Digital que Liga e desliga o controle (run YES/no).  
Fechado = saídas habilitadas  
Aberto = saída de controle e alarmes desligados;
  - **Código 8** - Entrada Digital  
Disponível para I/O5, I/O6 e tecla [E]. Define canal para selecionar SP remoto.  
Fechado = SP remoto;  
Aberto = SP principal
  - **Código 9** - Entrada Digital  
Disponível para I/O5, I/O6 e tecla [F]. Define canal para comandar a execução de programas.  
Fechado = habilita execução do programa,  
Aberto = interrompe programa
- Nota: Quando o programa é interrompido, sua execução é suspensa no ponto em que ele está (o controle continua ativo). O programa retoma sua execução normal quando o sinal aplicado à entrada digital permitir (contato fechado).
- **Código 10** - Entrada Digital  
Disponível para I/O5, I/O6 e tecla [E]. Define canal para selecionar execução do **programa 1**. Esta opção é útil quando se deseja alternar entre o setpoint principal e um segundo setpoint definido no programa de Rampas e Patamares.  
Fechado = seleciona programa 1,  
Aberto = assume o setpoint principal

Função de I/O	CÓDIGO	Tipo de I/O
Sem Função	0	Saída
Saída de Alarme 1	1	Saída
Saída de Alarme 2	2	Saída
Saída de Alarme 3	3	Saída
Saída de Alarme 4	4	Saída
Saída de Controle (Relé ou Pulso Digital)	5	Saída
Alterna modo Automático/Man	6	Entrada Digital
Alterna modo Run/Stop	7	Entrada Digital
Seleciona SP Remoto	8	Entrada Digital
Congela / Executa programa	9	Entrada Digital
Deseleciona / Seleciona programa 1	10	Entrada Digital
Saída de Controle Analógica 0 a 20mA	11	Saída Analógica
Saída de Controle Analógica 4 a 20mA	12	Saída Analógica
Retransmissão de PV 0 a 20mA	13	Saída Analógica
Retransmissão de PV 4 a 20mA	14	Saída Analógica
Retransmissão de SP 0 a 20mA	15	Saída Analógica
Retransmissão de SP 4 a 20mA	16	Saída Analógica

Tabela 2 - Tipos de funções para os canais I/O

- **Códigos 11 a 12** - Saída de Controle Analógica  
Disponível apenas para I/O 5. Programa a saída analógica para operar como saída de controle 0-20mA ou 4-20mA.

- **Códigos 13 a 16** - Retransmissão  
Disponível apenas para I/O 5. Programa a saída analógica para retransmitir PV ou SP em 0-20mA ou 4-20mA.

4.3 CONFIGURAÇÃO DE ALARMES

O controlador possui 4 alarmes independentes. Estes alarmes podem ser programados para operar com nove diferentes funções, representadas na Tabela 3.

TIPO	TELA	ATUAÇÃO
Inoperante	[OFF]	Saída não é utilizada como alarme.
Sensor aberto ou em curto (Input Error)	[Err]	Aconado quando o sinal de entrada da PV é interrompido, fica fora dos limites de faixa ou P1100 em curto.
Evento (ramp and Soak)	[E]	Aconado em um segmento específico de programa.
Resist. queimada (resistência fail)	[FR]	Sinaliza falha na resistência de aquecimento. Detecta a não presença de corrente.
Valor mínimo (Low)	[L]	
Valor máximo (High)	[H]	
Diferencial mínimo (diferencial Low)	[d.F]	
Diferencial máximo (diferencial High)	[d.H]	
Diferencial (diferencial)	[d.F]	

Tabela 3 - Funções de alarme

onde SPAn refere-se aos Setpoints de Alarme 'SPR1', 'SPR2', 'SPR3' e 'SPR4'

- **Sensor Aberto**  
O alarme de sensor aberto atua sempre que o sensor de entrada estiver rompido ou mal conectado.
- **Alarme de Evento**  
Aciona alarme(s) em segmento(s) específico(s) do programa. Ver item 8.2 deste manual.
- **Resistência queimada**  
Sinaliza que a resistência de aquecimento rompeu-se, monitorando a corrente na carga nos momentos em que a saída de controle está ativa. Essa função de alarme exige a presença de um acesso opcional (opção 3). Detalhes de uso da opção 'resistência queimada' estão em documentação específica que acompanha o produto sempre que essa opção for encomendada.
- **Valor Mínimo**  
Dispara quando o valor medido estiver **abaixo** do valor definido pelo Setpoint de alarme.
- **Valor Máximo**  
Dispara quando o valor medido estiver **acima** do valor definido pelo Setpoint de alarme.
- **Diferencial (ou Banda)**  
Nesta função os parâmetros 'SPR1', 'SPR2', 'SPR3' e 'SPR4' representam o Desvio da PV em relação ao SP principal.  
Para um Desvio Positivo o alarme Diferencial dispara quando o valor medido estiver **fora** da faixa definida por:  
**(SP - Desvio) e (SP + Desvio)**  
Para um Desvio Negativo o alarme Diferencial dispara quando o valor medido estiver **dentro** da faixa definida acima.
- **Diferencial Mínimo**  
Dispara quando o valor medido estiver **abaixo** do ponto definido por:  
**(SP - Desvio)**

Figura B.3: Folha de dados do controlador Novus n2000

- **Diferencial Máximo**  
Dispara quando o valor medido estiver **acima** do ponto definido por:  
 $(SP + \text{Desvio})$

**4.4 TEMPORIZAÇÃO DE ALARME**

O controlador permite programação de **Temporização dos Alarmes**, onde o usuário pode estabelecer atrasos no disparo do alarme, apenas um pulso no momento do disparo ou fazer que o disparo aconteça na forma de pulsos seqüenciais. A temporização está disponível apenas para os alarmes 1 e 2 e é programada através dos parâmetros **R1t1**, **R1t2**, **R2t1** e **R2t2**.

As figuras mostradas na Tabela 4 representam estas funções; t1 e t2 podem variar de 0 a 6500 segundos e suas combinações determinam o modo da temporização. Para que os alarmes tenham operação normal, sem temporizações, programar t1 e t2 com valor 0 (zero).

Os sinalizadores associados aos alarmes acendem sempre que ocorre a condição de alarme, independentemente do estado atual do relé de saída, que pode estar desenergizado momentaneamente em função da temporização.

Função de Saída do Alarme	t1	t2	ATUAÇÃO
Operação normal	0	0	
Atraso	0	1 a 6500s	
Pulso	1 a 6500s	0	
Oscilador	1 a 6500s	1 a 6500s	

Tabela 4 - Funções de Temporização para os Alarmes 1 e 2

**4.5 BLOQUEIO INICIAL DE ALARME**

A opção de **bloqueio inicial** inibe o acionamento do alarme caso exista condição de alarme no momento em que o controlador é ligado. O alarme só poderá ser acionado após a ocorrência de uma condição de não-alarme seguida de uma condição de alarme. O bloqueio inicial é útil, por exemplo, quando um dos alarmes está programado como alarme de valor mínimo, o que pode causar o acionamento do alarme na partida do sistema, comportamento muitas vezes indesejado.

O bloqueio inicial não é válido para a função Sensor Aberto.

**4.6 EXTRAÇÃO DA RAIZ QUADRADA**

Disponível quando selecionado tipo de entrada **19**. Com isso o indicador passa a apresentar no visor o valor correspondente a raiz quadrada do sinal de corrente aplicado aos terminais de entrada.

**4.7 RETRANSMISSÃO ANALÓGICA DA PV E SP**

O controlador possui uma saída analógica (I/O5) que pode realizar a retransmissão em 0-20mA ou 4-20mA proporcional aos valores de PV ou SP estabelecidos. A retransmissão analógica é escalável, ou seja, tem os limites mínimo e máximo, que definem a faixa de saída, definidos nos parâmetros **"SPLL"** e **"SPHL"**.

Para obter uma retransmissão em tensão o usuário deve instalar um resistor shunt (550 Ω máx.) nos terminais da saída analógica. O valor deste resistor depende da faixa de tensão desejada.

**4.8 SETPOINT REMOTO**

O controlador pode ter seu valor de SP definido através de um sinal de corrente 4-20mA gerado remotamente. Este recurso é habilitado através dos canais de I/O 5 e I/O6 quando utilizados como entrada digital e configurados com a função 8 da Tabela 2. "Seleciona SP Remoto".

Este recurso tem impedância de entrada de 100R (Zin= 100R).

**4.9 SOFT-START**

Define o intervalo de tempo para que a saída de controle possa atingir o seu valor máximo. O valor de saída varia progressivamente de 0 a 100% no intervalo de tempo programado na tela **"SFSt"**.

O Soft-start é normalmente utilizado em processos que requeiram partida lenta, onde a aplicação de 100% de potência no início da operação pode comprometer o sistema.

O valor saída de controle é determinada principalmente pela malha de controle PID. O Soft-start simplesmente limita essa saída. Ver também os parâmetros **"auLL"** e **"auRL"**.

**4.10 FUNÇÕES DE TECLA [F] E ENTRADA DIGITAL (I/O6 DIG IN)**

A tecla [F] (tecla de função especial) no painel dianteiro do controlador, bem como a entrada digital (I/O6 DIG IN), podem executar as funções 7, 8, 9 e 10 mostradas na Tabela 2, definidas pelo usuário na configuração do instrumento.

A função da tecla é definida pelo usuário no parâmetro **"FFun"**. A função da entrada digital é definida na configuração de I/O6.

A entrada digital pode ainda executar a função 6 da Tabela 2. Altera entre modo Manual e Automático.

**4.11 TECLA [M]**

A tecla [M] no painel dianteiro do controlador executa a função 6 da Tabela 2; Altera modo de controle entre manual e automático.

Antes de utilizada a tecla deve habilitada no parâmetro **RuEn**.

O sinalizador MAN acende quando o controle passa para o modo Manual.

**5 INSTALAÇÃO / CONEXÕES**

**5.1 MONTAGEM NO PAINEL**

O controlador deve ser fixado em painel, seguindo a seqüência de passos abaixo:

1. Fazer o recorte no painel;
2. Retirar as presilhas de fixação do controlador;
3. Inserir o controlador no recorte pelo frontal do painel;
4. Recolocar as presilhas no controlador pressionando até obter uma firme fixação junto ao painel.

**5.2 CONEXÕES ELÉTRICAS**

O circuito interno do controlador pode ser removido sem desfazer as conexões no painel traseiro. A disposição dos sinais no painel traseiro do controlador é mostrada na Figura 2.



Figura 2 - Conexões do painel traseiro

Figura B.4: Folha de dados do controlador Novus n2000