

MANUELA SOUZA LEITE

**PROJETO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DE UM
PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE
POLIMERIZAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO E
IMPLEMENTAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE
CONTROLES INTELIGENTES**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

CAMPINAS / SP/ BRASIL
Agosto - 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

MANUELA SOUZA LEITE

**PROJETO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DE UM
PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO
PARA O DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROLES INTELIGENTES**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva
Co-Orientadora: Liliane Maria Ferrareso Lona
Colaboradora: Ana Maria Frattini Fileti

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DE DOUTORADO
DEFENDIDA PELA ALUNA MANUELA SOUZA LEITE**

**CAMPINAS / SP/ BRASIL
Agosto - 2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

L536p Leite, Manuela Souza
Projeto, montagem e instrumentação de um protótipo experimental de sistema de polimerização para o desenvolvimento e implementação de diferentes técnicas de controles inteligentes / Manuela Souza Leite. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Flavio Vasconcelos da Silva.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Logica fuzzy. 2. Sistemas difusos. 3. Inteligência artificial. 4. Polimerização. 5. Estireno. I. Silva, Flavio Vasconcelos da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Design, assembly and instrumentation of an experimental prototype system for the polymerization of different development and implementation of intelligent control techniques

Palavras-chave em Inglês: Fuzzy logic, Fuzzy systems, Artificial intelligence, Polymerization, Styrene

Área de concentração: Sistema de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Aline Carvalho da Costa, Paulo Roberto Alves Pereira, Edson Romano Nucci, Luiz Antonio Rezende Muniz

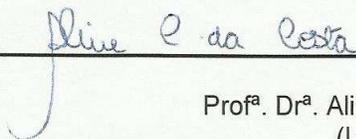
Data da defesa: 11-08-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

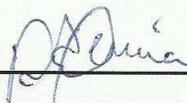
Tese de Doutorado defendida por Manuela Souza Leite e aprovada em 11/08/2011 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:



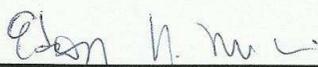
Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva - Orientador
(UNICAMP/ FEQ)



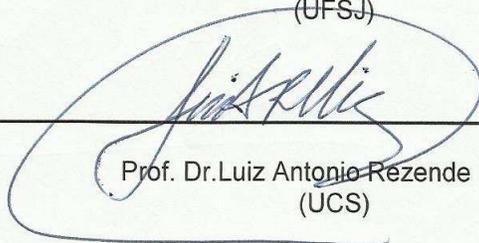
Prof.ª Dr.ª. Aline Carvalho da Costa
(UNICAMP)



Prof. Dr. Paulo Roberto Alves Pereira
(UNIFAL)



Prof. Dr. Edson Romano Nucci
(UFSJ)



Prof. Dr. Luiz Antonio Rezende Muniz
(UCS)

Este exemplar corresponde à Tese de Doutorado em Engenharia Química, apresentada por Manuela Souza Leite, em 11/08/2011.



Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva - Orientador
(UNICAMP/ FEQ)

(Orientador)

*Dedico este trabalho:
Ao meu Deus para honra e glória de Seu nome;
Aos meus pais Manoel Leite e Marivalda Leite, com
gratidão e amor.
Ao meu marido Paulo Jardel, por tudo que
compartilhamos nesta jornada.*

"Há os que se queixam do vento. Os que esperam que ele mude. E os que procuram ajustar as velas." (William G. Ward)

***Os que esperam no Senhor adquirirão sempre novas forças, tomarão asas como de águia, correrão e não fatigarão, andarão e não se desfalecerão.
(Isaías, 40:31)***

AGRADECIMENTOS

Há quatro anos atrás... na verdade poderia dizer mesmo há quase 6 anos: arrisquei-me em uma nova cidade, em um novo trabalho em um novo convívio. Hoje me sinto uma pessoa muito diferente, seja a partir de mudanças intelectuais e pessoais. Entendi melhor a frase de Einstein “A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Sim, há 4 anos que me deparei com um desafio, e que desafio! Desenvolver a tese de doutorado a partir de um sistema que eu mesma criaria no laboratório...pioneirismo...aprendizagem...habilidades...O desafio foi lançado e eu aceitei. Me dediquei, me doeie por completo, tentei fazer o melhor de mim. Claro, nem tudo é como gostaríamos que fosse. Existem os imprevistos e as adversidades. Mas enfim, a estrada é longa, a trajetória está apenas começando, mas este percurso finalmente chegou ao final. E agora não poderia deixar de expressar meus agradecimentos a pessoas que de alguma forma ajudaram nesta etapa tão importante da minha vida profissional:

Primeiramente, e principalmente, agradeço ao meu Deus, Senhor da minha vida, a quem eu devo tudo que conquistei. Àquele que segurou em minhas mãos e enxugou as minhas lágrimas quando o caminho parecia tão difícil, tão árduo...que iluminou a minha mente, acalmou me coração e se fez tão presente em minha vida. Esta finalização de minha tese de doutorado, em meio a dificuldades, contrariedades, muitas abdições, mas também tantos momentos agradáveis e edificantes, é para sua Glória Senhor! Sem Ti nada seria possível. Obrigada por minha saúde e por iluminar a minha mente. Te agradeço com todo meu coração Pai!

Ao meu marido, grande amor e amigo Paulo Jardel, por todo apoio, companheirismo, atenção, cuidado e incentivo. Agradeço a você meu amor que sempre esteve comigo quando eu mais precisei. A você, meu anjo, com quem compartilho dessa vitória. Com você que dividi minhas angústias e os melhores

momentos da minha vida. Obrigada por tornar minha vida mais especial e me fazer sentir uma pessoa mais forte. Obrigada por me ajudar e enxergar mais longe e a ser uma pessoa mais confiante e feliz. Eu te amo muito!

Aos meus eternos amores, motivos de grande alegria e incentivo para a minha vida: meus pais e meus irmãos! Meus amados pais, Marivalda e Manoel, aqueles que sempre incentivaram e realçaram meus potenciais, que a cada dia enchem minha vida de mais esperança, e me dão forças a enfrentar cada dia. A vocês que me proporcionaram a educação, um dos bens preciosos que sempre carregarei comigo e já se fez uma herança intelectual. Esta jornada de estudos, que hoje se caracteriza de uma etapa tão importante e sonhada, não seria possível, não fosse à intervenção de vocês que iniciou há tempos atrás. Obrigada meus preciosísimos pais! Eu os amo infinitamente! Agradeço também aos melhores irmãos e amigos que eu poderia ter: Viviane e Vinícius, que sempre torceram e acreditaram em mim, torcendo sempre pelo meu sucesso, e demonstrando tanto amor e carinho. Amo demais vocês meus maninhos!; Agradeço ao meu querido cunhado Clemisson pelo apoio e ao pedacinho do meu coração, minha princesinha Yasmin, que nasceu exatamente no mesmo período que esta tese se iniciou e me trouxe tantas alegrias. Vocês família, são presentes de Deus, incentivo e orgulho em minha vida!

Agradeço aos meus avós, minhas cunhadas, minha sogra, primos, tios e amigos que se orgulharam e torceram por mim nesta caminhada. Em especial a minha vózinha (Carmelita) e a minha sogra (D. Rita) por suas orações e tantas palavras de carinho que serviram de conforto para mim.

Aos professores Flávio Vasconcelos e a Ana Maria Frattini pelas oportunidades concedidas, parceria, e confiança depositada em mim para a realização deste trabalho. Agradeço pela liberdade de ação que me permitiram, a qual foi decisiva para que este trabalho contribuísse para o meu desenvolvimento pessoal. Agradeço também a professora Liliane Lona pela contribuição na área de processo de polimerização fundamental na etapa de desenvolvimento do projeto inicial e análises finais para conclusão do trabalho.

À professora Teresa Kakuta pelas oportunidades de participação em estágios docentes e pelo exemplo de caráter e profissionalismo na área acadêmica que me proporcionou, e ainda exemplos de vida. Levarei estes ensinamentos ao longo da minha vida. Obrigada pela orientação e amizade. Agradeço também ao professor Elias Tambougui por se ter se mostrado sempre tão atencioso e disposto a ajudar.

À UNICAMP/ FEQ/ DESQ pelo acolhimento e pela oportunidade de desenvolver esta tese. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), agência financiadora de pesquisa, pela bolsa de doutorado concedida a mim e tornou possível o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo para a minha formação profissional. À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), órgão financiador deste projeto, pelo apoio financeiro que viabilizou a montagem e automação do protótipo experimental de polimerização desenvolvido para a aplicação de controladores.

Durante a etapa inicial da realização do projeto de montagem do sistema experimental, tive a oportunidade de conhecer vários fornecedores e empresas. No entanto, alguns técnicos/fornecedores muito me auxiliaram com acessoria na fase de aquisição de equipamentos e materiais para o desenvolvimento do protótipo, e quero deixar registrado aqui meus agradecimentos pela contribuição e atenção especial de: Wescley Teixeira e Eng. Thiago Camocardi, da empresa Metroval, pelos empréstimos dos equipamentos densímetro e coriolis, por um prazo de demonstração antes de efetuar-se a compra dos mesmos, e extrema paciência e atenção; e Ao Senhor Azarias (Unicoifas) pelas informações prestadas durante o projeto e dimensionamento da Capela; E ainda: Nelson Sales (Reator inox); Bueno (Everest); Dirceu (Inbal); Fernando (Smar), Marco Antonio (Merse); Ricardo (RZR bombas); Nei (MGI), Paulo (SOS Parafusos).

Aos meus queridos amigos e vizinhos com os quais pude desfrutar de momentos tão agradáveis nos finais de semana, e que com certeza deixarão muitas saudades: meus queridos padrinhos que admiro Luiz e Roberta, a doce Juliana, ao Martin, a Aline e a pequena Júlia.

A Dona Terezinha Farah pela atenção e moradia na Pousada do Sol, onde pude passar uns dos melhores anos da minha vida, neste lugar tão sossegado e que pude encontrar e fazer amizades com pessoas tão especiais e de diferentes culturas. Momentos inesquecíveis! E com certeza, é o que mais me deixará com saudades de Campinas.

À Equipe do Laboratório LCAP e LESQ, em especial: Lílian, Brunno, Rejane, Raphael, Rômulo, Elisângela. Nossas pausas para o cafezinho foram muito agradáveis e tão divertidas. Também registro meu agradecimento ao amigo Sr.Georges pelas palavras de carinho e sabedoria.

Aos técnicos Mascos Estevom, Daniel Moura e Fernando Beluomini pela disponibilidade em ajudar sempre que solicitados, e pela relação agradável de amizade durante este tempo. Ao técnico “tchu-tchu-tchu” pela disponibilidade do laboratório da Graduação durante os testes iniciais de reação de polimerização; E ao técnico “Pim-pim” (Química) por toda sua boa vontade e disposição em ajudar voluntariamente na construção da linha de nitrogênio gasoso, por ceder algumas peças necessárias para esta linha e por alertar sobre os cuidados a serem tomados durante a manipulação com o cilindro deste gás.

Ao mestrando Gabriel por toda a atenção dispensada quando da realização de análises viscosimétricas e utilização da balança e estufa. A doutoranda Caroline Paganucci pelos empréstimos de material e explicações das análises de GPC e ao técnico Fernando Frederico pelas injeções das amostras para análise de cromatografia.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Deixo aqui a minha grande contribuição nesta instituição e na área acadêmica e, espero que minha passagem possa sempre ser lembrada de forma positiva. Obrigada!

Manuela.

“As pessoas se esquecerão do que você disse... as pessoas se esquecerão do que você fez... mas as pessoas nunca se esquecerão de como você as tratou.”

RESUMO

Através de processos de polimerização pode-se obter uma enorme diversidade de produtos de grande interesse industrial, devido a sua vasta gama de aplicações. Cada reação deve ser feita com finalidades específicas, e então os polímeros devem ser produzidos sob certas condições operacionais estabelecidas, que lhe atribuem características relacionadas às suas aplicações.

Buscando soluções para os diversos desafios existentes em processos de polimerização, tem sido crescente o número de trabalhos que buscam novas estratégias de controle mais eficazes para tais sistemas. O controle de um reator de polimerização apresenta grande dificuldade devido a sua natureza altamente não-linear e complexidade do mecanismo cinético da reação.

Muitos dos algoritmos convencionais de controle não atendem, em sua totalidade, as exigências cada vez mais específicas destes processos e, visando atender estas necessidades, tem ocorrido nos últimos anos, um crescimento considerável na aplicação de estratégias de controle avançado em processos de polimerização.

Este trabalho teve como proposta a montagem de um protótipo experimental, utilização de tecnologia de automação, desenvolvimento e implementação de estratégias de controle baseadas em inteligência artificial, especificamente, lógica *fuzzy*. A configuração do sistema experimental permitiu o acompanhamento em tempo real das principais variáveis do processo, possibilitando o uso de medidas on-line de variáveis, como viscosidade e densidade, as quais estão relacionadas indiretamente com o peso molecular e conversão, respectivamente. As estratégias de controle foram desenvolvidas com o objetivo de proporcionar a manutenção da temperatura da reação de polimerização em solução, e em batelada, do estireno, uma vez que esta variável possui influência direta na qualidade do produto final. O estireno foi selecionado como estudo de caso devido a sua importância industrial e ampla faixa de aplicação.

Foram implementados no sistema experimental controladores mono e multivariáveis, e com saídas do tipo incremental e posicional, utilizando-se de modelos Mamdani e Sugeno. A reação foi conduzida por 3 horas, a um *set-point* de 90°C, utilizando uma concentração do monômero estireno de 50% em volume, e como solvente o tolueno, tendo o BPO (peróxido de benzoíla) como iniciador. Foi definido um sistema de controle tipo cascata-fuzzy, o qual trata-se de um sistema que apresenta inediticidade, visto que não foram encontradas na literatura aplicações com esta configuração. Os controladores inteligentes foram aplicados na malha principal, tendo como variável de saída (variável intermediária) a temperatura da camisa do reator, e a variação de potência da resistência imersa no fluido térmico da camisa, como variável manipulada deste processo.

As estratégias de controle, implementadas para um mesmo estudo de caso, foram analisadas conforme suas características, e todas as estruturas apresentaram eficiência do controle da reação de polimerização. A eficiência do sistema foi avaliada através do comportamento das variáveis controlada e manipulada, análise de índices de desempenho dos controladores (ISE, ITSE, IAE e ITAE), consumo de energia elétrica, visando redução de custos operacionais e, análise das propriedades finais do polímero obtido tais como: peso molecular médio, polidispersidade e produtividade (conversão).

Palavras-Chaves: Controladores fuzzy, Mamdani e Sugeno, Neuro-fuzzy, Polimerização, Estireno, Sistema experimental, CLP, Inteligência artificial.

ABSTRACT

The favorable properties of polymeric products such as its usage, flexibility, light weight, low cost and its ease of processing, results in increased on their demand. Polymerization reactors have nonlinear natures and they show time varying behaviour. Their dynamic nature and the wide variations in operating conditions during batch cycles can make the reactor control difficult and important. Temperature variations greatly affect the kinetics of polymerization process and the produced polymer. As a result, to keep the product quality constant, the temperature of the reactor should be efficiently controlled. However, the control of polymerization reactors in general and particularly batch polymerization reactors is very difficult due to its complex characteristics.

Advanced control techniques can be used as a viable solution for controlling and improving the efficiency and productivity of such nonlinear processes. Until recently, application of intelligent system such as fuzzy logic control in batch polymerization reactor control has been realized.

This work included the installation of an experimental prototype, automation techniques, development and implementation of fuzzy control strategies in a batch polymerization reactor. The experimental system allowed real-time monitoring of key process variables. The design enables on-line measurement of variables indirectly related to the molecular weight and conversion, such as viscosity and density.

A free radical polymerization of styrene was chosen as a process for the investigation, because polystyrene is an important product in today's industrial polymers and it has a very wide range of applications. In this process, temperature control is the most important control problem.

Styrene (50%, v/v), toluene and benzoylperoxide (BPO) were used as the monomer, solvent and initiator, respectively. The reaction was conducted for 3 hours at a set point of 90 °C. Setting an unprecedented fuzzy-cascade was employed. The intelligent controllers have been applied in the primary loop. The secondary variable was the temperature of the reactor jacket, and the power variation of resistance immersed in a heat transfer fluid that circulates through the jacket, as manipulated variable in this process.

The experimental results show the effectiveness of fuzzy controller strategies. System efficiency was evaluated through the behavior of the controlled and manipulated variables, analysis of performance indices of the controllers (ISE, ITSE, IAE and ITAE), energy consumption, to reduce costs operational and analysis of the final properties of the polymer obtained such as average molecular weight, polydispersity and conversion.

Keywords: *Fuzzy controllers, Sugeno and Mamdani models, Neuro-fuzzy, Polymerization, Styrene, Experimental system, CLP, Artificial Intelligence.*

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1. LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA NO PROTÓTIPO.	40
TABELA 2.2 - EQUAÇÕES OBTIDAS A PARTIR DA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA.	52
TABELA 3.1 – RESUMO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS PREVIAMENTE DEFINIDAS	105
TABELA 4.1. COMPARAÇÃO ENTRE REDES NEURAIS E SISTEMAS DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	133
TABELA 4.2. RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS DE CONTROLE CASCATA.	146
TABELA 4.3. REGRAS DE SINTONIA DE ZIGLER-NICHOLS (1º MÉTODO). .	148
TABELA 4.4. PARÂMETROS DOS CONTROLADORES CONVENCIONAIS. ..	152
TABELA 4.5. VALORES DE VISCOSIDADE CALCULADOS POR INFERÊNCIA E LIDOS ATRAVÉS DE VISCOSÍMETRO.	156
TABELA 5.1. RESUMO DAS CONFIGURAÇÕES DOS CONTROLADORES INTELIGENTES IMPLEMENTADOS NO SISTEMA EXPERIMENTAL DE POLIMERIZAÇÃO.	171
TABELA 5.2. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS INICIAIS PARA CONTROLADORES <i>FUZZY</i> POSICIONAL COM 5 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.	173

TABELA 5.3. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS INICIAIS PARA CONTROLADORES <i>FUZZY</i> INCREMENTAL COM 5 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.	174
TABELA 5.4 - MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> MISO.....	182
TABELA 5.5. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> MISO	186
TABELA 5.6. PARÂMETROS ADOTADOS PARA O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> S MISO.....	191
TABELA 5.7. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> S MISO.....	194
TABELA 5.8. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS ADOTADAS PARA O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> -PI.....	198
TABELA 5.9. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> PI SISO.....	203
TABELA 5.10. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS ADOTADAS PARA O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> -PD, QUE CONSTITUI O <i>FUZZY</i> -PID.....	207
TABELA 5.11. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS ADOTADAS PARA O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> -PI, QUE CONSTITUI O <i>FUZZY</i> -PID.	207
TABELA 5.12. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> -PID.	212
TABELA 5.13. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS ADOTADAS PARA O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> -PD SIMO, PARTE POSICIONAL.	216
TABELA 5.14. MATRIZ BIDIMENSIONAL DE BASE DE REGRAS ADOTADAS PARA O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> -PI SIMO, PARTE INCREMENTAL.	216

TABELA 5.15. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR <i>FUZZY SIMO</i>	221
TABELA 5.16. PARÂMETROS ADOTADOS PARA O CONTROLADOR NEURO- <i>FUZZY</i> , COM DADOS ' <i>CLUSTERIZADOS</i> '.....	232
TABELA 5.17. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO CONTROLADOR NEURO- <i>FUZZY</i>	236

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - ESQUEMA PARA DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	6
FIGURA 1.2 - ESQUEMA DE ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	8
FIGURA 2.1. ESTRUTURA BÁSICA DE UM CLP	16
FIGURA 2.2. SUPORTE METÁLICO PARA O SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO. 23	
FIGURA 2.3. CAPELA MODULAR PARA O SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO. ...	25
FIGURA 2.4. PROJETO DE CONFECÇÃO DO REATOR.....	26
FIGURA 2.5. PROJETO DE CONFECÇÃO DO TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE FLUIDO TÉRMICO.....	27
FIGURA 2.6. MONTAGEM DAS LINHAS DE (A) COBRE E (B) INOX.	28
FIGURA 2.7. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP) UTILIZADO NO PROTÓTIPO.	29
FIGURA 2.8. CICLO DE VARREDURA DE UM CLP.	31
FIGURA 2.9 BOMBAS VOLUMÉTRICAS PARA OS FLUIDOS (A) POLIMÉRICO E (B) TÉRMICO.....	32
FIGURA 2.10. INVERSORES DE FREQUÊNCIA (A) FLUIDO POLIMÉRICO (B) FLUIDO TÉRMICO.....	33
FIGURA 2.11. VARIADOR DE POTÊNCIA UTILIZADO NO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO.....	35

FIGURA 2.12. AGITADORES UTILIZADOS NO (A) TANQUE E NO (B) REATOR DE POLIMERIZAÇÃO.....	37
FIGURA 2.13. FLUXOGRAMA DE REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO.....	38
FIGURA 2.14. (A) SENSOR DE TEMPERATURA COM CABEÇOTE E (B) UNIDADE DE TRANSMISSÃO DE TEMPERATURA.	39
FIGURA 2.15. SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL UTILIZADO NO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO.....	41
FIGURA 2.16. MEDIDOR DE VAZÃO MÁSSICA CORIOLIS (A) TRANSMISSOR E (B) SENSOR.	43
FIGURA 2.17. TRANSMISSOR DE DENSIDADE PARA MEDIDAS ON-LINE UTILIZADO NO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO.....	44
FIGURA 2.18. ESQUEMA ILUSTRATIVO DA ETAPA INICIAL DA MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO DE COMANDO.....	45
FIGURA 2.19. DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA INSTALADOS NO PAINEL ELÉTRICO DE COMANDO.....	46
FIGURA 2.20. PROTÓTIPO EXPERIMENTAL PARA REAÇÕES DE POLIMERIZAÇÃO.....	48
FIGURA 2.21 - COMPORTAMENTO DA VAZÃO DO FLUIDO TÉRMICO COM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA ROTAÇÃO DA BOMBA.	50
FIGURA 2.22 - COMPORTAMENTO DA POTÊNCIA CONSUMIDA PELO MOTOR DA BOMBA DO FLUIDO TÉRMICO COM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA ROTAÇÃO.	51
FIGURA 2.23 - CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE TEMPERATURA INSTALADO NO INTERIOR DO REATOR.	53

FIGURA 2.24. FONTES ELÉTRICAS PARA POSSIBILITAR A COMUNICAÇÃO.	54
FIGURA 2.25. MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO DE COMANDO	54
FIGURA 2.26. AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO SPDSW	56
FIGURA 2.27. ILUSTRAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO <i>LADDER</i>	57
FIGURA 2.28. TELA DE MONITORAMENTO ON-LINE DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO, UTILIZANDO O SISTEMA SUPERVISÓRIO INDUSOFT	60
FIGURA 2.29. BLOCOS PARA SUPERVISÃO, ARMAZENAMENTO DE DADOS E CONTROLE DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO.	62
FIGURA 2.30. EXEMPLO DE GRÁFICO DE SUPERVISÃO EM TEMPO REAL, NO SIMULINK, DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.	62
FIGURA 3.1. PERFIL DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO FLUIDO POLIMÉRICO EM TRÊS PROPORÇÕES (70%, 50% E 30% DO MONÔMERO, EM VOLUME), EM ENSAIOS DE BANCADA.	91
FIGURA 3.2. PERFIL DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO REATOR EM ENSAIOS DE BANCADA E ENSAIOS REALIZADOS NO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE POLIMERIZAÇÃO (50%/50% ESTIRENO/TOLUENO).	92
FIGURA 3.3. PERFIL DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO BECKER EM ENSAIO DE BANCADA E ENSAIO NO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE POLIMERIZAÇÃO, SEM CIRCULAÇÃO DA LINHA DO FLUIDO POLIMÉRICO (50%/50% ESTIRENO/TOLUENO).	94
FIGURA 3.4. PERFIS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO REATOR E DA CAMISA, COM CIRCULAÇÃO DO FLUIDO POLIMÉRICO, COM E SEM ADIÇÃO DE INICIADOR NA REAÇÃO (50%/50% ESTIRENO/TOLUENO).....	97

FIGURA 3.5. PERFIL DE VARIAÇÃO DE DENSIDADE (DDENS), DO FLUIDO POLIMÉRICO, COM E SEM ADIÇÃO DE INICIADOR NA REAÇÃO (50%/50% ESTIRENO/TOLUENO).	97
FIGURA 3.6. PERFIS DE VAZÃO MÁSSICA (QM) E PRESSÃO DIFERENCIAL (PD) DO FLUIDO POLIMÉRICO, COM E SEM ADIÇÃO DE INICIADOR NA REAÇÃO (50%/50% ESTIRENO/TOLUENO).	98
FIGURA 3.7. PERFIS DE VARIAÇÃO DE DENSIDADE (dDENS), DO FLUIDO POLIMÉRICO, A DIFERENTES PROPORÇÕES DE ESTIRENO/TOLUENO: 50%/50% E 30%/70%.	101
FIGURA 3.8. COMPORTAMENTO DA VARIAÇÃO DA VARIÁVEL CONTROLADA FRENTE A PERTURBAÇÕES NA ROTAÇÃO DA BOMBA QUE IMPULSIONA O FLUIDO TÉRMICO PELA CAMISA DO REATOR, OU SEJA, FRENTE A MUDANÇAS NA VAZÃO DE CIRCULAÇÃO.	103
FIGURA 4.1. FLUXO DE INFORMAÇÕES PARA ATUAÇÃO DE UM CONTROLADOR.	112
FIGURA 4.2. UNIÃO ENTRE CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	117
FIGURA 4.3. INTERSEÇÃO ENTRE CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	118
FIGURA 4.4. FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA (A) TRIANGULAR, (B) TRAPEZOIDAL E (C) GAUSSIANA	121
FIGURA 4.5. ESTRUTURA DE UM SISTEMA COM CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	123
FIGURA 4.6. SISTEMA <i>FUZZY</i> DO TIPO TAKAGI-SUGENO.	128
FIGURA 4.7. ESTRUTURAS BÁSICAS DOS CONTROLADORES POSICIONAIS (A) <i>FUZZY</i> -PD, (B) <i>FUZZY</i> -PI, (C) E (D) <i>FUZZY</i> -PID.	130
FIGURA 4.8. ESTRUTURAS BÁSICAS DOS CONTROLADORES INCREMENTAIS (A) <i>FUZZY</i> -PD, (B) <i>FUZZY</i> -PI, (C) E (D) <i>FUZZY</i> -PID.	131

FIGURA 4.9. ARQUITETURA DO NEURO- <i>FUZZY</i> ANFIS.....	135
FIGURA 4.10. ESQUEMA DE IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE CASCATA.	143
FIGURA 4.11. A) CONTROLE CONVENCIONAL; B) CONTROLE CASCATA TEMPERATURA-TEMPERATURA.....	145
FIGURA 4.12 A. RESPOSTA DE UM PROCESSO A UMA PERTURBAÇÃO DO TIPO DEGRAU (ZIEGLER-NICHOLS).....	147
FIGURA 4.12 B. CURVA DE REAÇÃO EM FORMA DE S, PARA MÉTODO DE ZIEGLER NICHOLS.....	147
FIGURA 4.14. ENSAIO DE CONTROLE MANUAL 1 (PV X MV).....	154
FIGURA 4.15. ENSAIO DE CONTROLE MANUAL 2 (PV X MV).....	154
FIGURA 4.16. ENSAIOS DE CONTROLE MANUAL 1 E 2 (TEMPERATURA DO TANQUE).....	155
FIGURA 4.17. ENSAIOS DE CONTROLE MANUAL 1 E 2 (QM X PD).	155
FIGURA 4.18. COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS DE VARIAÇÃO DE DENSIDADE PARA ENSAIOS DE CONTROLE EM MALHA ABERTA E MALHA FECHADA	157
FIGURA 5.1A. EDIÇÃO DA BASE DE REGRAS DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PI</i> SISO.....	174
FIGURA 5.1B. EDIÇÃO DA BASE DE REGRAS DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> SIMO.....	175
FIGURAS 5.2. SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS CONTROLADORES (A) <i>FUZZY</i> MISO E (B) <i>FUZZY</i> S MISO, RESPECTIVAMENTE, ATRAVÉS DA SINTONIA DO <i>TOOLBOX FUZZY</i>	176

FIGURA 5.2 (C). SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONTROLADOR FUZZY-PI SIMO, ATRAVÉS DA SINTONIA DO <i>TOOLBOX FUZZY</i>	177
FIGURA 5.3 - ESTRUTURA DO CONTROLADOR FUZZY MISO, EM CASCATA.	178
FIGURA 5.4. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY-MISO, POSICIONAL	179
FIGURA 5.5 - ESTRUTURAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS VARIÁVEIS (A) TXDENS (B) ERROTRT E (C) SPTTQ EMPREGADAS NO DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY MISO.....	181
FIGURA 5.6. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO CONTROLADOR DENOMINADO FUZZY MISO, AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.....	184
FIGURA 5.7. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CONTROLADA E MANIPULADA UTILIZANDO CONTROLADOR FUZZY MISO NA MALHA DE PROCESSO.....	184
FIGURA 5.8. ESTRUTURA DO CONTROLADOR FUZZY S MISO, EM CASCATA.	187
FIGURA 5.9. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY S MISO POSICIONAL NO MATLAB 7.0.1.....	188
FIGURA 5.10. ESTRUTURAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS VARIÁVEIS (A) TXDENS (B) ERROTRT EMPREGADAS NO DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY S.	189
FIGURA 5.11. CURVA DO ERRO DE TREINAMENTO DA ESTRUTURA DO CONTROLADOR FUZZY S MISO	190

FIGURA 5.12. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO CONTROLADOR DENOMINADO <i>FUZZY S MISO</i> , AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.....	192
FIGURA 5.13. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CONTROLADA E MANIPULADA UTILIZANDO CONTROLADOR <i>FUZZY S MISO</i> NA MALHA DE PROCESSO.....	193
FIGURA 5.14. ESTRUTURA DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PI</i> , EM CASCATA.	195
FIGURA 5.15. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PI</i> NO MATLAB 7.0.1.....	196
FIGURA 5.16. ESTRUTURAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS VARIÁVEIS (A) ERROTRT (B) DERROTRT E (C) DSPTTQ EMPREGADAS NO DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>FUZZY PI</i>	197
FIGURA 5.17. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PI</i> , AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.	201
FIGURA 5.18. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CONTROLADA E MANIPULADA UTILIZANDO CONTROLADOR <i>FUZZY-PI</i> NA MALHA DE PROCESSO.....	202
FIGURA 5.19. ESTRUTURA DE CONTROLADORES (A) <i>FUZZY-PI</i> INCREMENTAL E (B) <i>FUZZY-PD</i> POSICIONAL COM DUAS ENTRADAS.	204
FIGURA 5.20. ESTRUTURA HÍBRIDA DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PID</i>	205
FIGURA 5.21. ESTRUTURA DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PID</i> , EM CASCATA.	206
FIGURA 5.22. ESTRUTURAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS VARIÁVEIS (A) ERROTRT (B) DERROTRT E (C) DSPTTQ EMPREGADAS NO	

DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PID</i> (<i>FUZZY-PI+FUZZY-PD</i>).	209
FIGURA 5.23. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PID</i> , AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.	210
FIGURA 5.24. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CONTROLADA E MANIPULADA UTILIZANDO CONTROLADOR <i>FUZZY-PID</i> , NA MALHA DE PROCESSO.....	211
FIGURA 5.25. ESTRUTURA SIMPLIFICADA PARA CONTROLADOR TIPO <i>FUZZY-PID</i>	213
FIGURA 5.26. ESTRUTURA DO CONTROLADOR <i>FUZZY- SIMO</i> , EM CASCATA.	214
FIGURA 5.27. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>FUZZY-SIMO</i> NO MATLAB 7.0.1.....	214
FIGURA 5.28. ESTRUTURAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA (A) ERROT RT E (B) DERROT RT E PARA AS VARIÁVEIS DE SAÍDA (C) DSPTTQ E (D) %INVFREQ UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>FUZZY-PI (SIMO)</i>	217
FIGURA 5.29. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO CONTROLADOR <i>FUZZY SIMO</i> , AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.	219
FIGURA 5.30. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CONTROLADA E DE SAÍDA DO CONTROLADOR <i>FUZZY SIMO</i> NA MALHA DE PROCESSO.	220
FIGURA 5.31. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS MANIPULADA E DE SAÍDA DO CONTROLADOR <i>FUZZY SIMO</i> NA MALHA DE PROCESSO.....	220

FIGURA 5.32. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA NEURO-FUZZY.	223
FIGURA 5.33. ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UM MODELO NEURO-FUZZY... ..	224
FIGURA 5.34. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR NEURO-FUZZY NO MATLAB 7.0.1	226
FIGURA 5.35. ESTRUTURA DO CONTROLADOR NEURO-FUZZY.	227
FIGURA 5.36 - ESTRUTURAS INICIAIS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA (A) $T_{RT(K)}$, (B) $T_{RT(K-20)}$, (C) $T_{IN(K)}$, (D) $T_{IN(K-20)}$, (E) $\%VP_{(K)}$ E (F) $\%VP_{(K-20)}$ UTILIZADAS NO PROJETO DO CONTROLADOR <i>NEURO-FUZZY</i>	228
FIGURA 5.37. ESTRUTURA NEURAL DO CONTROLADOR NEURO-FUZZY..	230
FIGURA 5.38. CURVA DO ERRO DE TREINAMENTO DA ESTRUTURA DO CONTROLADOR NEURO-FUZZY.....	230
FIGURA 5.39 - ESTRUTURAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA, OTIMIZADAS PELO ANFIS, PARA AS VARIÁVEIS DE ENTRADA (A) $T_{RT(K)}$, (B) $T_{RT(K-20)}$, (C) $T_{IN(K)}$, (D) $T_{IN(K-20)}$, (E) $VP_{(K-20)}$ E (F) $VP_{(K)}$, UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR <i>NEURO-FUZZY</i>	231
FIGURA 5.40. COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS CONTROLADA E MANIPULADA COM A IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR NEURO-FUZZY NO PROCESSO.....	235
FIGURA 6.1. ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS ANÁLISES DE CROMATOGRAFIA DE AMOSTRAS POLIMÉRICAS EM UMA COLUNA DE PERMEAÇÃO EM GEL.....	250

FIGURA 6.2. COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE <i>OVERSHOOT</i> (SOBRESSINAL) OBSERVADOS NO PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO, SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.....	252
FIGURA 6.3. COMPARAÇÃO ENTRE TEMPOS DE SUBIDA OBSERVADOS NO PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO, SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.	253
FIGURA 6.4. COMPARAÇÃO ENTRE TEMPOS DE ESTABILIZAÇÃO OBSERVADOS NO PROCESSO DE POLIMERIZAÇÃO, SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.	253
FIGURA 6.5. VALOR DO PARÂMETRO ISE (INTEGRAL DO QUADRADO DO ERRO) PARA ENSAIOS REALIZADOS SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE.....	254
FIGURA 6.6. VALOR DO PARÂMETRO ITSE (INTEGRAL DO QUADRADO DO ERRO, COM PESO TEMPORAL) PARA ENSAIOS REALIZADOS SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE.	255
FIGURA 6.7. VALOR DO PARÂMETRO IAE (INTEGRAL DO ERRO ABSOLUTO) PARA ENSAIOS REALIZADOS SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE.....	255
FIGURA 6.8. VALOR DO PARÂMETRO ITAE (INTEGRAL DO ERRO ABSOLUTO, COM PESO TEMPORAL) PARA ENSAIOS REALIZADOS SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE.	256
FIGURA 6.9. COMPARAÇÃO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA, DEVIDO À VARIAÇÃO DE POTÊNCIA, PARA ENSAIOS REALIZADOS SOB DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE.....	258
FIGURA 6.10. PERFIL DE CONVERSÕES EXPERIMENTAIS UTILIZANDO DIFERENTES CONTROLADORES X CONVERSÃO POR SIMULAÇÃO.	260

FIGURA 6.11. PERFIL DE CONVERSÃO X VARIAÇÃO DE DENSIDADE NO ENSAIO UTILIZANDO O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> MISO.	260
FIGURA 6.12. PERFIL DE CONVERSÃO X VARIAÇÃO DE DENSIDADE NO ENSAIO UTILIZANDO O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> S MISO.	261
FIGURA 6.13. PERFIL DE CONVERSÃO X VARIAÇÃO DE DENSIDADE NO ENSAIO UTILIZANDO O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> PI.	261
FIGURA 6.14. PERFIL DE CONVERSÃO X VARIAÇÃO DE DENSIDADE NO ENSAIO UTILIZANDO O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> PID.	262
FIGURA 6.15. PERFIL DE CONVERSÃO X VARIAÇÃO DE DENSIDADE NO ENSAIO UTILIZANDO O CONTROLADOR <i>FUZZY</i> PI SIMO.	262
FIGURA 6.16. PERFIL DE CONVERSÃO X VARIAÇÃO DE DENSIDADE NO ENSAIO UTILIZANDO O CONTROLADOR NEURO- <i>FUZZY</i> MISO.	263
FIGURA 6.17. PERFIS DE MASSA MOLECULAR NUMÉRICA, MN, DE ENSAIOS EM MALHA FECHADA UTILIZANDO AS DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROLES, AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.	265
FIGURA 6.18. PERFIS DE MASSA MOLECULAR PONDERAL, MW, DE ENSAIOS EM MALHA FECHADA UTILIZANDO AS DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROLES INTELIGENTES, AO LONGO DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO.	266
FIGURA 6.19. PERFIS DE MASSA MOLECULAR NUMÉRICA, MN, DE ENSAIOS EM MALHA ABERTA, MALHA FECHADA (<i>NEURO-FUZZY</i> E <i>FUZZY</i> -PID), ENSAIO DE CONTROLE MANUAL (CM3) E POR SIMULAÇÃO, AO LONGO DA REAÇÃO.	267
FIGURA 6.20. PERFIS DE MASSA MOLECULAR PONDERAL, MW, DE ENSAIOS EM MALHA ABERTA, MALHA FECHADA (<i>NEURO-FUZZY</i> E <i>FUZZY</i> -	

PID), ENSAIO DE CONTROLE MANUAL (CM3) E POR SIMULAÇÃO, AO LONGO DA REAÇÃO. **268**

FIGURA 6.21. PERFIS DE ÍNDICE DE POLIDISPERSIDADE, PDI, DE ENSAIOS EM MALHA ABERTA, MALHA FECHADA (NEURO-FUZZY E FUZZY-PID), ENSAIO DE CONTROLE MANUAL (CM3) E POR SIMULAÇÃO, AO LONGO DA REAÇÃO. **269**

FIGURA 6.22. CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MASSA MOLECULAR, AO LONGO DA REAÇÃO, REFERENTE AO ENSAIO DE MALHA FECHADA COM CONTROLE NEURO-FUZZY. (EIXO X = LOG MASSA MOLECULAR; EIXO Y=FRAÇÃO DA MASSA) **272**

FIGURA 6.23. CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MASSA MOLECULAR, AO LONGO DA REAÇÃO, REFERENTE AO ENSAIO DE MALHA FECHADA COM CONTROLE FUZZY-PID. (EIXO X = LOG MASSA MOLECULAR; EIXO Y=FRAÇÃO DA MASSA) **273**

FIGURA 6.24. CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MASSA MOLECULAR, AO LONGO DA REAÇÃO, REFERENTE AO ENSAIO DE CONTROLE MANUAL CM3. (EIXO X = LOG MASSA MOLECULAR; EIXO Y=FRAÇÃO DA MASSA) **274**

FIGURA 6.25. CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE MASSA MOLECULAR, AO LONGO DA REAÇÃO, REFERENTE AO ENSAIO EM MALHA ABERTA (MA). (EIXO X = LOG MASSA MOLECULAR; EIXO Y= FRAÇÃO DA MASSA) **275**

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	XI
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE FIGURAS.....	XXIII

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO	2
1.2 - OBJETIVO	4
1.3 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	5
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	7
1.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9

CAPÍTULO 2. PROJETO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO	11
---	-----------

2.1 - INTRODUÇÃO.....	11
2.2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.2.1 - <i>Automação, Instrumentação e Controle de processos</i>	12
2.2.2 – <i>CLP</i>	14
2.2.2.1 <i>Estrutura Básica de um CLP</i>	15
2.2.3 – <i>Comunicação OPC</i>	19
2.2.4 – <i>Sistemas de supervisão</i>	20
2.3 – METODOLOGIA	21
2.3.1 – <i>Projeto e montagem do sistema de polimerização</i>	21
2.3.2 – <i>Etapas para a montagem do sistema experimental de polimerização</i> 23	
2.3.2.1 <i>Confecção do suporte do sistema de polimerização</i>	23

2.3.2.2 Projeto de construção da capela	24
2.3.2.3 Confeção do reator de polimerização e do tanque de armazenamento do fluido térmico	26
2.3.2.4 Aquisição de reagentes e vidrarias e equipamentos de segurança	27
2.3.2.5 Montagem das linhas de processo	28
2.3.3 – Equipamentos necessários para compor o sistema de polimerização	29
2.3.3.1 CLP.....	29
2.3.3.1.1 Princípio de funcionamento de um CLP	31
2.3.3.2 Bombas volumétricas	32
2.3.3.2.1 Princípio de funcionamento da bomba volumétrica.....	33
2.3.3.3 Inversores de frequência	33
2.3.3.4 Variador de potência.....	35
2.3.3.4.1 Determinação da potência enviada pelo variador de potência (elemento final de controle).....	36
2.3.3.5 Agitadores	36
2.3.4. Instrumentação do sistema de polimerização	37
2.3.4.1 Sensores de temperatura	39
2.3.4.1.1 Calibração dos sensores de temperatura	40
2.3.4.2 Sensor de pressão diferencial	41
2.3.4.3 Sensor de vazão mássica.....	42
2.3.4.4 Sensor de densidade.....	43
2.3.5. Montagem do painel elétrico de comando do protótipo experimental ..	44
2.4. RESULTADOS.....	47
2.4.1 – Montagem do protótipo experimental do sistema de polimerização... 47	
2.4.1. Comportamento da vazão do fluido térmico com relação À frequência do inversor	49
2.4.2. Calibração dos sensores de temperatura.....	51
2.4.3. Montagem do painel elétrico de comando.....	53
2.4.4. Configuração do CLP através do software SPDSW.....	55
2.4.5. Desenvolvimento do sistema supervisor e armazenamento de dados 	58
2.4.5.1 Interface de comunicação MATLAB/SIMULINK	61
2.5. CONCLUSÕES.....	63
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO 67

3.1. INTRODUÇÃO.....	67
3.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	68
3.2.1. Tipos de polimerização	70
3.2.1.1. Polimerização em massa.....	70
3.2.1.2. Polimerização em solução.....	70
3.2.1.3. Polimerização em emulsão.....	71
3.2.1.4. Polimerização em suspensão.....	72

3.2.2. Etapas da reação de polimerização de estireno	72
3.2.2.1. Iniciação	72
3.2.2.2. Propagação	74
3.2.2.2.1. Transferência de cadeia.....	77
3.2.2.3. Terminação.....	79
3.3. EXPLANAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO.....	80
3.4. METODOLOGIA	81
3.4.1. Procedimento para a realização dos ensaios no protótipo experimental de polimerização	81
3.4.2 – Determinação das condições operacionais.....	82
3.4.2.1. Determinação da proporção monômero e solvente e do tempo de reação	83
3.4.2.1.1- Metodologia para a realização de ensaios-testes no bécker ..	84
3.4.3 Monitoramento on-line de variáveis secundárias	85
3.4.4. Análise do comportamento transiente do sistema.....	86
3.5. RESULTADOS.....	87
3.5.1. Determinação do volume da mistura polimérica, seleção e concentração do iniciador, velocidade de agitação e set-point da temperatura	87
3.5.2. Determinação das vazões dos fluidos polimérico e térmico.....	88
3.5.3. Determinação da temperatura inicial da camisa do reator de polimerização	89
3.5.4 Determinação da proporção monômero e solvente	90
3.5.5. Análise do comportamento transiente do sistema.....	95
3.5.5.1 Análise das variáveis envolvidas no sistema de controle	102
3.5.6 Resumo das condições operacionais previamente definidas.....	104
3.6 – CONCLUSÕES	105
3.7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

CAPÍTULO 4. SISTEMAS DE CONTROLE..... 111

4.1. INTRODUÇÃO	111
4.2 . FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	114
4.2.1. Controladores Inteligentes Fuzzy.....	114
4.2.1.1. Introdução.....	114
4.2.1.2. Conjuntos Fuzzy	115
4.2.1.3. Variáveis linguísticas	118
4.2.1.4. Funções de pertinência	119
4.2.1.5. Sistema de inferência	122
4.2.1.5.1 Base de Conhecimento.....	124
4.2.1.5.2. Processo de Fuzzificação	125
4.2.1.5.3. Processo de Defuzzificação	125
4.2.1.6. Classificação de sistemas fuzzy	126
4.2.1.7. Estrutura de controle fuzzy	129
4.2.2. Controladores Inteligentes Híbridos (fuzzy e redes neurais).....	132
4.2.2.1 Sistema Neuro-Fuzzy ANFIS.....	134

4.3. CONTROLADORES AVANÇADOS APLICADOS EM PROCESSOS DE POLIMERIZAÇÃO	136
4.4. METODOLOGIA	142
4.4.1 <i>Controle cascata implementado no sistema experimental de polimerização</i>	142
4.4.2. <i>Projeto do Controlador Escravo</i>	146
4.4.3. <i>Projeto do Controlador Mestre</i>	149
4.4.3.1. Conhecimento especialista	150
4.5. RESULTADOS.....	151
4.5.1. <i>Projeto do controlador escravo</i>	151
4.5.2. <i>Projeto do controlador mestre</i>	153
4.5.2.1. Conhecimento especialista	153
4.6. CONCLUSÕES.....	158
4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160

CAPÍTULO 5. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES INTELIGENTES 169

5.1 INTRODUÇÃO.....	169
5.2. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE FUZZY	170
5.2.1 <i>Estruturas dos Controladores</i>	170
5.2.2. <i>Determinação das Funções de Pertinência</i>	172
5.2.3. <i>Definição da Base de Regras</i>	173
5.2.4. <i>Sintonia dos Controladores Fuzzy</i>	175
5.3. CONTROLADOR “FUZZY MISO” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE MISO/POSICIONAL).....	177
5.3.1. <i>Estrutura do Controlador “Fuzzy MISO”</i>	177
5.3.2. <i>Parâmetros de Sintonia do Controlador “Fuzzy MISO”</i>	180
5.3.3. <i>Implementação do Controlador “Fuzzy MISO”</i>	183
5.4. CONTROLADOR “FUZZY S MISO” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE MISO/POSICIONAL)	186
5.4.1. <i>Estrutura do Controlador “Fuzzy S MISO”</i>	186
5.4.2. <i>Parâmetros de sintonia do Controlador “Fuzzy S MISO”</i>	188
5.4.3. <i>Implementação do Controlador “Fuzzy S MISO”</i>	192
5.5. CONTROLADOR “FUZZY PI” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE SISO/INCREMENTAL)	195
5.5.1. <i>Estrutura do Controlador “Fuzzy PI”</i>	195
5.5.2. <i>Parâmetros de Sintonia do Controlador “Fuzzy-PI”</i>	196
5.5.3. <i>Implementação do controlador “Fuzzy-PI”</i>	200
5.6. CONTROLADOR “FUZZY-PID” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE SISO/POSICIONAL).....	203
5.6.1. <i>Estrutura do Controlador “Fuzzy PID”</i>	203
5.6.2. <i>Parâmetros de Sintonia do Controlador “Fuzzy-PID”</i>	206
5.6.3. <i>Implementação do Controlador “Fuzzy-PID”</i>	210

5.7. CONTROLADOR “FUZZY PI SIMO” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE SIMO/INCREMENTAL E POSICIONAL)	212
5.7.1. Estrutura do Controlador “Fuzzy PI SIMO”	212
5.7.2. Parâmetros de Sintonia do Controlador “Fuzzy PI SIMO”	215
5.7.3. Implementação do Controlador “Fuzzy PI SIMO”	218
5.8. CONTROLADOR “NEURO-FUZZY” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE MISO/POSICIONAL/ANTECIPATIVO)	222
5.8.1. Estrutura do Controlador “Neuro-Fuzzy”	222
5.8.2. Parâmetros de Sintonia do Controlador “Neuro-Fuzzy”	227
5.8.3. Implementação do Controlador “Neuro-Fuzzy”	234
5.9. CONCLUSÕES	236
5.10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	238

CAPÍTULO 6. ANÁLISE DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE

IMPLEMENTADAS 241

6.1. INTRODUÇÃO	241
6.2. CRITÉRIOS DE DESEMPENHO	241
6.3. ENSAIOS EM MALHA FECHADA COM CONTROLADORES INTELIGENTES	245
6.4. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS POLIMÉRICAS	246
6.4.1. <i>Determinação da Conversão</i>	246
6.4.2 <i>Determinação da distribuição e massas moleculares médias</i>	247
6.4.2.1. <i>Análise de cromatografia de permeação em gel (GPC)</i>	249
6.5. AVALIAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE IMPLEMENTADAS	251
6.5.1. <i>Quanto ao overshoot, tempo de subida e tempo de estabilização</i>	252
6.5.2. <i>Quanto a energia elétrica consumida pelo variador de potência</i>	257
6.5.3. <i>Quanto à conversão</i>	259
6.5.4. <i>Quanto às massas molares</i>	264
6.7. CONCLUSÕES	276
6.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	278

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES GERAIS 281

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 285

APÊNDICE A 287

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A automação está associada à instrumentação de processos e intimamente ligada aos sistemas de qualidade, pois garante a manutenção de uma produção com elevada especificidade e alta produtividade. Sistemas de automação industrial são aplicados com objetivo de garantir a manutenção das condições de operação e de segurança dos processos, proporcionando a redução de custos e de riscos ambientais.

A complexidade dos processos químicos e a crescente busca da qualidade dos produtos obtidos, aliados às rigorosas regulamentações ambientais vigentes, ratificam a necessidade da aplicação de sistemas de controle mais robustos frente às variabilidades destes processos.

Estas características são observadas na indústria de produção de polímeros, devido à utilização de reatores em batelada ou semi-batelada (inerentemente não lineares) e à dinâmica das reações e variáveis envolvidas.

Apesar da facilidade de implementação e por se tratar de uma técnica consolidada industrialmente, a utilização de controladores clássicos (PID) apresentam desempenho ineficiente quando, por exemplo, o processo apresenta não-linearidades, é multivariável, variante no tempo ou quando as especificações de projeto são muito rígidas, como é o caso dos sistemas de polimerização. Sendo assim, técnicas de controle avançado têm sido aplicadas na tentativa de melhorar o desempenho do sistema para satisfazer aos requisitos de produção do processo industrial.

Nesta direção, vários trabalhos têm implementado estratégias de controle *fuzzy* através de simulações computacionais em reatores batelada ou semi-batelada para processos de polimerização com o objetivo de alcançar melhor eficiência na manutenção das condições operacionais, no entanto, as aplicações experimentais de controladores inteligentes em tais processos ainda são incipientes. Existem poucos trabalhos experimentais focando o tema de controle e automação, evidenciando assim carência em aplicações práticas.

Além disso, observa-se um interesse industrial pela monitoração *on line* de propriedades dos polímeros, tais como, massa molecular e conversão do monômero, pois essas propriedades influenciam diretamente na qualidade do produto final. No entanto, a falta de instrumentação adequada impossibilita a medida direta destas variáveis em tempo real. Uma alternativa para solucionar este problema passa pela determinação indireta destas variáveis através das medidas de variáveis correlacionadas tais como: temperatura, viscosidade e densidade.

1.1 - MOTIVAÇÃO

O setor de polímeros é responsável pelo grande crescimento das indústrias químicas nos últimos anos. Através de processos poliméricos é produzida uma grande diversidade de produtos de utilidade no mercado mundial e nacional, justificando a importância de trabalhos abordando processos de polimerização.

As propriedades de uso final de um polímero dependem de vários fatores tais como a distribuição da massa molecular e conversão, os quais são fortemente influenciados pela temperatura de processo, sendo de fundamental importância o controle rigoroso desta variável.

Embora a estrutura química de um determinado polímero seja a mesma, conversões e massas moleculares diferentes originam polímeros com características desiguais, influenciando nas propriedades finais do polímero e por conseguinte em sua aplicabilidade.

Para o controle de propriedades dos polímeros, muitos algoritmos de controle avançados estão sendo utilizados em reatores de polimerização (MATEDDI, 2003; LIMA 2006; SOLGI ET AL. 2006; WAKABAYASHI, 2007). A importância da utilização de uma configuração de controle satisfatória não somente está no fato de propiciar a obtenção de produtos dentro de certa especificação, como também inclui questões de segurança (considerando uma reação com potencial térmico instável), operabilidade e redução de custos. Sendo assim, diante do crescente avanço tecnológico nos últimos anos e da necessidade de produção cada vez mais eficiente, é marcante o número de trabalhos que buscam estratégias de controle mais eficazes para tais sistemas, como as técnicas de controle *fuzzy*.

Entretanto, observa-se que maioria dos trabalhos se concentra em resultados obtidos através de simulações e são poucas as publicações sobre controle de reatores de polimerização em regime batelada/semi-batelada que apresentam resultados diante de aplicação em protótipos experimentais, sendo esta a proposta central deste trabalho.

Outro aspecto que motiva a aplicação de diferentes estratégias de controle no processo de polimerização é o fato de um mesmo monômero gerar polímeros com propriedades diferentes, o que implica num número considerável de dificuldades encontradas durante a produção do material polimérico, de forma que, para garantir a produção de um polímero específico, são necessárias condições de reação severamente controladas e equipamentos adequados (TOLEDO,1992).

Um outro foco importante deste trabalho é a utilização de sensores “on-line” de variáveis indiretas que possam possibilitar informações sobre a conversão do monômero durante a batelada, as quais poderão ser utilizadas para a obtenção

de um conhecimento especialista do processo e, por conseqüência, a construção da base de regras durante o desenvolvimento do controlador *fuzzy*.

1.2 - OBJETIVO

O objetivo principal deste projeto é desenvolver e implementar diferentes estratégias de controle *fuzzy* e avaliar o desempenho de cada implementação através de uma aplicação experimental em um processo de polimerização via radical livre do estireno em solução.

Para alcançar o objetivo proposto propõe:

- Montar e instrumentar um protótipo experimental de um sistema de polimerização batelada/semi-batelada;
- Automatizar o sistema e supervisionar as variáveis mais importantes do processo;
- Obter um conhecimento especialista do processo e determinar as condições operacionais que serão adotadas como referência para o uso dos controladores;
- Desenvolver e implementar experimentalmente diferentes estratégias de controladores inteligentes *fuzzy* baseados em regras utilizando o Modelo de Mamdani e no modelo de Takagi-Sugeno para a manutenção da temperatura de reação de polimerização, a qual permitirá comparar a eficiência dos controladores entre si.
- Avaliar o desempenho dos controladores desenvolvidos através dos cálculos dos parâmetros de erro (ISE, ITSE, IAE e ITAE), dos parâmetros de controle (*overshoot* e tempo de resposta) e através da determinação das propriedades que determinam a qualidade do

polímero obtido, tais como: massas moleculares e produtividade do processo, medida através da conversão do monômero.

- Realizar uma análise entre as estratégias de controle desenvolvidas, baseada nas propriedades dos controladores, nas características do polímero obtido e na redução do consumo de energia.

1.3 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho é detalhado na Figura 1.1, onde a representação do fluxograma tem como objetivo a fácil compreensão da sua evolução.

Inicialmente foram estabelecidos os objetivos do trabalho e, posteriormente, foi realizado um levantamento de trabalhos envolvendo lógica *fuzzy* aplicada ao controle de processos, bem como trabalhos relacionados à sistemas de polimerização.

Partindo-se do entendimento do sistema a ser utilizado como estudo de caso neste trabalho, foi realizada a etapa de montagem e instrumentação de todo o protótipo de polimerização, incluindo os projetos e especificação de todos os equipamentos/instrumentos utilizados para a realização de tal etapa.



FIGURA 1.1 - Esquema para desenvolvimento da Tese.

Trabalhos encontrados na literatura foram utilizados como base para se determinar as condições iniciais do processo, e em seguida foram desenvolvidas estratégias de controle posteriormente testadas no protótipo experimental. Cada resposta foi analisada quanto ao seu desempenho e produtividade e por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os diferentes tipos de controladores utilizados neste trabalho.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado em 6 capítulos, os quais tem o intuito de apresentar o conteúdo deste trabalho de forma clara e coerente.

No Capítulo 1 é apresentada a motivação para realização deste projeto, ressaltando o diferencial com relação ao uso de um protótipo experimental, e a utilização de controladores baseados em inteligência artificial, com enfoque no uso de controle avançado *fuzzy*, para melhorar a eficiência de supervisão e controle do processo de polimerização.

No Capítulo 2 são relatadas as etapas realizadas durante a fase de concepção, projeto de montagem e instrumentação do sistema de polimerização. São detalhados os dimensionamento e configuração de equipamentos, sensores e atuadores, bem como o desenvolvimento do sistema supervisor, e programação do controlador Lógico Programável (CLP).

No Capítulo 3 são apresentados alguns conceitos teóricos fundamentais ao entendimento do trabalho desenvolvido, sobre sistemas de polimerização e as realizações das etapas para a determinação das condições operacionais estabelecidas para a aplicação de controle avançado.

No capítulo 4 é apresentada uma discussão sobre os sistemas de controle, com enfoque nos sistemas de controle inteligentes baseados em lógica *fuzzy*; uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de controle nestes sistemas; a obtenção de conhecimento sobre o processo;

No Capítulo 5 faz-se uma explanação sobre o desenvolvimento, sintonia e implementação dos controladores inteligentes em malha fechada; e mostra os resultados obtidos após a realização dos ensaios.

No Capítulo 6 é apresentada uma análise do desempenho entre as estratégias de controle implementadas, baseados em análises qualitativas e quantitativas.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões fundamentais sobre o trabalho realizado e, em seguida, são apontadas algumas perspectivas de trabalhos futuros.

Na Figura 1.2 é apresentado um esquema da organização da tese em que se mostra a interação entre os diferentes capítulos.

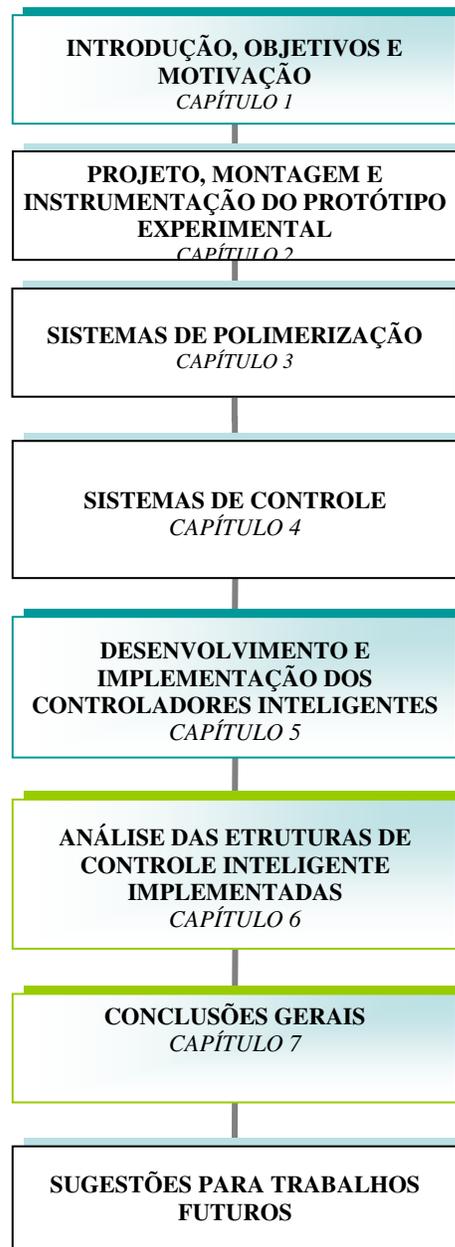


FIGURA 1.2 - Esquema de organização da tese.

1.5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIMA, N. M. N. **Modelagem e controle híbrido preditivo por lógica fuzzy de processos de polimerização**. 238P. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2006.

MATTEDI, A. **Síntese de um controlador híbrido fuzzy-preditivo: Aplicação para processos de polimerização**. 132p. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2003.

SOLGI, R.; VOSOUGH, R.; RAFIZADEH, M. Generalization of Takagi-Sugeno fuzzy controller and its application to control of MMA batch polymerization reactor. **Polymers - Plastics Technology and Engineering**. v.45, p. 243-249, 2006.

WAKABAYASHI , C. Análise e controle fuzzy de processos: Estudo de caso em um reator de polimerização. 122 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Mecatrônica, EFBA, Salvador, 2007.

TOLEDO, E.C.V. Modelagem e controle de um reator de polimerização CSTR acoplado a um controlador horizontal semi-inundado. Dissertação de Mestrado. COPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1992.

CAPÍTULO 2. PROJETO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

O sistema de polimerização proposto como o estudo de caso neste trabalho foi projetado de forma a possibilitar o desenvolvimento de experimentos para implementação de estratégias de controle. A montagem foi realizada de forma a permitir versatilidade de aplicações para este protótipo experimental, possibilitando futuros trabalhos com este enfoque.

A montagem e aplicação de um protótipo experimental, aplicados em um estudo de caso, ressalta que a prática de sistemas de controle é importante, não sendo só simulada por ferramentas computacionais, mas mostrando respostas reais, que em geral são diferentes das respostas calculadas devido a não existências de variações nos sistemas computacionais. Esta planta permite a operação com dispositivos, sistemas e técnicas que abordem proximidade com o cenário industrial.

O aparato experimental foi montado no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP. Este protótipo permitiu a abertura de uma nova linha de pesquisa no departamento da faculdade, contribuindo para a formação de recursos humanos, numa área da engenharia química que apresenta carência de profissionais especializados.

2.2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sistema de polimerização apresenta um comportamento transiente que pode ocasionar alterações nas condições de operação durante o processo de polimerização. É importante o dimensionamento adequado e seleção de equipamentos para condições de operação pré-definidas, como por exemplo, a temperatura de processo e de circulação da camisa do reator, bem como sua vazão; a densidade e a vazão mássica do fluido polimérico.

2.2.1 - AUTOMAÇÃO, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS

O aprimoramento das técnicas de controle associado à evolução dos sistemas de automação industrial torna complexa a determinação dos equipamentos e do tipo de controle que melhor se ajusta às necessidades de uma dada empresa.

Em um mercado a cada dia mais competitivo, a automação tem influência direta e grande importância em praticamente todos os processos industriais, sendo de extrema importância para uma produção com uniformidade, qualidade e agilidade. A presença da automação na economia global é crescente e ultrapassou as fronteiras das instalações industriais. Inicialmente, a implantação de processos automatizados na indústria tinha o objetivo de alcançar maior produtividade e redução de custos. Contudo, a experiência revelou que isso nem sempre é verdadeiro. O investimento para implantação de sistemas automáticos é elevado e, além disso, a nova instalação requer recursos, inclusive humanos,

dispendiosos para sua manutenção. Atualmente, o principal motor da automação é a busca de maior qualidade dos processos, para reduzir perdas (com reflexo em custos) e possibilitar a fabricação de bens que de outra forma não poderiam ser produzidos, bem como do aumento da sua flexibilidade. Outra justificativa para os investimentos em automação que têm sido feitos é a segurança de processos industriais e de infra-estrutura críticos, pois a automação tem sido vista como uma forma de minimizar o erro humano (NATALE, 2000; GUTIERREZ E PAN, 2008).

O aprimoramento das técnicas de controle está associado à evolução dos sistemas de automação industrial. Os sistemas de controle automático na indústria operam em paralelo à linha de produção e são utilizados para coordenar, monitorar, alterar e registrar as condições de máquinas, produtos e processos. Têm como principais requisitos, que devem ser atendidos simultaneamente, a minimização da intervenção humana, a manutenção de condições de segurança operacional e a garantia de respostas em tempo real.

Na automação de um processo produtivo, é necessário empregar dispositivos mecânicos, elétricos e eletrônicos que desempenhem funções equivalentes às humanas nas atividades de supervisão e controle, tais como coleta e análise de dados e correção de rumos. Para o atributo dos sentidos humanos, foram desenvolvidos os sensores ou instrumentos de medição, que medem e informam os dados sobre o andamento do processo. Para as funções executadas pelo cérebro humano, foram criados dispositivos denominados controladores, que recebem e processam as informações fornecidas pelos sensores, calculando as medidas a adotar e emitindo instruções para os atuadores. Esses são os dispositivos que executam as ações que seriam realizadas pelos membros humanos para corrigir variações detectadas pelos outros dispositivos ou alterar as respostas do processo (NATALE, 2000; McMILLAN e CONSIDINE, 1999).

2.2.2 – CLP

Com o avanço da eletrônica, as unidades de memória ganharam maior capacidade e com isso armazenam todas as informações necessárias para controlar diversas etapas do processo. Os circuitos lógicos tornaram-se mais rápidos, compactos e capazes de receber mais informações de entrada, atuando sobre um número maior de dispositivos de saída. Chega-se assim, aos microcontroladores responsáveis por receber informações das entradas, associá-las às informações contidas na memória e a partir destas desenvolver uma lógica para acionar as saídas. Toda esta evolução nos levou a sistemas compactos, com alta capacidade de controle, que permitem acionar diversas saídas em função de vários sinais de entradas combinados logicamente (JACK, 2004; ANTONELLI, 1998; RICHTER, 2001).

Um outra etapa importante desta evolução é que toda a lógica de acionamento pode ser desenvolvida através de software, que determina ao controlador a seqüência de acionamento a ser desenvolvida. Este tipo de alteração da lógica de controle caracteriza um sistema flexível. Os CLP's são equipamentos eletrônicos de controle que atuam a partir desta filosofia.

Os controladores lógico-programáveis (CLP ou PLC, em inglês) surgiram para substituir painéis de controle a relé, na década de 60. A grande vantagem dos controladores programáveis era a possibilidade de reprogramação. Já os painéis de controle a relés necessitavam modificações na fiação, o que muitas vezes era inviável, tornando-se mais barato simplesmente substituir todo painel por um novo. Portanto, os CLPs permitiram transferir as modificações de hardware em modificações no software (RICHTER, 2001; SOUZA e SCHUTTENBERG, 2000; SILVA FILHO, 1998).

Os Controladores Lógicos Programáveis ou CLPs são ferramentas de trabalho muito úteis, de fácil aplicação e versáteis para aplicações em sistemas de acionamentos e controle, e por isso são utilizados em grande escala no mercado industrial. Permitem desenvolver e alterar facilmente a lógica para acionamento das saídas em função das entradas. Desta forma, é possível associar diversos sinais de entrada para controlar atuadores ligados aos sinais de saída (McMILLAN e CONSIDINE, 1999; JACK, 2004)

Além disso, pode-se citar outras características dos CLPs que o torna muito atrativo em diversos setores de aplicação no mercado da automação: Ocupa pouco espaço num painel elétrico; baixo consumo de energia elétrica; são reprogramáveis (caso ocorra alguma mudança nos requisitos de controle); além de flexibilidade possuem confiabilidade, e ainda interfaces de comunicação com outros CLPs e computadores (SILVA FILHO, 1998).

2.2.2.1 Estrutura Básica de um CLP

O CLP tem sua estrutura baseada no hardware de um computador, tendo, portanto, uma fonte, unidade central de processamento (CPU), memórias e interfaces de entrada e saída. O diagrama a seguir (Figura 2.1) ilustra a estrutura básica de um CLP:

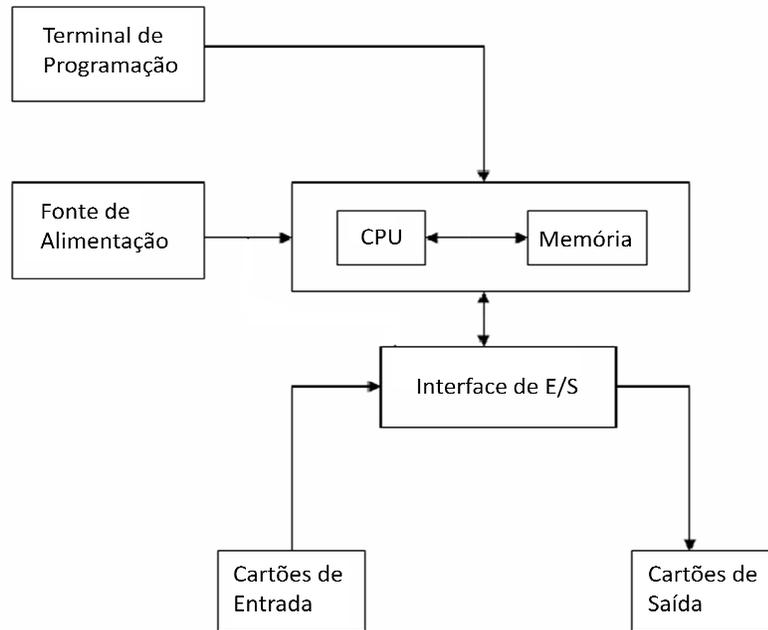


FIGURA 2.1. Estrutura básica de um CLP

- **CPU**

A CPU é o elemento principal do controlador, responsável tanto pela execução dos programas do usuário quanto pelas funções associadas ao endereçamento de memória, operações aritméticas e lógicas. Sua tarefa consiste em coletar os dados dos cartões de entrada, processá-los de acordo com o programa do usuário, gravado na memória, e enviar o resultado para os cartões de saída. Geralmente cada CLP tem uma CPU, que pode estar compactada com os pontos de entrada e saída numa mesma unidade, ou constituir uma unidade separada dos outros módulos.

- **Fonte**

A fonte é responsável pela alimentação, fornecendo os níveis de tensão exigidos para o funcionamento do CLP e dos módulos de entrada e saída. Converte a tensão da rede de 110 ou 220 VCA em +12VCC ou +24VCC para alimentar os circuitos eletrônicos, as entradas e as saídas.

- **Memória**

Dispositivo responsável por armazenar os dados e programas utilizados durante o funcionamento do CLP. O sistema de memória é uma parte de importância vital para o controlador programável, pois armazena todas as instruções do programa a ser executado, bem como variáveis inerentes ao seu funcionamento. Existem vários tipos de memória, com diferentes características. Um CLP pode fazer uso de vários desses tipos. Os diferentes tipos de memórias que compõem o mapa de memória de um controlador programável podem ser divididos em cinco áreas principais (ANTONELLI, 1998):

a) Memória executiva

É formada por memórias do tipo ROM, e armazena o sistema operacional do controlador programável. O usuário não tem acesso a essa área da memória.

b) Memória do Sistema.

É formada por memórias do tipo RAM, e seu conteúdo é alterado constantemente pelo sistema operacional. Nesta área da memória são armazenados os resultados das operações efetuadas pela CPU, e seu conteúdo também não pode ser alterado pelo usuário.

c) Memória de Status de E/S.

Essa memória é do tipo RAM, e serve para armazenar os dados lidos nos dispositivos de entrada e os dados a serem lançados nos dispositivos de saída. Essa memória também é chamada de memória de imagem, pois representa uma imagem dos dispositivos de E/S.

d) Memória de dados.

Também do tipo RAM, essa memória armazena os valores do processamento das instruções utilizadas pelo programa do usuário. Funções de

temporização, contagem, aritméticas e especiais necessitam de uma área de memória para armazenamento de dados.

e) Memória do Usuário.

Nesta área é armazenado o programa do usuário, que é lido e executado pela CPU, de acordo com os procedimentos determinados pelo sistema operacional.

• **Módulos de Entrada / Saída**

As entradas e saídas do CLP (*input e output*) podem ser do tipo digitais (variáveis discretas) ou analógicas (variáveis contínuas). As entradas e saídas digitais são definidas como sinais discretos em níveis lógicos 0 ou 1, sendo que 1 corresponde a um nível alto de tensão que pode ser 110 ou 220 VCA (tensão alternada) ou 12 ou 24VCC, (tensão contínua) , 0 corresponde a um nível baixo de tensão que pode ser Neutro (corrente alternada) ou CC COMUM (corrente contínua).

Enquanto que entradas e saídas analógicas são definidas como sinais variantes no tempo sendo a mais difundida industrialmente o sinal 4 à 20mA. As entradas analógicas são módulos conversores A/D, que convertem um sinal de entrada em um valor digital, normalmente de 12 bits (4095 combinações). As saídas analógicas são módulos conversores D/A, ou seja, um valor binário é transformado em um sinal analógico.

• **Terminal de Programação**

O terminal de programação é um dispositivo periférico que, conectado ao CLP, permite introduzir o programa do usuário. Este terminal pode ser um equipamento de um determinado fabricante ou, como no caso deste trabalho, um

computador pessoal equipado com um software de programação e interface entre o PC e o CLP.

2.2.3 – COMUNICAÇÃO OPC

Nos últimos anos os fabricantes de sistemas digitais oferecem soluções de hardwares e software com maior capacidade e menor custo. A instrumentação de campo melhorou muito sua qualidade, oferecendo muitas opções para o aumento da eficiência de controle. A comunicação entre sistemas foi bastante simplificada com a adoção da tecnologia do padrão OPC (*OLE for Process Control*). Toda esta disponibilidade de tecnologia para integração e implementação reduziu drasticamente os custos e prazos dos projetos de controle avançado e com isto cada vez mais sistemas de controle avançados vêm sendo implementados (PASTORELLO, 2008; FONSECA 2002).

A tecnologia OPC é uma tecnologia para conectar aplicações Windows e equipamentos de controle de processos. O OPC é um protocolo de comunicação aberto que permite um método consistente de acesso aos dados de inúmeros equipamentos dos mais diversos fabricantes. O método é o mesmo, independente da origem dos dados, o que vem oferecer ao usuário final uma maior liberdade na escolha dos equipamentos independentemente da disponibilidade de *drivers* de comunicação proprietários (SOUZA et al., 1998 ; DUARTE et al., 2006).

O OPC é construído usando tecnologia Microsoft OLE (*Object Linking and Embedding*)/COM (*Component Object Model*), mas a especificação OPC foi desenvolvida por uma fundação aberta, a *OPC Foundation*, para atender as necessidades gerais da indústria e não as necessidades específicas de alguns fabricantes de hardware e software (OPC Foundation, 2008) . A especificação ainda prevê a evolução das funcionalidades ao longo do tempo e por isso, os

componentes OPC podem se manter no topo das necessidades emergentes da indústria (DUARTE et al., 2006; SOUZA et al., 1998).

O padrão OPC é considerado hoje o protocolo padrão da indústria. A vantagem mais acentuada em se utilizar esse tipo de padrão de comunicação é a uniformidade de acesso aos *tags* com sistemas supervisórios sem a necessidade de utilizar drives proprietários de controladores. Outra vantagem deste padrão de comunicação é a integração entre diferentes ferramentas de supervisão.

2.2.4 – SISTEMAS DE SUPERVISÃO

Para o gerenciamento do sistema foram utilizados os *software* supervisório INDUSOFT *Web Studio* 6.1, e o programa MATLAB 7.0.1. Estes softwares permitem o fornecimento de informações, em tempo real, na forma numérica ou por gráficos temporais deixando mais acessível a interface homem-máquina.

A interface de controle avançado foi desenvolvida no ambiente de programação do MATLAB, mais precisamente o ambiente SIMULINK. O MATLAB é um programa interativo para cálculos científicos e de engenharia, muito utilizado no meio acadêmico. A família de programas MATLAB® inclui o programa principal e uma variedade de *toolboxes*, uma coleção de arquivos especiais chamados *M-files* que estendem a funcionalidade do programa principal. Juntos, o programa principal e o *Control System Toolbox* propiciam a capacidade para projetar e analisar sistemas de controle (DORF e BISHOP, 2001).

O sistema de aquisição dos dados obtidos durante os experimentos constituiu no armazenamento dos valores de interesse em histórico para posteriormente serem efetuados gráficos em que possa ser visualizado o comportamento das variáveis.

2.3 – METODOLOGIA

Nesta seção, serão descritas as etapas realizadas relacionadas ao projeto, montagem e instrumentação do protótipo experimental de polimerização. Serão apresentados detalhes de sua construção e no que se diz respeito aos equipamentos e instrumentos e as suas funcionalidades, os quais tornaram possíveis a realização dos objetivos a que se destina o protótipo.

2.3.1 – PROJETO E MONTAGEM DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

Nesta etapa foram projetados e especificados componentes com o objetivo de realizar a montagem do protótipo experimental de forma a se alcançar a máxima versatilidade de aplicações no sistema. Nesta fase várias tarefas foram efetuadas, entre elas:

- O planejamento para construção do suporte, utilizando material Metalon, para a instalação do sistema de polimerização; projeto e confecção do reator e do tanque de armazenamento de fluido térmico, utilizando material aço-inox;
- A realização de um projeto com dimensões definidas para a construção de uma capela adequada para a realização de ensaios de polimerização, bem como a aquisição de vidrarias, reagentes e equipamentos de proteção individual e coletiva de forma a atender as normas de segurança exigidas;

- O dimensionamento, aquisição e configuração de equipamentos a serem utilizados para permitir o monitoramento em tempo real das condições operacionais do sistema de polimerização, a citar: sensores de temperatura, de vazão, de densidade e de pressão;
- As configurações necessárias para o funcionamento do CLP, através de linguagem *Ladder* implementado no programa SPDSW/CLP da HI Tecnologia Ltda.
- O desenvolvimento e configuração de um sistema supervisor para possibilitar a fácil monitoração em tempo real das condições do processo, bem como a análise de perfis e registros de respostas obtidas; o mesmo foi habilitado para operar de forma automática ou manual de acordo com a opção do operador do sistema;
- O projeto, aquisição de materiais e dispositivos e construção de um painel elétrico de comando para facilitar as interligações dos equipamentos e sensores de campo de forma mais versátil com sistema supervisor desenvolvido;
- A instalação e configuração dos parâmetros do inversor de frequência (elemento final de controle utilizado neste trabalho) para possibilitar sua eficiência de atuação.
- A distribuição dos equipamentos e sensores no suporte do protótipo,
- A montagem das linhas do sistema, para possibilitar a circulação do fluido polimérico através de instrumentos de medição *on-line*, e do fluido térmico em torno da camisa do reator de polimerização;
- A instalação da linha de adição de nitrogênio gasoso para o sistema.

- Testes iniciais de comunicação Supervisório/CLP; detecção de vazamentos nas linhas de processo; Isolamento das linhas com material isolante *Armaflex* a fim de evitar troca térmica com o meio ambiente;

O planejamento e a montagem do protótipo proporcionaram maior conhecimento das tecnologias envolvidas e dos instrumentos utilizados, permitindo uma maior independência quanto a manutenções preventivas e corretivas.

2.3.2 – ETAPAS PARA A MONTAGEM DO SISTEMA EXPERIMENTAL DE POLIMERIZAÇÃO

2.3.2.1 Confeção do suporte do sistema de polimerização

Inicialmente foi projetado um suporte para a sustentação da montagem da planta, como tubulações, equipamentos e instrumentos. As dimensões foram calculadas de forma aproximada levando em consideração os equipamentos que iriam constituir a planta didática. O suporte foi confeccionado utilizando material Metalon, que é leve e resistente, e foi projetado para apresentar as seguintes dimensões: 130 x 60 x 170 mm (Figura 2.2).



FIGURA 2.2. Suporte metálico para o sistema de polimerização.

A base foi confeccionada com roldanas para facilitar a locomoção da planta, caso houvesse alguma necessidade.

2.3.2.2 Projeto de construção da capela

Foi projetada uma capela com sistema de exaustão para permitir a operabilidade da planta. O propósito de ter uma capela no laboratório foi o de evitar a passagem de contaminantes para o laboratório, possibilitando que a concentração de contaminantes na atmosfera se mantivesse a mais baixa possível.

A capela foi projetada de forma que o suporte ficasse em seu interior, sendo assim, foi desenvolvido o projeto de uma capela que permitisse o total funcionamento do protótipo inserido na capela de segurança. O intuito foi o de construir uma pequena capela modular de fácil instalação, que pudesse ser mudada de lugar, caso houvesse necessidade, e que os dutos fossem totalmente adaptáveis em qualquer situação.

A Capela foi construída em chapa galvanizada, revestida com pintura epóxi, com dimensões de 1.400mm x 750mm x 2.000mm (Figura 2.3) e dispensa instalação especial de alvenarias. Possui uma coifa tipo tronco piramidal na parte superior, medindo 1.400mm x 750mm x 500mm, fabricada com chapa galvanizada com estrutura totalmente soldada e polida. Estas coifas apresentam-se como uma solução de baixo custo inicial para a captação e filtragem de ar, pois seu princípio de funcionamento consiste unicamente em filtrar mecanicamente o ar após a captação, através de um quadro de filtros inerciais.



FIGURA 2.3. Capela modular para o sistema de polimerização.

Possui porta em vidro temperado, permitindo excelente visualização do interior, resistente aos solventes e de fácil limpeza, com deslocamento vertical (tipo guilhotina) e sistema de contrapeso laterais, cabo de aço e roldanas que permite ajustar a abertura em qualquer ponto; e luminária interna. Possui exaustor centrifugo laminado em fibra de vidro com turbina em material resistente aos gases corrosivos e tubo de saída com motor 3/4 HP com rotação 1.150 rpm 220Volts trifásico, pressão 25 mmCA montado na parte superior da coifa tipo tronco piramidal. Possui rede de duto flexível, sendo o exaustor encaixado na saída da capela e pode ser direcionado para qualquer lado no sentido horizontal. Foi também projetado um suporte móvel para manipulação de vidrarias. O volume nominal de ar deslocado pelo exaustor é de 2.500 m³/h.

2.3.2.3 Confeção do reator de polimerização e do tanque de armazenamento do fluido térmico

O reator foi projetado para operar com uma capacidade máxima de aproximadamente 2 Litros, com dimensões de 150 mm de comprimento e 140 mm de largura. Possui uma camisa ao redor do reator para promover a remoção do calor da reação por onde circula o fluido térmico (Figura 2.4).

Foi confeccionado com material em aço inoxidável 316 para suportar a agressão imposta pelos reagentes e temperatura. Possui uma camisa para promover a troca térmica do calor da reação por onde circularia o fluido de refrigeração. Duas abas laterais foram adicionadas para proporcionar o suporte do reator na estrutura metálica e uma chapa superior para o apoio da tampa do reator. Todas as saídas foram confeccionadas com rosca para proporcionar maior flexibilidade do equipamento durante a montagem. Foi confeccionada também uma tampa de com o mesmo material, com o intuito de fechar o sistema a fim de minimizar as perdas dos reagentes por evaporação.



FIGURA 2.4. Projeto de confecção do reator.

PROJETO, MONTAGEM E INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

O tanque de armazenamento do fluido térmico foi construído com o mesmo material e possui capacidade de aproximadamente 10 Litros, com 200 mm de largura e comprimento aproximado de 300 mm (Figura 2.5). Neste tanque foi inserida uma resistência elétrica do tipo espiral para promover o aquecimento do fluido térmico.



FIGURA 2.5. Projeto de confecção do tanque de armazenamento de fluido térmico.

2.3.2.4 Aquisição de reagentes e vidrarias e equipamentos de segurança

Foram adquiridas vidrarias como béckeres de tamanhos variados (20 mL, 100 mL, 500 mL e 1000 mL), bastões de vidro, funil, pipetas graduada e volumétrica, provetas (500 mL e 1000 mL), vidros de relógio, espátulas, entre outros. Quanto aos reagentes foram solicitados: monômero (estireno), solvente (tolueno), iniciador (BPO), inibidor (hidroquinona), nitrogênio gasoso (fluido inerte), e fluido térmico a ser circulado na camisa do reator de polimerização.

Tendo em vista o potencial de riscos de acidentes devido a manipulação de substâncias perigosas, uma das primeiras preocupações durante a montagem

do protótipo experimental foi a aquisição de equipamentos de segurança para proteção coletiva e individual. Foram adquiridos os seguintes equipamentos de proteção individual (EPI): aventais e luvas contra produtos corrosivos (de PVC), protetores faciais como máscaras contra gases e óculos de segurança e botas de PVC. Todos os materiais utilizados para os EPI's foram adquiridos conforme instruções dos próprios fabricantes dos reagentes que foram utilizados na planta para proporcionar a reação de polimerização.

2.3.2.5 Montagem das linhas de processo

Para a linha de circulação do fluido térmico: barras de cobre rígido 1/2" do tipo soldável, bem como as conexões necessárias (Figura 2.6 a). Para a linha de circulação do fluido polimérico: Barras de aço-inox 1/4" , e conexões do tipo rosca/anilha (Figura 2.6 b).



FIGURA 2.6. Montagem das linhas de (a) cobre e (b) inox.

Após a montagem das linhas foram observados vários pontos de vazamento. Na linha de inox, um ajuste maior nas anilhas foi necessário, sendo

que uma delas não se mostrou eficiente para a vedação sendo necessário substituí-la. Na linha de cobre em um dos módulos foi necessário refazer a parte de soldagem. Observou-se que a maioria dos vazamentos encontrava-se nas conexões com os instrumentos, e para saná-los foi necessário construir algumas peças, sob medida, de material resistente teflon, para melhor vedação nestas conexões.

2.3.3 – EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA COMPOR O SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

2.3.3.1 CLP

Neste trabalho foi utilizado um CLP fabricado pela empresa HI Tecnologia, modelo MCI02-QC, o qual pode ser visualizado na Figura 2.7. Este equipamento possui 8 entradas e 4 saídas analógicas e oferece grande versatilidade de configurações.



FIGURA 2.7. Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado no protótipo.

A disposição modular do MCI02-QC confere bastante flexibilidade às aplicações. Possui a capacidade de gerenciar pontos discretos e variáveis analógicas, incluindo blocos funcionais de controle. Este modelo de CLP permite a

expansão a qualquer momento dos *slots*, com configurações independentes. O modelo utilizado possui apenas dois *slots*: um módulo de entrada analógica com 8 canais disponíveis (entradas E0 a E7), e um módulo de saída analógica com 4 canais disponíveis (S0 a S3).

Em seguida serão especificados todos os sinais analógicos que foram conectados aos canais disponíveis nos módulos de entrada e saída, durante a etapa de instalação e configuração do CLP:

Módulo de entrada analógica

Canal 1: Sensor de temperatura localizado no reator de polimerização (E0);

Canal 2: Sensor de temperatura localizado na entrada da camisa do reator (E1);

Canal 3: Sensor de temperatura localizado na saída da camisa do reator (E2);

Canal 4: Vazio (E3);

Canal 5: Sensor de vazão mássica localizado na linha do fluido polimérico (E4);

Canal 6: Sensor de densidade localizado na linha do fluido polimérico (E5);

Canal 7: Sensor de pressão diferencial localizado na linha do fluido polimérico (E6);

Canal 8: Sinal on-line real de freqüência (Hz) da bomba de circulação do fluido térmico (E7);

Módulo de saída analógica

Canal 1: Sinal de entrada do inversor de frequência utilizado para acionamento da bomba responsável por impulsionar o fluido polimérico (S0);

Canal 2: Sinal de entrada do inversor de frequência utilizado para acionamento da bomba responsável por variar a velocidade do fluido térmico (S1);

Canal 3: Sinal de entrada do variador de potência utilizado para o acionamento e variação da potência da resistência elétrica (S2);

Canal 4: Vazio (S3);

2.3.3.1.1 Princípio de funcionamento de um CLP

O princípio de funcionamento de um CLP é baseado numa forma seqüencial de execução fazendo um ciclo de varredura em algumas etapas, conforme esquema ilustrado na Figura 2.8. É importante observar que quando cada etapa do ciclo é executada, as outras etapas ficam inativas. As instruções no CLP são lidas de cima para baixo e da esquerda à direita.



FIGURA 2.8. Ciclo de varredura de um CLP.

Durante a etapa de inicialização é verificado o funcionamento da CPU, memórias, e existência de um programa de usuário, sendo emitido um aviso de erro em caso de falha. Em seguida faz a leitura das entradas executando os comandos conforme programação do usuário e em seguida realiza os acionamentos especificados através da atualização nas variáveis de saída. E assim um novo ciclo é iniciado.

2.3.3.2 Bombas volumétricas

No desenvolvimento do protótipo foram utilizadas bombas de deslocamento positivo para impulsionar, através das linhas do sistema, os fluidos polimérico e térmico (Figura 2.9 a e b, respectivamente). As bombas de deslocamento positivo também podem ser chamadas de bombas volumétricas, assim são chamadas porque deslocam uma quantidade fixa de volume de fluido por vez, após a rotação do seu eixo, independentemente das condições de pressão na saída, o que não é conseguido nas bombas centrífugas. Essas bombas caracterizam-se por trabalhar com baixas vazões e com fluidos de maior viscosidade.

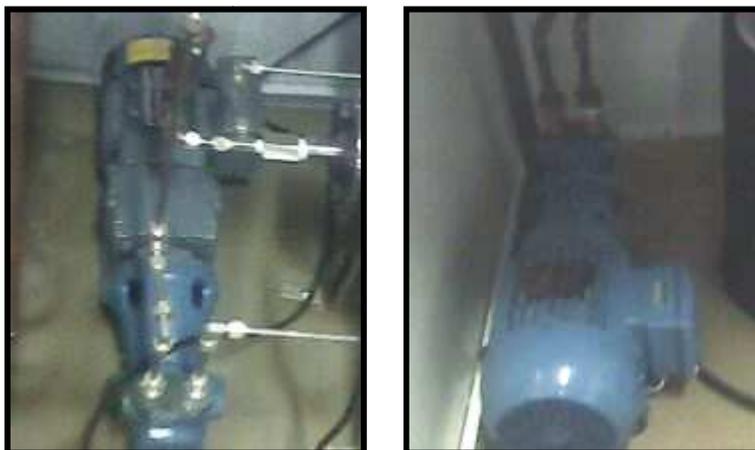


FIGURA 2.9 Bombas volumétricas para os fluidos (a) polimérico e (b) térmico.

Para o circuito do fluido térmico foi utilizada uma bomba de engrenagem de ferro fundido com vazão máxima de 500 Litros/hora (1 CV de potência e 220V). Para o circuito do fluido polimérico foi utilizada uma bomba de engrenagem com vazão máxima de 30 L/h, 0,5 CV de potência e 220V.

2.3.3.2.1 Princípio de funcionamento da bomba volumétrica

O princípio de funcionamento das bombas volumétricas baseia-se no deslocamento do centro da engrenagem interna em relação ao centro da engrenagem externa (rotor), isto é, a engrenagem interna gira excentricamente ao eixo da bomba. Na entrada da bomba são formadas câmaras de sucção, entre os dentes da engrenagem interna e os dentes do rotor, que succionam o líquido para dentro da bomba. Logo após, o fluxo de líquido é dividido pela meia-lua, que é parte da tampa da bomba. Parte do fluxo é conduzida entre os dentes da engrenagem interna e a outra parte é conduzida entre os dentes do rotor. A meia-lua funciona como vedação entre a saída e a entrada da bomba. Na etapa final, a engrenagem interna e o rotor voltam a se engrenar, reduzindo os espaços entre os dentes das engrenagens e expulsando o líquido retido entre os dentes pela conexão de saída da bomba (RZR Bombas, S/D).

2.3.3.3 Inversores de frequência

Para acionar a bomba volumétrica da linha de circulação do fluido polimérico foi utilizado um inversor de frequência (INV 101) da marca WEG, modelo CFW 10 0026, trifásico, 220V, alimentado por CLP (Figura 2.10 a).

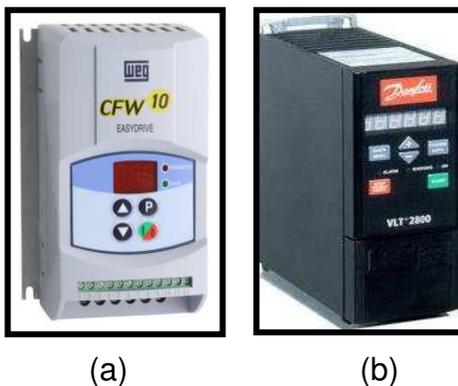


FIGURA 2.10. Inversores de frequência (a) fluido polimérico (b) fluido térmico

Para o acionamento e variação de velocidade da bomba da linha de circulação do fluido térmico, foi utilizado um inversor de frequência (INV 102) da marca DANFOOS, modelo VLT 2800 trifásico, 220V (Figura 2.10 b). Este equipamento foi utilizado neste trabalho como um elemento final de controle, uma vez que possui a capacidade de promover a variação da vazão do fluido térmico ao redor da camisa do reator, constituindo esta de uma possível variável manipulada do processo.

O inversor de frequência representado na Figura 2.10 b possui a capacidade de medir a potência consumida pelo motor da bomba do fluido térmico durante os ensaios e comunicá-la para a rede de dados, permitindo determinar o consumo de energia ao final de cada batelada.

Para a aquisição dos inversores de frequência a etapa principal foi a definição do dimensionamento. Para definir a sua capacidade foi necessário identificar a corrente máxima do motor que seria acionado. Normalmente se escolhe um inversor com uma capacidade de corrente igual ou um pouco superior à corrente nominal do motor. A tensão, tanto do inversor quanto do motor deve ser igual a da rede de alimentação.

Após a instalação dos inversores foi realizada a configuração dos mesmos, uma vez que para que o inversor funcione a contento, não basta apenas instalá-lo corretamente, é preciso também "informar" em que condições de trabalho irá se operar. Essa etapa consistiu na configuração do inversor.

Quanto maior o número de recursos que o inversor oferece, tanto maior será o número de parâmetros disponíveis. No entanto foram apenas configurados os parâmetros principais (básicos), aqueles que afetariam o funcionamento dos inversores de frequência, conforme ressalta o manual do equipamento.

2.3.3.4 Variador de potência

Para proporcionar o aquecimento do fluido polimérico até uma temperatura desejada para iniciar a reação, foi necessário o aquecimento do fluido térmico que circula na camisa do reator. No tanque de aquecimento, utilizou-se uma resistência elétrica de imersão, fabricada com elementos tubulares blindadas em aço inoxidável, 220 V, 2000 W, com cabeça de latão sextavada, rosca BSP 2", e dimensões 130 x 60 mm.

Para o dimensionamento da resistência elétrica foram realizados cálculos de balanços de energia, ponderando-se a capacidade calorífica do fluido, a quantidade de calor a quantidade de calor fornecida pela resistência para proporcionar a variação de temperatura do fluido e o tempo desejado para esta variação. Desta forma foi possível encontrar a potência adequada para a resistência elétrica a ser adquirida.

Para o acionamento e variação da carga térmica proporcionada pela resistência foi utilizado um variador de potência (marca Therma) (Figura 2.11). O variador de potencia permite impor carga modulada ao sistema, cuja comunicação 4-20 mA foi efetuada através da automação empregada (CLP).



FIGURA 2.11. Variador de potência utilizado no sistema de polimerização.

2.3.3.4.1 Determinação da potência enviada pelo variador de potência (elemento final de controle).

O variador de potência impõe uma carga modulada ao sistema, através do acionamento da resistência elétrica instalada no interior do tanque de armazenamento de óleo térmico, o qual circula através da camisa do reator.

A variação de potência é uma variável importante de ser monitorada, uma vez que tem potencial para ser usada como elemento final de controle para este sistema de reação de polimerização. Desta forma foi imprescindível a aquisição dos dados desta variável, em tempo real, para posterior tratamento de dados.

A medida da potência consumida pelo aquecimento foi obtida através da ligação do equipamento com o CLP, localizado no painel elétrico de comando. A partir do módulo de saída analógica do CLP foi possível enviar ao sistema a variação de potência requerida de forma manual, através do operador, ou de forma automática, através do controlador. Estas informações foram monitoradas e coletadas através de configuração do CLP com o sistema supervisor utilizado.

2.3.3.5 Agitadores

Existem vários tipos de agitadores, sendo a sua aplicação determinada pela viscosidade e estado físico do produto. Neste trabalho foram utilizados dois agitadores: um para proporcionar a mistura do fluido polimérico dentro do reator de polimerização e outro para o fluido térmico situado no interior do tanque de armazenamento. O agitador para o tanque trata-se de um Agitador Mecânico Microprocessado Modelo 712 Fisatom, rotação regulável entre 160 a 2000 rpm, 15W (Figura 2.12 a).



(a)

(b)

FIGURA 2.12. Agitadores utilizados no (a) tanque e no (b) reator de polimerização.

Um agitador mecânico modelo 713 D, Fisatom, 73 w, indicado para fluidos com elevada viscosidade, foi utilizado para operar no reator (Figura 2.12 b). Este agitador possui duas saídas de rotação sendo a primeira de alto torque, permitindo trabalhar com rotações mais baixas (5 a 240 rpm) e a segunda de alta rotação de 90 a 5000 RPM autocompensável.

2.3.4. INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

A instrumentação utilizada no protótipo de polimerização (Figura 2.13) foi indispensável, pois possibilitou o acesso a uma maior quantidade de informações das variáveis de processo, possibilitando a supervisão do curso da reação com confiabilidade e precisão e o proporcionando o controle do sistema.

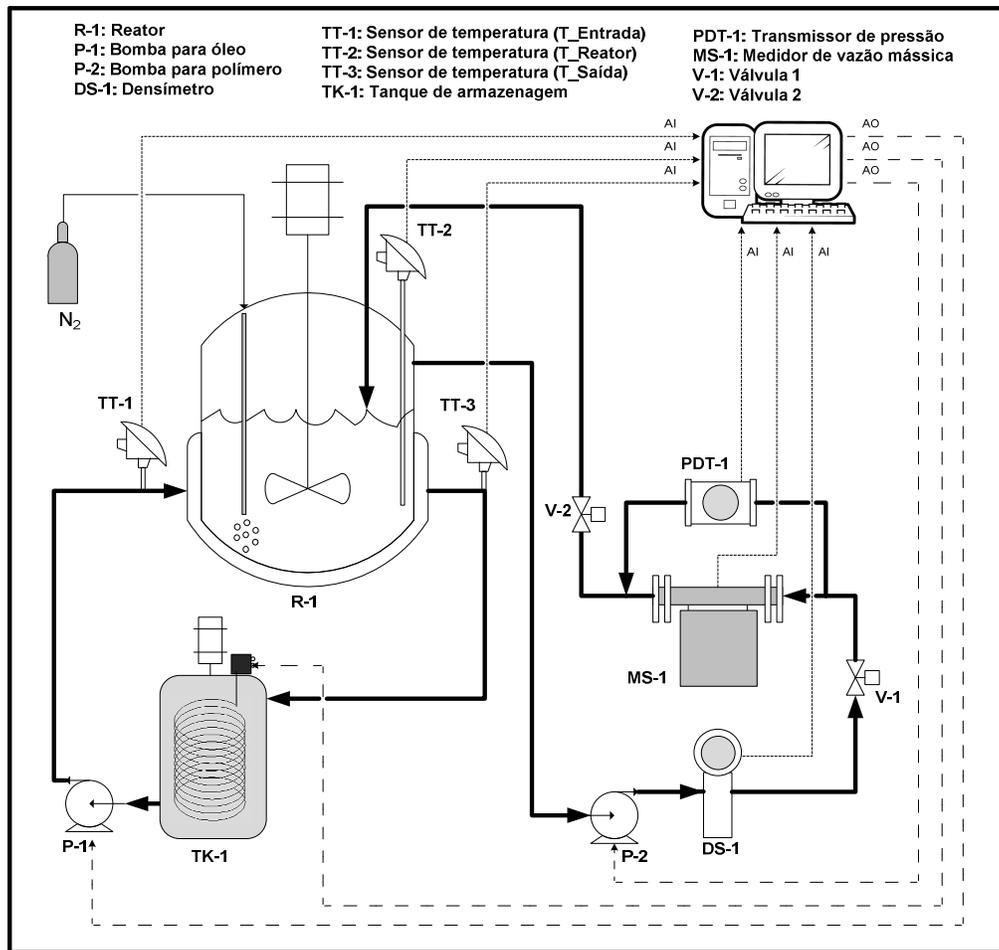


FIGURA 2.13. Fluxograma de Representação do Sistema de Polimerização.

O monitoramento das principais variáveis do processo possibilita a realização de ensaios com diferentes perturbações na variável manipulada e o acompanhamento o comportamento da variável controlada, fornece um perfil do comportamento dinâmico do sistema o qual pode ser utilizado para o desenvolvimento das estratégias de controle. A partir das informações em tempo real das variáveis manipulada e controlada, tornou-se possível efetuar correções dos desvios ocorridos, a partir da aplicação de controladores desenvolvidos.

Os sensores de temperatura (termoresistência Pt100), pressão diferencial (transdutor de pressão capacitivo), vazão mássica (transdutor de vazão do tipo

coriolis), e de densidade foram instalados em pontos estratégicos para a identificação das condições operacionais do sistema como apresentado no fluxograma mostrado na Figura 2.13.

A seguir será realizada uma breve descrição dos instrumentos utilizados nesta etapa o projeto proposto.

2.3.4.1 Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura utilizados neste trabalho foram os do tipo Pt100. O Pt100 é uma termoresistência feita de Platina onde a sua resistência a 0°C é 100 ohms.

Para as medidas de temperatura no sistema de polimerização foram utilizados termo resistências Pt100 a três fios com cabeçote (Figura 2.14 a). No cabeçote deste instrumento foram instaladas unidades eletrônicas de módulo de transmissão com comunicação Hart, adequadas para a montagem direta sobre a unidade do sensor (Figura 2.14 b).

O sensor adquirido foi o modelo TT302, Smar, com comunicação Hart, sinal de saída 4 a 20 mA e foi calibrado através do TXblock para temperaturas entre 0 e 160°C, valores que compreendem a faixa de operação do sistema.



FIGURA 2.14. (a) Sensor de temperatura com cabeçote e (b) unidade de transmissão de temperatura.

Os sensores/transmissores foram instalados no sistema de forma a monitorar a temperatura no interior do reator, a qual foi selecionada como variável a ser controlada no processo, e as temperaturas de entrada e saída da camisa do reator (Tabela 2.1).

TABELA 2.1. Localização dos sensores de temperatura no protótipo.

Sensores	Localização
TT-01	Entrada da camisa do reator
TT-02	Interior do reator
TT-03	Saída da camisa do reator

2.3.4.1.1 Calibração dos sensores de temperatura

Para garantir a alta qualidade e fidelidade das variáveis monitoradas foi de fundamental importância a calibração dos sensores utilizados. As termoresistências foram colocadas dentro do banho térmico próximas a um termômetro padrão utilizado como referência para a calibração. A temperatura de *set-point* do banho de refrigeração foi alterada em intervalos de temperatura de 10 °C, numa faixa de 20 °C a 90 °C. Para cada intervalo de temperatura, foram lidas e registradas as temperaturas do termômetro padrão e de cada uma das termoresistências, permitindo a construção das curvas de calibração e equações de ajuste.

2.3.4.2 Sensor de pressão diferencial

O sensor de pressão via célula capacitiva funciona a partir da comparação entre duas pressões, isto é, de forma diferencial. Muitos são os sensores baseados em células capacitivas usados na indústria. Um deles é o sensor adquirido para o emprego na planta de polimerização, o qual está ilustrado na Figura 2.15.

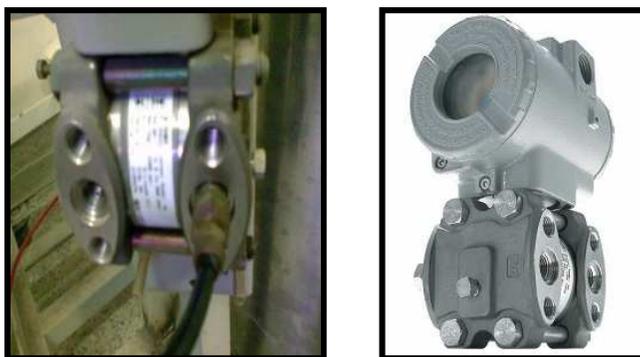


FIGURA 2.15. Sensor de pressão diferencial utilizado no sistema de polimerização.

Foi utilizado o sensor LD301 da Smar, para pressões entre 0 e 2500 mbar, com comunicação Hart, sinal de saída 4 a 20 mA, e uma precisão de 0,04% de fundo de escala. Percebe-se nele a utilização da diferença de pressão, onde um lado recebe a pressão atmosférica e a outra recebe a pressão exercida na célula possui um diafragma fixo que serve como referência para as variações entre as placas paralelas da capacitância.

O sensor e transmissor de pressão diferencial (PDT-1) foi instalado na linha de aço inox (circuito do fluido polimérico), entre as tomadas de pressão à montante e à jusante do sensor de vazão mássica. A medida da pressão diferencial (ΔP) é de grande utilidade para o cálculo da Equação de Hagen-

Poiseuille (Equação 2.1) e conseqüentemente pode tornar possível a inferência da medida de uma propriedade importante durante a reação, viscosidade, no tempo t_x .

$$\Delta P = \frac{128\mu L Q}{\pi d^4} \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 L Q} = K \frac{\Delta P \rho}{\dot{Q}_m} \quad (2.1)$$

Onde:

$$K = \frac{\pi d^4}{128 L Q}$$

ΔP = pressão diferencial (Pa);

μ = viscosidade absoluta (Pa.s);

L = comprimento dos tubos entre as tomadas de pressão(m);

Q = vazão volumétrica (L/min);

Q_m = vazão mássica (Kg/min);

ρ = densidade (kg/m³);

d = diâmetro do tubo(m).

2.3.4.3 Sensor de vazão mássica

Neste trabalho foi dimensionado e adquirido um sensor de vazão mássica do tipo Coriolis, para se obter informações sobre medidas de vazão mássica do

fluido polimérico, uma vez que esta medida corresponde a uma variável importante (Q) para a resolução da equação de Hagen-Poiseuille, e conseqüentemente tornar possível a inferência da medida de viscosidade num tempo ' t_x '.

O sensor e o transmissor de vazão mássica Coriolis, adquiridos e utilizados neste trabalho foram os modelos RHM 06 (sensor) e CMM01 (transmissor), conforme ilustrado na Figura 2.16.

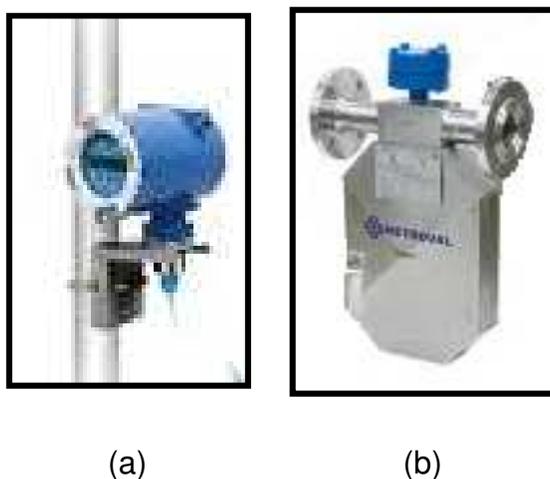


FIGURA 2.16. Medidor de vazão mássica Coriolis (a) transmissor e (b) sensor.

Este medidor da marca Metroval foi fabricado com material aço-inox, possui uma saída analógica de 4 a 20 mA , calibrado numa faixa 0,1 a 0,5 kg/min, e opera numa temperatura máxima de 120°C.

2.3.4.4 Sensor de densidade

Para realizar as medições *on-line* da densidade da mistura polimérica foi adquirido um transmissor de densidade, ou densímetro digital, o qual foi instalado

na linha de aço inox do sistema de polimerização (Figura 2.17). O modelo é o TDM01 da Metroval, que opera a vazões de até 6 L/min, calibrado para um range de 600 a 1100 kg/m³, podendo operar numa temperatura máxima de 150°C.



FIGURA 2.17. Transmissor de densidade para medidas on-line utilizado no sistema de polimerização.

2.3.5. MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO DE COMANDO DO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi realizada a montagem de um painel elétrico de comando que possibilitasse efetuar as ligações elétricas de uma forma mais didática, e que facilitasse as futuras manutenções corretivas. A montagem do quadro de comando do sistema viabiliza o controle lógico e a operação manual do processo.

Inicialmente foi construído o suporte do painel de comando, projetando o tamanho do quadro elétrico, de acordo com os prováveis instrumentos e materiais que seriam dispostos no mesmo. Nesta etapa foi adquirida uma placa de madeira MDF, canaletas de recorte aberto 50x50, trilhos e parafusos para fixação, e em

seguida marcações foram feitas na placa para identificar o layout do painel, demarcado pela disposição das canaletas (Figura 2.18).

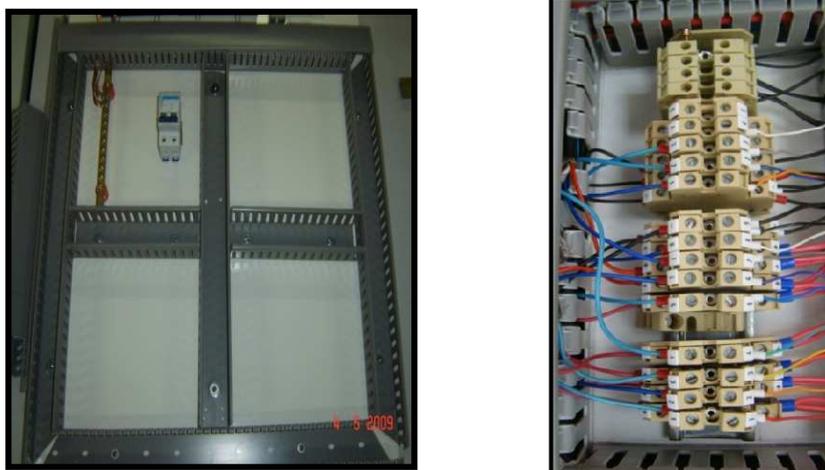


FIGURA 2.18. Esquema ilustrativo da etapa inicial da montagem do painel elétrico de comando.

As canaletas foram utilizadas para permitir a passagem de cabos elétricos e de instrumentação de forma organizada e discreta. Os trilhos foram utilizados para proporcionar a fixação dos componentes eletrônicos no painel. Foram fixados os componentes eletrônicos que compunham o painel, inclusive dispositivos de segurança como disjuntores, fusíveis e cabos de aterramento (Figura 2.19).

Os disjuntores e os fusíveis são dispositivos que permitem proteger uma determinada instalação elétrica contra sobre-intensidades (curto-circuitos ou sobrecargas). Funcionam como chaves automáticas cuja função é cortar a passagem de corrente elétrica quando esta for excessiva para circuito causando danos ao sistema.



FIGURA 2.19. Dispositivos de segurança instalados no painel elétrico de comando.

Portanto, a função dos disjuntores e fusíveis é desarmar em caso de sobrecarga, protegendo a instalação, operador e seus aparelhos conectados a instalação. A diferença básica entre os dois sistemas de proteção é que os disjuntores permitem serem rearmados, já os fusíveis, uma vez atuados devem ser substituídos. Para o dimensionamento destes dispositivos foram ponderadas as potências dos equipamentos associados a eles, bem como a sua voltagem requerida para o cálculo da corrente máxima. Foi obedecida a recomendação de que a corrente do circuito que se deseja proteger fosse menor que 70 a 80% da capacidade do disjuntor que protege o circuito. Ainda por questões de segurança, nesta etapa foi verificado se a capacidade do disjuntor era compatível com a capacidade da fiação do circuito protegido.

Para promover as ligações elétricas dos instrumentos da planta e promover a organização das ligações de forma didática no painel de comando, foi necessária a aquisição de bornes, conectores, terminais tubulares, cabos de instrumentação, cabos 'de força' e barra de aterramento. O layout do painel foi projetado de forma a evitar a proximidade entre que os cabos de elétricos e de instrumentação, uma vez que os sinais de entrada, normalmente, têm níveis de tensão e corrente pequenos, eles se tornam susceptíveis a interferências de campos elétricos e magnéticos a sua volta.

Os cabos de instrumentação foram utilizados para a alimentação dos instrumentos, através da fonte, e/ou para efetuar as ligações dos seus circuitos elétricos. Foram adquiridos cabos de instrumentação blindados (4x22) de forma a minimizar problemas com ruído, uma vez que as interferências elétricas podem afetar a integridade dos dados de sinal analógico. Os cabos de força foram utilizados para a ligação dos equipamentos à rede elétrica. O dimensionamento dos cabos foi realizado levando em consideração o fato de que há um limite máximo de aquecimento suportado pelo fio ou cabo, acima do qual ele começa a se deteriorar. Nessas condições, os materiais isolantes se derretem, expondo o condutor de cobre, podendo provocar choques e causar incêndios. Assim, foi calculada a corrente elétrica (A) que circula na instalação, tendo como base a corrente necessária para funcionamento de cada equipamento do painel, para que assim o dimensionamento dos cabos fosse realizado de forma eficiente e segura.

2.4. RESULTADOS

2.4.1 – MONTAGEM DO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

O sistema montado neste trabalho possuiu a finalidade principal de possibilitar a realização dos ensaios de reação de polimerização de maneira versátil. Na Figura 2.20 pode ser observado o protótipo montado no Laboratório de Controle e Automação de Processos (LCAP) na FEQ/UNICAMP.



FIGURA 2.20. Protótipo experimental para reações de polimerização.

O sistema para operação em batelada é constituído basicamente pelos seguintes elementos:

- Um reator de aço inox com capacidade de aproximadamente 2000 mL onde ocorre a reação de polimerização;
- Um tanque de armazenamento do fluido térmico Paratherm NF (Danvic) para circulação na camisa do reator;
- Duas bombas volumétricas (RZR), a fim de possibilitar a circulação do fluido polimérico e térmico, respectivamente.
- Três termoresistências do tipo Pt 100 (Smar), que possibilitam o monitoramento das temperaturas de entrada do fluido térmico na camisa do reator, do reator de polimerização e da saída do fluido térmico na camisa do reator, respectivamente;

- Três transmissores de temperatura (Smar) com sinal de saída analógica, ligados diretamente às termoresistências Pt100 para monitoramento e controle das condições operacionais do sistema;
- Um transmissor de densidade (Metroval), um sensor de pressão diferencial (Smar) e um medidor de vazão mássica (Metroval) para medições na linha do fluido polimérico em tempo real;
- Dois inversores de frequência (Weg e Danfoos), que alternam a velocidade de funcionamento das bombas dos fluidos polimérico e térmico, respectivamente;
- Dois agitadores (Fisatom) para proporcionarem a efetiva capacidade de mistura no interior do reator e no interior do tanque contendo óleo térmico.

2.4.1. COMPORTAMENTO DA VAZÃO DO FLUIDO TÉRMICO COM RELAÇÃO À FREQUÊNCIA DO INVERSOR

Este comportamento foi determinado a fim de se conhecer a vazão do fluido na linha de acordo com a variação de rotação imposta na bomba. Na Figura 2.21 pode ser observado o comportamento linear da vazão do fluido térmico com relação à variação da rotação da bomba.

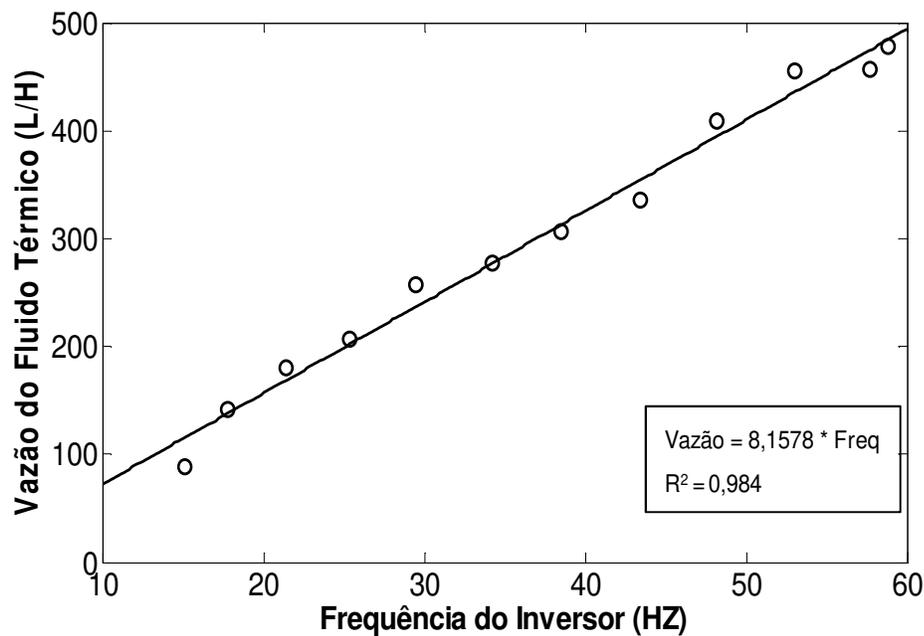


FIGURA 2.21 - Comportamento da vazão do fluido térmico com relação à variação da frequência rotação da bomba.

Quanto maior a frequência de rotação da bomba, maior vazão apresentada e, conseqüentemente, maior a potência consumida. Devido à frequência possuir uma relação direta com a vazão, foi possível a construção de uma curva que relacionasse a Potência consumida (W) e a vazão do fluido térmico aplicada (L/h).

A relação entre a potência consumida pelo motor e a vazão do fluido térmico pode ser observada na Figura 2.22. Observa-se uma desejável relação linear entre essas variáveis.

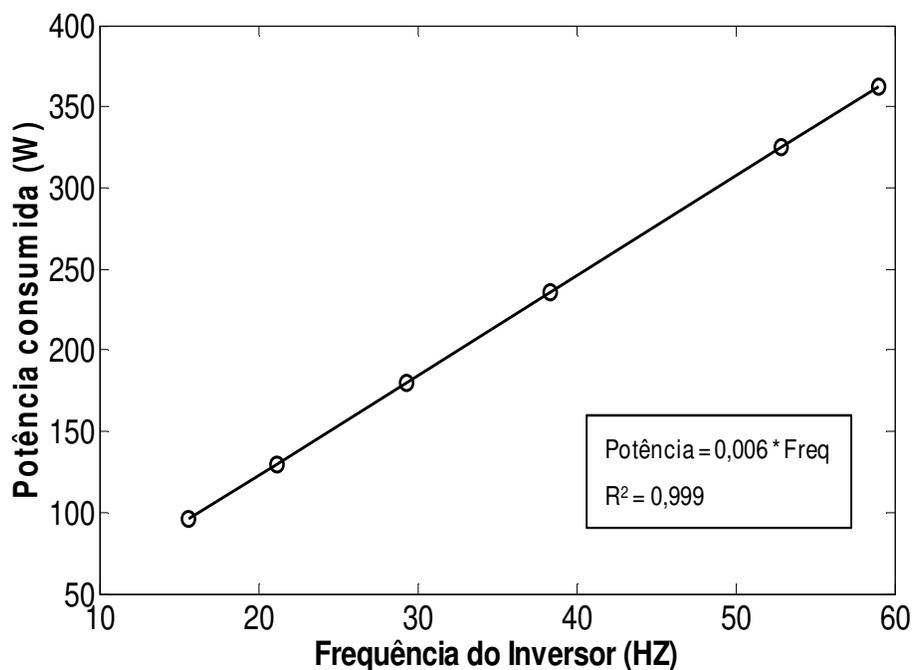


FIGURA 2.22 - Comportamento da potência consumida pelo motor da bomba do fluido térmico com relação à variação da freqüência rotação.

O comportamento linear apresentado na Figura 2.22 é desejável, pois com a necessidade de redução da vazão do fluido térmico no sistema ocorre uma redução da potência consumida.

2.4.2. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

As equações obtidas após a calibração dos sensores de temperatura são apresentadas na Tabela 2.2. Tais equações são obtidas através da correlação entre os valores lidos pelo sensor e os observados pelo termômetro de referência durante a calibração.

TABELA 2.2 - Equações obtidas a partir da calibração dos sensores de temperatura.

Sensores	Equação de Ajuste	(r²)
TT-01	$T_{real} = 1,024 * TT-01 - 0,840$	0,999
TT-02	$T_{real} = 1,010 * TT-02 - 0,732$	0,999
TT-03	$T_{real} = 1,026 * TT-03 - 0,480$	0,999

Pode ser observado que os ajustes da calibração dos sensores de temperatura apresentaram altos valores de coeficiente de determinação refletindo um excelente ajuste dos dados experimentais ao modelo linear proposto.

Na Figura 2.23 é apresentada a curva de calibração da temperatura obtida para o sensor TT-02 utilizado para medição da temperatura interna do reator. Observa-se uma boa concordância entre os valores de temperatura obtidos pelo sensor e os valores de temperatura reais observados no termômetro padrão.

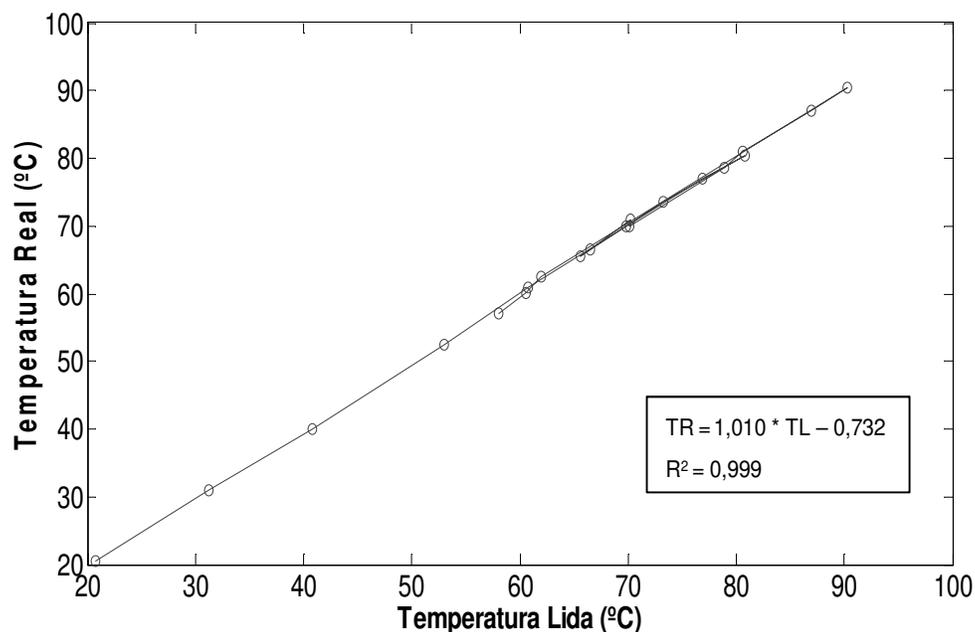


FIGURA 2.23 - Curva de calibração para o sensor de temperatura instalado no interior do reator.

2.4.3. MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO DE COMANDO

Os dispositivos do painel elétrico foram organizados visando maior praticidade das ligações entre os instrumentos. Foram instalados no painel os seguintes equipamentos: CLP; dois inversores de frequência; variador de potência; duas fontes (Figura 2.24): uma para fornecer sinal de referencia (0 V) possibilitando o fechamento do circuito elétrico para a passagem de corrente para todos os instrumentos e equipamentos acoplados no painel; e outra para alimentar o módulo eletrônico dos transmissores de densidade e de vazão mássica. E ainda dispositivos de segurança como disjuntores (um para cada equipamento citado anteriormente) e ainda fusíveis do para maior proteção do inversor de frequência utilizado para possibilitar variar a vazão do fluido térmico.



FIGURA 2.24. Fontes elétricas para possibilitar a comunicação.

Na Figura 2.25 é apresentado o quadro de comando montado com a finalidade de facilitar as interligações dos equipamentos e sensores de campo com os instrumentos.



FIGURA 2.25. Montagem do painel elétrico de comando

Todos os instrumentos da planta foram conectados ao CLP no painel elétrico que posteriormente permitiu a conexão do sistema ao computador, possibilitando acionamentos de equipamentos e leituras de instrumentos de forma remota. O sistema opera sob os modos remoto e manual. O modo remoto é gerenciado via CLP, onde os comandos são realizados de acordo com o programa LADDER/SPDSW implementado. No modo manual cada equipamento pode ser acionado individualmente através da ação direta sobre o painel.

2.4.4. CONFIGURAÇÃO DO CLP ATRAVÉS DO SOFTWARE SPDSW

A grande responsável pela flexibilidade de um CLP é a sua capacidade de ser programado, seja através de um dispositivo IHM ou de um microcomputador. As principais etapas para o desenvolvimento do programa para o CLP consistiram no desenvolvimento da lógica e edição do programa. Existem diversas linguagens de programação de CLP's que são padronizadas pela norma IEC 61131-3. Dentre elas destacam-se as linguagens gráficas, em especial o *ladder*, a qual será utilizada para desenvolver as experiências deste projeto. A linguagem de contatos *ladder* é uma linguagem baseada na lógica de relés e contatos e a mais difundida nos campos de aplicação de CLP, pois a semelhança com os diagramas de comando tradicionais torna fácil o aprendizado e a modernização de sistemas de comando antigos, sendo este o fator impulsionador para a aceitação deste programa no mercado.

O CLP permitiu neste trabalho a automação do sistema de polimerização e o monitoramento on-line das variáveis envolvidas, proporcionando a aquisição dos dados do processo a cada batelada, o que tornou possível as implementações dos controladores desenvolvidos.

A principal atividade realizada na etapa de automação do sistema foi o desenvolvimento de um programa lógico para o CLP, utilizando diagrama *LADDER* do programa SPDSW da HI Tecnologia para a configuração do CLP (Figura 2.26).

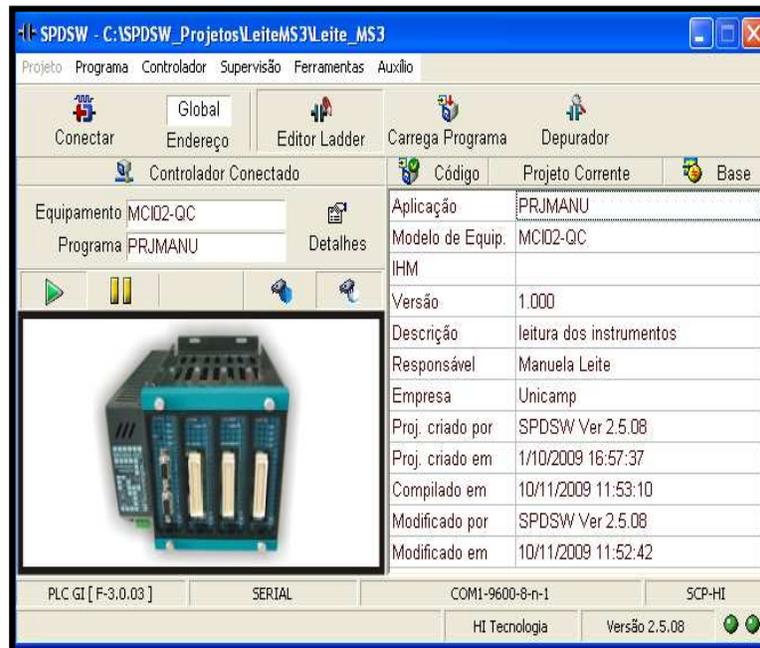


FIGURA 2.26. Ambiente de programação SPDSW.

Uma ilustração do programa *LADDER* desenvolvido neste trabalho para a aquisição e conversão dos dados em diagrama *LADDER* do SPDSW/CLP é apresentada na Figura 2.27.

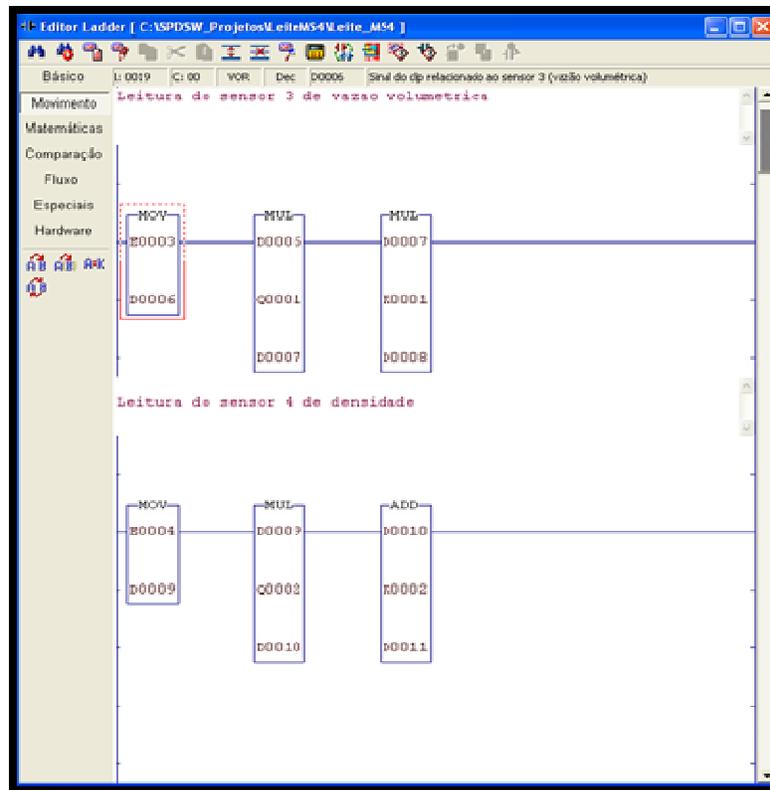


FIGURA 2.27. Ilustração da Programação *Ladder*.

A programação do CLP foi realizada através do editor *Ladder*. O equipamento foi configurado de forma a permitir a obtenção dos sinais de leitura dos instrumentos da planta e ainda permitir atuação automática do sistema. A partir do desenvolvimento deste programa tornou-se possível a supervisão das variáveis do processo e o posterior desenvolvimento de controladores automáticos.

Foram inseridos blocos com restrições de segurança neste programa, tais como: Temperatura limite a ser alcançada pelo fluido polimérico e do fluido térmico, com desligamento automático do variador de potência, e das bombas de circulação. Esta atitude foi necessária de forma a prevenir acidentes e evitar prejuízos que pudessem ser causados aos equipamentos utilizados no sistema.

2.4.5. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

Neste trabalho o software supervisorío INDUSOFT Web Studio 6.1 e o ambiente SIMULINK, do programa MATLAB 7.0 foram utilizados para a construção das telas de supervisão do sistema de polimerização para facilitar a apresentação e aquisição das variáveis importantes do processo. A comunicação destes programas com o CLP foi efetuada através do protocolo *Ole for Process Control (OPC)*.

Para o monitoramento inicial do sistema de polimerização foi utilizado o Sistema Supervisorío *InduSoft Web Studio 6.1* realizando comunicação dos equipamentos de controle através do CLP (Controlador Lógico Programável). Essa comunicação permitiu a monitoração e aquisição de dados em tempo real de sensores de temperatura, pressão, vazão entre outros e a realização de comandos de controle tipo liga/desliga do sistema em questão. As etapas de desenvolvimento do sistema supervisorío foram constituídas de tarefas como:

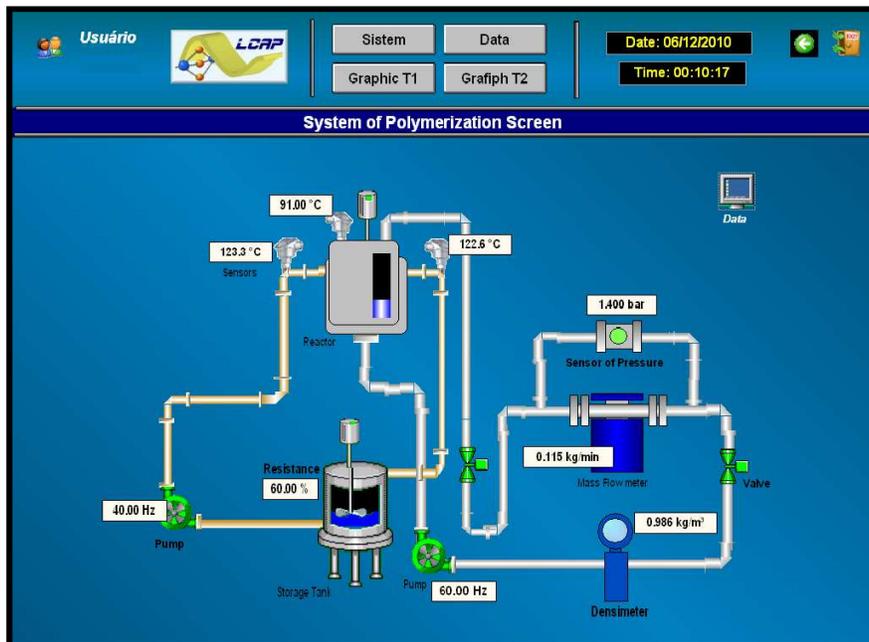
- Configuração do servidor OPC;
- Definições dos tipos de *tags*;
- Desenvolvimento das telas de supervisão;
- Desenvolvimento de gráficos de tendências *on-line* e banco de dados;
- Comunicação com o CLP;

A supervisão de um processo com sistema supervisório ocorre através da leitura de variáveis de processos no campo. Os valores dessas variáveis são associados a objetos do sistema chamados *Tags*. Para cada objeto inserido na tela, deverá associar pelo menos um *tag* ou atributo. Os *tags* são todas as variáveis (numéricas ou alfanuméricas) envolvidas num aplicativo. Os atributos são dados fornecidos pelo sistema supervisório sobre parâmetros de sistema e componentes da aplicação. Os *tags* podem representar qualquer tipo de variável, como entrada ou saída analógica, a depender da configuração e endereçamento requeridos pelo driver.

Antes de criar um *tag* CLP é necessário criar um objeto *Driver*, ao qual o *tag* será associado. O *drivers* de comunicação são bibliotecas (arquivos.DLL) responsáveis pela interligação do supervisório com os equipamentos externo (que possua uma interface de comunicação) e os *tags* têm a mesma finalidade de trocar informações com os equipamentos de aquisição de dados através dos *drivers* de comunicação.

Nas Figuras 2.28 a e b estão ilustradas telas de monitoramento e de perfil *on-line* de variáveis do sistema de polimerização.

Durante o desenvolvimento das telas do supervisório foram priorizados o conceito de funcionalidade na operação manual e a facilidade de visualização das variáveis do processo. Desta forma, uma atenção especial foi dada para a representação sinótica do processo real e para a construção de gráficos de tendências *on-line*.



(a)



(b)

FIGURA 2.28. Tela de monitoramento on-line das variáveis do sistema de polimerização, utilizando o sistema supervisório Indusoft.

Este sistema supervisorio foi utilizado na fase de testes de comunicação e nos ensaios preliminares do sistema de polimerização. Durante a etapa de implementação dos controladores avançados, foi necessária a utilização do software MATLAB, que também foi configurado para permitir o monitoramento e a aquisição das variáveis de processo, passando a ser usado como o sistema supervisorio oficial. Para permitir a comunicação dos instrumentos de forma remota com o MATLAB, através do CLP, foi utilizado o servidor OPC *Scada.Server.OPC* do *InduSoft Web Studio 6.1*.

2.4.5.1 Interface de comunicação MATLAB/SIMULINK

O software MATLAB trata-se de um software matemático iterativo de alta performance apropriado ao emprego de trabalhos em que se desejam desenvolver e implementar algoritmos utilizando-se de técnicas avançadas de controle. Além de o MATLAB ser uma linguagem robusta para cálculos científicos, apresenta também, uma interface gráfica de fácil compreensão e dispõe de uma biblioteca abrangente de funções matemáticas e de bibliotecas “*toolboxes*”. O MATLAB possui inúmeras “*toolboxes*” com algoritmos pré-programados para conhecimentos específicos. A implementação dos controladores avançados em tempo real foi realizada no ambiente MATLAB/SIMULINK. Na Figura 2.29 pode ser visualizado o desenvolvimento dos blocos construídos pra permitir tal aplicação.

Na Figura 2.30 os gráficos de supervisão que permitem uma melhor visualização do monitoramento do avanço da reação em tempo real, no ambiente MATLAB/SIMULINK.

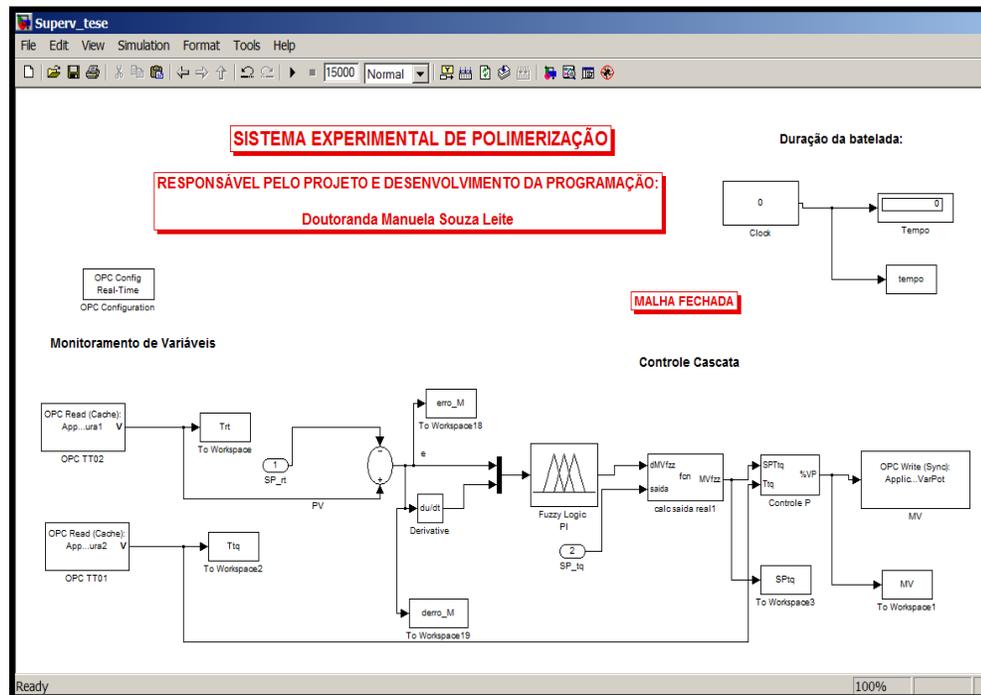


FIGURA 2.29. Blocos para supervisão, armazenamento de dados e controle do sistema de polimerização.

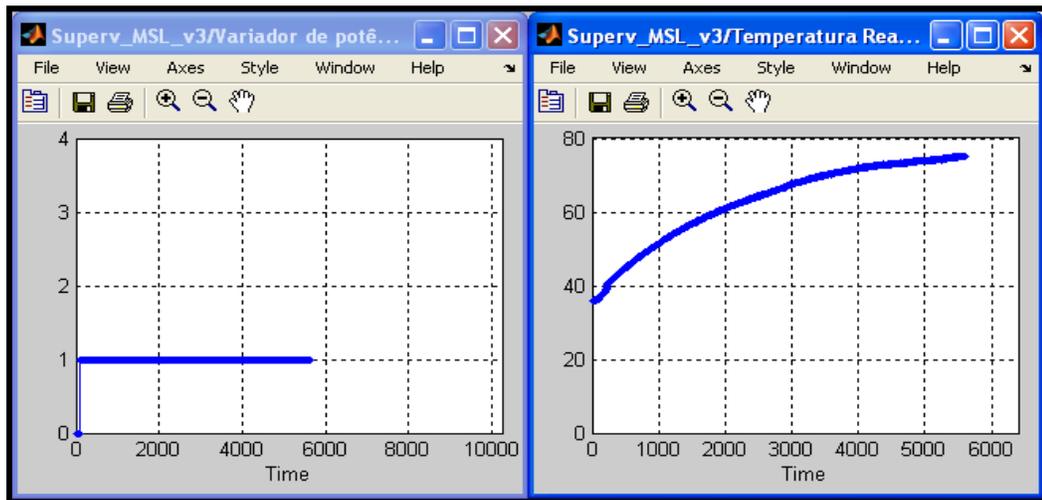


FIGURA 2.30. Exemplo de gráfico de supervisão em tempo real, no Simulink, das variáveis do processo.

2.5. CONCLUSÕES

A construção do protótipo experimental de um sistema de polimerização foi realizada de forma satisfatória, apresentando versatilidade de aplicações no mesmo. O protótipo traz uma grande contribuição para trabalhos a serem desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP, disponibilizando um sistema moderno, que abre uma nova linha de pesquisa na faculdade para desenvolvimento de novos trabalhos com enfoque em tecnologias de automação, instrumentação e controle de processos.

A descrição detalhada das etapas de montagem deste protótipo facilita futuras mudanças que possam vir a ser realizadas no protótipo para ajuste do mesmo e seu emprego em um novo estudo de caso.

A instrumentação de todo o processo e a construção do painel elétrico de comando possibilita um gerenciamento do processo de forma mais ampla, facilita a implementação do sistema de controle no sistema e torna mais simples as etapas de manutenção ou correção que sejam necessárias.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELLI, P. L. **Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis.** Apostila disponível em: <http://www.ejm.com.br/download/introducao%20clp.pdf>. Acesso em julho de 2008.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos.** 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 659p, 2001.

DUARTE, C. R. M.; FIGUEIREDO, L. C.; CORREA, M. V. **Utilização do MATLAB® no Ensino da Tecnologia OPC aplicada a Controle de Processos.** XII Congresso Brasileiro de Automática, Vol. II, Uberlândia, pp. 637–642, 2006.

FONSECA, M. O. **Comunicação OPC – Uma abordagem Prática.** VI Seminário de Automação de Processos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vitória – ES, Brasil, 2002.

GUTIERREZ, R. M. V.; PAN, S. S. K. **Complexo Eletrônico: Automação do Controle Industrial.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.28, p. 189-232, 2008.

JACK, H. **Automating Manufacturing Systems with PLCs.** Livro digital disponível em <http://claymore.engineer.gvsu.edu/~jackh/books.html>, 2004.

McMILLAN, G. K.; CONSIDINE, D. M. **Process/Industrial Instruments and Controls Handbook.** 5ª Ed., Ed. McGraw-Hill, New York, 1999.

NATALE, F. **Automação Industrial.** Ed. Érica, São Paulo, 2000.

OPC Foundation, **OPC Overview.** Disponível em: <http://www.opcfoundation.org/> . Acesso em Maio, 2008.

PASTORELLO, R. **Integração via OPC de controlador preditivo comercial com simulador dinâmico de processos gerando ambientes virtual de testes.** 109 p. Dissertação de Mestrado. Centro Universitário do Instituto Mauá de tecnologia, São Caetano do sul, 2008.

RICHTER, C. **Controladores Programáveis – Curso de Automação Industrial**. Ed. Dexter, Rio de Janeiro, 2001.

SILVA FILHO, B. S. **Curso de Controladores Lógicos Programáveis**. LEE-UERJ, Rio de Janeiro, 1998.

SOUZA, A. M.; SCHUTTENBERG, R. M. C. **Controle de Processos e PLC**. XII Congresso Brasileiro de Automática, Vol. II, Uberlândia, pp. 637–642, 2000.

SOUZA, L. C. A.; FOLHO, C. S.; PENA, R. T. **Padrão de Acesso a Dados OPC e sua Implementação em um Driver OPC-MODBUS**. In: V Simpósio Regional de Instrumentação/ II Congresso Mineiro de Automação, ISA / GRINST – IBP, Belo Horizonte, p. 157-164, 1998.

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

A indústria de polímeros teve grande impulso após a Segunda Guerra Mundial, em função da necessidade de substituir materiais naturais (borracha natural e lã) e matérias primas básicas (lã).

Polímero é uma macromolécula com massa molecular da ordem de 10^3 a 10^6 (g/mol) cuja estrutura apresenta simples unidades químicas repetidas, chamadas meros. Existe no mercado uma grande quantidade de tipos de polímeros derivados de diferentes compostos químicos. Dependendo de suas propriedades físicas, mecânicas, elétricas, óticas e outras, cada polímero é indicado para uma ou mais aplicações (VIANNA JR. et al., 2006; GOLÇALVES, 2006).

Na indústria de polímeros processos em batelada são muito difundidos. A maioria dos polímeros que possuem características diferenciadas, para utilizações específicas são fabricados em processos batelada. Geralmente, são produzidos em pequena e média escala, em plantas multi-propósito, projetadas para a fabricação de uma linha de produtos que passam por processos semelhantes e nos mesmos equipamentos.

O desenvolvimento da indústria de polímeros é devido em grande parte ao fato de os materiais poliméricos apresentarem ampla faixa de propriedades, o que torna possível ampla gama de aplicações. No entanto, esta versatilidade cria também a necessidade natural de controlar ou projetar um material com características bem específicas. Isto é particularmente importante porque, ao

contrário das moléculas que possuem propriedades químicas e físicas bem definidas, a estrutura molecular dos materiais poliméricos depende da forma com que estes materiais são produzidos (VIANNA JR. et al., 2006).

Sendo assim, devido os polímeros possuírem alto valor agregado e requererem condições de processamento bastante criteriosas para que sejam atingidas as rígidas características de sua especificação, justifica-se a utilização de sistemas de controle e monitoramento cada vez mais avançados e eficientes para estes processos, como por exemplo os controladores que se baseiam em Inteligência Artificial (*fuzzy* e redes neurais).

Devido ao interesse comercial do poliestireno e sua facilidade de polimerização, os polímeros estirênicos se tornaram um dos sistemas poliméricos mais estudados do mundo (ALMEIDA, 2004). Neste trabalho, optou-se na utilização de um sistema de polimerização do estireno em solução, como estudo de caso na aplicação de estratégias de controle, devido a sua importância comercial e econômica, além de ser de fácil manuseio e alta aplicabilidade.

3.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A descoberta do monômero estireno é creditada à Newman, em 1786, a partir da destilação do 'líquido âmbar'. Entretanto a primeira polimerização é de Eduard Simon, em 1839 (MOORE, 1989). O chamado estírol, pelo pesquisador, foi o sólido obtido, acidentalmente, da destilação do vapor de resina gomosa.

O poliestireno foi descoberto em 1831, mas só foi utilizado em escala industrial a partir de 1930 na Alemanha. A comercialização demorou muito, porque não se detinha a mínima tecnologia para a condução adequada da reação, uma vez que a mesma é altamente exotérmica. Os Estados Unidos só tomou impulso

na produção de plástico industrial de estireno a partir de 1946, por causa do incentivo da borracha sintética na segunda guerra mundial (MOORE, 1989, NICHOLSON, 1991). Desde então a produção de poliestireno tem crescido pelo mundo devido a uma gama de produtos que podem ser gerados a partir dele.

O Estireno ou Monômero do Estireno é um hidrocarboneto aromático não saturado. À temperatura ambiente é um líquido oleoso incolor, que polimeriza com facilidade na presença de oxigênio e oxida na presença da luz e de ar. É utilizado como matéria prima para múltiplas aplicações, sendo as mais importantes as seguintes: poliestireno, borracha sintética, resinas poliéster, copolímeros e derivados. Estes derivados por sua vez, são utilizados em inúmeros outros produtos secundários.

Quando a polimerização é conduzida em larga escala pode ser uma reação de difícil controle, pois é altamente exotérmica, além de possuir alta viscosidade, baixa taxa de difusão e baixa condutividade térmica. Estas propriedades influenciam nas taxas de reação e nas características finais do produto (NICHOLSON, 1991).

Durante a polimerização, a concentração de polímeros aumenta, o que faz com que também aumente a viscosidade da massa polimérica fundida ou em solução. Altas viscosidades causam aumentos de temperatura que devem ser dissipados de forma correta por reatores e/ou agitadores adequados (Técnicas de Polimerização, S/D; LONA, 2002).

Existe no mercado uma grande quantidade de tipos de polímeros, derivados de diferentes compostos químicos. Cada polímero é mais indicado para uma ou mais aplicações dependendo de suas propriedades físicas, mecânicas, elétricas, óticas, etc. Devido a sua grande produção e utilização, os polímeros *commodities*, são os tipos de polímeros mais consumidos atualmente, como por exemplo, os poliestirenos, que são bastante utilizados principalmente em embalagens, utensílios domésticos e isolantes térmicos (POLÍMEROS, S/D; KRUSE et al., 2002).

Trabalhos recentes falam da reciclagem do poliestireno por meio da decomposição do polímero via pirólise a temperaturas superiores a 300 °C com a conseqüente recuperação do monômero (KRUSE et al., 2002).

3.2.1. TIPOS DE POLIMERIZAÇÃO

A polimerização do estireno pode acontecer nas seguintes formas: em massa, em solução, em suspensão, em emulsão. As duas primeiras sendo sistemas homogêneos e as duas últimas heterogêneos.

3.2.1.1. Polimerização em massa

A reação se caracteriza pela presença apenas do monômero e do iniciador, embora algumas indústrias usem baixíssimos percentuais de solvente (5 a 10%) para redução de efeito difusionais. É difícil o controle de temperatura e portanto da uniformidade das condições de operação, o que causa heterogeneidade no tamanho das macromoléculas formadas. A dificuldade da remoção dos vestígios do iniciador é outra desvantagem desta técnica. Em contra partida, obtém-se um alto valor de conversão. (MANO e MENDES, 1999; MENEGUELO, 2001).

3.2.1.2. Polimerização em solução

Na tentativa de reparar os problemas da polimerização em massa, a polimerização em solução emprega, além do monômero e iniciador, o uso de um solvente orgânico que homogeneiza o sistema. Este foi o tipo de polimerização selecionado para se utilizar nas aplicações experimentais deste trabalho.

Na polimerização em solução, solventes inertes agem como diluentes dessas reações. Eles baixam a concentração de monômeros e, conseqüentemente, as taxas de reação. Os diluentes também fazem diminuir o efeito “gel”, e a viscosidade do sistema é menor, reduzindo o problema de limitação difusional no sistema reacional (MENEGUELO, 2001; FRANCO, 2006).

Essa técnica é adequada para polímeros que se destinam à utilização sob a forma de solução, como no caso de composições de revestimento (tintas, vernizes, etc). Entre as desvantagens dessa técnica estão o retardamento da reação pelo solvente, a dificuldade de remoção e de recuperação total do solvente, o que pode causar um efeito limitativo de seu emprego industrial (KIPARISSIDES,1996, MANO e MENDES, 1999, CONTANT, 2007).

3.2.1.3. Polimerização em emulsão

A polimerização em emulsão convencional emprega monômero, iniciador, água e emulsificante. A reação ocorre em um meio heterogêneo. Os radicais livres se formam na fase aquosa e migram para a fase orgânica, onde a reação acontece. Essa técnica apresenta algumas semelhanças com a polimerização em suspensão: ambas as técnicas envolvem a polimerização de monômeros em uma dispersão aquosa. Na polimerização em emulsão, no entanto, ao invés de um agente de suspensão, é utilizado um emulsificante e o iniciador é solúvel não na fase orgânica, mas na fase aquosa (NICHOLSON, 1991; KIPARISSIDES,1996)

O objetivo de se usar emulsificante na polimerização é a formação de micelas de tamanhos entre 1 nm e 1 mm onde o monômero fica retido. A reação vai se processando dentro das micelas, formando gotas de polímeros e só acaba quando converte todo monômero presente em micelas.

A polimerização em emulsão apresenta a dificuldade da completa remoção dos resíduos dos componentes do meio reacional, restringindo as aplicações do material. No entanto, como principal vantagem tem-se baixa

viscosidade, a formação de polímeros com elevadas massas moleculares e rápida e altas taxas de conversão (MANO E MENDES, 1999; MENEGUELO, 2001).

3.2.1.4. Polimerização em suspensão

A polimerização em suspensão emprega, além do monômero, um iniciador organossolúvel, um solvente (normalmente água) e um espessante ou agente de suspensão (orgânico ou inorgânico) para manter a dispersão.

Nessa técnica, a polimerização acontece nas gotas de monômero. Sendo assim, o que ocorre neste tipo de polimerização, é a polimerização em massa dentro de cada gotícula suspensa. O tamanho das partículas dispersas geralmente é de 10 μ m, o que exige agitação vigorosa e contínua. A precipitação do polímero ocorre espontaneamente ao se interromper a agitação, e este se deposita sob a forma de "pérolas" (MANO e MENDES, 1999; MENEGUELO, 2001; CONTANT, 2007).

3.2.2. ETAPAS DA REAÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO DE ESTIRENO

A cinética da reação de polimerização de estireno via radical livre em solução pode ser dividida em três etapas: iniciação, propagação e terminação. E serão abordados a seguir (NICHOLSON, 1991; MANO e MENDES, 1999; MENEGUELO 2001, MACHADO, 2004; GONÇALVES, 2006; CONTANT, 2007). O balanço de massa foi utilizado para se obter o perfil de conversão simulado.

3.2.2.1. Iniciação

A etapa de iniciação é responsável pela formação dos radicais livres que irão crescer e se tornar moléculas de polímero, ou seja, é a etapa encarregada de gerar radicais continuamente durante o processo de polimerização. Portanto é

uma etapa muito importante do processo, pois será determinante no número de moléculas do polímero que será formado.

Existem três tipos de iniciação: química, térmica e por radiação. Na iniciação química, uma molécula de iniciador se decompõe formando radicais livres; na iniciação por radiação, o meio reacional é exposto a raios ultravioleta, raios gama ou raios elétricos que fornecerão energia suficiente para um iniciador ou monômero se excitar a ponto de formar radical livre; a iniciação térmica ocorre em altas temperaturas onde os monômeros reagem entre si para formar radicais livres. A iniciação térmica é uma reação própria do estireno e é obtida a uma temperatura acima de 100°C, na qual existe a decomposição térmica do monômero a radicais livres.

Para a polimerização do estireno, normalmente é usado um iniciador químico, por exemplo, o Peróxido de Benzoíla (alta atividade oxidante devido aos oxigênios livres da molécula) e a reação é conduzida em temperaturas entre 85 e 100 °C. Outros iniciadores químicos podem ser utilizados, isso só depende das configurações do estudo empregado em cada processo. A Equação 3.1 apresenta a etapa de iniciação química, onde um iniciador se decompõe formando dois radicais livres. Cada radical se liga a moléculas de monômeros, deixando-as reativa (começo da propagação).



$$\frac{dI}{dt} = -K_d I \quad (3.2)$$

$$K_d = 1,0533 * 10^{15} * \exp\left(\frac{-15488,33}{T}\right) \quad (3.3)$$

Onde:

I : iniciador.

R^* : radical livre.

K_d : constante cinética da taxa de decomposição do iniciador.

Estes radicais livres, por sua vez, irão reagir com as moléculas de monômeros presentes no meio reacional.



Onde:

M : monômero.

R^* : radical livre.

R_1^* : radical livre com comprimento de cadeia=1.

A eficiência desta etapa depende da natureza do iniciador e do monômero empregados. O número de moléculas formado é proporcional a taxa de iniciação e quanto maior a taxa, mais moléculas serão formadas. Uma maior quantidade de radicais livres presentes no meio reacional significa uma maior taxa de polimerização, pois haverá um maior número de radicais consumindo monômero.

3.2.2.2. Propagação

Na etapa de propagação, os radicais reagem com as moléculas de monômero fazendo com que o comprimento da cadeia do radical livre aumente. Os radicais contendo moléculas de monômeros em suas estruturas continuam a reagir com outras moléculas de monômeros, fazendo com que a cadeia de radical livre cresça. Esta é a etapa responsável pelo crescimento da cadeia polimérica.



Onde:

R_r^* : radical livre com comprimento de cadeia= r.

K_p : constante cinética de propagação.

R_{r+1}^* : radical livre com comprimento de cadeia= r+1.

A taxa de propagação, ou taxa de polimerização será proporcional à taxa de consumo de monômero e proporcional a taxa de produção do polímero. A reação de propagação consiste da reação de um monômero com um radical livre e, portanto, dependerá da concentração destes dois elementos no meio reacional (Equação 3.6):

$$\frac{dM}{dt} = R_p = K_p \cdot [M] \cdot [R^*] \quad (3.6)$$

Onde:

K_p : constante de propagação;

R_p : taxa de propagação, taxa de polimerização;

$[M]$: concentração de monômero;

$[R^*]$: concentração de radicais livres.

A temperatura favorece o crescimento de cadeias e o aumento da viscosidade, pois aumenta a reatividade da iniciação e dos radicais livres formados. Os radicais livres são formados pela reação de iniciação e desaparecem devido a reação de terminação. A taxa de propagação não altera o número de radicais livres. Assim, o balanço de radicais livres do sistema é dado pela Equação 3.7.

$$\frac{1}{V} \frac{d[R^*]}{dt} = R_I - R_t \quad (3.7)$$

Onde:

R_I : taxa de iniciação;

R_t : taxa de terminação;

V : volume do reator;

t : tempo.

A taxa de iniciação para um sistema usando iniciadores químicos é dada pela taxa de decomposição do iniciador, que se decompõe formando dois radicais livres (Equação 3.8), no caso de iniciadores monofuncionais, como é o caso do BPO. A taxa de terminação é dada pela taxa pela qual os radicais reagem formando moléculas de polímero (Equação 3.9). Se for considerado o estado pseudo-estacionário assume-se que não haverá o acúmulo de radicais livres no sistema e as taxas de iniciação e terminação serão iguais. Então igualando-se as Equações 3.8 e 3.9 a concentração total de radicais livres presentes no sistema pode ser dada pela Equação 3.10:

$$R_I = 2 \cdot f \cdot K_d \cdot [I] \quad (3.8)$$

$$R_t = K_t \cdot [R^*]^2 \quad (3.9)$$

$$[R^*] = \left(\frac{2 \cdot f \cdot K_d \cdot [I]}{K_t} \right)^{0,5} \quad (3.10)$$

Onde:

f : eficiência do iniciador;

K_d : constante de decomposição do iniciador;

K_t : constante de terminação;

R^* : radical livre;

$[I]$: concentração de iniciador.

Substituindo a equação da concentração total de radicais na taxa de propagação (Equação 3.10 em 3.6), obtém-se uma nova equação para a taxa de propagação, conforme descrito na Equação 3.11:

$$\frac{dM}{dt} = R_p = K_p \cdot [M] \cdot \left(\frac{2 \cdot f \cdot K_d \cdot [I]}{K_t} \right)^{0,5} \quad (3.11)$$

A Equação 3.11 mostra que a taxa de propagação não é apenas dependente da constante de propagação e da concentração de monômero, mas também da quantidade de iniciador e da taxa de decomposição do iniciador e da taxa de terminação.

A eficiência do iniciador (f) é um parâmetro usado na modelagem de sistemas de polimerização, que indica qual a fração de radicais gerados pelo iniciador que irão participar do crescimento de cadeias de polímeros. É necessário considerar este parâmetro, pois alguns radicais gerados pela decomposição do iniciador se recombinam e não formam cadeias de polímero. O valor da eficiência varia de 0 a 1.

3.2.2.2.1. Transferência de cadeia

Na propagação pode haver reações de transferência de cadeia. Nestas reações, o radical em crescimento reage com uma molécula pequena, que pode ser o monômero, inibidor, iniciador, solvente, agente de transferência e impurezas.

A transferência de cadeia ocorre quando o radical abstrai um hidrogênio instável de uma molécula pequena presente no meio reacional. Esta reação de transferência termina com o crescimento da cadeia e transferência do centro ativo (radical) para a molécula que teve o hidrogênio abstraído. Este novo radical pode se propagar formando uma nova molécula de polímero.

Quando ocorre a transferência de cadeia para o monômero (Equação 3.12), a cadeia de polímero é desativada pela molécula do monômero, resultando

em um polímero inativo e um monômero reativo.



$$K_{tm} = 2,31 * 10^6 * \exp\left(\frac{-6377}{T}\right) \quad (3.14)$$

Pode haver também propagação por transferência de cadeia para o solvente, onde o solvente se torna reativo, ao passo que há formação de um polímero inativo. Este processo é semelhante ao que ocorre na propagação por transferência para o monômero, só que neste caso o solvente vem no lugar do monômero (Equação 3.15 e 3.16). Por causa deste mecanismo de propagação, o solvente deve ser cuidadosamente selecionado. Os mais utilizados são os hidrocarbonetos aromáticos que possuem um baixo valor entre a relação das constantes K_{trs} e K_p , que é na ordem de 1×10^{-4} .



$$K_{trs} = 5,0 * 10^{-5} K_p \quad (3.17)$$

Onde:

K_{tm} : constante cinética de transferência de cadeia para o monômero.

K_{trs} : constante cinética de transferência de cadeia para o solvente.

S : molécula do solvente

P_r^* : Polímero com radical livre

$S.$: molécula do solvente ativa.

A temperatura favorece o crescimento de cadeias e o aumento da viscosidade, pois aumenta a reatividade da iniciação e dos radicais livres formados.

3.2.2.3. Terminação

Os radicais livres formados durante a reação de polimerização podem reagir entre si bem lentamente, dando fim a reatividade da cadeia e formando o polímero, daí caracteriza-se a terminação por combinação. O sistema reacional, também, está sujeito a terminação por desproporcionamento (Equação 3.18), mas, especificamente para o estireno, quando se usa uma faixa de temperatura acima de 80°C a terminação acontece praticamente por combinação (Equação 3.19).



A constante global de terminação é dada pela soma das constantes de terminação por combinação e por desproporcionamento:

$$K_t = K_{tc} + K_{td} \quad (3.20)$$

Onde:

P_r : polímero com comprimento de cadeia= r.

P_s : polímero com comprimento de cadeia= s.

P_{r+s} : polímero com comprimento de cadeia = r+s.

K_t : constante cinética de terminação global.

K_{tc} : constante cinética de terminação por combinação.

K_{td} : constante cinética de terminação por desproporcionamento.

Conforme a conversão de monômero aumenta, maior será a quantidade de moléculas de polímero no meio reacional. À medida que cresce a concentração do polímero, os radicais têm dificuldade em mover-se, aumentando, assim, a resistência à difusão e à propagação de calor gerado. Então pode ocorrer uma diminuição do valor da constante de terminação dando origem ao efeito conhecido como efeito *Trommsdorff* (efeito gel).

A atuação do efeito gel altera sensivelmente a distribuição da massa molecular, de modo que, no início da reação há formação de polímeros com massa molecular uniforme e termina com a formação de polímero com massa molecular variado. Essa variação de massa acarreta ao produto propriedades mecânicas indesejáveis, pois o mesmo torna-se quebradiço, perdendo o valor comercial.

3.3. EXPLANAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO

O sistema experimental desenvolvido trata-se de uma reação de polimerização que ocorre num reator encamisado, através do qual foi circulado fluido térmico para promover adição/retirada de calor da reação possibilitando um controle de temperatura no interior do reator onde encontra-se o fluido polimérico.

Este fluido é composto do monômero estireno, do solvente tolueno e de uma pequena quantidade de iniciador BPO (peróxido de benzoíla) e circula numa outra linha do processo onde estão conectados instrumentos de medição para

acompanhamento do curso da reação, como por exemplo o sensor de densidade, proporcionando o acompanhamento desta variável em tempo real, a qual possui ligação com a viscosidade e conversão do polímero.

O objetivo deste processo foi manter a temperatura interna do fluido polimérico no reator dentro de um valor especificado, de forma a obter um polímero com conversão e massa molecular definidos segundo as condições operacionais utilizadas, visto que estas propriedades do polímero são influenciadas pela temperatura. O controle da temperatura do reator será realizado através da manipulação da variação de potencia da resistência inserida no tanque contendo o fluido térmico, permitindo a variação da temperatura da camisa do reator de polimerização.

3.4. METODOLOGIA

3.4.1. PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NO PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE POLIMERIZAÇÃO

A partir deste trabalho, foram adotadas as seguintes etapas a serem cumpridas para a realização de cada ensaio no protótipo experimental desenvolvido:

- 1) Adição do monômero e do solvente na planta na proporção estabelecida;
- 2) Iniciar a agitação dos fluidos poliméricos e térmico;
- 3) Iniciar o borbulhamento de N_2 no interior do reator pelo menos 15 minutos antes de realizar os ensaios, dificultando a presença de O_2 no meio, uma vez que este age como inibidor da reação de polimerização;

- 4) Iniciar a circulação do fluido térmico através da camisa do reator;
- 5) Iniciar a circulação do fluido polimérico através da linha de circulação que permite a passagem do fluido polimérico através dos equipamentos de medição *on-line* de densidade, pressão diferencial e vazão mássica.
- 6) Propiciar o aquecimento do sistema, até que a temperatura do reator alcançasse o valor de *set-point* da reação;
- 7) Adicionar o iniciador da reação e, imediatamente, dar início ao processo de polimerização.
- 8) Coletar amostras periodicamente em béckeres com peso anteriormente determinado, para a determinação gravimétrica e realização das análises em GPC (Cromatografia de Permeação em Gel), posteriormente;
- 9) Adicionar o inibidor de reação de polimerização hidroquinona em cada amostra coletada;
- 10) Finalizar o processo após o tempo de reação estabelecido.

3.4.2 – DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Antes de se realizar ensaios de polimerização foi imprescindível a determinação das condições iniciais dos ensaios, servindo de referência para as perturbações no sistema. Nesta fase o intuito foi o de estabelecer:

- Proporção a ser utilizada entre o monômero/solvente;
- Volume da mistura polimérica;
- Tipo de iniciador;

- Concentração de iniciador a ser utilizada;
- Temperatura do *set-point* do reator de polimerização;
- Velocidades de agitação;
- Temperaturas de entrada e saída da camisa do reator;
- Vazão de circulação do fluido polimérico;
- Vazão de circulação do fluido térmico ao redor da camisa;
- Tempo de reação

Estas condições foram fixadas e utilizadas como referência à aplicação de diferentes tipos de controlador implementados.

Para a determinação das condições iniciais no sistema de polimerização foram utilizados como base alguns trabalhos encontrados na literatura, principalmente os trabalhos de Ghasem et al, 2007, Altinten et al. 2003, Altinten et al., 2006, os quais foram escolhidos por possuírem maiores semelhanças com o sistema em questão.

3.4.2.1. Determinação da proporção de monômero e de solvente e do tempo de reação

Testes em bancada foram realizados para determinar a proporção de monômero e solvente. Estes testes iniciais foram realizados em bancada, uma vez que se tratava de um sistema experimental sobre o qual se tinha poucas informações no que se diz respeito à prática deste experimento nas condições propostas.

Houve a preocupação de não utilizar uma mistura polimérica que se tornasse viscosa no decorrer da reação, a ponto de provocar entupimento nas linhas do sistema, ou mesmo nos instrumentos de linha utilizados.

Outra questão levada em consideração é que a intenção de fazer a circulação do fluido polimérico através dos instrumentos de linha era justamente o fato de poder fazer medições *on-line* de além da densidade, da variação de pressão e vazão mássica. Como já mencionado, seria possível inferir estes dados na equação de Hagen-Poiseuilli (Equação 2.1), e obter então dados de viscosidade, segundo Kalotay, 1999.

No entanto, a aplicação desta relação tem como limitação que o fluido deve ser newtoniano, e apenas os fluidos poliméricos menos viscosos (mais diluídos) possuem esta característica. Desta forma o tempo de reação e a concentração do monômero foram definidos baseados nesta condição.

3.4.2.1.1- Metodologia para a realização de ensaios-testes no bécker

Para realizar os ensaios-testes foi utilizado um Bécker de 1L e uma mistura polimérica de 800 mL, uma vez que como eram testes preliminares, o volume foi diminuído para reduzir consumo dos reagentes. A concentração do iniciador BPO foi mantida em 0,0185 mol/L. As reações foram conduzidas em um banho termostático para manter a temperatura em 90°C, para o início da reação. A mistura polimérica ficou sob agitação constante, e antes de iniciar a reação foi borbulhado nitrogênio na mistura (para formar uma camada livre de oxigênio, pois é um inibidor da reação).

A adição de nitrogênio foi continuada mesmo após o início da reação, e o monitoramento da temperatura da mistura polimérica no decorrer da reação foi realizado através de um sensor com saída analógica, o qual permitiu a aquisição

dos dados da reação. Sendo assim, todo o procedimento que seria adotado nos ensaios de polimerização seguintes, foram empregados também nos ensaios-teste.

Foram testadas três concentrações diferentes com proporções de estireno/tolueno: 30%/70%, 50%/50% e 70%/30%. O tempo inicial de reação utilizado para teste foi de 8000 s, tempo suficiente para o sistema voltar a entrar em regime permanente.

3.4.3 MONITORAMENTO ON-LINE DE VARIÁVEIS SECUNDÁRIAS

Verificaram-se, além dos perfis da temperatura do reator (fluido polimérico) e do tanque (fluido térmico), os perfis das variáveis de monitoramento do fluido polimérico: densidade, vazão mássica e pressão diferencial. Estas variáveis estão diretamente relacionadas às alterações sofridas no interior do reator de polimerização devido à ocorrência da reação.

Os densímetros são bastante usados para medidas laboratoriais de conversão de monômero. São baseados no princípio que polímeros são mais densos que monômeros. Quando o monômero é convertido a polímero a mudança no volume é monitorada através da mudança no peso da solução dentro do tubo capilar graduado (RICHARDS e CONGALIDIS, 2006). Assim, houve o interesse de monitorar esta variável e utilizar as medidas de densidade para relacionar à conversão após cada ensaio.

Ainda, segundo Vega (2001) para sistema de polimerização em solução, a viscosidade pode relatar a massa molecular do polímero, sendo assim, a viscosidade pode ser empregada *on-line* para monitoramento da massa molecular em polimerização. Não foi utilizado um viscosímetro na linha do sistema, mas como uma forma alternativa proposta por Kalotay (1999), a vazão mássica

apresenta relação com a viscosidade, e estes dados poderiam ser utilizados em cálculos utilizando a equação de Hagen Poiseuille, e fornecer informações de viscosidade *on line*, por inferência.

O intuito de monitorar estas variáveis *on-line*, além de obter informações sobre o fluido polimérico, que poderiam ser usadas como base de um conhecimento especialista, utilizar estas variáveis em estratégias de controle avançado, proporcionando maior versatilidade ao emprego de técnicas de controle no sistema de polimerização.

3.4.4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSIENTE DO SISTEMA

Foram realizados ensaios no sistema de forma a obter conhecimentos sobre o comportamento transiente das variáveis do processo ao longo da reação de polimerização. Foram comparados os comportamentos das variáveis monitoradas com e sem a ocorrência de reação no sistema experimental.

Foi seguida toda a metodologia de operação mencionada anteriormente, no entanto, em um ensaio não foi adicionado iniciador, ou seja, não foi iniciada a reação de polimerização, apenas o aquecimento do fluido no sistema. Assim, os resultados dos dois ensaios foram analisados para se perceber melhor a resposta das variáveis frente ao processo de polimerização.

O ensaio realizado com reação, em malha aberta, na proporção estabelecida, poderia então ser utilizado como referência para outros ensaios em malha fechada.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. DETERMINAÇÃO DO VOLUME DA MISTURA POLIMÉRICA, SELEÇÃO E CONCENTRAÇÃO DO INICIADOR, VELOCIDADE DE AGITAÇÃO E SET-POINT DA TEMPERATURA

Foi definido trabalhar com o sistema de polimerização de estireno em solução, operando em reator em batelada. Foi estabelecido um volume de mistura polimérica de 1100 mL, volume bastante utilizado em trabalhos com sistema de polimerização.

Após analisar os tipos de iniciadores utilizados, foi selecionado o iniciador peróxido de benzoíla, devido a sua faixa de atuação de temperatura. Foi selecionada a temperatura de operação ponderando-se as limitações dos equipamentos e instrumentos utilizados na linha. Optou-se em trabalhar com temperaturas mais amenas devido a questões de segurança. A temperatura de *set-point* selecionada para a variável controlada foi de 90°C, e adotou-se a concentração do iniciador de $I_0=0,0185$ mol/L, que é a combinação mais encontrada na literatura.

A velocidade de agitação no interior do reator foi fixada em 150 rpm e a do fluido térmico em 200 rpm, para ajudar na homogeneidade da mistura e dissipação de calor.

3.5.2. DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES DOS FLUIDOS POLIMÉRICO E TÉRMICO

Foi preciso definir as vazões que inicialmente seriam utilizadas para a circulação dos fluidos térmico e polimérico através do sistema, uma vez que estas variáveis estão relacionadas com o aquecimento do sistema.

Para determinar a vazão do fluido polimérico, primeiramente atentou-se para a vazão máxima que poderia ser utilizada a fim de garantir um fluido com escoamento laminar. Esta condição foi observada, uma vez que se tinha o interesse em utilizar os dados deste fluido para inferência na Equação de Hagen Poiseuille (Equação. 2.1) para relacionar a viscosidade do fluido.

Para garantir que o fluxo seria laminar, restrição para o emprego desta equação, foram realizados cálculos para estabelecer a vazão máxima a ser utilizada. A viscosidade do estireno é de 0,76 cP a temperatura ambiente, e a do tolueno 0,59cP. Obviamente que a viscosidade do fluido polimérico seria maior, mas tomou-se como base a viscosidade mínima do fluido que circularia na linha. Para o cálculo da vazão utilizou-se a Equação de Reynolds que permite determinar o tipo de escoamento de um fluido: quanto maior a viscosidade maior a faixa de atuação de vazão permitida de forma a garantir que o fluido seja laminar.

Os cálculos mostraram uma vazão máxima de 30 a 40 L/h, para os valores mínimos de viscosidade. Estes cálculos nortearam o dimensionamento da bomba, inicialmente. A vazão estabelecida e fixada para este fluido polimérico durante a realização dos ensaios foi de 17L/h.

A vazão do fluido térmico foi definida de forma a permitir um range de atuação na mesma, e que esta variável pudesse ser utilizada posteriormente como

uma variável de controle. Foi estabelecida uma vazão para o fluido térmico de 70%, que correspondia a uma vazão de 336 L/h.

3.5.3. DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA INICIAL DA CAMISA DO REATOR DE POLIMERIZAÇÃO

As temperaturas de entrada e saída da camisa do reator foram selecionadas de forma a manter constante a temperatura no interior do reator, e com valor em torno do valor do *set-point* (90°C). Foi importante a determinação da temperatura da camisa do reator que proporcionasse o aquecimento do fluido polimérico até que o mesmo alcançasse o regime permanente, possibilitando posteriormente, o início da reação de polimerização.

Uma vez que foi constatada que a linha de circulação do fluido polimérico provocava uma redução na temperatura do sistema, foi necessário encontrar, através de testes heurísticos, qual a temperatura que poderia contornar esta queda de temperatura no reator.

A temperatura da camisa foi elevada aos poucos e aguardava-se um tempo de aproximadamente 1 hora para constatar se o sistema havia alcançado o regime permanente. Este passo foi repetido até que a temperatura adequada para a camisa do reator fosse determinada.

A temperatura da camisa do reator foi selecionada para operar no início da reação a aproximadamente 137 °C, com a vazão de circulação da camisa fixada no valor estabelecido anteriormente. No entanto, vale lembrar que esta temperatura não foi mantida constante durante a reação, uma vez que esta variável foi utilizada como variável manipulada do sistema de controle e variava conforme ações do controlador.

3.5.4 DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO DE MONÔMERO E SOLVENTE

Os testes em bancada da reação de polimerização foram realizados sob três concentrações diferentes de estireno/tolueno: 30%/70%, 50%/50% e 70%/30%, em volume. Os ensaios foram realizados em malha aberta, sem a intervenção de controladores. Após o fluido polimérico atingir a temperatura de *set-point*, o iniciador era adicionado à mistura e então a reação era monitorada.

Em ensaios testes anteriormente realizados, percebeu-se que o volume final era muito pouco comparado ao inicial, devido à grande evaporação do solvente no decorrer da reação, o que tornava o fluido polimérico remanescente com uma viscosidade muito elevada, a ponto de quase se tornar um sólido. Esta evaporação demasiada acontecia pelo fato de ter utilizado um meio aberto, por isso a necessidade da utilização de uma tampa sob medida, em aço inox, para que as reações em bancada fossem realizadas em ambiente fechado, assim como seriam no sistema.

Na Figura 3.1 apresentam-se os resultados obtidos para os ensaios em bancada, utilizando um Becker (com tampa) como um “reator”.

De acordo com as resposta obtidas na Figura 3.1 observa-se que quanto maior a concentração de monômero, maior é o calor liberado pela reação de polimerização. Para realizar ensaios-teste em malha aberta no sistema, foi selecionada a condição 50%/50% de monômero/solvente no sistema. Por questões de segurança, inicialmente não foi escolhida a condição 70%/30%, uma vez que foi observada grande liberação de calor, apesar de esta ser a condição mais utilizada neste tipo de sistema de polimerização.

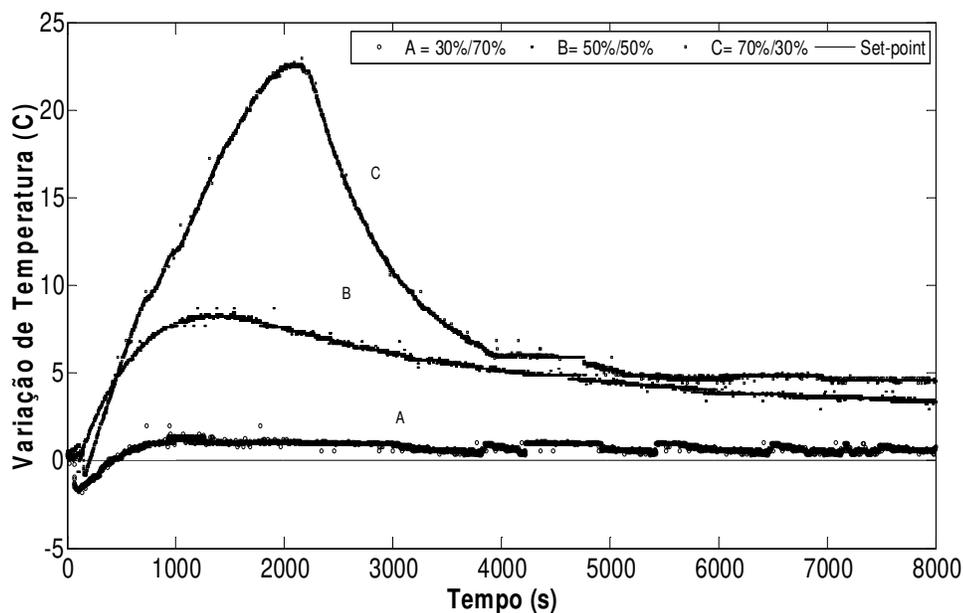


FIGURA 3.1. Perfil do comportamento da temperatura do fluido polimérico em três proporções (70%, 50% e 30% do monômero, em volume), em ensaios de bancada.

As elevações de temperatura estavam dentro de uma faixa esperada inicialmente 10-30°C, conforme observações nas respostas obtidas por outros trabalhos na literatura que usaram a similar concentração de iniciador e temperatura de operação (ALTINTEN 2003; GHASEM, 2007).

Foram seguidas as etapas para a realização dos ensaios no protótipo experimental, e foi implementada a condição 50%/50% de concentração monômero/solvente. Percebeu-se uma grande diferença no perfil de temperatura no interior do reator do protótipo, conforme pode ser observado na Figura 3.2. A diferença entre os perfis de temperatura do fluido polimérico nos ensaios realizados no Becker e no protótipo de polimerização foi muito grande e inesperada.

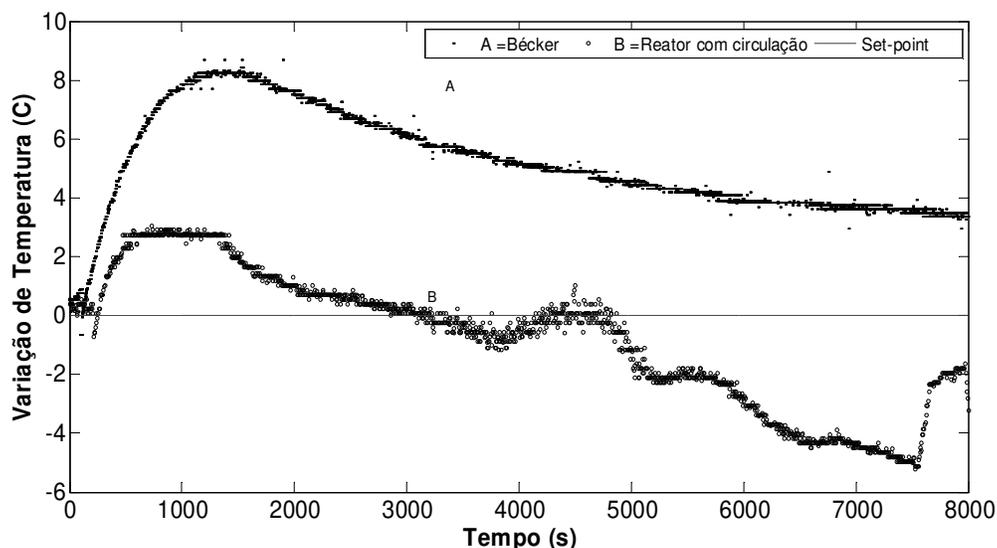


FIGURA 3.2. Perfil de temperatura no interior do reator em ensaios de bancada e ensaios realizados no protótipo experimental de polimerização (50%/50% estireno/tolueno).

A elevação inicial da temperatura no início da reação, logo após a adição do iniciador BPO, é devido à liberação de calor, uma vez que a reação de polimerização é exotérmica. No início devido à grande quantidade de radicais livres presentes no meio reacional, existe um maior consumo de monômero. Com o tempo, o número de radicais livres vai diminuindo e também a liberação de calor pela reação, o que provoca a queda de temperatura no interior do reator, como se observa nas curvas A e B da Figura 3.2.

No entanto, percebe-se que a elevação da temperatura após a adição do iniciador e também no decorrer da reação, em ensaios realizados no reator (Figura 3.2 B), foi bastante reduzida quando comparada ao perfil de temperatura quando a reação foi efetuada em Becker (Figura 3.2 A). Este comportamento, foi atribuído ao fato de que, no sistema experimental de polimerização, funcionava a linha de circulação do fluido polimérico para possibilitar a leitura dos instrumentos de

medição de densidade, vazão mássica e pressão diferencial, e esta linha não existia nos ensaios em bancada realizados em Bécker.

Desta forma, percebeu-se que ocorria uma grande perda de calor no sistema através desta linha, provocando exatamente o efeito contrário do que se esperava, onde o fluido polimérico passava a atuar em determinados momentos com temperaturas abaixo da temperatura desejada, devido a esta “fonte de retirada de calor” do sistema.

Para conter este problema, o sistema foi isolado termicamente com material de borracha elastomérica Armaflex, a fim de se evitar perdas de calor para o meio ambiente. No entanto, esta atitude não foi suficiente para a contenção das perdas.

Para constatar que esta situação se devia mesmo a queda de temperatura devido à linha de circulação do fluido polimérico, foi medida a temperatura de circulação deste fluido antes da sua entrada no reator, e percebeu-se que a queda se dava antes mesmo de se completar a circulação, logo após a passagem do fluido pelos instrumentos.

Para confirmar estas observações, optou-se em realizar um ensaio no sistema de polimerização, entretanto, sem utilizar a linha de circulação do fluido polimérico. De acordo com a Figura 3.3, verifica-se que o comportamento do ensaio em bancada e realizado no protótipo são semelhantes, constatando-se efetivamente que a linha de circulação do fluido polimérico, atuava como uma perturbação para o sistema.

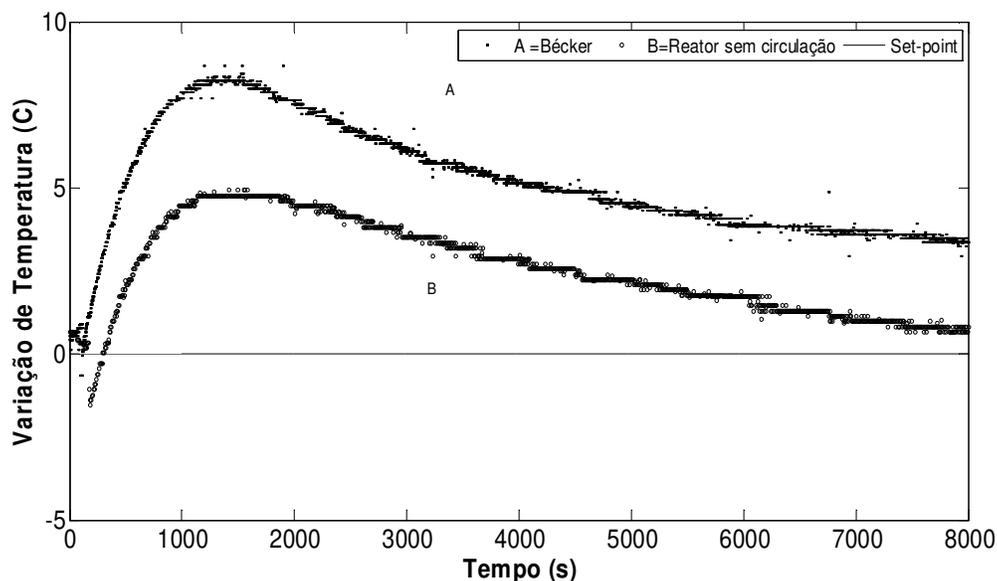


FIGURA 3.3. Perfil de temperatura no interior do Becker em ensaio de bancada e ensaio no protótipo experimental de polimerização, sem circulação da linha do fluido polimérico (50%/50% estireno/tolueno).

Na Figura 3.3 observa-se que a variação de temperatura do fluido polimérico no reator foi menor. Isto se deve primeiramente a mudança de sistema de operação, uma vez que no ensaio em bancada tratava-se de um Becker de vidro de 1L, e no protótipo experimental, de um reator em aço inox, com diferente dimensão, e capacidade máxima de 2L. Além disso, o volume útil para a reação em bancada foi de 800 mL e no protótipo, o volume foi de 1100 mL.

Ainda assim é ressaltada a necessidade de controle nesta reação para manter a temperatura dentro do valor e *set-point* estabelecido, uma vez que as variações de temperatura ao longo da reação influenciam na distribuição da massa molecular afetando a qualidade final do produto.

Com base nos trabalhos de Ghasem et al., (2007) e Altinten et al, (2006), Erdogan et al. (2002) foi estabelecido um tempo de reação de polimerização de 3 horas.

3.5.5. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRANSIENTE DO SISTEMA

Ainda que constatada a influência da linha de circulação sobre a temperatura do sistema, foi realizada uma análise sobre as alterações que ocorriam no processo após o início da reação.

Foram realizados então ensaios em malha aberta no protótipo experimental, com circulação do fluido polimérico pela linha do processo, com a única diferença que no primeiro ensaio não foi adicionado o iniciador da reação, ou seja, durante todo o ensaio a proporção de monômero e solvente se manteria inalterada (Perfil A das Figuras 3.4, 3.5 e 3.6).

Nestes ensaios foi utilizada a proporção de 50%/50% de monômero, em volume, a qual seria mantida a partir de então para todos os ensaios realizados posteriormente. A temperatura do tanque foi mantida constante em todo o ensaio, no valor de set-point inicial, determinado para as condições operacionais, de 137°C. Os comportamentos dos perfis das variáveis do processo podem ser observados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6.

Na curva A da Figura 3.4 pode-se notar que, à temperatura constante da camisa do reator, e mesmo com circulação da linha do fluido polimérico, a temperatura do reator é mantida constante durante todo o ensaio, no entanto, vale ressaltar que neste caso não ocorre à reação de polimerização propriamente dita uma vez que não houve a adição do iniciador, apenas manteve-se o monômero e solvente aquecidos no reator nas proporções estabelecidas.

Na curva B (Figura 3.4), como ocorre a reação de polimerização, percebe-se que no início há uma elevação de temperatura proveniente da adição do iniciador, uma vez que há liberação de calor visto que a reação é exotérmica. No início a liberação de calor é mais acentuada devido a maior quantidade de radicais

livres presentes no meio reacional, e ao longo da reação esta liberação de calor vai diminuindo, provocando queda da temperatura. Este comportamento pode ser claramente observado no ensaio realizado no reator, sem a circulação da linha do fluido polimérico, conforme Figura 3.3.

No entanto, observa-se que a elevação inicial de temperatura e a sua queda no decorrer da reação é mais intensificada quando o sistema experimental opera com a linha de circulação do fluido polimérico em funcionamento, uma vez que esta atua como uma fonte de retirada de calor, como anteriormente constatado nas Figuras 3.2 e 3.3.

Assim, mantendo a temperatura de circulação da camisa do reator constante durante todo o ensaio de polimerização com reação (temperaturas de entrada e saída da camisa permanecem constantes), percebe-se que ocorre uma queda de temperatura no interior do reator de aproximadamente 17°C.

Esta queda vai se tornando mais acentuada à medida que a reação vai se processando, em função das mudanças cada vez mais intensificadas das propriedades do fluido polimérico (Figuras 3.5 e 3.6).

Os perfis dos comportamentos das variáveis de processo: densidade, vazão mássica e pressão diferencial, indicam a variação do fluido polimérico ao longo da reação. Nas curvas A, das Figuras 3.5 e 3.6, referentes ao ensaio sem reação, está explícito que não existe alteração nas propriedades do fluido polimérico, enquanto que na curvas B, claramente se percebe a variação destas variáveis que acompanham as alterações do fluido ao longo do processo de polimerização.

As alterações sofridas pela temperatura, densidade, vazão mássica e pressão diferencial podem ser atribuídas principalmente ao aumento da viscosidade do fluido no interior do reator, onde há o aumento de formação e crescimento de cadeias poliméricas, devido à conversão do monômero estireno a poliestireno.

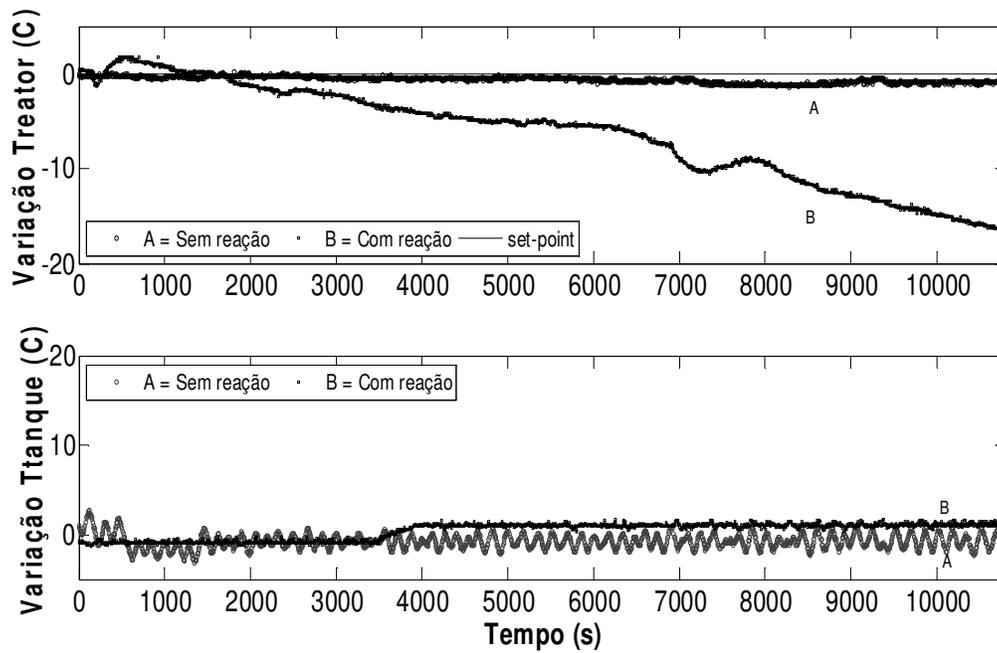


FIGURA 3.4. Perfis de variação de temperatura do reator e da camisa, com circulação do fluido polimérico, com e sem adição de iniciador na reação (50%/50% estireno/tolueno).

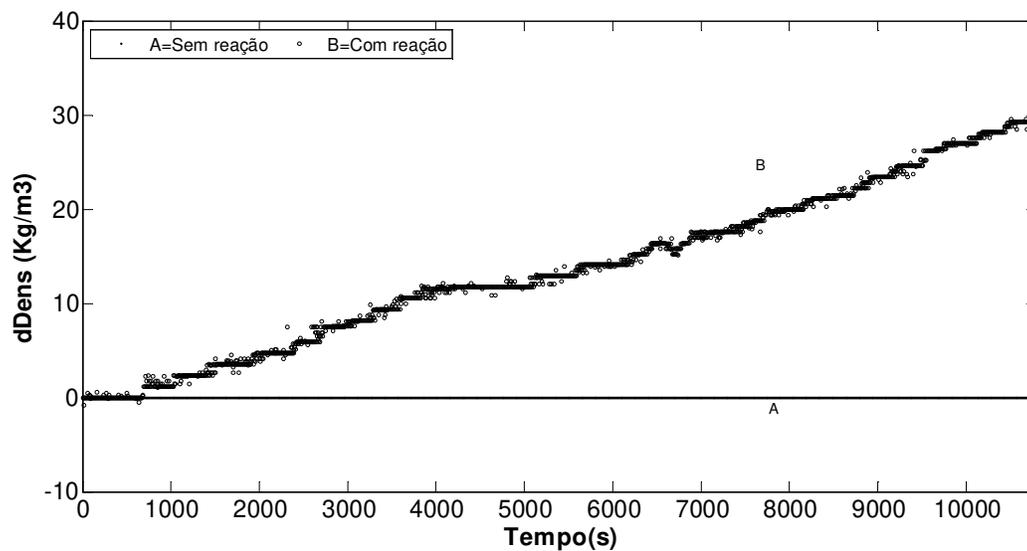


FIGURA 3.5. Perfil de variação de densidade (dDens), do fluido polimérico, com e sem adição de iniciador na reação (50%/50% estireno/tolueno).

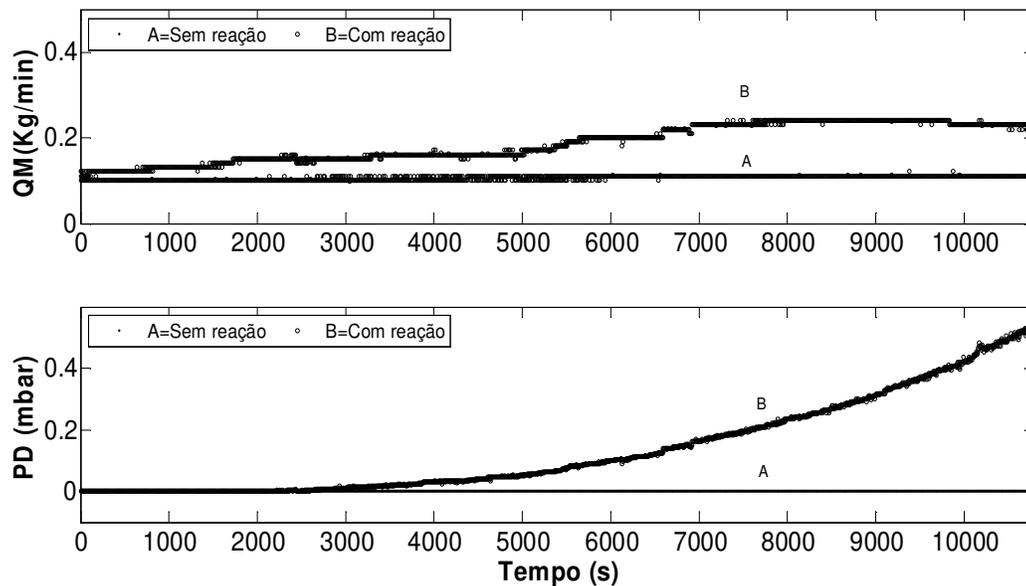


FIGURA 3.6. Perfis de vazão mássica (QM) e pressão diferencial (PD) do fluido polimérico, com e sem adição de iniciador na reação (50%/50% estireno/tolueno).

Sabe-se que, pela modelagem matemática, o calor emitido pelo fluido térmico do tanque de aquecimento é dado pela Equação 3.5:

$$Q_c = UA(T_{rt} - T_{tq}) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Onde: Q_c - calor fornecido pela camisa do reator; U - coeficiente de transferencia de calor; A - área de troca térmica; T_{rt} - temperatura do reator; T_{tq} - temperatura do tanque contendo o fluido de aquecimento.

Este calor fornecido a camisa do reator vai se tornando ineficiente, uma vez que o coeficiente de troca térmica decresce com a polimerização já que há um aumento na viscosidade do fluido polimérico no interior do reator (ESPOSITO, 2006). Este fato, o qual está aliado à mudança nas propriedades físicas do fluido polimérico, favorece a queda de temperatura no interior do reator. Além disso, devido à evaporação dos reagentes ao longo da reação, há uma redução no volume reacional e conseqüentemente uma diminuição da área de troca térmica.

A viscosidade inicial da mistura polimérica era menor que 1cP. Para confirmar o aumento da viscosidade devido à reação de polimerização a amostra

com concentração inicial de 50% de monômero, em volume, ao final de 3 horas de reação de polimerização, em ensaio em malha aberta, foi analisada num viscosímetro de Brookfield, na temperatura de operação, obtendo-se um valor de 108 cP. O valor da viscosidade também foi calculado a partir da reação de Hagen Poiseuille, (Equação 2.1, pag. 40), uma vez que neste ensaio tinham-se disponíveis dados de variação de pressão, vazão mássica e densidade.

$$\mu = \frac{\pi d^4 \Delta P \rho}{128 L Q_m} \quad (2.1)$$

Sendo: ΔP = pressão diferencial; μ = viscosidade absoluta; L = comprimento dos tubos entre as tomadas de pressão; Q = vazão volumétrica; Q_m = vazão mássica; ρ = densidade; d = diâmetro do tubo.

Para possibilitar o cálculo da viscosidade através desta equação, foi necessário determinar a constante L , a qual está relacionada à distância entre as tomadas de pressão da linha polimérica (Equação 3.6):

$$L = \frac{\pi d^4 \Delta P \rho}{128 \mu Q_m} \quad (3.6)$$

O valor do parâmetro L foi determinado, preliminarmente, mediante a passagem de um fluido padrão de silicone com viscosidade conhecida de 300 cP, e utilizando a Equação 3.6.

A viscosidade calculada para o fluido polimérico foi de 120 cP. Este resultado mostra que a equação de *Poiseuille*, e o monitoramento on-line das variáveis citadas relacionadas ao fluido polimérico podem ser utilizados de forma

promissora para inferência da viscosidade em tempo real, uma vez que a diferença entre o valor calculado e lido proporcionou um erro de medição relativo de 11%, o qual encontra-se próximo a faixa do erro de medição do instrumento de medição de viscosidade.

No entanto, vale ressaltar, que a queda de temperatura no meio reacional é intensificada, não apenas pela variação de viscosidade no meio polimérico, mas principalmente pela grande perda de calor do fluido polimérico ao passar pela linha de circulação onde se encontram os instrumentos de medição *on-line*. Foi constatada uma perda de calor de aproximadamente 30°C nesta linha, após medições de temperatura à montante e à jusante dos instrumentos instalados nesta linha.

Assim, a forma então de operar este sistema, seria a de controlar a elevação no início da reação, menos acentuada que anteriormente, e em seguida, controlar a queda de temperatura fornecendo calor ao sistema, através do fluido térmico, para manter a temperatura do reator nas condições estabelecidas.

Comparando o comportamento da temperatura no interior do reator de polimerização e as outras variáveis do processo mencionadas, Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 verifica-se que após 1 hora de reação (3600s) há uma intensificação nas alterações de propriedades sofridas pelo fluido polimérico. Desta forma, constata-se que estas variáveis podem ser utilizadas para dar indicação, em tempo real, sobre o curso da reação de polimerização.

O monitoramento *on-line* destas variáveis é de extrema importância e de interesse industrial, uma vez que fornecem informações sobre o produto final. Estas informações também podem ser muito úteis para melhorar a performance de controladores a serem desenvolvidos para o processo de polimerização. Estes dados poderiam ser utilizados como variáveis de entrada de um controlador baseado em inteligência artificial (*fuzzy* e/ou redes neurais) permitindo assim maior robustez do controlador, proporcionando ações de controle mais adequadas diante da variabilidade da amostra polimérica a ser processada.

Partindo desta idéia, foram comparados os comportamentos da densidade, frente a diferentes concentrações de monômero, por exemplo. Na Figura 3.7 pode ser observada a variação de densidade de um ensaio de reação de polimerização anteriormente realizado com 50%/50% e com 30%/70% de proporção estireno/tolueno.

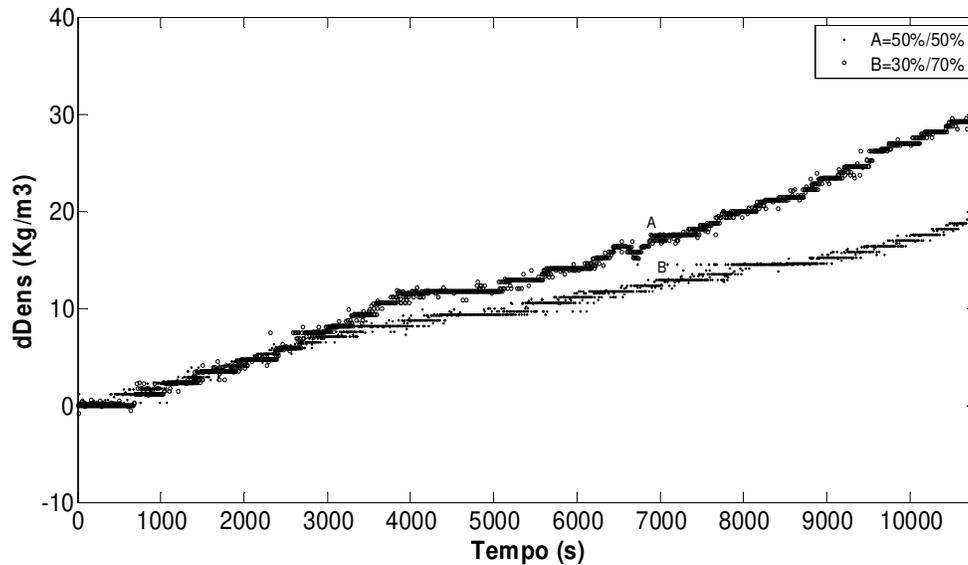


FIGURA 3.7. Perfis de variação de densidade (dDens), do fluido polimérico, a diferentes proporções de estireno/tolueno: 50%/50% e 30%/70%.

Sabe-se que quanto maior a concentração de monômero, maior será o rendimento da reação de polimerização. Uma vez que a densidade está relacionada à conversão do processo, era de se esperar que o perfil da variação da densidade fosse mais acentuada para a amostra polimérica de maior concentração de monômero (Curva A). Consta-se então que o equipamento de medição de densidade pode ser utilizado para o acompanhamento do curso do processo, ou caracterização de amostra polimérica, de forma eficiente.

3.5.5.1 Análise das variáveis envolvidas no sistema de controle

Para realizar o controle de temperatura do sistema de polimerização em questão, inicialmente idealizou-se em utilizar a variação da vazão do fluido térmico da camisa do reator como variável manipulada.

No entanto, durante os ensaios preliminares na planta, percebeu-se que esta variável possuía pouca influência na temperatura do reator (variável controlada). Mantendo-se a temperatura do fluido térmico constante e após o sistema atingir o estado estacionário, com a temperatura do reator em torno do set-point estabelecido, foram realizadas perturbações de amplitude de 40% no inversor de frequência, relacionado à rotação da bomba do fluido térmico que circula na camisa do reator, provocando assim alterações na vazão de circulação deste fluido. O comportamento da variável controlada pode ser observado conforme Figura 3.8.

Como se pode notar, a influência da variação da vazão do fluido térmico sobre a temperatura do reator não foi tão significativa a ponto de que permitisse o eficaz controle da reação de polimerização, principalmente devido à fonte de perturbação externa inerente do sistema experimental, a qual está relacionada ao fato de o fluido polimérico apresentar queda de temperatura ao longo da reação devido a fonte de retirada de calor do sistema pela linha onde estão instalados os instrumentos de medição on-line. Foram realizados testes com modificação da vazão do fluido térmico durante a reação de polimerização e percebeu-se que esta variável não conseguia, sendo utilizada como única variável manipulada proporcionar a manutenção da temperatura do reator no valor de set-point.

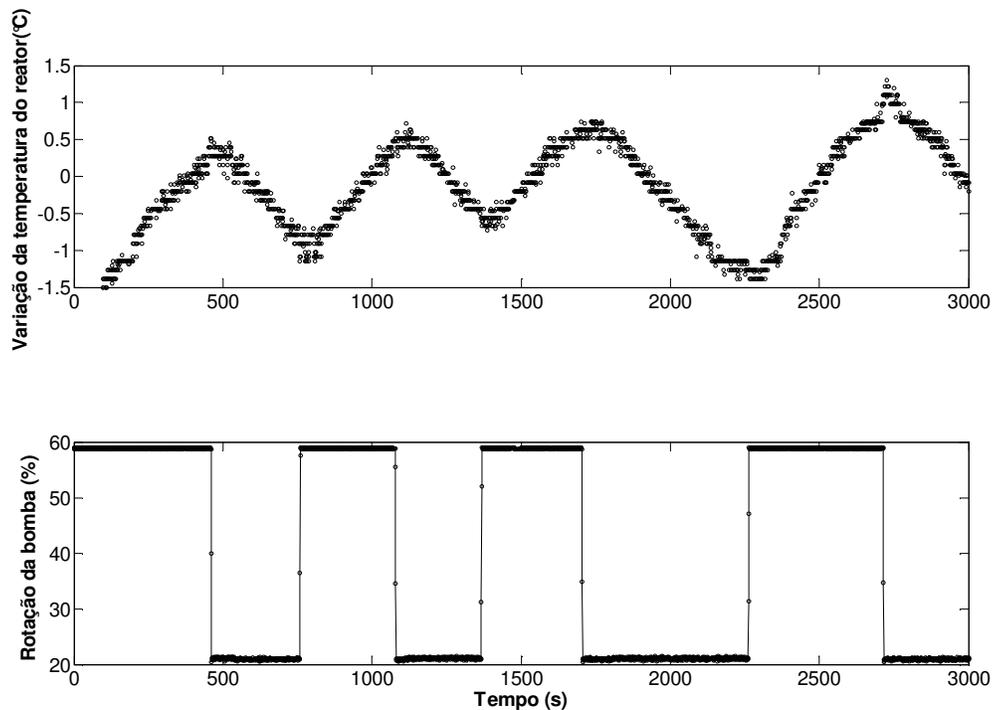


FIGURA 3.8. Comportamento da variação da variável controlada frente a perturbações na rotação da bomba que impulsiona o fluido térmico pela camisa do reator, ou seja, frente a mudanças na vazão de circulação.

Esta limitação no efeito da vazão do fluido térmico sobre a temperatura interna do reator pode ser atribuída à deficiência de troca térmica no reator de polimerização. A geometria do reator e o volume reacional utilizados contribuíram para uma área de troca térmica reduzida que desfavorecia a eficiência da troca de calor entre o fluido da camisa do reator e o fluido polimérico (interno). Além disso, este fato era ainda mais intensificado ao final da reação, uma vez que devido a evaporação dos reagentes havia uma redução de aproximadamente 20% da área de troca térmica do reator com relação às condições inicialmente utilizadas.

Para conter a queda de temperatura ao longo do processo seria necessário então um aumento da temperatura do fluido térmico que circula na camisa do reator. Desta forma, foi então selecionada como variável manipulada

para o sistema experimental de polimerização em questão, a variação da temperatura do fluido da camisa, através da variação de potência da resistência contida no tanque de aquecimento.

3.5.6 RESUMO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS PREVIAMENTE DEFINIDAS

A Tabela 3.1 fornece um resumo das condições operacionais previamente definidas, as quais deveriam ser seguidas em todos os ensaios de controle a serem realizados:

Apesar de terem sido realizados todos os procedimentos necessários para possibilitar as leituras de medidas de vazão mássica e pressão diferencial na linha de circulação do fluido polimérico, e possibilitar a inferência sobre a viscosidade do fluido, não foi possível utilizar estas variáveis nos ensaios de controle. Posteriormente às realizações dos ensaios preliminares, constatou-se entupimento nestes equipamentos, o que culminou na retiradas dos mesmos na linha do processo, apesar da tentativa de conserto para restabelecer seu funcionamento normal. Contudo, após os ensaios realizados para este trabalho, estes instrumentos voltaram a ser instalados na linha e futuramente, em um próximo trabalho, possibilitarão ser utilizados em novos ensaios de controle.

TABELA 3.1 – Resumo das condições operacionais previamente definidas

Variáveis do sistema	Condições iniciais
Proporção monômero/solvente	50%/50%, em volume
Volume da mistura polimérica	1100 mL
Tipo de iniciador	Monofuncional, BPO
Concentração de iniciador	0,0185 mol/L
Velocidade de agitação	200 rpm
Temperatura de set-point	90°C
Temperatura de entrada na camisa do reator	136-137 °C
Vazão do fluido polimérico	17 L/H
Vazão do fluido térmico	336 L/H
Tempo de reação	3 horas

3.6 – CONCLUSÕES

A partir de testes preliminares realizados no protótipo experimental, foi possível perceber o comportamento do sistema atuando em malha aberta, e a obtenção de conhecimentos importantes, necessários durante a fase de seleção dos sistemas de controle.

Foram prevalecidas as condições operacionais que mais se aproximassem de trabalhos encontrados na literatura, para que os dados pudessem ser utilizados posteriormente a fins de comparação. As condições

iniciais obtidas experimentalmente foram utilizadas como ponto de partida em todos os ensaios subseqüentes.

Os ensaios experimentais realizados nesta etapa do projeto permitiram a observação do comportamento transiente das variáveis envolvidas no processo de polimerização. Pode-se constatar uma perturbação externa inerente do sistema experimental, a qual proporcionava uma queda considerável na temperatura do fluido polimérico ao longo da reação. Esta observação permitiu uma análise quanto à adequada seleção do elemento final de controle a ser utilizado.

Inicialmente, foram selecionadas para o sistema como variáveis controlada e manipulada, a temperatura do reator e a vazão do fluido térmico na camisa do reator, respectivamente. No entanto, diante destas constatações, e de ensaios-teste realizados, percebeu-se que a eficiência de retirar ou embutir calor ao sistema através da variação de vazão do fluido térmico não seria adequada. Isto se devia ao fato de que a troca térmica do reator e a camisa eram ineficientes, o que era ainda ressaltado pelo volume útil do reator, pouco maior que 50% da sua capacidade (1100 mL), dificultando ainda mais a troca térmica.

Desta forma, foi selecionada a variação de potencia da resistência elétrica como uma variável de controle num sistema em malha fechada mais eficiente, uma vez que a mesma provoca um aquecimento direto do fluido térmico, influenciando conseqüentemente a temperatura do fluido polimérico.

Neste capítulo, foi constatado que a partir da utilização da equação de Hagen-Poiseuilli e os dados das variáveis de processo monitoradas na linha de circulação do fluido polimérico, permitem calcular a viscosidade deste fluido de forma indireta, em tempo real. Além disso, pode-se perceber a relação diretamente proporcional da variação da densidade com as alterações das propriedades do fluido polimérico, e sua relação com a concentração de monômero no meio reacional, podendo ser utilizada também como uma variável de entrada em estratégias de controle a serem desenvolvidas neste sistema experimental de polimerização.

3.7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. S. P. N. **Simulação de reatores de polimerização de estireno: Modelagem cinética e termodinâmica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia Química, Porto Alegre, 186p., 2004.

ALTITEN, A; ERDOGAN, S; HAPOGLU, F.; ALPBAZ, M. Control of a polymerization reactor by fuzzy control method with genetic algorithm. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 1031-1040, 2003.

ALTITEN, A; ERDOGAN, S; HAPOGLU, H; ALIEV, F.; ALPBAZ, M. Application of fuzzy control method with genetic algorithm to polymerization reactor at Constant set point. **Chemical Engineering research and design**, v. 84, p. 1012-1018, 2006.

CONTANT, S. Modelagem de reatores de polimerização: determinística e por Redes neurais. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 291p, 2007.

ERDOGAN, S., ALPBAZ, M., KARAGOZ, A. R. The effect of operational conditions on the performance of batch polymerization reactor control. **Chemical Engineering Journal**, v.86, p 259–268, 2002.

ESPOSITO, M. **Monitoramento de reações de homopolimerização em emulsão através de técnicas calorimétricas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 99 pg., Florianópolis, 2006.

GHASEM, N. M.; SATA, S. A.; HUSSIAN, M. A. Temperature control of a bench-scale batch polymerization reactor for polystyrene production. **Chemical Engineering Technology**, v. 30, p.1193-1202, 2007.

GONÇALVES, M. C. **Estudo experimental da polimerização via radical livre controlada em presença de radicais nitróxido (NMRP)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 128p, 2006.

FRANCO, C. M. Pesquisa Experimental sobre a polimerização via radical livre com iniciadores mono e difuncional. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 103p, 2006.

KALOTAY, P. Density and viscosity monitoring systems using Coriolis flow meters. **ISA Transactions**, v.38, p. 303-310, 1999.

KIPARISSIDES, C. Polymerization Reactor Modeling: a Review of Recent Developments and Future Directions. **Chemical Engineering Science**, 51, 1637-1659, 1996.

KRUSE, T. M., WOO, O. S., WONG, H.-W., KHAN, S. S., BROADBELT, L. J. Mechanistic Modeling of Polymer Degradation: A Comprehensive Study of Polystyrene. **Macromolecules**, 35, 7830-7844, 2002.

LONA, L. M. F. **Engenharia de Polimerização**. Notas de Aula do Curso IQ302E - Tópicos em Desenvolvimento de Processos Químicos, Unicamp, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2002.

MACHADO, P. F. M. P. B. Polimerização via radical livre para polímeros lineares e ramificados usando iniciadores mono e difuncional. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 186p, 2004.

MANO, E. B., MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. Edgard Blücher, 2a ed., São Paulo, 1999.

MOORE, E. R., **Styrene Polymers**. Encyclopedia of Polymer and Engineering, v.16, p. 1-246, 2ª ed. By John Wiley & Sons, 1989.

MENEGUELO, A. P. **Modelagem e Simulação de reator de polimerização em regime semi-batelada**. Dissertação de Mestrado.

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 186p, 2001.

NICHOLSON, J. W.. **The Chemistry of Polymers**. The Royal Society of Chemistry, Inglaterra. , 1991.

POLÍMEROS, (S/D). Disponível em <labinfo.cefetrs.edu.br/professores/ticiane/Complemento.pdf>. Acessado em 13 de janeiro de 2008.

RICHARD, J. R. E CONGALIDIS, J. P. Measurement and control of polymerization reactors. **Computers & Chemical Engineering** v.30, p. 1447-1463, 2006.

TÉCNICAS DE POLIMERIZAÇÃO, (S/D). Disponível em <dequi.faelnquil.br/domingos/aula%207.pdf>. Acessado em 17 de novembro de 2007.

VEGA, M.; LIMA, E. L.; PINTO, J. C. On-line monitoring of weight average molecular weight in solution polymerization using intrinsic viscosity measurements. **Polymers**, v.42, p.3909, 2001.

VIANNA JR., A. S.; BISCAIA JR., E. C.; PINTO, J. C. Flutuações estocásticas para a distribuição de tempos de residência em um reator tubular de polimerização. **Polímero: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n.1, p 19-25, 2006.

CAPÍTULO 4. SISTEMAS DE CONTROLE

4.1. INTRODUÇÃO

A engenharia de controle tornou-se de fundamental importância para desenvolvimento e evolução da engenharia como um todo. O controle de sistemas hoje é parte fundamental dos modernos processos industriais de manufatura, controlando variáveis como pressão, temperatura, nível e outros. O controle de processos e seus avanços teóricos e práticos propiciam a obtenção de um ponto ótimo de desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorando qualidade, produção e custos de produtos.

Mudanças nas condições de alimentação do processo e no ambiente (perturbações) estão sempre acontecendo e se nenhuma ação for tomada importantes variáveis do processo não alcançarão as condições desejadas. Porém, esta ação deve ser estabelecida de modo que: a segurança dos equipamentos e dos trabalhadores; a qualidade do produto; e a produção sejam asseguradas com um mínimo custo de investimento e/ou operacional.

Controlar um processo significa atuar sobre ele, ou sobre as condições a que o processo está sujeito, de modo a atingir algum objetivo. Por exemplo, pode-se achar necessário ou desejável manter o processo sempre próximo de um determinado estado estacionário, mesmo que efeitos externos tentem desviá-lo desta condição. Este estado estacionário pode ter sido escolhido por atender melhor aos requisitos de qualidade e segurança do processo (LUYBEN, 1996).

A atuação de um controlador pode ser representada graficamente como um fluxo de informações entre módulos com funções distintas. Na Figura 4.1, um módulo de monitoração obtém uma informação proveniente do processo e envia ao controlador. O controlador recebe esta informação, toma decisões e comunica a um elemento final a ação a ser tomada. O elemento final, por sua vez, interfere em alguma condição de processo para tentar alterar o comportamento do processo.

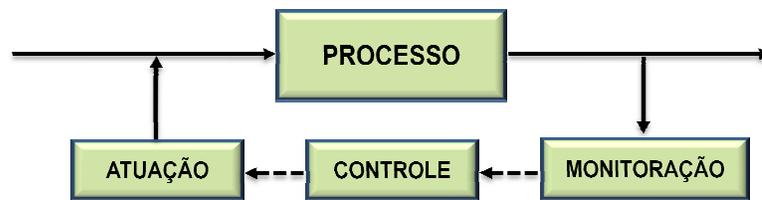


FIGURA 4.1. Fluxo de informações para atuação de um controlador.

Dentre as principais vantagens que um controlador oferece, podem ser citadas:

- Segurança operacional e pessoal;
- Adaptação a perturbações externas;
- Estabilidade operacional;
- Especificação do produto;
- Redução do impacto ambiental;
- Otimização;
- Resultado econômico do processo.

O objetivo de um controlador é através da atuação na variável manipulada (variável de controle) manter a variável controlada (variável de processo) no nível

desejado, ou seja, em torno do valor do *set-point*. Um bom controle é avaliado pela sua capacidade de proporcionar um mínimo desvio da variável de processo como resultado de uma perturbação, retornando-a à condição de funcionamento prefixada em um mínimo intervalo de tempo.

A eficiência de um controlador esta associada, além das suas características, de uma sintonia adequada. Os métodos de sintonia desenvolvidos para controladores convencionais são, geralmente, fáceis de implementar, porém, apresentam desvantagens quanto à otimização. Para resolver estes problemas, tem-se incorporado inteligência humana aos sistemas de controle com a finalidade de obter soluções mais eficientes. Assim, cada vez mais é utilizada a lógica *fuzzy* para este fim (GOMIDE, 1994; ABREU et al. 1996; SHAW e SIMÕES, 1999; PINHEIRO, 2000).

O desenvolvimento de técnicas de Inteligência Artificial (IA) nos últimos anos ocupa cada vez mais posição de destaque em pesquisas na área de controle de processos industriais e, aos poucos, começam a ser implantadas em plantas industriais com enorme sucesso, como é o caso do controle *fuzzy*.

Observa-se que a teoria de controle clássico apresenta limitações de desempenho quando o processo apresenta alta complexidade, onde não-linearidades e o comportamento transiente estão presentes. No entanto, o controle *fuzzy* pode ser aplicado a sistemas lineares e não-lineares. É de fácil implementação e baixo custo, além de apresentar características de robustez.

Os controladores *fuzzy* tornaram-se populares em anos recentes porque não requerem necessariamente um modelo teórico da planta que deve ser controlada. Conseqüentemente, a fim desenvolver um controlador *fuzzy*, é necessário quantificar a experiência apresentada pelo especialista do processo.

4.2 . FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.2.1. CONTROLADORES INTELIGENTES FUZZY

4.2.1.1. Introdução

As redes neurais artificiais e lógica *fuzzy* são dois dos principais desenvolvimentos metodológicos relacionados ao que se convencionou chamar de controle inteligente. As redes neurais artificiais representam a abordagem conexionista da inteligência artificial enquanto a lógica *fuzzy* faz parte da abordagem cognitiva.

A propriedade dos controladores inteligentes, especialmente os controladores *fuzzy*, é de serem baseados em experiências práticas e nos padrões de raciocínio, e não em modelos matemáticos. Enquanto o controle convencional se apóia no conhecimento das equações diferenciais representativas do comportamento dinâmico do sistema, o controle *fuzzy* utiliza regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuitiva e heurística, para controlar um processo (FERREIRA e PARANHOS, 2004; CAMPOS e SAITO, 2004; SHAW e SIMÕES 1999, SANDRI e CORREA, 1999).

A lógica *fuzzy* foi introduzida primeiramente por Zadeh (1965) como forma de controlar e processar informações vagas e lingüísticas. Segundo ele técnicas quantitativas convencionais de análise de sistemas são intrinsecamente inadequadas para lidar com sistemas humanísticos, e as formulou no princípio da incompatibilidade: “Quando a complexidade do sistema aumenta, nossa habilidade para concluir fatos e tomar decisões que sejam precisas e significativas diminui,

até que um limite é alcançado, além do qual a precisão e a relevância têm características quase mutuamente exclusivas” (ZADEH, 1973).

Mamdani (1976) foi um dos pioneiros em utilizar lógica *fuzzy* em controle e demonstrou as vantagens em utilizar a linguagem natural para desenvolver controladores. Desde então, a lógica *fuzzy* vem sendo aplicada com bastante sucesso em uma vasta gama de aplicações (TAKAGI E SUGENO, 1983; SUGENO, 1985; LEE, 1990a).

A lógica *fuzzy* é uma das tecnologias atuais bem sucedidas para o desenvolvimento de sistemas para controlar processos sofisticados.

4.2.1.2. Conjuntos Fuzzy

A Lógica *Fuzzy*, baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, foi inicialmente construída a partir dos conceitos já estabelecidos de lógica clássica; operadores foram definidos à semelhança dos tradicionalmente utilizados e outros foram introduzidos ao longo do tempo, muitas vezes por necessidades de caráter eminentemente práticos (TRANSCHEIT, 2007).

De acordo com esta teoria um conjunto não apresenta limites bem definidos, podendo um elemento pertencer parcialmente a ele, ou pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo. Assim, surge a flexibilidade da teoria dos conjuntos *fuzzy*, onde um elemento do universo do discurso X pertence a um conjunto A , de acordo com o grau de pertinência que indica quanto este elemento pertence a um determinado conjunto.

Nos conjuntos tradicionais a pertinência é do tipo binária representada pelos graus 1 ou 0. Isto pode ser expresso pela função característica f_A .

$$f_A(x) = 1 \text{ se e somente se } x \in A.$$

$$f_A(x) = 0 \text{ se e somente se } x \notin A.$$

Zadeh (ZADEH,1965) propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* A em um universo X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$ e representado por um conjunto de pares ordenados

$$A = \{ \mu_A(x)/x \mid x \in X \}$$

onde $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com o conjunto A . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, com diferentes graus de pertinência.

Dessa forma, no conjunto *fuzzy* a pertinência é gradual, variando de 0 a 1. Neste caso, não é necessário incluir ou excluir integralmente o elemento, basta que ele tenha alguma semelhança com a idéia representada pelo conjunto para ser aceito com algum grau.

A função de pertinência $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A :

1. $\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;
2. $\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;
3. $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

Observa-se que em um conjunto *fuzzy* a transição entre um membro e um não membro está numa faixa gradual sendo associado um grau entre 0 (totalmente não membro) e 1 (totalmente membro).

As operações com conjuntos *fuzzy* podem ser definidas a partir de dois conjuntos *fuzzy* A e B no universo de discurso X, com funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações de união e interseção são definidas a seguir (LEE, 1990a; LEE, 1990b):

a) **União:** A união entre os dois conjuntos A e B é o conjunto *fuzzy* C, tal que sua a função de pertinência é definida como $\mu_C = \mu_A \cup \mu_B$, e representada na Figura 4.2:

$$\mu_C(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\forall x \in X) \quad \text{Equação 4.1}$$

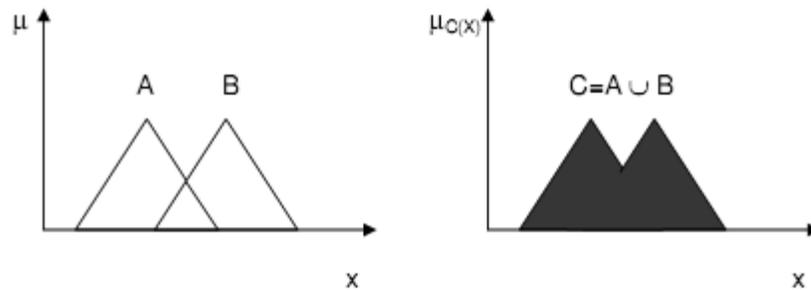


FIGURA 4.2. União entre conjuntos *fuzzy*.

b) **Interseção:** A interseção entre os dois conjuntos A e B é o conjunto *fuzzy* C, tal que sua a função de pertinência é definida como $\mu_C = \mu_A \cap \mu_B$, e representada na Figura 4.3:

$$\mu_C(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\forall x \in X) \quad \text{Equação 4.2}$$

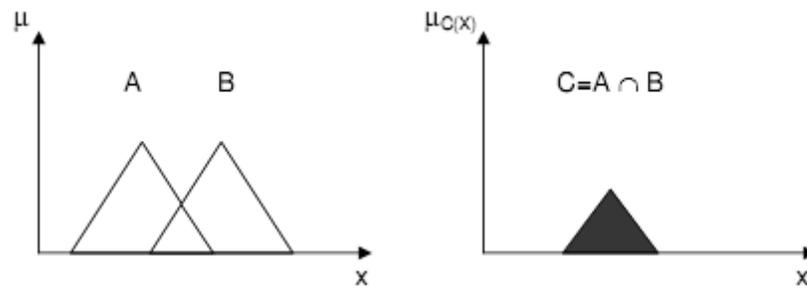


FIGURA 4.3. Interseção entre conjuntos *fuzzy*.

O operador ***min*** (Matlab) pode ser utilizado para realizar a interseção dos conjuntos *fuzzy* (PADILHA, 2001; CAMPOS, 1997).

4.2.1.3. Variáveis linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência. Os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, por exemplo), de conectivos lógicos (conectivos *e* e *ou*, ou de negação *não*), e de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) (TRANSCHEIT, 2007).

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

Formalmente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(N, T(N), X, G, M)$, onde (LEE, 1990a; LEE, 1990b):

N: nome da variável;

T(N): conjunto de termos de N, ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de N;

X: universo de discurso;

G: regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de T(N), conectivos lógicos, modificadores e delimitadores;

M: regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto *fuzzy* em X. Ou seja, associa o valor de G a um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência exprime o seu significado.

Por exemplo, se temperatura é interpretada como variável linguística (N), então o seu conjunto de T (temperatura) poderia ser:

$$T(\text{temperatura}) = \{\text{baixa, média, alta}\}$$

Onde cada termo de T(temperatura) é caracterizado por um conjunto fuzzy no universo de discurso $U=(20,100)$, por exemplo.

4.2.1.4. Funções de pertinência

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. Algumas das funções de pertinência (FP) mais utilizadas são a triangular, trapezoidal e gaussiana que são mostradas nas Figuras 4.4 a, b e c (HUAMANI, 2003; PADILHA 2001; PEDRYEZ E GOMIDE, 1998; YAGER E FILEV, 1994):

a) Função triangular:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a, \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m], \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x > b, \end{cases} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde m é o valor modal, e a e b são os limites superior e inferior, respectivamente.

b) Função trapezoidal

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a, \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m], \\ 1 & \text{se } x \in [m, n], \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [n, b] \\ 0 & \text{se } x > b, \end{cases} \quad \text{Equação 4.4}$$

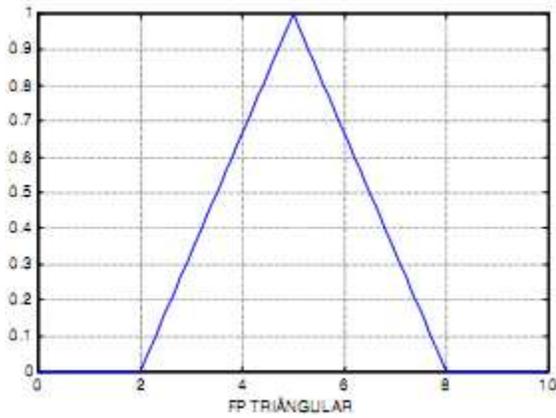
c) Função gaussiana

$$\mu_A(x) = \exp^{-\beta(x-m)^2}$$

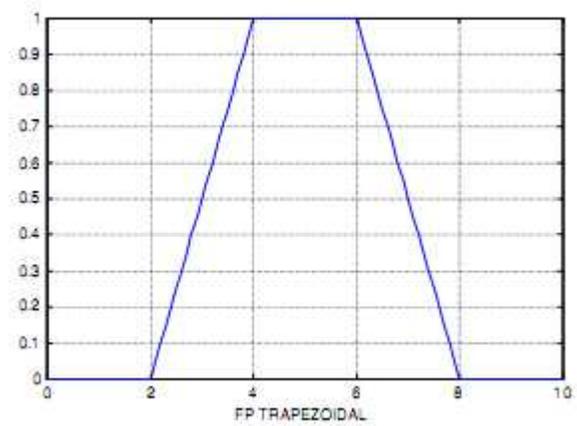
Equação 4.5

Segundo as Figuras 4.4 a, b e c, tem-se:

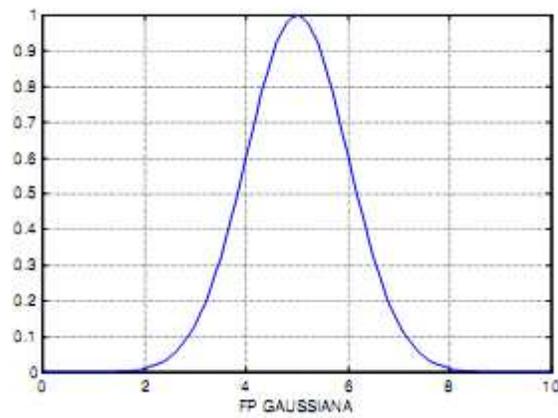
- (a) $m = 5, a = 2, b = 8;$
- (b) $a = 2, b = 8, m = 4, n = 6;$
- (c) $m = 5, \beta = 6.$



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.4. Função de pertinência (a) triangular, (b) trapezoidal e (c) gaussiana .

4.2.1.5. Sistema de inferência

As técnicas de controle *fuzzy* originaram-se com as pesquisas e projetos de E. H. Mamdani (MAMDANI, 1976) e ganharam espaço como área de estudo em diversas instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento do mundo, sendo até hoje uma importante aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy*.

Proposições *fuzzy* podem ser combinadas por meio de diferentes operadores, como por exemplo, os conectivos lógicos *e* e *ou*, e o operador de implicação 'se ...então' (TANSCHKEIT, 2003; LEE, 1990a).

Define-se uma proposição *fuzzy* como a associação de um conjunto *fuzzy*, representando um conceito, a uma variável lingüística. Uma proposição *fuzzy* pode ser representada genericamente por uma construção do tipo (x é A) onde x é uma variável lingüística e A é um conjunto *fuzzy*. Define-se regra *fuzzy* como uma regra de produção que utiliza proposições *fuzzy* representando um conceito. A regra é formada por um antecedente, representando uma condição e um conseqüente, representando uma ação, estruturada em termos de uma associação de proposições *fuzzy* (SHAW e SIMÕES, 1999; BROWN e HARRIS, 1994; LIMA, 2004).

Os algoritmos de controle da lógica *fuzzy* utilizam termos lingüísticos para descrever as variáveis do processo com segurança, economia, efetividade, facilidade e aplicabilidade sem a necessidade de modelos matemáticos.

Devido a dificuldades encontradas no controle de processos, tais como: complexidade dos fenômenos simultâneos, modelagem matemática, precisão do modelo, tempo de atuação do controle pelos algoritmos, não linearidade de processos, condições dinâmicas e conhecimento do processo, o controle *fuzzy* torna-se conveniente, uma vez que apresenta as facilidades quanto à adequação da estratégia de controle humano, ao protocolo de controle, à simplicidade das leis de controle, à flexibilidade das variáveis lingüísticas e à precisão para

implementação no computador (LIMA, 2004; FERREIRA e PARANHOS, 2004; SHAW e SIMÕES, 1999).

Devido à natureza heurística, os controladores *fuzzy* possuem desempenho superior aos controladores convencionais, fornecendo tratamento de não-linearidades, quando sintonizados de forma adequada.

A estrutura de universo de discurso, variáveis lingüísticas, *fuzzificação*, base de regras, máquina de inferência e sistema de *defuzzificação* propostos por Mandani quando bem assimilada, é uma arma poderosa de simplificação e possibilita decisões rápidas e coerentes num ambiente de incertezas.

Uma idéia do fluxo de informações de como opera um controlador de lógica *fuzzy*, é apresentada na Figura 4.5.

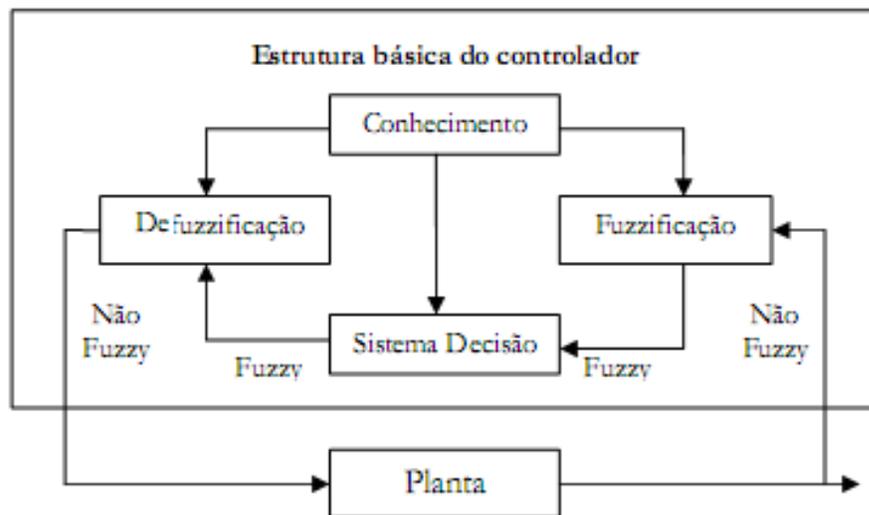


FIGURA 4.5. Estrutura de um sistema com controlador *fuzzy*.

Percebe-se que o mecanismo principal deste modelo consiste em *fuzzificar*, ou seja, transformar em conjuntos *fuzzy* as medidas obtidas dos

sensores, representadas por escalas numéricas, processá-las com base em regras estabelecidas com o auxílio de informações de especialistas e, em seguida, *defuzzificar*, o que significa transformar os conjuntos *fuzzy* obtidos na saída do controlador em valores de controle para o processo (ZADEH et al., 1997).

Um aspecto importante no desenvolvimento de controladores *fuzzy* é a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada e às variáveis de saída, pois o desempenho do sistema de inferência dependerá do número de conjuntos e de sua forma.

4.2.1.5.1 Base de Conhecimento

Consiste numa base de dados (funções de pertinência lingüística) e uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece as definições numéricas necessárias às funções de pertinência usadas no conjunto de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza os objetivos e a estratégia de controle utilizados por especialistas na área sendo assim, nesta etapa os especialistas devem ser consultados para informar como o controlador *fuzzy* deve operar, para que as regras sejam definidas (SHAW e SIMÕES, 1999).

Um recurso visual interessante sob o ponto de vista didático é a demonstração de variáveis e dos termos lingüísticos através de uma matriz, ressaltando que tal recurso é válido apenas quando a regra de controle tem somente duas entradas e uma saída para ser inferida.

4.2.1.5.2. Processo de Fuzzificação

A *fuzzificação* é o mapeamento do domínio de entradas precisas (valores numéricos reais, como valores obtidos de um sensor) para valores de entradas *fuzzy* (*fuzzy input*), definidos pelas funções de pertinência (SHAW e SIMÕES, 1999).

Vale ressaltar, que segundo Shaw e Simões (1999), quanto maior a quantidade de variáveis lingüísticas, mais suave será o *output* do sistema, ou seja, a transição de um estado para outro será menos abrupta. Todavia, essa maior quantidade aumentará a possibilidade de o modelo, em operação, tornar-se instável.

4.2.1.5.3. Processo de Defuzzificação

Uma vez feitas as avaliações das proposições (regras) *fuzzy*, deve-se determinar o valor de saída do sistema. Esse processo chama-se *defuzzificação* (LEE, 1990b). Consiste na conversão do variável *fuzzy* a uma variável numérica que atuará no processo de forma a regulá-lo.

Apesar de não existir nenhum procedimento sistemático para a escolha da estratégia de *defuzzificação* os critérios mais utilizados são (COSTA, 2006; ARBEX, 1994; GOMIDE & GUDWIN, 1994; LEE, 1990a):

- Método do Critério Máximo: Esse método produz, como ação de controle, o valor no qual a função de pertinência assume o valor máximo do conjunto *fuzzy* de saída.

- Método da Média dos Máximos: Essa estratégia gera uma ação de controle obtida pelo valor médio de todas as ações de controle locais, onde a função de pertinência assume o valor máximo:

$$y = \sum_{j=l}^i \frac{W_j}{l} \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde W_j é o valor de suporte no qual a função de pertinência $\mu_z(w_j)$ assume seu valor máximo e l é o número de valores suporte.

- Método do Centro de Gravidade: O método de *defuzzificação* mais utilizado é o método do centro de gravidade, também denominado centróide, pois ele calcula o centro da área composta que representa o termo de saída *fuzzy*. Esse termo de saída *fuzzy* é composto pela união de todas as contribuições de regras. Os graus de pertinência são utilizados como pesos para o cálculo de uma média ponderada (por esta razão este método também é conhecido como Método da Média Ponderada).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_z(W_j) \cdot W_j}{\sum_{i=1}^n \mu_z(W_j)} \quad \text{Equação 4.7}$$

Cox (1995) justifica a preferência dos usuários por este método, principalmente em decorrência da sua propriedade de fornecer respostas (saídas *fuzzy*) que provocam ações suaves de mudanças para os próximos passos dos sistemas de controle.

4.2.1.6. Classificação de sistemas fuzzy

Os sistemas *fuzzy* podem ser classificados em (COSTA, 2006; HUAMANI, 2003; WANG, 1994):

- Sistemas *fuzzy* puros (Mamdani)

Um sistema *fuzzy* é formado por uma base de regras do tipo SE (antecedente) e ENTÃO (conseqüente), e um mecanismo de inferência *fuzzy* como representado na Figura 4.5. O mecanismo de inferência *fuzzy* determina um mapeamento dos conjuntos *fuzzy* do universo de discurso de entrada em U com os conjuntos *fuzzy* de saída pertencente ao universo de discurso V. A estrutura básica de uma regra *fuzzy*, proposta por Mamdani, é a seguinte:

Se $(x_1 \text{ é } A_1) \text{ E } (x_2 \text{ é } A_2) \text{ E... E } (x_n \text{ é } A_n) \text{ Então } (y \text{ é } B_n)$. Equação 4.8

onde A_n e B_n são conjuntos *fuzzy* em U e V; $x = [x_1, \dots, x_n] \in U$ e $y \in V$ são as variáveis de base das variáveis lingüísticas; e n o número de regras que formam a base de regras do sistema *fuzzy*.

O conectivo ENTÃO utilizado na descrição de regras *fuzzy* corresponde ao operador *fuzzy* de implicação.

Da mesma forma que a estratégia humana, as bases de regras *fuzzy* do tipo SE - ENTÃO expressam como o controle deve ser realizado quando um certo estado do processo controlado é observado, a partir do conhecimento do operador do processo.

- Sistemas *fuzzy* funcionais (Takagi-Sugeno)

Este sistema tem como principal diferença do sistema *fuzzy* Mamdani, o cálculo da saída y, a qual é computada como uma função de entrada, como por exemplo uma combinação linear de x (TAKAGI e SUGENO, 1985), sendo as regras neste caso definidas como:

Se $(x_1 \text{ é } A_1) \text{ E } (x_2 \text{ é } A_2) \text{ E... E } (x_n \text{ é } A_n) \text{ Então } y_n = f(x_1, \dots, x_n)$ Equação 4.8

onde y_n é a saída real de cada regra e f representa uma combinação linear aplicada aos valores exatos.

Enquanto os antecedentes das regras continuam sendo *fuzzy*, o conseqüente não. A saída numérica global inferida y (Equação 4.9) é obtida pela média ponderada das saídas individuais y_i geradas em cada regra, utilizando os respectivos graus de pertinência como pesos, evitando um processo de *defuzzificação*. Na Equação 4.7, w_i é a compatibilidade global da regra i (grau de ativação da regra), calculada através do produto algébrico (Equação 4.10):

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r w_i y_i}{\sum_{i=1}^r w_i} \quad (\text{Equação 4.9})$$

$$w_i = \prod_{i=1}^r \mu_{A_i}(x_i) \quad (\text{Equação 4.10})$$

Na Figura 4.6 é apresentada a estrutura para o sistema *Fuzzy* Sugeno:

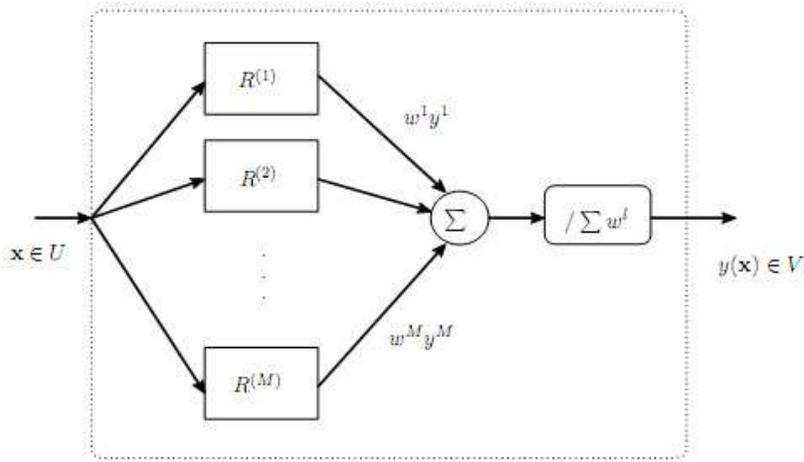


FIGURA 4.6. Sistema *Fuzzy* do tipo Takagi-Sugeno.

Onde R são as regras *fuzzy* e M o número de regras total.

A obtenção de regras sempre foi uma questão relevante em modelagem *fuzzy*. O procedimento pode apresentar regras conflitantes (saída diferentes para uma mesma combinação de entradas), bem como podem inexistir regras (nenhuma saída é apontada para um arranjo de entradas), podendo então fornecer dados incompletos.

Técnica de agrupamento (*clustering*) de dados constitui uma ferramenta poderosa para análise de dados, e tem se mostrado muito útil para modelagem, e de forma a contornar este problema. Seu propósito é destacar grupos e dados de um conjunto maior, produzindo uma representação concisa dos dados que relacionam o comportamento do sistema modelado (PINHEIRO, 2000). Sugeno e Yasukawa (1993), Abreu et al. (1996), Kroll (1996) usaram técnicas de agrupamento para identificar a estrutura de modelos *fuzzy*, e classificaram este método como rápido, eficiente e simples para a produção de regras de modelos *fuzzy*.

4.2.1.7. Estrutura de controle fuzzy

A estrutura de controle *fuzzy* pode ser classificada de acordo com a aplicação. Um dos mais populares tipos de estrutura *fuzzy* é baseada em realimentação do erro, mais conhecido como controlador *fuzzy* convencional (LI e GATLAND, 1996; LI, 1997).

Existem diferentes estruturas de controladores *fuzzy* combinando os elementos estruturais mostrados abaixo (MANN et al., 1999):

(a) Erro: $e(k) = r(k) - y(k)$;

(b) Variação do erro: $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$;

(c) Taxa de variação do erro: $\Delta^2 e(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$; e

(d) Somatório do erro: $\sum e(k) = \sum_{k=0}^n e(k)$

A estrutura de controle *fuzzy* é classificada de acordo com a sua aplicação. Um controle com estrutura *fuzzy-PI* é um controle prático que possui a capacidade de remover o *off-set* da resposta em processos. Este tipo de controlador gera uma saída de controle incremental a partir do erro e da totalização do erro no tempo, sendo considerado um controle de velocidade. O controle *fuzzy-PD* gera saídas de controle a partir das entradas do erro e da variação do erro, sendo considerado controle de posição. O controlador *fuzzy-PID* produz uma saída incremental a partir do erro, variação do erro e aceleração do erro (LI e GATLAND, 1996).

Os tipos de controladores *fuzzy* baseados no erro são apresentados nas Figuras 4.7 (a, b, c e d) e 4.8 (a, b, c e d) .

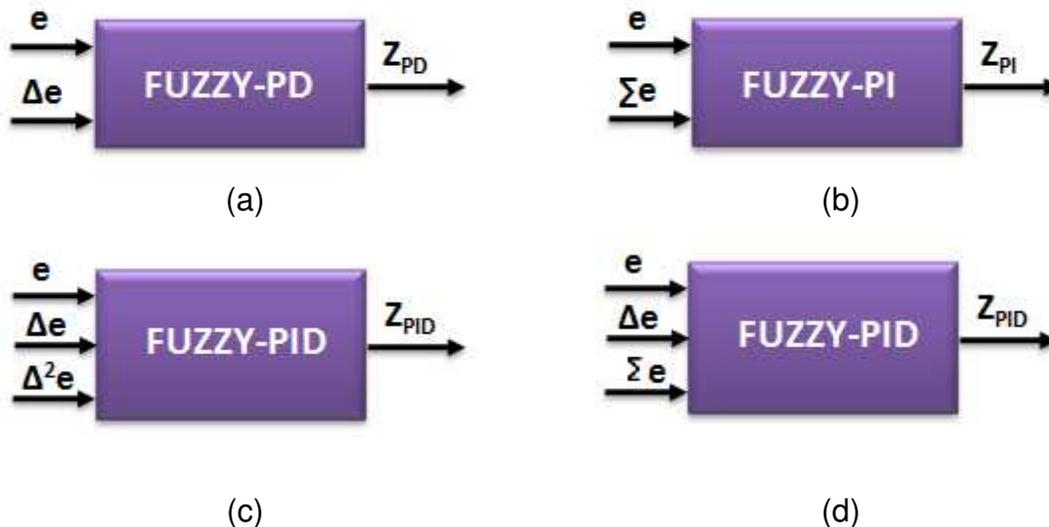


FIGURA 4.7. Estruturas básicas dos controladores posicionais (a) *Fuzzy-PD*, (b) *Fuzzy-PI*, (c) e (d) *Fuzzy-PID*.

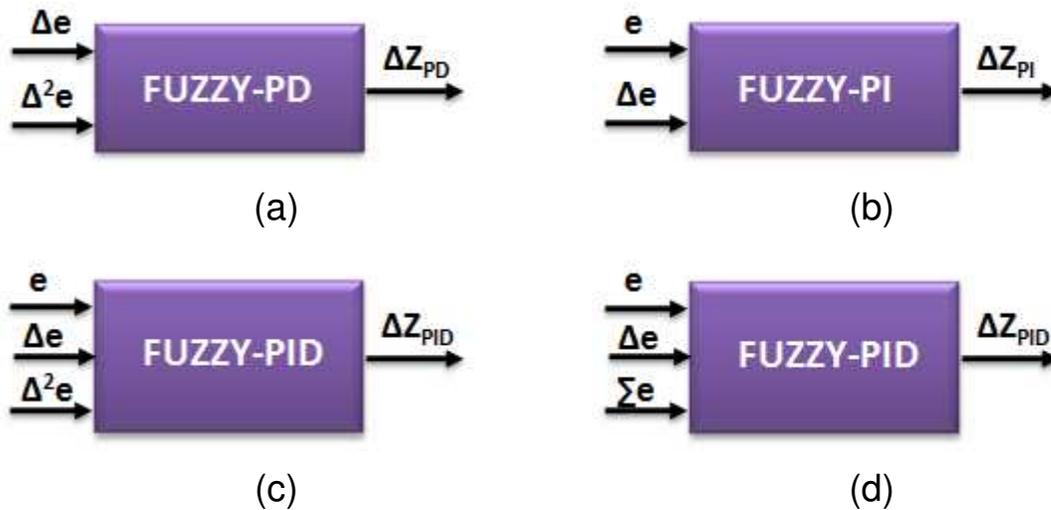


FIGURA 4.8. Estruturas básicas dos controladores incrementais (a) *Fuzzy-PD*, (b) *Fuzzy-PI*, (c) e (d) *Fuzzy-PID*.

Sendo:

e = erro;

Δe = variação do erro;

Z = valor posicional da saída do controlador *fuzzy*;

ΔZ = valor incremental da saída do controlador *fuzzy*;

Li e Gatland (1996) e Li (1997) afirmam que as estruturas e os princípios de projeto dos controladores *fuzzy-PID* com duas entradas apresentam-se como alternativas ao projeto deste controlador com três entradas, que expande a base de regras substancialmente e implica em diversas dificuldades no controle. Assim, a definição do projeto de um controlador *fuzzy-PID* usualmente utiliza uma metodologia multimalha, ou seja, uma malha *fuzzy-PI* e uma malha *fuzzy-PD*.

O controlador *fuzzy* é intrinsecamente não linear e ao contrário dos outros métodos, como as redes neurais, se caracteriza pela fácil determinação da ação

que deverá tomar para uma dada situação, uma vez que apresenta estruturas analíticas (PIRES, 2007).

4.2.2. CONTROLADORES INTELIGENTES HÍBRIDOS (FUZZY E REDES NEURAI)

Como resultado da combinação dos sistemas *fuzzy* e as redes neurais artificiais surgem os denominados sistema neuro-*fuzzy*. Assim um sistema neuro-*fuzzy* pode ser definido como um sistema *fuzzy* que é treinado por um algoritmo provido de uma rede Neural. Estes sistemas agregam as propriedades de aproximação universal e aprendizagem das redes neurais com a facilidade de manipulação de informação lingüística e dedução dos sistemas *fuzzy* em um único sistema, resultando um modelo eficiente e robusto, com capacidade para tratar as incertezas existentes na informação (TEIXEIRA et al., 2007; HUAMANI, 2003).

Os sistemas neuro-*fuzzy* tem atraído o interesse da comunidade científica nestes últimos anos pois muitas vezes estes sistemas têm demonstrado um melhor desempenho em diferentes aplicações quando comparados com sistemas puros. Os sistemas neuro-*fuzzy* estão entre os sistemas híbridos mais pesquisados na atualidade. Muitos pesquisadores têm tentado integrar essas duas técnicas de modelagem para gerar um modelo híbrido que possa associar as vantagens de cada abordagem e minimizar suas deficiências (LEITE et al., 2011; KHAJEH et al, 2009; BURAGOHAIN e MAHANTA, 2008; EKPO e MUJTABA 2008; ERTUGRUL, 2008; SHEIKHZADEH et al., 2008; TAKAHASHI et al., 2008; ARRUDA, et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2007, AL-HAJ et al., 2006; MESA et al., 2006; NG e HUSSAIN, 2004; GALHARDO et al., 2009; PAGLIOSA, 2003; ZHANG, 2003; VIEIRA et al., 2003; ROCHA, 2003; CHENG e HUNG, 2002; PADILHA, 2001; VEGA, et al., 2000;).

As RNA são apropriadas para a criação de modelos a partir de um conhecimento implícito embutido em um conjunto de dados, os sistemas *fuzzy* são

adequados para a criação de modelos a partir de um conhecimento explícito, originário de especialistas humanos. Por exemplo, as RNA's demandam tempo de projeto, devido à necessidade de ajustes dos seus parâmetros (números de camadas escondidas, números de nodos em cada camada, etc). Isto leva à utilização de técnicas híbridas, que utilizam as vantagens de cada uma, inclusive aproveitando o conhecimento do modelo do sistema para diminuir o tempo do projeto. Com isto, surgem os sistemas híbridos. A Tabela 4.1 apresenta, sob alguns parâmetros e características das RNA's e dos Sistemas *Fuzzy*, segundo HUAMANI, 2003.

Pode-se definir um sistema neuro-*fuzzy* como um sistema *fuzzy* que utiliza um algoritmo de aprendizado derivado ou inspirado na teoria de redes neurais para determinar seus parâmetros (subconjuntos e regras *fuzzy*) através do processamento das amostras de dados (PADILHA, 2001; TEIXEIRA, 2007).

TABELA 4.1. Comparação entre redes neurais e sistemas de inferência *fuzzy*.

Redes Neurais Artificiais	Sistemas de Inferências Fuzzy
Conhecimento a priori não utilizado	Conhecimento a priori para ser incorporado
Capacidade de aprendizado	Utiliza conhecimento lingüístico
Caixa preta	De fácil interpretação (regras SE-ENTÃO)
Algoritmos de aprendizado complexos	Fácil interpretação e implementação
Dificuldade para extração de conhecimento	Conhecimento disponível

4.2.2.1 Sistema Neuro-Fuzzy ANFIS

Pode-se efetuar uma sintonia "manual" das funções de pertinência dos conjuntos, mas é mais comum empregarem-se métodos automáticos. A integração entre sistemas de inferência *fuzzy* e redes neurais – originando os sistemas neuro-*fuzzy* – ou algoritmos genéticos tem se mostrado adequada para a sintonia de funções de pertinência, assim como para a geração automática de regras.

O Sistema de inferência Neuro-*Fuzzy* adaptativo (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* - ANFIS) é uma rede Neural proposta por Jang (JANG, 1993), (JANG et al. ,1997) cuja idéia básica é de implementar um sistema de inferência *fuzzy* através de uma arquitetura paralela distribuída, neste caso, a de uma RNA, de tal forma que os algoritmos de aprendizado possam ser usados para ajustar este sistema de inferência *fuzzy*. Os parâmetros associados com as funções de pertinência são ajustados via um algoritmo de aprendizado.

O ANFIS faz uma adaptação dos valores de entrada e saída para uma base de regra que interliga todas as entradas e saídas, formando assim uma base de regras robusta que cria um sistema de inferência *fuzzy* que contempla todas as possíveis entradas. Esta estrutura implementa sistemas do tipo Takagi-Sugeno (TAKAGI e SUGENO, 1985).

Na Figura 4.9 (JANG,1993), tem-se a arquitetura da ANFIS.

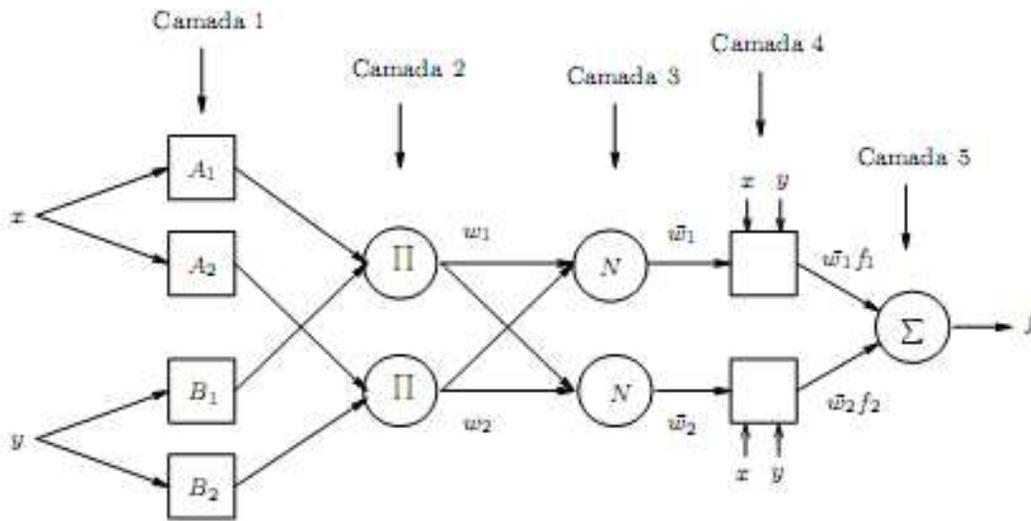


FIGURA 4.9. Arquitetura do Neuro-Fuzzy ANFIS.

1ª camada - A primeira camada é composta pelo grau de pertinência do padrão de entrada (x,y). Nesta camada calcula-se o grau de pertinência com que as entradas precisas satisfazem os valores ou termos lingüísticos associados a estes nós.

$$w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), \quad i = 1,2$$

Equação 4.11

2ª camada - Na segunda camada, cada nó corresponde a uma regra, e calcula-se o grau de ativação de cada regra, ou seja, com que grau o conseqüente da regra está sendo atendido.

$$f(x,y) = \frac{w_1(x,y)f_1(x,y) + w_2(x,y)f_2(x,y)}{w_1(x,y) + w_2(x,y)} = \frac{w_1f_1 + w_2f_2}{w_1 + w_2}$$

Equação 4.12

3ª camada - Esta camada realiza uma normalização dos valores da camada anterior.

$$w_t^m = \frac{w_t}{w_1 + w_2}$$

Equação 4.13

4ª camada - Nesta camada as saídas dos neurônios são calculados pelo produto dos valores dos conseqüentes da regra.

5ª camada - Os nós desta última camada calculam a saída do ANFIS. Podendo ser rescrito como:

$$f = w_1^m f_1 + w_2^m f_2$$

Equação 4.14

Esta estrutura pode ser treinada por qualquer mecanismo de aprendizagem empregado nas RNAs. Desta forma ao se utilizar um algoritmo de aprendizagem para a rede pode-se gerar em seguida o sistema *fuzzy* desejado.

4.3. CONTROLADORES AVANÇADOS APLICADOS EM PROCESSOS DE POLIMERIZAÇÃO

Estratégias de controle avançado vêm sendo utilizadas como alternativa ao controle do processo de polimerização. Alguns autores consideraram a importância da aplicação de estratégias de controle experimentais em reatores batelada de polimerização, no entanto existem poucas publicações sobre a aplicação da lógica *fuzzy* para reatores de polimerização, em sistema

experimental, uma vez que a grande maioria das aplicações de técnicas de controle avançado estão restritas a simulações numéricas.

A seguir são apresentados exemplos de trabalhos publicados nesta área aplicados em diferentes tipos de processos de polimerização.

Abonyi et al. (1997) desenvolveram controladores *fuzzy* Takagi-Sugeno adaptativo baseado em modelo, segundo trabalho de Andersen et al. 1997, e um controlador *fuzzy* baseado em controlador convencional PI. Estes controladores foram aplicados em um processo de polimerização em batelada para produção de poliestireno, através de simulação. Os resultados apresentados pelos controladores desenvolvidos pelos autores apresentaram uma melhoria de até 30% no desempenho destes controladores quando comparado com o convencional, no processo em questão.

Uma série de estudos no sistema experimental de polimerização de estireno começou com Ozkan et al., (1998). Ozkan e outros colaboradores desenvolveram um sistema experimental composto de um reator encamisado de 1,1 litros em vidro. Nitrogênio era borbulhado no interior do reator para manter a mistura livre de oxigênio. Possuía um condensador acoplado na parte superior do reator a fim de evitar perdas por evaporação do monômero e solvente, e a saída do nitrogênio gasoso. Água fria era circulada através da camisa do reator e uma resistência elétrica foi instalada dentro do reator para proporcionar o aquecimento da mistura polimérica. Utilizou como monômero o estireno a 70%, como solvente o tolueno, e como iniciador o BPO (peróxido de benzoíla). Os autores realizaram um controle preditivo generalizado (GPC) sobre a variável temperatura do processo em um reator batelada com camisa para troca de calor e comparam com um controlador convencional (PID). Apresentaram um modelo matemático para o reator, onde o modelo cinético considera somente as etapas de iniciação do peróxido, da propagação e terminação, com camisa de resfriamento. Os parâmetros deste modelo foram determinados a partir de dados experimentais e os resultados obtidos para ambos controles aplicados foram satisfatórios. Porém, nas mesmas condições experimentais, as respostas obtidas pelo sistema

utilizando GPC foram melhor que no controlador PID. Os autores enfatizam em seu trabalho o número tão restrito de trabalhos na literatura que utilizem técnicas de controle em sistemas experimentais de polimerização.

Em seguida, Yuce et al., (1999) utilizaram um sistema experimental de polimerização do estireno em solução para a aplicação prática de controladores DMC (Dynamic Matrix Control) e IMC (Internal Model Control). Os autores utilizaram condições isotérmicas na reação e utilizaram os algoritmos de controle DMC e IMC sendo o tempo de reação definido de forma a obter a qualidade do produto final desejada (conversão e comprimento da cadeia polimérica). Os resultados apresentados quanto ao comportamento da variável controlada foram bastante oscilatórios, e com semelhanças entre as duas técnicas empregadas.

Complementando o trabalho de Yuce 1999, Ozkan et al. (2001) utilizaram o mesmo sistema experimental de polimerização do estireno em solução, para a aplicação de controlador baseado em um modelo não-linear. Para a obtenção do modelo não linear para o controle de temperatura foi utilizada a estrutura NARMAX (*Nonlinear Auto-Regressive Moving Average with exogenous variable*) para relacionar a energia térmica de entrada da camisa, escolhida como variável manipulada, com a temperatura no reator. A experiência laboratorial mostrou que o modelo não linear implementado no controlador foi aceitável para as variações dos parâmetros do sistema.

Altintin e outros colaboradores (2003) reforçam a escassez de trabalhos práticos envolvendo processos químicos e desenvolvem seu trabalho neste mesmo sistema. Apresentam em seu trabalho um controlador *fuzzy* para sistema SISO de controle da temperatura em um reator de polimerização de estireno, empregando algoritmos genéticos (*off-line*) para encontrar os melhores parâmetros das cinco funções de pertinência triangulares das duas entradas e da saída do controlador. O desempenho do controlador projetado foi examinado experimentalmente. Os resultados mostraram uma grande eficiência do algoritmo na melhoria do desempenho deste controle, e um alcance de aproximadamente

16% maior de conversão, sob condições operacionais similares as anteriormente utilizadas por Ozkan 2001.

Na mesma época Alpbaz et al., 2004, sob diferentes condições operacionais, aplicaram o algoritmo GPC (*Generalized Predictive Control*) para testes no sistema de polimerização. Os resultados mostraram uma performance satisfatória do controlador GPC e apresentou melhor desempenho que o controle convencional. Altinten e outros utilizaram este mesmo trabalho, no entanto, a variável manipulada desta vez foi a temperatura da camisa do reator, e as funções de pertinência *fuzzy* foram também ajustadas através de algoritmos genéticos. Obtiveram uma conversão 8% maior e um aumento no massa molecular de aproximadamente 20%. Estes são os trabalhos experimentais mais significativos encontrados na literatura para sistema de polimerização utilizando como monômero o estireno em solução.

Asua (2001) implementou um controlador *fuzzy* hierárquico baseado em modelo não-linear composto por sistema *fuzzy* em um sistema de copolimerização em emulsão de estireno e butil acrilato, onde a lógica *fuzzy* foi utilizada para avaliar a trajetória ótima da temperatura, enquanto que o controlador baseado em modelo foi aplicado para seguir tal trajetória, através de simulações computacionais, obtendo-se resultados positivos.

Vieira et al., (2003) apresentam exemplos de como modelos de processos podem ser inseridos em controladores, cujas variáveis controladas não podem ser medidas ou são medidas com pouca freqüência. Lee, Chung e Yu (2003), propuseram o uso de sistemas difusos hierárquicos para reduzir o número de universos de discurso/conjuntos difusos. Este trabalho consistia da separação de um sistema com mais de duas entradas em subsistemas com, duas entradas. Um algoritmo para estruturação do sistema foi proposto. A estratégia parece interessante apesar dos testes simulados serem limitados.

Ainda em 2003, Hanai et al., especificaram uma rede neural para determinar as condições iniciais de produção do polibutadieno para obtenção de

determinadas propriedades físico-químicas e estimar conversão e proporção do isômero cis do polímero. Algoritmos genéticos foram utilizados para o ajuste da rede e obtido erro de 3,9%. Dados de 15 experimentos laboratoriais foram utilizados para treinar a rede neural e foi obtida uma boa capacidade de aproximação da rede.

No mesmo ano, Mattedi et al. (2003), aplicaram estratégias de controle preditivo (DMC) baseadas em modelos dinâmicos *fuzzy* funcionais de Takagi-Sugeno, em um processo de policondensação para produção do Nylon 6,6 e a copolimerização do metacrilato de metila. O *fuzzy* atuava como preditor no controle preditivo. Os modelos não-lineares utilizados foram baseados em modelos dinâmicos *fuzzy* funcionais e inseridos em técnicas de controle preditivo. A partir de simulações computacionais realizadas, os resultados indicaram que o projeto de controladores preditivos não-lineares é uma alternativa ao projeto de controladores preditivos convencional, pois proporcionaram uma pequena melhoria do desempenho de controles servos e regulatórios.

No trabalho de Antunes et al. (2005) foi utilizado um sistema de controle com algoritmo *fuzzy* para controle de temperatura de um processo de polimerização em massa do metacrilato de metila, a partir da manipulação da vazão de água de resfriamento. Uma comparação com controlador convencional PID constatou que após alterações em vários parâmetros do controlador, o controlador *fuzzy* se mostrou mais efetivo e confiável para esse tipo de processo, apresentando um desempenho melhor do que o controlador PID, garantindo maior flexibilidade para resolver o problema de controle de temperatura, pois a temperatura se manteve mais próxima do set-point e com eliminação do *off-set*.

Cetinkaya et al. (2006) aplicaram a estratégia de controle *fuzzy*-DMC em uma reação de polimerização do poliestireno em solução combinando esquema *feedback* e *feedforward*. O desempenho do controlador *fuzzy*-DMC foi comparado com o do controlador preditivo não-linear generalizado (NLGPC). As duas estratégias mostraram-se ser satisfatórias, no entanto os dados obtidos nas simulações, os índices de desempenho ISE, ITAE e IAE que estão relacionados

com o comportamento da variável controlada (temperatura do reator) e os dados sobre a qualidade do polímero formado indicaram uma melhor eficiência do controlador *fuzzy*-DMC.

Lima (2006) realizou um trabalho similar ao de Mattedi (2003) aplicando controlador preditivo (DMC) baseado em modelos *fuzzy* tipo Takagi-Sugeno, através de simulações computacionais, para o processo de polimerização em solução do metacrilato de metila e acetato de vinila e a copolimerização do eteno/1-buteno com catalisador Ziegler Natta solúvel. Após uma comparação entre os controladores híbrido e DMC convencional para problemas regulatório e servo, percebeu-se que os dois tipos de controlador apresentaram resultados satisfatórios em ambas as situações.

Controlador *fuzzy* adaptativo baseado em modelo de Takagi- Sugeno (2006) foi utilizado por Solgi et al. (2006) em um reator em batelada de polimerização em solução de metil metacrilato (MMA). Eles definiram, a partir de lógica *fuzzy*, uma trajetória para a temperatura da camisa do reator (variável manipulada), com adaptação *on-line*, para manter a temperatura no interior do tanque de polimerização (variável controlada), ponderando a variação da exotermia da reação durante o processo de polimerização.

O trabalho de revisão de Richard e Congalidis (2006) fornece algumas tendências relacionadas ao desenvolvimento em medidas e controle em reatores de polimerização dando enfoque ao uso de sensores *on-line* em medidas de viscosidade, massa molecular, composição e tamanho de partícula.

Wakabayashi (2007) utilizou controlador *fuzzy* em reator de polimerização em semi-batelada para produção do nylon a partir da ϵ -caprolactama de modo que as trajetórias dos *set-points* da temperatura do meio reacional e pressão na fase gasosa fossem obedecidas por estas variáveis do processo. Os resultados obtidos por simulação computacional comprovam a potencialidade da abordagem do controle *fuzzy*-PI para reatores de polimerização semi-batelada com *set-point* variável. Os ajustes das regras das funções de pertinência mostraram-se capazes

de produzir um bom desempenho em relação às trajetórias de *set-point* especificadas, tendo-se inclusive redução de *overshoot* na temperatura.

Ainda na linha de trabalhos utilizando o estireno em solução pode-se citar o trabalho de Ghasem et al. (2007). O sistema utilizado consistia de um reator de 2 L, de inox e camisa de vidro encamisado, com volume útil de 1,2 L. A variável manipulada foi uma resistência dentro do reator. E água fria era passada pela camisa do reator constantemente para a retirada de calor do reator. O monômero estireno e o BPO foram purificados antes de sua utilização. Os autores utilizaram, experimentalmente, um controle on-line da temperatura do reator de polimerização em batelada, através de duas técnicas de controle avançada: lógica *fuzzy* e GMC. Uma comparação entre os controladores revela que ambos os desempenho melhor do que os controladores convencionais, no que se diz respeito à variável manipulada, pois o comportamento da variável controlada foi satisfatório para todos os tipos.

4.4. METODOLOGIA

4.4.1 CONTROLE CASCATA IMPLEMENTADO NO SISTEMA EXPERIMENTAL DE POLIMERIZAÇÃO

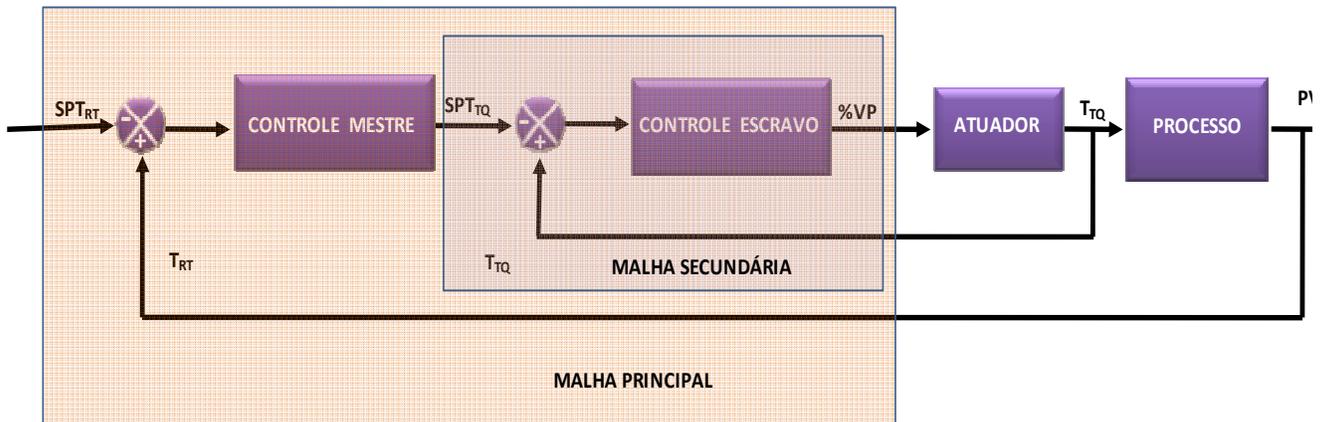
O controle cascata é eficaz em situações onde existem perturbações a serem eliminadas, e se utiliza de pelo menos duas variáveis controladas para atuar sobre uma única variável manipulada. Este tipo de controle é particularmente útil quando distúrbios são associados à variável manipulada ou quando o elemento de controle final exibe comportamento não-linear.

No sistema de polimerização em questão, foi selecionada como variável controlada a temperatura interna do reator e como variável manipulada a variação

da potência da resistência contida no fluido polimérico, a qual tem o potencial de provocar alterações na temperatura da camisa do reator.

No entanto, com esta estrutura de controle (direto), qualquer variação na variável controlada (T_{reator}) provocaria uma desproporcional ação de controle da variável manipulada, a qual provocaria uma alteração demasiada na temperatura do óleo térmico que circula na camisa do reator, aumentando assim, as oscilações na variável controlada. O controlador por sua vez tomaria medidas preventivas tardias, ocasionando grandes oscilações no sistema.

Sendo assim, optou-se em utilizar o controle tipo cascata com o objetivo de melhorar a resposta dinâmica do sistema. Um esquema para a implementação deste controlador é apresentado na Figura 4.10.



SPT_{RT} = set-point da temperatura do reator; T_{RT} = temperatura do reator; SPT_{TQ} = set-point da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento; PV = variável controlada do processo = T_{RT} .

FIGURA 4.10. Esquema de implementação de controle cascata.

Uma malha de controle cascata consiste de duas malhas de controle integradas com realimentação negativa, com a saída do controlador primário (mestre) estabelecendo o ponto de ajuste da variável do controle secundário (escravo). O controle cascata permite um controlador primário regular um

secundário, melhorando a velocidade de resposta e reduzindo os distúrbios causados pela malha secundária. A saída do controlador secundário vai para o elemento final de controle. O controle cascata é constituído de dois controladores convencionais e um único elemento final de controle, formando duas malhas fechadas.

A malha secundária contém a temperatura do tanque e o variador de potência, sendo esta a malha de controle escravo. A malha primária abrange o controlador principal, que envolve a temperatura do reator e a temperatura do tanque, denominado controlador mestre, cujo sinal de saída fornece valores de *set-point* para o controlador escravo, e rege as atuações do elemento final de controle.

É útil desdobrar uma malha comum no sistema cascata quando se dispõe de uma variável intermediária convenientemente mais rápida devido à atuação da variável manipulada, como no caso em questão. Após a realização de ensaios-testes realizados no sistema, após perturbações efetuadas no variador de potência, percebeu-se que a constante de tempo da variável intermediária, temperatura da camisa, era menor que a constante de tempo para a variável principal, temperatura do reator. Esta constatação está relacionada ao fato de que atuações efetuadas pelo variador de potência (variável manipulada) causavam muito lentamente reações na temperatura do reator (variável controlada).

Devido a isso a estratégia de controle cascata foi selecionada para este trabalho. Nesta estratégia de controle, a temperatura do reator (mais lenta) “cascateia” a temperatura da camisa (mais rápida). Quando houvesse um distúrbio na variação da potência fazendo a temperatura da camisa cair, o controlador secundário, regido pela saída do controlador primário, corrigiria esta variação mais rapidamente. Sendo assim, a malha secundária reduziria de forma significativa o atraso de resposta na parte primária, propiciando melhorias na velocidade de resposta desta malha.

Além disso, ressalta-se que o interesse em utilizar controle cascata foi intensificado pelo fato de não ter sido encontrado na literatura, até o momento,

nenhum trabalho que reportasse a implementação de controladores inteligentes em sistemas de controle deste tipo.

Na Figura 4.11 é apresentado um esquema do controle cascata utilizado neste sistema.

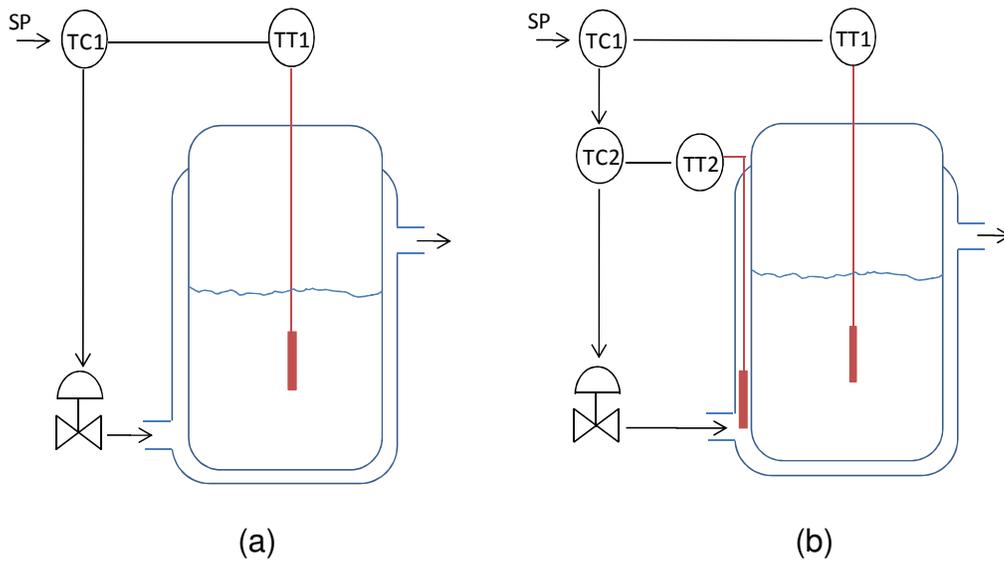


FIGURA 4.11. a) Controle Convencional; b) Controle Cascata Temperatura-Temperatura.

Na Tabela 4.2 é apresentado um resumo sobre as principais características das malhas envolvidas no controle cascata implementado para o sistema de polimerização em estudo.

TABELA 4.2. Resumo das características das malhas de controle cascata.

Descrição	Malha Principal	Malha secundária
Tipo de controlador	Inteligente (Mestre)	Clássico (Escravo)
Topologia	Mais externa	Mais interna
Dinâmica	Mais lenta	Mais rápida
Variável de entrada	Δ Temperatura do reator	<i>Set-point</i> do tanque
Variável de saída	<i>Set-point</i> do tanque	Variação de potência

4.4.2. PROJETO DO CONTROLADOR ESCRAVO

Alguns ensaios foram realizados com o objetivo de identificar o processo através de um ensaio em malha aberta. Este ensaio foi utilizado no intuito de observar a curva de resposta referente à variação da temperatura do fluido, mediante uma perturbação degrau gerada pelo variador de potência da resistência elétrica, constituindo-se da utilização do método de Ziegler-Nichols.

O método de sintonia proposto por Ziegler e Nichols, é um método clássico, simples, e aplicável na indústria. Este método baseia-se na realização de um único experimento, com sistema em malha aberta, cujo objetivo é o de obter experimentalmente a resposta do processo a uma perturbação para ajuste e analogia ao modelo de primeira ordem com tempo morto, conforme esquema da Figura 4.12 a e 4.12 b.

É possível determinar graficamente os parâmetros utilizados na sintonia do controlador através da curva de reação representada pela Figura 4.12 b. Traça-se uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de reação, e encontram-se os valores de tempo morto (t_d), que é a intersecção da tangente com a abcissa, e

encontra-se o valor da constante de tempo ($T = \tau + t_d$), que é a resposta máxima obtida pela curva.



FIGURA 4.12a. Resposta de um processo a uma perturbação do tipo degrau (Ziegler-Nichols).

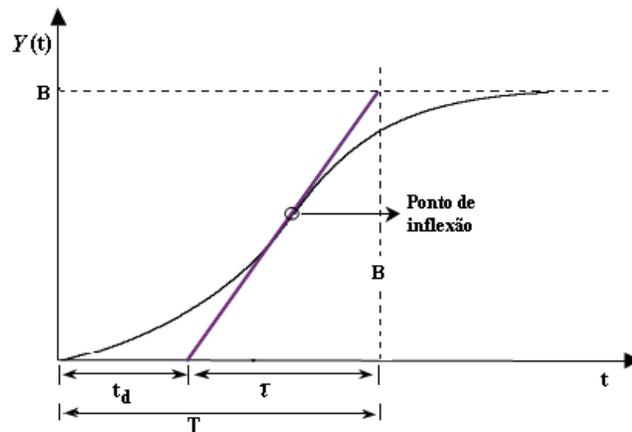


FIGURA 4.12 b Curva de reação em forma de S, para método de Ziegler Nichols.

A metodologia adotada para a implementação do 1º método de Ziegler e Nichols para a sintonia foi a seguinte: O reator foi preenchido até o volume de 1100 mL, sob agitação constante e foi iniciada a circulação do fluido de aquecimento pela camisa do reator, na vazão estabelecida. Para alcançar um regime permanente, havia uma retirada e alimentação constante do fluido no

reator de polimerização. Para a alimentação do reator foi utilizada uma bomba peristáltica, e foram mantidas iguais as vazões de entrada e saída deste líquido, sendo que a temperatura de entrada era mantida à mesma temperatura do fluido inicial (90 °C, em banho térmico), para que esta adição não contribuísse em mais uma fonte de perturbação para o meio.

Inicialmente, o valor do variador de potência foi fixado em 100% e aguardou-se até que a temperatura do sistema alcançasse o valor de *set-point* estabelecido. Em seguida foi dada uma perturbação de 50% até que o sistema estabilizasse. Depois de estabelecido o regime permanente, o sistema de polimerização foi submetido a uma perturbação de 25 % na variável manipulada e aguardou até a chegada de um novo estado estacionário. Desta forma, foi possível obter a curva de reação do processo.

Após realização do ensaio, foi obtida uma curva, onde ao traçar uma reta tangente ao ponto de inflexão, obteve-se o tempo morto e a constante de tempo, que através das equações propostas por Ziegler e Nichols, foi possível encontrar os parâmetros para o controlador convencional, conforme Tabela 4.3.

TABELA 4.3. Regras de sintonia de Ziegler-Nichols (1º método).

Tipo de controlador	K_c	τ_i	τ_d
P	$\frac{K_p t_d}{\tau}$	∞	0
PI	$\frac{0,9K_p t_d}{\tau}$	$3t_d$	0
PID	$\frac{1,2\tau}{K_p t_d}$	$2t_d$	$0,5t_d$

Este procedimento de sintonia foi realizado com o intuito de ter uma estimativa preliminar para o projeto do controlador P a ser utilizado na malha escravo do sistema cascata.

4.4.3. PROJETO DO CONTROLADOR MESTRE

Neste estudo o interesse foi o de aplicar diferentes técnicas de controle inteligente, baseados em lógica *fuzzy*, na malha de controle principal do sistema de polimerização, utilizado como estudo de caso.

Como mencionado anteriormente, o controlador baseado em lógica *fuzzy* não necessita de um modelo analítico do processo. Ele calcula as ações em função de uma base de conhecimento heurística de como se deve controlar esse processo.

A propriedade fundamental dos controladores *fuzzy* é a de se basearem na experiência que os operadores e/ou engenheiros possuem na operação deste processo, ou seja, trabalha “automatizando” informações. Este fator, por si só, torna-se um argumento plausível e poderoso na adoção do sistema *fuzzy* em aplicações específicas.

Assim, para projetar estes controladores foi necessário ter um conhecimento especialista sobre o sistema, a qual foi de fundamental importância no projeto adequado destes controladores. A base de conhecimento de um controlador *fuzzy* é onde está localizada a ‘inteligência’ do mesmo.

4.4.3.1. Conhecimento especialista

Todos os ensaios realizados na etapa inicial deste trabalho, inclusive os efetuados durante a etapa de projeto do controlador convencional, foram de extrema importância e possibilitaram a análise do comportamento dinâmico do sistema e das não-linearidades apresentadas pelo processo de polimerização.

Para aumentar a base de conhecimento sobre o processo a ser controlado, foram realizados ensaios manuais de controle no sistema de polimerização. Estes ensaios consistiram da implementação de uma malha de controle manual, onde as atuações no variador de potência (variável manipulada) eram realizadas pelo operador ao invés do controlador, de forma a manter controlada a temperatura no interior do reator. As condições de operação foram as mesmas utilizadas durante a implementação do controle cascata convencional.

As respostas observadas diante destes procedimentos mencionados contribuíram para a construção de um conhecimento especialista do sistema, habilidade importante no desenvolvimento do controlador *fuzzy*.

Para complementar a análise do comportamento dinâmico do sistema foram observadas todos os perfis das variáveis monitoradas no processo, não focando apenas nas variáveis controlada e manipulada. Desta forma permite-se obter um conhecimento especialista mais completo, abrindo possibilidades para a criação de um sistema multivariável MISO (*multi-input, single-output*), MIMO (*multi-input, multi-output*), SIMO (*single-input, multi-output*) e não apenas SISO (*single-input, single-output*). Percebe-se então que é possível desenvolver diferentes estratégias de controle avançado neste sistema.

4.5. RESULTADOS

4.5.1. PROJETO DO CONTROLADOR ESCRAVO

Após realizar o ensaio em malha aberta foi possível caracterizar as constantes, tempo morto τ_d , constante de tempo τ e ganho do processo K . De acordo com a metodologia de sintonia, os dados experimentais, foram ajustados a um modelo de primeira ordem com tempo morto (Equação 4.15), segundo Stephanopoulos, 1984.

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} e^{-t_d s} \quad \text{EQUAÇÃO 4.15}$$

Onde:

$G(s)$ = função de transferência de primeira ordem com tempo morto;

k_p = ganho do processo (°C/%);

τ = constante de tempo do processo (s);

e = função exponencial

t_d = tempo morto (s).

Foram então obtidos valores dos parâmetros para controladores convencionais conforme a Tabela 4.4.

TABELA 4.4. Parâmetros dos controladores convencionais.

Parâmetros obtidos por Ziegler-Nichols			
Tipo de controlador	K_c (%/°C)	τ_i (s)	τ_d (s)
P	<u>26,36</u>	-	-
PI	23,72	636,03	-
PID	31,63	382	95,5

Sendo: K_c - ganho proporcional do controlador; τ_i - constante de tempo integral; τ_d - constante de tempo derivativa.

Vale lembrar que na maioria das vezes estes valores obtidos pelos métodos disponíveis na literatura para projeto de controladores são tidos apenas como primeira estimativa, devendo-se observar experimentalmente se estes resultados se adéquam ao sistema utilizado. Assim, para se conhecer o comportamento do processo com a utilização de malha fechada, foram realizados testes heurísticos no sistema de forma a encontrar valores para os parâmetros de controle que mais se ajustassem ao processo em questão.

O procedimento de sintonia foi realizado com a diminuição dos valores dos ganhos dos controladores, uma vez que valores muito altos de K_c provocavam um comportamento muito oscilatório da variável manipulada. E valores muito baixos de K_c , proporcionava um retardo na atuação do controlador, aumentando o atraso de resposta do sistema quanto a uma perturbação, o que conseqüentemente ocasionava desvios muito grande na variável controlada. Para o controlador escravo foi estabelecido um valor de $K_c = 18$ %/°C.

Neste trabalho, não constitui-se como objetivo a obtenção de um controle P otimizado. No entanto, foi utilizado o mesmo controlador escravo em todas as

implementações de controladores inteligentes para permitir comparações entre as diferentes técnicas de controle aplicadas.

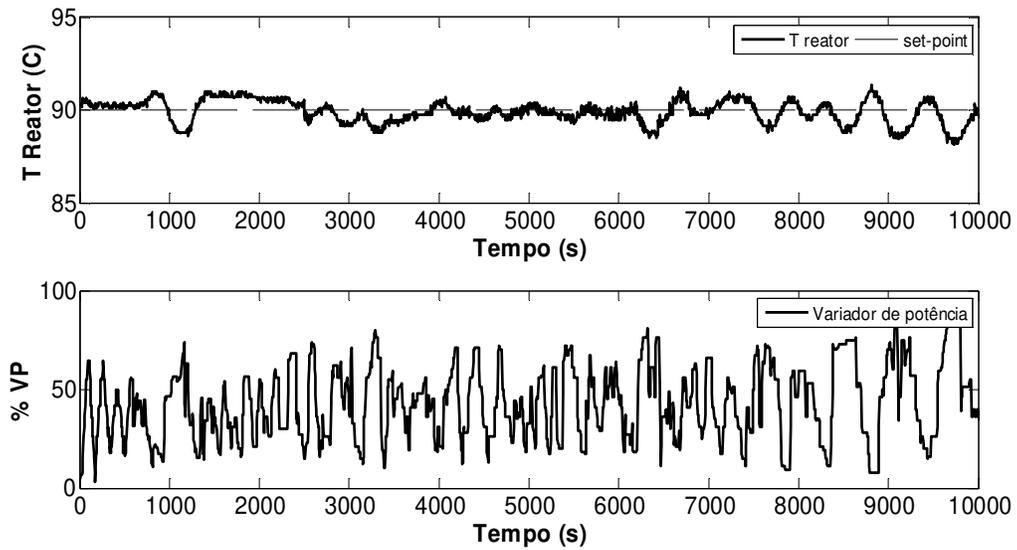
4.5.2. PROJETO DO CONTROLADOR MESTRE

4.5.2.1. Conhecimento especialista

Os ensaios realizados com atuações na variável manipulada (%VP) definidos pelo operador (controle manual) exigiram o monitoramento ininterrupto das variáveis envolvidas no processo para que as decisões na atuação da variável de controle não fosse comprometida. Este tipo de ensaio permitiu ao operador maior liberdade quanto às decisões a serem tomadas enquanto a reação de polimerização se processava, observando seus efeitos sobre as variáveis do processo.

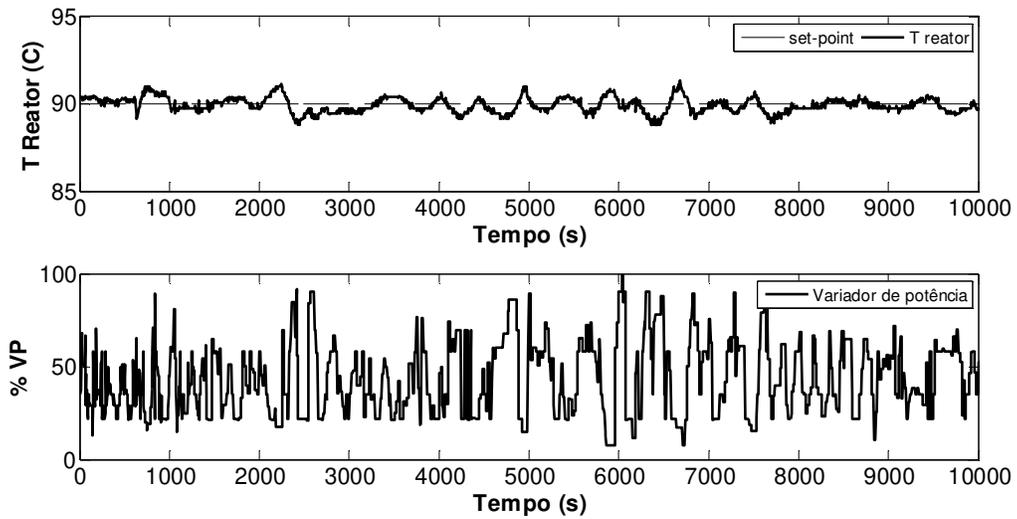
Nas Figuras 4.14 e 4.15 são apresentados os comportamentos das variáveis controlada (temperatura do reator) e manipulada (% variação de potência) do processo para ensaios de controle manuais, realizados em dias diferentes, denominados Controle manual 1 e Controle manual 2 respectivamente.

Percebe-se que os ensaios apresentaram comportamentos bastante similares, e com eficácia quanto manutenção da variável controlada em torno do *set-point*. Para conseguir manter a temperatura do reator em torno do *set-point*, observa-se uma elevação da temperatura do tanque (fluido térmico) de aproximadamente 25°C (Figura 4.16). Estes resultados são importantes para se ter idéia de como o controlador automático deveria proceder para alcançar o êxito no processo de controle, auxiliando no projeto dos controladores inteligentes.



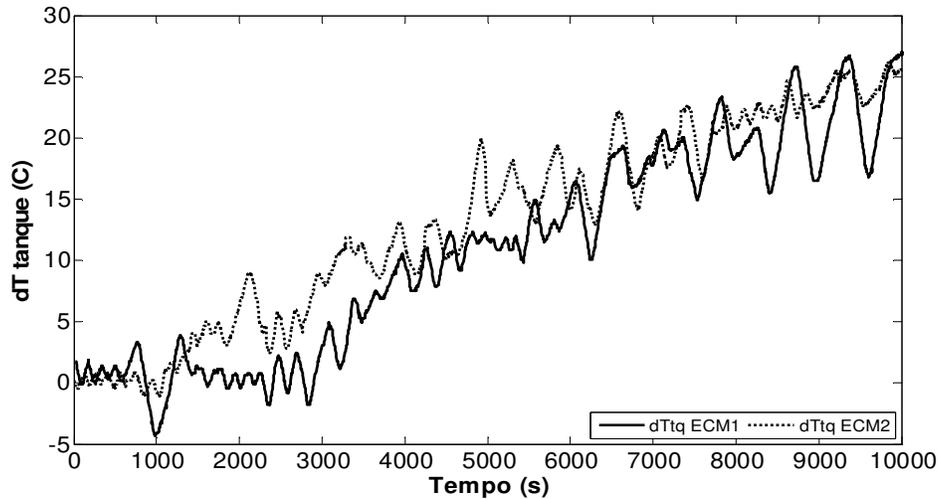
Onde: VP – variador de potencia; PV- variável controlada; MV-variável manipulada

FIGURA 4.14. Ensaio de controle manual 1 (PV x MV).



Onde: VP – variador de potencia; PV- variável controlada; MV-variável manipulada

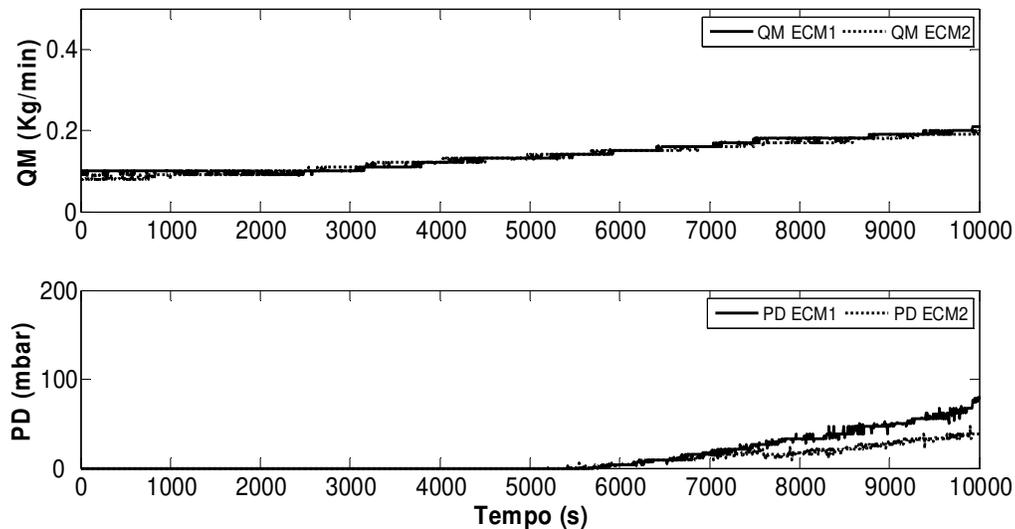
FIGURA 4.15. Ensaio de controle manual 2 (PV x MV).



Onde: Tq-temperatura do tanque; ECM – Ensaio de Controle Manual

FIGURA 4.16. Ensaios de controle manual 1 e 2 (Temperatura do tanque).

Além da análise das variáveis manipulada e controlada, foram observadas as variáveis de processo como, o perfil da densidade, bem como a vazão mássica e pressão diferencial ao longo da reação (Figura 4.17).



Onde: QM-Vazão mássica, PD-Pressao Diferencial; ECM – Ensaio de Controle Manual

FIGURA 4.17. Ensaios de controle manual 1 e 2 (QM x PD).

A partir do monitoramento on-line das variáveis pressão diferencial, vazão mássica e densidade, foi possível efetuar o cálculo das viscosidades de cada ensaio (ECM1 e ECM2), ao final da reação de polimerização, obtida por inferência a partir da utilização da equação de Hagan-Poiseuille (Equação 2.1, página 40).

Vale ressaltar que a viscosidade possui relação com as massas molares do polímero a ser obtido. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores de viscosidade calculados pela equação, utilizando os dados de monitoramento do sistema, e os valores de viscosidade obtidos a partir da leitura de um viscosímetro de Brookfield.

TABELA 4.5. Valores de viscosidade calculados por inferência e lidos através de viscosímetro.

Amostra	μ_{lido}(cP)	μ_{calc}(cP)	Erro (%)
ECM1	185	165	12,0
ECM2	167	155	7,7

Analisando a Tabela 4.5 pode-se perceber que os valores de viscosidades obtidos por inferência apresentaram um erro relativo aceitável, uma vez que encontra-se próximo da faixa de erro da medida de viscosidade obtida através do viscosímetro de Brookfield, que é em torno de 10%.

Desta forma, é possível estimar a viscosidade do fluido polimérico em tempo real, podendo-se monitorar esta variável on-line e utilizá-la em estratégias de controles inteligentes.

Adicionalmente, foi realizada uma comparação entre os perfis de densidade entre os ensaios realizados com controle (malha fechada) e sem controle (malha aberta), a qual pode ser analisada a partir da Figura 4.18.

Percebe-se que o perfil de densidade no ensaio realizado em malha fechada (ECM2) é mais acentuado que o do ensaio realizado em malha aberta, uma vez que sabe-se que o perfil de densidade está relacionado com a conversão do fluido polimérico, e que esta está relacionada com a temperatura do meio reacional. Além disso, ressalta-se a necessidade de um sistema de controle eficiente para a manutenção da temperatura de reação no sistema de polimerização, uma vez que a variação de temperatura no meio reacional pode provocar variações indesejáveis na distribuição da massa molecular do polímero e que afetam suas propriedades físicas, a fim de não comprometer a qualidade do produto final.

Em todos os perfis apresentados nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, verifica-se que as mudanças mais acentuadas nas respostas das variáveis se dá após 1 hora (3600s) da reação de polimerização. Todas estas variáveis monitoradas apresentam uma ligação direta com as modificações ocorridas no interior do reator a medida que a reação se processa.

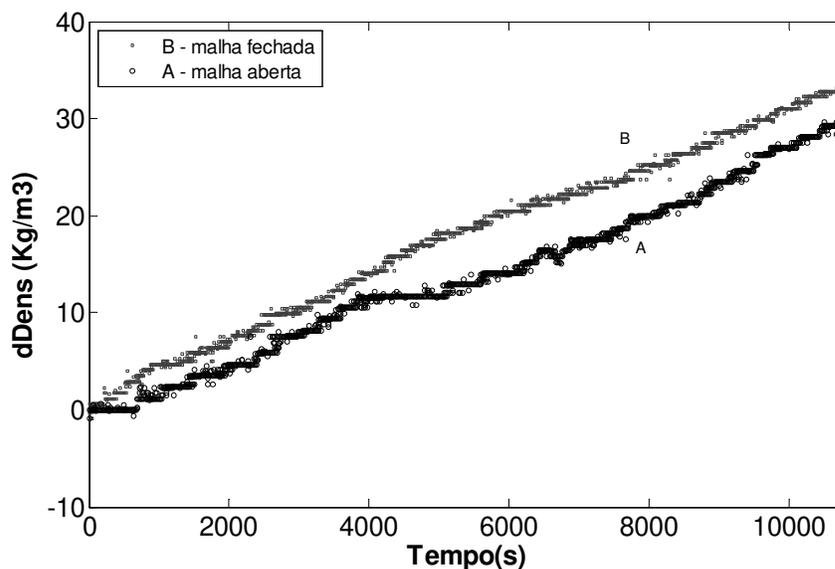


FIGURA 4.18. Comparação entre os perfis de variação de densidade para ensaios de controle em malha aberta e malha fechada .

Diante desta observação foi tido o interesse em realizar um controle inteligente *fuzzy* que utilizasse de uma destas variáveis para indicar ao controlador em que “fase” se encontrava o processo e a sua necessidade de atuação na variável manipulada. Desta forma, esperava-se obter um controle que evitasse grandes variações de *set-point* para a malha de controle secundária, e proporcionasse então suaves atuações da variável manipulada.

4.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados ensaios realizados em malha aberta e com controle manual efetuado pelo operador, para permitir a verificação do comportamento dinâmico do sistema, e permitir a obtenção de um conhecimento especialista sobre o processo de polimerização no sistema experimental, necessário para o desenvolvimento dos controladores *fuzzy*.

Foi definido nesta etapa o tipo de controle que seria utilizado nos próximos ensaios (controle cascata) e todo o procedimento a ser realizado para a execução de cada ensaio, tornando possível efetuar posteriormente uma análise entre os próximos controladores a ser desenvolvidos.

Os ensaios utilizando controle manual foram de extrema importância para se observar o comportamento das variáveis de processo no decorrer da reação de polimerização mediante controle da temperatura interna do reator (variável controlada). A partir destes ensaios constatou-se a necessidade de um aumento de temperatura da camisa do reator em torno de 25°C necessários para a manutenção da temperatura interna do reator em torno do *set-point*.

Esta necessidade de fornecer calor ao sistema foi devido à constatação de que a circulação do fluido polimérico em uma das linhas do sistema proporcionava uma perda de calor muito grande, o que conseqüentemente provocava uma

redução na temperatura interna do reator, a qual era intensificada pelas mudanças nas propriedades físicas do fluido polimérico. O aumento da viscosidade aliado a redução da área de troca térmica entre o reator e a camisa, devido a redução do volume do fluido polimérico no decorrer da reação, contribuíam para uma redução de coeficiente de troca térmica neste sistema experimental.

Devido ao fato exposto, foi comprovada a adequada escolha:

a) do elemento final de controle do sistema: variação de potencia da resistência imersa no fluido térmico, o qual estava presente no tanque de aquecimento e que circulava na camisa do reator; e

b) a estratégia de controle a ser utilizada : controle cascata, uma vez que a constante de tempo da variável controlada era maior que a constante de tempo da variável intermediária (T_{tq}), ou seja, a resposta da variável controlada frente a ações na variável manipulada era mais lenta que a reação da variável intermediária.

A partir da ativação de circulação da linha do fluido polimérico, foi possível o monitoramento e a aquisição de dados relacionados à pressão diferencial, a vazão mássica e a densidade, os quais permitem a determinação da viscosidade da linha em tempo real através de cálculos por inferência. Desta forma, a partir da coleta de amostras em diferentes intervalos da reação, é possível o monitoramento on-line do perfil de viscosidade do fluido polimérico, no interior do reator, ao longo da reação de polimerização.

Diante das informações observadas, mediante comportamento transiente do processo, foi possível desenvolver os controladores inteligentes *fuzzy* para atuação no sistema em cascata.

4.7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABONYI, J., NAGY, L., SZEIFERT, F. Takagi-Sugeno Fuzzy Control of Batch Polymerization Reactors. In Proceedings of the **2nd On-line World Conference on Soft Computing**, 23-27 1997.

ABREU, A., CUSTÓDIO, L., FERREIRA, C. P. Fuzzy modelling: a rule based approach. Proc. **5th IEEE International Conference On Fuzzy Systems**, p 162-168, 1996.

AL-HAJ, A.; BETLEM, B.; WEICKERT, G.; ROFFEL, B. Non-linear model based control of a propylene polymerization reactor M. **Chemical Engineering and Processing**, 46, 554–564, 2007.

ALPBAZ, M YÜCE, S.; HAPOGLU, H.; ZEYBEK, Z. Adaptive heuristic temperature control of a batch polymerization reactor. **Chemical Engineering and Processing**, v.43, p. 911-920, 2004.

ALTINTEN, A. J. B., ERDOGAN, S., HAPOGLU, H., ALPBAZ, M. Control of a polymerization reactor by fuzzy control method with genetic algorithm, **Computers and Chemical Engineering**, 27, 1031 – 1040, 2003.

ANDERSEN, H. C.; LOFTI, A; TSOI, A. C. A new approach to adaptative fuzzy control: The controller output error method. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 27 – B(4), 1997.

ANTUNES, A.; PEREIRA, J.A.F.R E FILETTI, A. M. F. Fuzzy control of a PMMA batch reactor. Development and experimental testing. **Computers and Chemical Engineering**, v. 30, p. 268-279, 2005.

ARBEX, R. T. Controle *Fuzzy*: conceitos e aplicações. **INTEC – Instrumentação e Controle de Processos**, v.78, p.18-30, jun, 1994.

ARRUDA, L. V. R., NEVES JR., F., NAGAI, E. Y. Um método neuro-fuzzy para construção de sensores virtuais. *Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN)*, v.55, n.2, p. 65-80, 2007.

ASUA, J. M. Control of emulsion polymerization reactors using a hierarchical fuzzy logic/model-based controller. ***Polymer Reaction Engineering***, v.9, n.1, p. 37-67, 2001.

BROWN, M.; HARRIS, C. **Neurofuzzy Adaptive modelling and control**. Prentice Hall Int., 1994.

BURAGOHAİN, M.; MAHANTA, C. A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design. ***Applied Soft Computing***, 8, 609-625, 2008.

CAMPOS, M. C., **Sistemas Inteligentes para Controle e Automação de Processos**, Notas de Aula, IME, 1997.

CAMPOS, M. M.; SAITO, K. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**, Ed. Ciencia Moderna, 2004.

CENTIKAYA, S.; ZEYBEK, Z.; HAPOGLU, H. E ALPBAZ, M. Optimal temperature control in a batch polymerization reactor using fuzzy-relational models-dynamics matrix control. ***Computer and Chemical Engineering***, v.30, p.1315-1323, 2006.

CHENG, J.; HUNG, B. Optimization of Batch Polymerization Reactors Using Neural-Network Rate-Function Models. ***Industrial and Engineering Chemistry Research***, 41, 2716-2727, 2002.

COSTA, H., R., N. **Aplicação de técnicas de inteligência artificial em processos de fabricação de vidro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo, Faculdade de Engenharia de Telecomunicações e Controle, São Paulo, 261p, 2006.

COX, E. **Fuzzy Logic for Business and Industry**. Rockland: Charles River Media, Inc. 1995.

EKPO, E.E.; MUJTABA, I.M. Evaluation of neural networks-based controllers in batch polymerisation of methyl methacrylate. **Neurocomputing** 71, 1401–1412, 2008.

ERTUGRUL, S. Predictive modeling of human operators using parametric and neuro-fuzzy models by means of Computer-based identification experiment. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 21, 259–268, 2008.

FERREIRA, A. L. G.; PARANHOS, J. P. S. **Controle em tempo real por lógica fuzzy**. 100 f.. Projeto Final (Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica) - Faculdade de Engenharia de Resende, Resende-RJ, 2004.

GALHARDO, E. **Polimerização de estireno via radical livre mediada por nitróxido usando unificador trifuncional**. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GHASEM, N. M.; SATA, S. A.; HUSSIAN, M. A. Temperature control of a bench-scale batch polymerization reactor for polystyrene production. **Chemical Engineering Technology**, v. 30, p.1193-1202, 2007.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R., MODELAGEM, CONTROLE, SISTEMAS E LÓGICA FUZZY, **SBA Controle e Automação**, v.4 (3), 94–115, 1994.

HANAI, T.; OHKI, T.; HONDA, H.; KOBAYASHI, T. Analysis of initial conditions for polymerization reaction using fuzzy neural network and genetic algorithm. **Computers and Chemical Engineering**, 27, 1011-1019, 2003.

HUAMANI, I. R. L. **Redes Neurais Fuzzy Aplicadas em Identificação e Controle de Sistemas**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

JANG, J, S, R, ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. 23 no. 3, pp. 665 – 685, 1993.

JANG, J.R.; SUN, C.T., Neuro-Fuzzy Modeling and Control, **IEEE Transactions on Systems**, vol.83, n.3, 1997.

KHAJEH, A.; MODARSESS, H.; REZAEI, B. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system for solubility prediction of carbon dioxide in polymers. **Expert Systems with Applications**, 36 5728–5732, 2009.

KROLL, A. Identification of functional fuzzy models using multidimensional reference fuzzy sets. **Fuzzy Sets and Systems**, v.80, p149-158, 1996.

LEE, C. C., Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller: Parte I. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, vol. 20, n.2, p 404-418, 1990a.

LEE, C. C., Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller: Parte II. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, vol. 20, n.2, p 419-435, 1990b.

LEE, M. L.;CHUNG, H. Y.; YU, F. M. Modeling of hierarchical fuzzy systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 138, n.2, p. 343-361, 2003.

LEITE, S. M., SANTOS, B. F., LONA, L. M. F; SILVA, F. V; FILETI, A. M. F. Application of Artificial Intelligence Techniques for Temperature Prediction in a Polymerization Process. **Chemical Engineering Transactions**, v.24, 385-390, 2011.

LI, H.-X. A comparative design and tuning for a conventional fuzzy control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

LI, H.-X. e GATLAND, H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, 1996.

LIMA, F. S. **Estratégia de Escalonamento de Controladores PID Baseado em Regras Fuzzy para Redes Industriais Foundation Fieldbus Usando Blocos Padrões**. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 68 p., Natal, 2004.

LIMA, N. M. N. **Modelagem e controle híbrido preditivo por lógica fuzzy de processos de polimerização**. 238p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2006.

LUYBEN, W. L., **Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers**. 2nd. Ed., International Editions, McGraw-Hill, 1996.

MAMDANI, E. H. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, **Int. J. Man-Mach**, pp. 669 – 678, 1976

MANN, G. K. I.; HU, B. G. e GOSINER, R. G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.29, n.3, p.371-388, 1999.

MATTEDI, A. **Síntese de um controlador híbrido fuzzy-preditivo: Aplicação para processos de polimerização**. 132p. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2003.

MESA, E. B. M.; SOUZA, J. C. S.; SCHILLING; COUTTO FILHO, M. B. Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização de defeitos em sistemas de potência, **Revista de Controle e Automação**, 17, 103-114, 2006.

NG, C.W., HUSSAIN, M. A. Hybrid neural network—prior knowledge model in temperature control of a semi-batch polymerization process. **Chemical Engineering and Processing**, 43, 559–570, 2004.

ÖZKAN, G., HAPOGLU, H. AND ALPBAZ, M. Generalized predictive control of optimal temperature profiles in a polystyrene polymerization reactor. **Chemical Engineering and Processing**, 37, 125–139, 1998.

OZKAN, G.; OZEN, S.; ERDOGAN, S., HAPOGLU, H.; ALPBAZ, M. **Nonlinear control of polymerization reactor**, **Computer and Chemical Engineering**, 25, 757-763, 2001.

PADILHA, P. C. C. **Desenvolvimento de uma metodologia de sintonia de controladores “fuzzy” utilizando redes neurais - aplicações em processos petroquímicos**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Eletrica. Instituto Militar de Engenharia. 95 p. 2001

PADILHA, P. C. C.; PINHEIRO, G. M.; Aplicação de Controladores Neuro-fuzzy para Processos Industriais; **XIV Congresso Brasileiro de Automática**, Natal/RN. 2002.

PAGLIOSA, A. L.; SÁ, C. C. Obtenção de Funções de pertinência de um Sistema Neurofuzzy pelo Método de Kohonen; **Congresso Brasileiro de Computação**, Itajaí/SC, 2003.

PEDRYEZ, W.; GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**, MIT Press, Cambridge, 1998.

PINHEIRO, C. A. M. **Análise e projeto de sistemas de controle fuzzy: Uma abordagem no domínio da frequência**. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 141p, Campinas, 2000.

PIRES, J. R. C.; NASCIMENTO JR, C. L. **Controle fuzzy para braço robótico utilizando abordagem adaptativa neuro-fuzzy (ANFIS) do Matlab**. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/viiiencita/Controle%20fuzzy%20para%20braco%20robotico%20utilizando%20anfis%20do%20matlab.pdf>>. Acessado em 25/07/2008.

RICHARD, J. R. E CONGALIDIS, J. P. Measurement and control of polymerization reactors. **Computers & Chemical Engineering** v.30, p. 1447-1463, 2006.

ROCHA, A. M. P. **Identificação nebulosa da concentração de oxigênio dissolvido do tanque de aeração de uma estação de tratamento de esgotos por lodos ativados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 82 p., São Paulo, 2003.

SANDRI, S., CORREA, C. Lógica Nebulosa, V Escola de Redes Neurais, **Conselho Nacional de Redes Neurais**, 73-90, 1999.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem fuzzy**, Ed. Edgar Blucher Ltda., 1999.

SHEIKHZADEH, M., TRIFKOVIC, M., ROHANI, S. AdaptiveMIMOneuro-fuzzy logic control of a seeded and an unseeded anti-solvent semi-batch crystallizer. **Chemical Engineering Science**, 63, 1261 – 1272, 2008.

SOLGI, R.; VOSOUGH, R.; RAFIZADEH, M. Generalization of Takagi-Sugeno fuzzy controller and its application to control of MMA batch polymerization reactor. **Polymers - Plastics Technology and Engineering**. v.45, p. 243-249, 2006.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control: an introduction to theory and practice**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1984. 696p.

SUGENO M. AND YASUKAWA T. A fuzzy-logic based approach to qualitative modeling. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, 1, 7-31, 1993.

SUGENO, M.; KANG, G. T. Structure identification of fuzzy model. **Fuzzy Sets and Systems**, v.28, p. 15-33, 1988.

SUGENO, M. An introductory survey of fuzzy control. **Information Sciences** 36, p. 59-83, 1985.

TAKAGI, T. E SUGENO M. Derivation of fuzzy control rules from human operator's control action. **IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis**, Marseille, p. 55-60, 1983.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 15, n. 1, p. 116-132, 1985.

TAKAGI, T. E SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 15, n. 1, p. 116-133, 1985.

TAKAHASHI, H. J.; RABELO, G. B.; TEIXEIRA, R. A. Aplicação de técnicas de inteligência computacional para predição de propriedades mecânicas de aços de alta resistência microligados. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.5, n. 2, p. 100-104, São Paulo, 2008.

TEIXEIRA, R. A.; CORREA, M. V.; ASSIS, J. C. O. **Redes Neuro Fuzzy: Algoritmo de Treinamento e Aplicações**. Coronel Fabriciano Unileste, v. 1, n. 3, p.152-168, Minas Gerais, 2007.

TRANSCHEIT, R. **Sistemas fuzzy**. In: VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2007.

VEGA, M. P., LIMA, E. L., PINTO, J. C. Control of a loop polymerization reactor using neural networks. **Brazilian Journal Chemical Engineering**, v.17, 4-7, São Paulo, 2000.

VIEIRA, J. A. B.; DIAS, F. M.; MOTA, A. M. Comparison between artificial neural networks and neurofuzzy systems in modeling and control: A case study. SICICA - 5th IFAC **International Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications**, 2003.

WAKABAYASHI, C. **Análise e controle fuzzy de processos: Estudo de caso em um reator de polimerização.** 122 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Mecatrônica, EFBA, Salvador, 2007.

WANG, L. **Adaptive Fuzzy Systems and Control**, Prentice Hall, 1994.

YAGER, R. R.; FILEV, D. P. **Essentials of Fuzzy Modeling and Control.** John Wiley & Sons, Inc. New York. 1994.

YUCE, S.; HASALTUN, A.; ERDOGAN, S.; ALPBAZ, M. Temperature control of a batch polymerization reactor. Institution of Chemical Engineers. **Trans IChemE**, V. 77, Part A, 413-420, 1999.

ZADEH, L. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes interval-valued fuzzy sets. **IEEE Trans. Syst. Man Cybernet** ,3. p. 28-44, 1973.

ZADEH, L. A., Fuzzy sets, **Information and Control**, 8, 338-353, 1965.

ZHANG, J. Multi-Objective Optimal Control of Batch Processes Using Recurrent Neuro-fuzzy Networks. **IEEE Transactions on Neural Networks**, p304-309, 2003.

CAPÍTULO 5. DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES INTELIGENTES

5.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos controladores *fuzzy* envolveu três etapas essenciais: caracterização do intervalo de valores (conjunto-suporte) que as variáveis de entrada e saída iriam assumir; definição de um conjunto de regras para estabelecer uma relação entre valores da entrada e da saída, construída pela observação geral e conhecimento do sistema; determinação das funções de pertinência.

Os controladores *fuzzy* foram desenvolvidos e em seguida implementados no processo em malha fechada. Cada estratégia de controle seguinte utilizou de conhecimentos de ensaios de controle realizados. Todos os ensaios em malha fechada apresentados foram realizados numa mesma época, sob mesmas condições.

A verificação do comportamento transiente do processo de polimerização do estireno contribuiu para um melhor conhecimento especialista e, conseqüentemente, para o projeto do controlador *fuzzy*. A determinação do universo de discurso, dos conjuntos suporte, das disposições das funções de pertinência e da base de regras foram parâmetros manipulados com o objetivo de proporcionar uma melhor atuação dos controladores *fuzzy* projetados, constituindo-se da sintonia destes controladores.

Convém ressaltar que, para o desenvolvimento de todos os controladores *Fuzzy*, a determinação dos universos de discurso, a disposição das funções de pertinência, e as modificações nas bases de regras foi fortemente influenciada por conhecimentos subjetivos baseados em observações práticas do comportamento do controlador diante destas modificações.

Foram utilizadas as mesmas condições e procedimentos experimentais para a realização dos controladores *fuzzy*, a fim de possibilitar a avaliação de cada estratégia de controle inteligente implementada, bem como o desempenho dos controladores desenvolvidos. Todas as estratégias de controle foram implementadas no Matlab.

Serão apresentadas neste tópico as alterações das variáveis de entrada nas malhas de controle e os comportamentos das variáveis de processo e de controle ao longo da reação de polimerização no sistema experimental proposto, com a utilização de controladores.

Nos ensaios realizados em cascata foi utilizado o mesmo controlador P para todas as implementações de controle inteligente, a fim de permitir uma comparação entre os mesmos.

5.2. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE *FUZZY*

5.2.1 ESTRUTURAS DOS CONTROLADORES

Foram realizados ensaios para implementação de diferentes estratégias de controle *fuzzy*, na malha primária:

- *Fuzzy* posicional e incremental;
- *Fuzzy* com entradas baseadas em variáveis relacionadas ao processo;
- *Fuzzy* MISO e SISO;
- Estratégias Neuro-*fuzzy* MISO.

Na Tabela 5.1 é apresentado um resumo dos controladores inteligentes implementados no sistema experimental de polimerização, sob as mesmas condições operacionais.

TABELA 5.1. Resumo das configurações dos controladores Inteligentes implementados no sistema experimental de polimerização.

Estratégias de Controle Inteligentes					
Modelo	Denominação	Tipo (quanto à atuação)	Tipo (quanto às variáveis)	Entradas	Saídas
Mamdani	Fuzzy MISO	Posicional	MISO	Δ Dens. e ErroTrt	SPTtq
Sugeno	Fuzzy S MISO	Posicional	MISO	Δ Dens. e ErroTrt	SPTtq
Mamdani	Fuzzy PI	Incremental	SISO	ErroTrt e Δ ErroTrt	dSPTtq
Mamdani	Fuzzy PID	Posicional	SISO	ErroTrt e Δ ErroTrt	SPTtq
Mamdani	Fuzzy PI SIMO	Incremental e Posicional	SIMO	ErroTrt e Δ ErroTrt	dSPTtq %Inv.Freq
Sugeno	Neuro-Fuzzy	Posicional	MISO	$T_{rt(k)}, T_{rt(k-20)}, T_{in(k)},$ $T_{in(k-20)}, T_{out(k)},$ $\%VP_{(k)}$ e $\%VP_{(k-20)}$	$\%VP_{(k+20)}$

onde:

Δ Dens. = variação da densidade do fluido polimérico; ErroTrt = diferença entre a temperatura do reator e o set-point estabelecido; SPTtq= set-point da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; Δ ErroTrt = variação do erro; %InvFreq=% de variação do inversor de frequência da bomba volumétrica que impulsiona o fluido térmico pela camisa do reator, variando assim a sua vazão; Trt(k) = temperatura do reator no instante atual; Trt(k-20) = temperatura do reator em instante anterior; Tin(k) = temperatura do fluido térmico na entrada da camisa do reator no instante atual; Tin(k-20) = temperatura do fluido térmico na entrada da camisa do reator num instante anterior; %VP(k-20) = variação de potência da resistência do fluido térmico num instante anterior; %VP(k) = variação de potência da resistência do fluido térmico no instante atual; %VP(k+20) = variação de potência da resistência do fluido térmico num instante posterior;

Para o desenvolvimento destes controladores foi imprescindível a utilização de um conhecimento preliminar sobre o comportamento do processo de polimerização.

5.2.2. DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Além do conhecimento do processo, é muito significativa a determinação do efeito das funções de pertinência no desempenho do controlador *fuzzy*. Foram utilizadas funções de pertinência de forma triangular por serem amplamente utilizadas na literatura, pela simplicidade de implementação, e maior velocidade de computação. Outras funções foram testadas previamente, no entanto não foi verificada alterações de desempenho significativas nesta aplicação.

A determinação dos universos de discurso de cada função de pertinência do controlador *fuzzy* foi obtida pela observação do comportamento dinâmico das variáveis envolvidas no processo. Para a construção das funções de pertinência, foi utilizado o *Membership Function Editor do Toolbox Fuzzy do MATLAB 7.0.1*.

5.2.3. DEFINIÇÃO DA BASE DE REGRAS

A construção da base de regras foi obtida a partir de informações do sistema. Matrizes bidimensionais foram criadas para expressar a base de regras utilizada para os controladores desenvolvidos. Inicialmente foi criada uma matriz bidimensional de regras, as quais foram modificadas para se adequar ao controle do processo de polimerização. Nas Tabelas 5.2 e 5.3 estão representadas a matriz bidimensional de base de regras construídas com base nas regras estabelecidas por Mamdani (1974) e utilizadas inicialmente para o desenvolvimento de todos os controladores *fuzzy*, posicional e incremental.

Foram utilizadas 5 (cinco) funções de pertinência, as quais representam as ações do controlador *fuzzy*, constituindo um total de 25 regras para cada controlador *fuzzy* implementado. Os termos lingüísticos utilizados das funções de pertinência, das variáveis de entrada e saída, foram: GP (grande positivo), MP (médio positivo), ZR (zero), GN (grande negativo), MN (médio negativo).

TABELA 5.2. Matriz bidimensional de base de regras iniciais para controladores *Fuzzy* Posicional com 5 funções de pertinência.

Δ ERRO	ERRO				
	GN	MN	ZR	MP	GP
GN	GP	GP	MP	MN	MN
MN	GP	GP	MP	MN	MN
ZR	GP	MP	Z	MN	GN
MP	MP	MP	MN	GN	GN
GP	MP	MP	MN	GN	GN

TABELA 5.3. Matriz bidimensional de base de regras iniciais para controladores *Fuzzy* Incremental com 5 funções de pertinência.

Δ ERRO	ERRO				
	GN	MN	ZR	MP	GP
GN	GP	GP	GP	MP	Z
MN	GP	GP	MP	Z	MN
ZR	GP	MP	Z	MN	GN
MP	MP	Z	MN	GN	GN
GP	Z	MN	GN	GN	GN

As regras foram editadas com o auxílio do *Rule Editor do Toolbox Fuzzy* do programa MATLAB 7.0.1. As Figuras 5.1 (a e b) ilustram a edição das regras utilizadas para o controlador *fuzzy*-PI SISO e *fuzzy* SIMO, respectivamente.

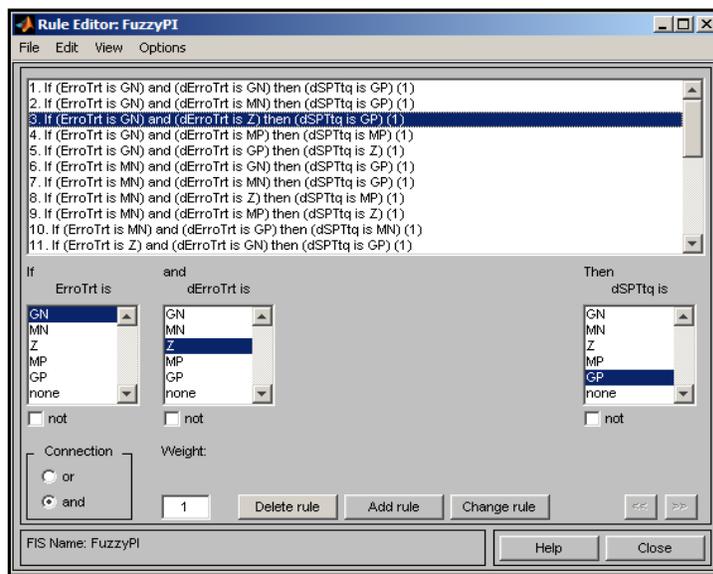


FIGURA 5.1a. Edição da base de regras do controlador *Fuzzy*-PI SISO.

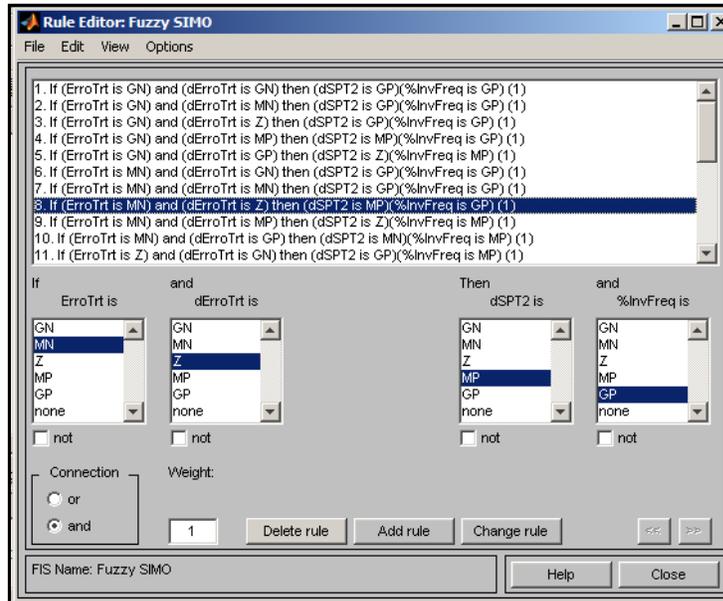


FIGURA 5.1b. Edição da base de regras do controlador *Fuzzy SIMO*.

5.2.4. SINTONIA DOS CONTROLADORES FUZZY

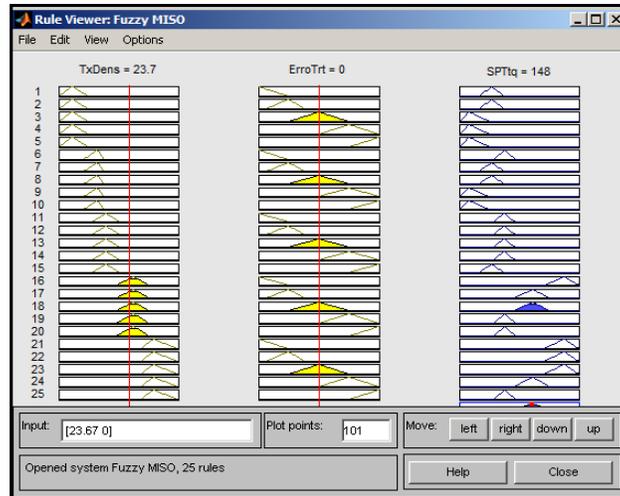
A sintonia é uma tarefa complexa devido a múltiplos ajustes simultâneos, exigindo esforço do projetista na obtenção do melhor desempenho do controlador, sendo esta uma etapa difícil e trabalhosa (CAMPOS e SAITO, 2004; SANDRI e CORRÊA, 1999; LI e GATLAND, 1996).

Com a tarefa de encontrar um conjunto de comandos convenientes que levassem o sistema a alcançar o estado desejado com o menor desvio possível, a sintonia dos controladores *fuzzy* desenvolvidos consistiu de: mudança nas disposições das funções de pertinência para entradas e saídas dos controladores, modificação na base de regras e ainda no universo de discurso.

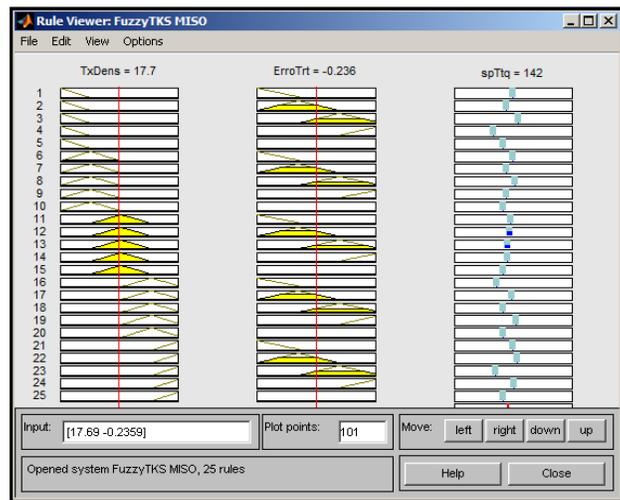
Antes de cada implementação era feita uma simulação do comportamento de cada controlador, através da ferramenta *Rule Viewer do Toolbox Fuzzy* do

programa MATLAB 7.0.1., a qual permitia observar se o controlador desenvolvido seria adequado para atuar em malha fechada.

Nas Figuras 5.2 (a, b e c) são ilustradas as regras e simulação computacional realizada na etapa de sintonia dos controladores *Fuzzy MISO*, *Fuzzy Anfis MISO* e *Fuzzy-PI SIMO*, respectivamente.

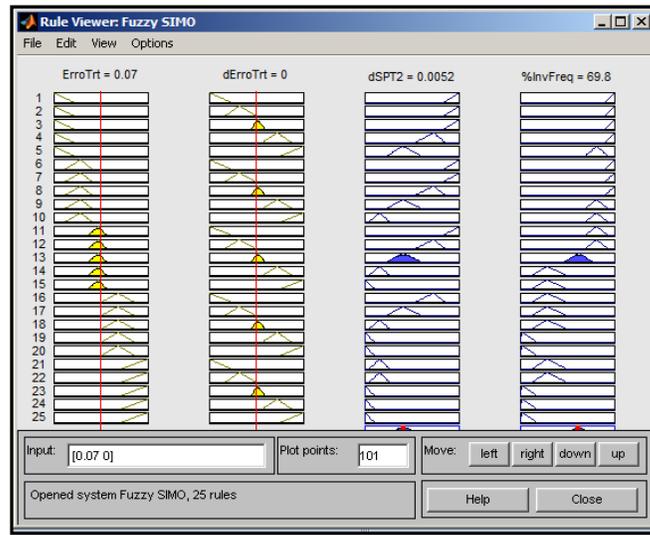


(a)



(b)

FIGURAS 5.2. Simulação do comportamento dos controladores (a) *Fuzzy MISO* e (b) *Fuzzy S MISO*, respectivamente, através da sintonia do *Toolbox Fuzzy*.



(c)

FIGURA 5.2 (c). Simulação do comportamento do controlador *Fuzzy-PI SIMO*, através da sintonia do *Toolbox Fuzzy*.

5.3. CONTROLADOR “FUZZY MISO” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE MISO/POSICIONAL)

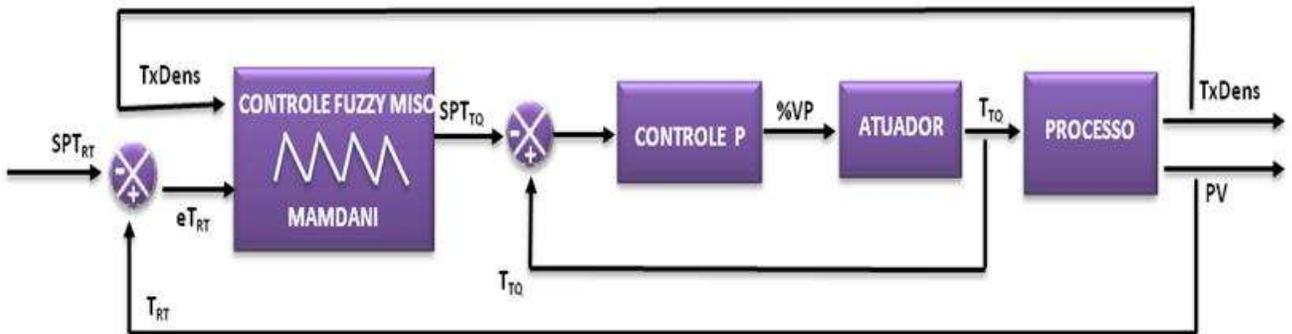
5.3.1. ESTRUTURA DO CONTROLADOR FUZZY MISO

De acordo com ensaios realizados anteriormente, verificou-se que devido às mudanças nas propriedades do fluido polimérico, havia a necessidade de aplicação de diferentes faixas de temperatura do fluido térmico para promover o aquecimento adequado do reator. Após esta constatação, foi então desenvolvido

um controlador inteligente *fuzzy*, que utilizasse de uma variável que “percebesse” tais modificações no fluido polimérico com o processamento da reação, como por exemplo, a variação da densidade.

Para o desenvolvimento de um controlador *Fuzzy MISO* posicional, foram utilizadas como variáveis de entrada a variação de densidade e o desvio da temperatura do fluido polimérico com relação ao *set-point*, definidas como $TxDens$ e eT_{RT} . O valor da temperatura do fluido térmico foi utilizado como variável de saída do controle *fuzzy*, definida como SPT_{TQ} . A variável de saída do controle *fuzzy* se constituiu do *set-point* do controlador escravo da malha seguinte.

Na Figura 5.3, é apresentada a estrutura para o controlador *fuzzy* utilizado neste esquema de controle. Na Figura 5.4 é ilustrado o início do desenvolvimento do controlador *fuzzy MISO*, no toolbox *fis* do programa MATLAB: inferência *fuzzy* (*Mamdani*) e o critério de *defuzzificação* (centro-de-gravidade).



SPT_{RT} = *set-point* da temperatura do reator; eT_{RT} = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; T_{RT} = temperatura do reator; $TxDens$ = variação da densidade do fluido polimérico; SPT_{TQ} = *set-point* da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; $\%VP$ = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento; PV = variável controlada do processo = T_{RT} .

FIGURA 5.3 - Estrutura do controlador *Fuzzy MISO*, em cascata.

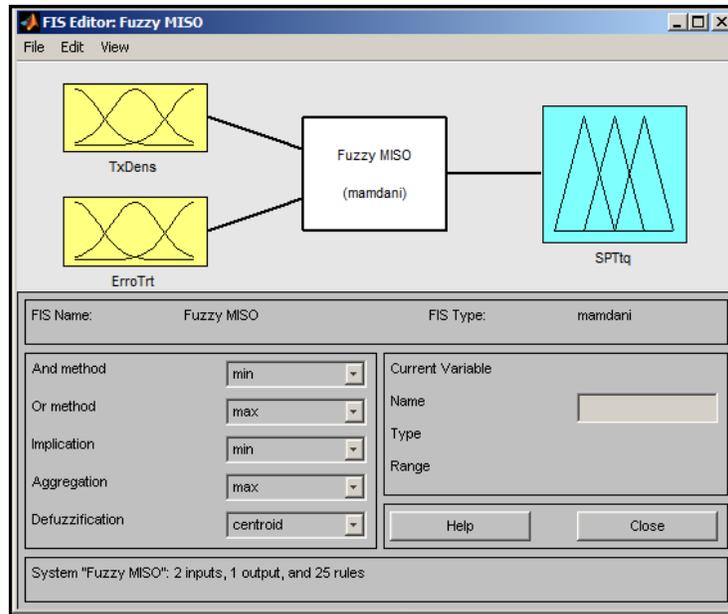


FIGURA 5.4. Desenvolvimento do controlador *fuzzy*-MISO, posicional, no MATLAB 7.0.1.

Neste tipo de controlador a variável variação de densidade foi utilizada a fim de proporcionar uma saída menos oscilatória do controlador posicional, uma vez que os valores de temperatura que o fluido térmico deveria assumir não estavam ligados apenas ao quanto a variável controlada se desviava de seu *set-point*, mas principalmente ao momento da reação em que isso acontecia. A variação de densidade foi usada como uma indicação sobre o curso da reação de polimerização.

A variação de densidade ao longo do processo está relacionada ao aumento da formação de moléculas do polímero, o que faz com que haja aumento também da sua viscosidade. Quanto maior a viscosidade, maior a necessidade do aumento da temperatura do fluido térmico, pois menor é o efeito de troca térmica entre os fluidos.

Como a variação de densidade no fluido polimérico está relacionada ao aumento da conversão no decorrer do processo, foi de interesse a utilização desta

variável numa estratégia de controle. Diante da versatilidade que o protótipo experimental do sistema de polimerização oferece, posteriormente, havia o interesse de utilizar a variação de densidade (conversão) como variável controlada no desenvolvimento de controladores inteligentes, visando manter o processo de polimerização dentro de uma faixa de conversão pré-estabelecida.

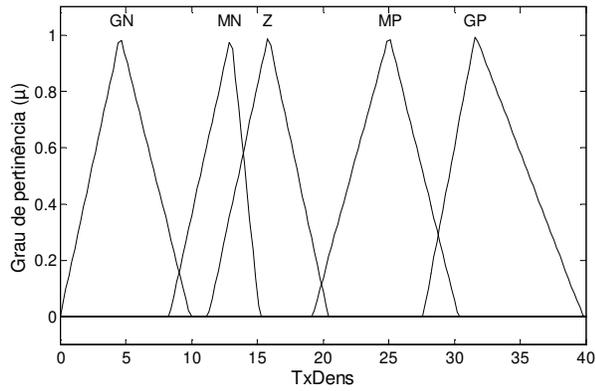
5.3.2. PARÂMETROS DE SINTONIA DO CONTROLADOR FUZZY MISO

Na Figura 5.5 são apresentadas as estruturas das funções de pertinência atribuídas ao controlador *Fuzzy* MISO para a variação de densidade e a o desvio da variável controlada, e para os valores de saída da temperatura do fluido térmico.

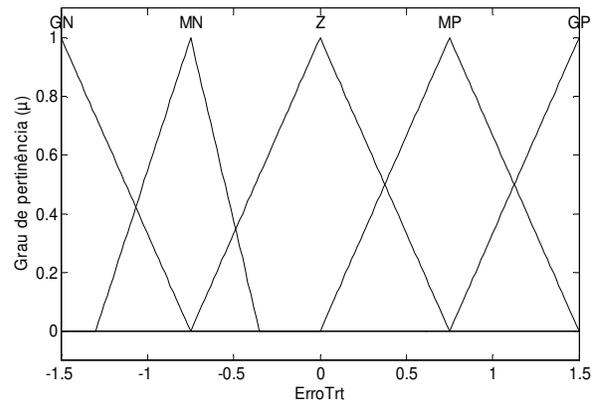
Após a definição do conjunto suporte de cada variável, a funções de pertinência, inicialmente igualmente espaçadas, foram modificadas conforme necessidade na etapa de sintonia do controlador.

Em todos os controladores inteligentes desenvolvidos foram utilizadas cinco funções de pertinência de cardinalidade 5 (GN - grande negativo; MN - médio negativo; ZR – zero; MP – médio positivo e GP – grande positivo).

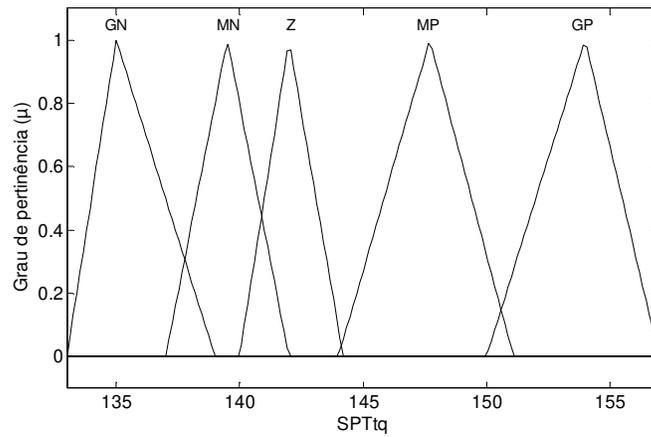
Para o desenvolvimento de um controlador fuzzy mais adequado, foram modificadas também, a base de regras do controlador posicional MISO. Na Tabela 5.4b está representada a matriz da base de regras com modificações sofridas (regras sublinhadas) após a sintonia deste controlador, com relação à base de regras inicialmente desenvolvida (Tabela 5.4a).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 5.5 - Estruturas das funções de pertinência para as variáveis (a) TxDens (b) ErroTrt e (c) spTtq empregadas no desenvolvimento do controlador *fuzzy* MISO.

TABELA 5.4 - Matriz bidimensional de base de regras do controlador *Fuzzy* MISO.

(a)						(b)					
Δ ERRO	ERRO					ErroTrt	Txdens				
	GN	MN	ZR	MP	GP		GN	MN	ZR	MP	GP
GN	GP	GP	MP	MN	MN	GN	<u>MN</u>	<u>Z</u>	<u>Z</u>	<u>GP</u>	<u>GP</u>
MN	GP	GP	MP	MN	MN	MN	<u>MN</u>	<u>MN</u>	<u>Z</u>	<u>MP</u>	<u>GP</u>
ZR	GP	MP	Z	MN	GN	ZR	<u>GN</u>	<u>MN</u>	Z	<u>MP</u>	<u>GP</u>
MP	MP	MP	MN	GN	GN	MP	<u>GN</u>	<u>GN</u>	<u>Z</u>	<u>Z</u>	<u>MP</u>
GP	MP	MP	MN	GN	GN	GP	<u>GN</u>	<u>GN</u>	MN	<u>Z</u>	<u>Z</u>

O universo de discurso proposto para a variável de entrada TxDens [0, 40] representa a faixa que corresponde a variação de densidade do fluido polimérico, dentro do reator, observada nos ensaios de polimerização anteriormente realizados.

A função de pertinência GN [0, 10] para a variável de entrada TxDens, assim como a função GN [132,137] da variável de saída corresponde a faixa em que o proceso se inicia, logo no começo da reação, onde o erro (ErroTrt) era próximo de zero (Z) (Figura 5.5). Assim para o início do processo, aplicou-se por exemplo a regra: *Se TxDens é GN e ErroTrt é Z então spT2 é GN* (Tabela 5.4b) .

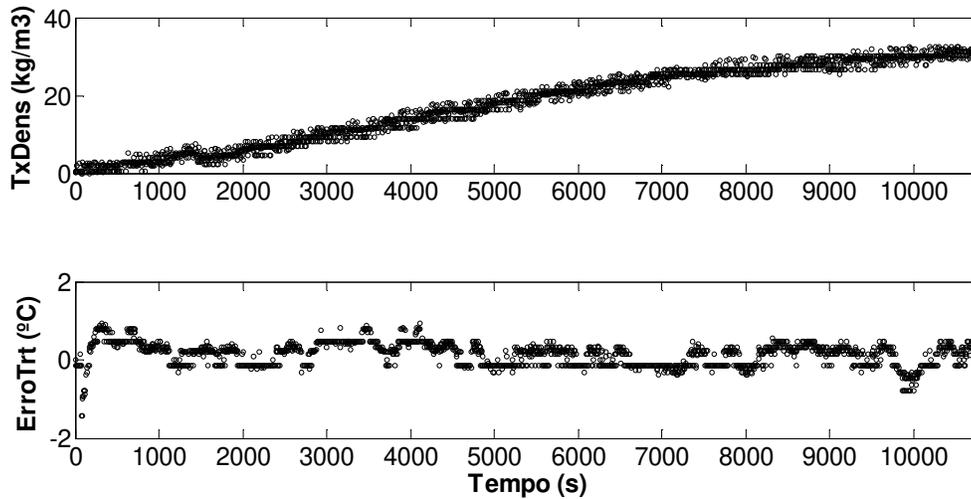
Num tempo médio da reação de polimerização, quando a variação de densidade (Txdens) encontra-se na faixa denominada zero (ZR), percebe-se que para variações de temperatura do reator (ErroTrt) na faixa “Zero” (valores nulos de erro) ou mesmo para valores de erros negativos (MN ou GN), é aplicada a saída (SPTtq) do controlador em valores que compreendem a faixa “Z”. Isto devido ao fato de que neste estágio da reação a faixa de temperatura para o set-point do tanque de aquecimento selecionada para a função de pertinência “Z” era suficiente

para conter pequenas quedas de temperatura do reator, com variações de temperatura (T_{rt}) dentro da faixa aceitável de oscilação. Inclusive, mesmo quando a variação da temperatura do reator encontrava-se na faixa “MP”, para valores de variação de densidade “Z”, os valores de set-point da temperatura do tanque enviados pelo controlador ainda deveriam se encontrar na faixa de “Z”. Apenas quando ocorressem valores mais altos de ErroTrt (GP) o controlador então enviaria valores de set-point mais baixos (MN) para a redução da temperatura do fluido de aquecimento. Estas atribuições foram necessárias na etapa de sintonia com o objetivo de o controlador fuzzy não proporcionar valores muito baixos de temperatura para a camisa do reator, o que ocasionaria redução e oscilação na temperatura do reator, uma vez que a queda de temperatura do mesmo já era favorecida pela perturbação inerente do sistema experimental, devido a perda de calor na linha de circulação do fluido polimérico.

Na fase final do processo de polimerização as funções de pertinência que regem as ações de controle são a GP, da variável TXDens e a GP da variável de saída, onde é necessário um maior aquecimento do sistema de polimerização. Nesta fase, mesmo que o erro seja positivo (MP), a ação de controle apenas atenua esta temperatura, com a função MP, continuando a enviar valores altos de saída, e evitando provocar oscilações na variável controlada (temperatura do reator), conforme o que foi explicado no parágrafo anterior.

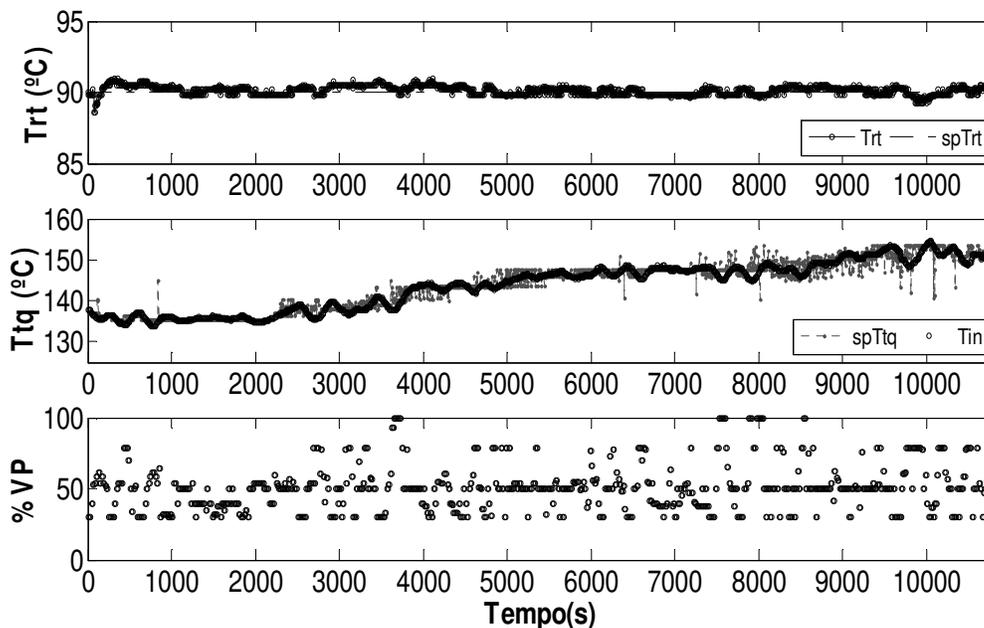
5.3.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY MISO

Na Figura 5.6 são apresentadas as variações das variáveis de entrada Txdens e ErroTrt do controlador. E na Figura 5.7 são apresentados os comportamentos das variáveis controlada e manipulada.



TxDens= variação da densidade do fluido polimérico; Erro_{TRT} = diferença entre a temperatura interna do reator e o *set-point* estabelecido.

FIGURA 5.6. Comportamento das variáveis de entrada do controlador denominado *Fuzzy MISO*, ao longo da reação de polimerização.



T_{RT} = temperatura interna do reator; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento.

FIGURA 5.7. Comportamento das variáveis controlada e manipulada utilizando controlador *Fuzzy MISO* na malha de processo.

No início da reação percebe-se uma rápida queda na temperatura do reator, seguida de um aumento até chegar à estabilização. Este comportamento foi comum em todos os controladores utilizados, pois tratava-se da adição do iniciador BPO, à temperatura ambiente, para dar início ao processo de polimerização. Devido à presença de radicais livres no meio polimérico, as moléculas de estireno começavam a se ligar, dando início à reação exotérmica de formação de poliestireno, e uma elevação da temperatura do reator foi observada. Em todos os ensaios o BPO foi mantido a temperatura ambiente antes de começar o ensaio.

Esta estratégia proporcionou o fornecimento de valores de *set-point* de temperatura de acordo com as mudanças sofridas pelo fluido polimérico, aumentando gradativamente conforme a necessidade de aquecimento do sistema, a fim de manter a temperatura do reator dentro dos limites estabelecidos.

Diante da observação do comportamento das variáveis controlada e manipulada do processo em malha fechada foi estabelecido um valor mínimo de saída de 30% de variação de potência. Esta condição foi estabelecida devido à observação de que quando o erro da temperatura do reator era nulo, este valor conseguia manter a temperatura do tanque próximo ao *set-point* sem provocar maiores oscilações.

De acordo com a Figura 5.7 observa-se que o controlador *fuzzy* forneceu valores de saída adequados acompanhando o curso da reação e possibilitando o controle da temperatura do reator de forma eficiente, com variação máxima de ($\pm 1^\circ$).

Na Tabela 5.5 são apresentados os parâmetros de desempenho para este controlador.

TABELA 5.5. Parâmetros de desempenho do controlador *Fuzzy* MISO

Parâmetros de Desempenho	
Controlador	<i>Fuzzy</i> MISO
ISE	223,3
IAE	584,3
ITAE	$2,74 \cdot 10^6$
ITSE	$9,078 \cdot 10^5$
<i>Overshoot</i> (°C)	0,98
Tempo de subida (s)	1265
Tempo de estabilização (s)	1265
Consumo de energia elétrica (kWh)	2,92

Observa-se um comportamento um pouco oscilatório, em alguns momentos, na saída do controlador *fuzzy*. Este fato foi atribuído a observação de presença de ruídos na leitura do densímetro, em alguns momentos da reação, levando a leitura de valores errôneos pelo sensor de densidade e provocando estas oscilações na saída. Para amenizar este problema, foi efetuado o aterramento do instrumento.

5.4. CONTROLADOR “FUZZY S MISO” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE MISO/POSICIONAL)

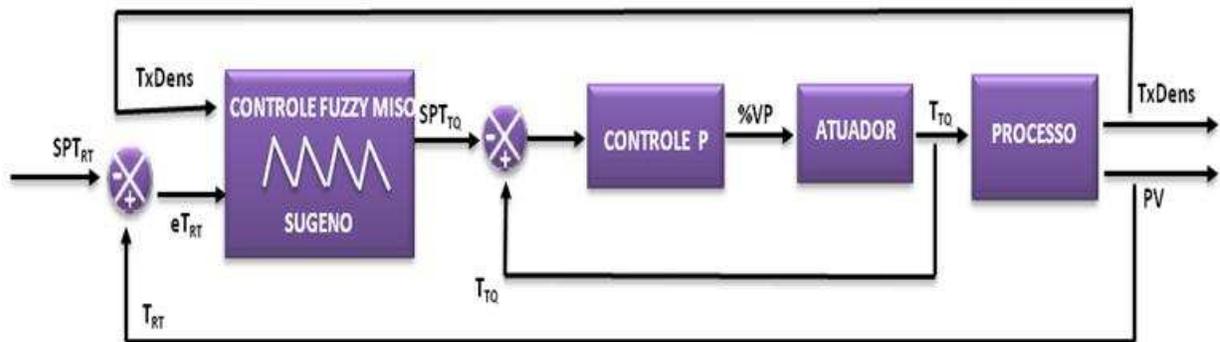
5.4.1. ESTRUTURA DO CONTROLADOR “FUZZY S MISO”

Após a realização de um controlador *fuzzy* Mamdani, foi implementado um controlador *fuzzy* tipo Sugeno, sendo que os parâmetros deste controlador foram ajustados pelo ANFIS (*Adaptative Neuro Fuzzy Inference System*).

Foram utilizados para dados de treinamento e teste ensaios anteriormente realizados de *fuzzy* que utilizaram a variação de densidade como variável de entrada, e ensaio de controle manual. Os dados foram separados aleatoriamente de forma a obter 75% de conjunto de dados para treinamento e 25% para testar o modelo.

O esquema da estrutura do controlador denominado “Fuzzy S MISO” utilizado (Figura 5.8) é similar ao esquema proposto para o controlador “Fuzzy MISO” apresentado na Figura 5.3.

Na Figura 5.9 é ilustrado o início do desenvolvimento do controlador *fuzzy* MISO posicional, no toolbox *fis* do programa MATLAB.



SPT_{RT} = *set-point* da temperatura do reator; eT_{RT} = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; T_{RT} = temperatura do reator; $TxDens$ = variação da densidade do fluido polimérico; SPT_{TQ} = *set-point* da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; $\%VP$ = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento; PV = variável controlada do processo = T_{RT} .

FIGURA 5.8. Estrutura do controlador *Fuzzy S MISO*, em cascata.

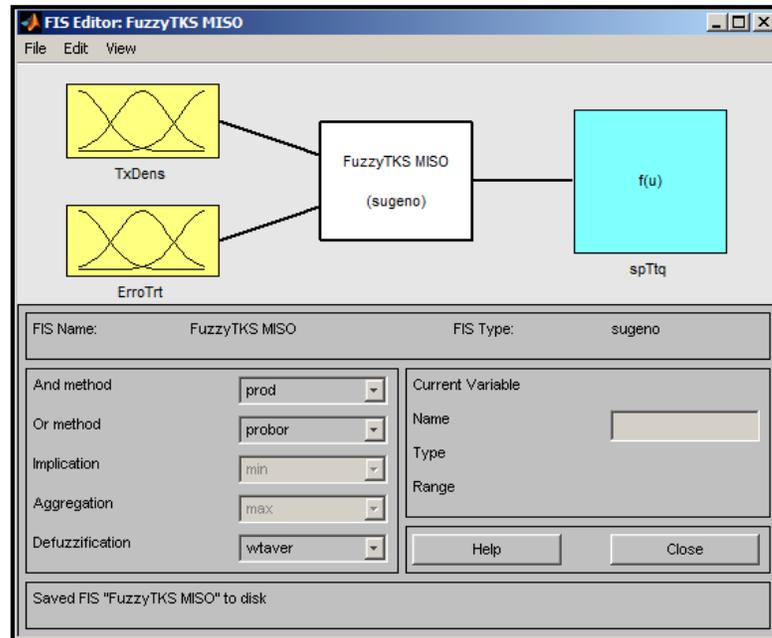


FIGURA 5.9. Desenvolvimento do controlador *Fuzzy S MISO* posicional no MATLAB 7.0.1.

5.4.2. PARÂMETROS DE SINTONIA DO CONTROLADOR “FUZZY S MISO”

A partir das funções de pertinência utilizadas inicialmente para o controlador “*Fuzzy MISO*”, foram então construídas as funções de pertinência para o controlador “*Fuzzy S MISO*” a partir do método Anfis.

Na Figura 5.10 são apresentadas as estruturas das funções de pertinência atribuídas ao controlador *Fuzzy S* para a variação de densidade e o desvio da variável controlada.

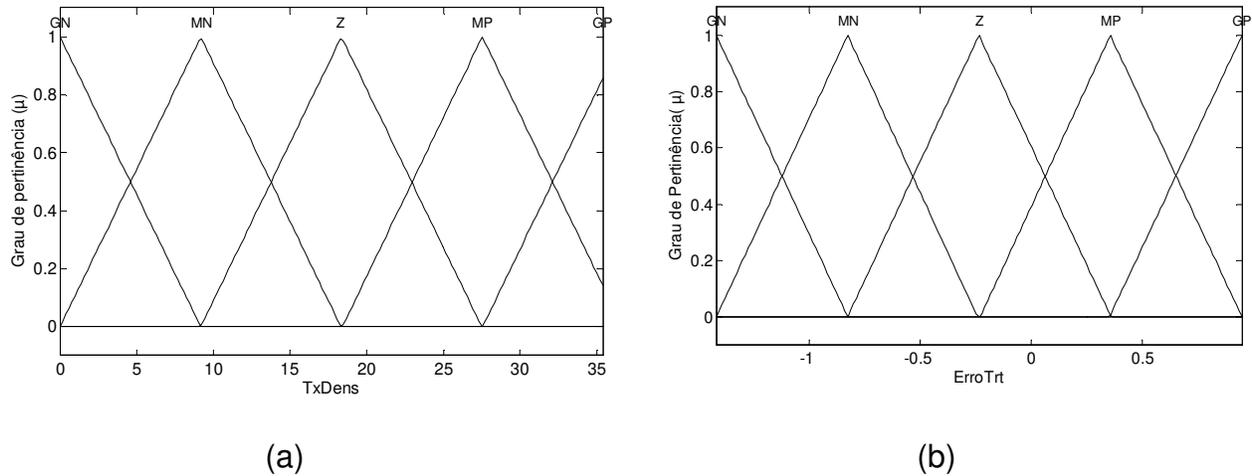


FIGURA 5.10. Estruturas das funções de pertinência para as variáveis (a) $TxDens$ (b) $ErroTrt$ empregadas no desenvolvimento do controlador *fuzzy S*.

As funções de pertinência e as relações de saída foram “otimizadas” a partir de um conjunto de dados experimentais contendo informações sobre o comportamento destas variáveis envolvidas neste controlador *fuzzy S*.

A estrutura Anfis foi treinada com 25 épocas, suficiente para se obter a convergência, apresentado um erro de treinamento de aproximadamente $1,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 5.11).

O erro de treinamento para os valores de temperatura do tanque de aquecimento (saída do controlador) foi considerado aceitável ($1,38\text{ }^{\circ}\text{C}$) uma vez que os valores de temperatura em ensaios realizados anteriormente, variavam em aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ em torno dos valores de *set-point*.

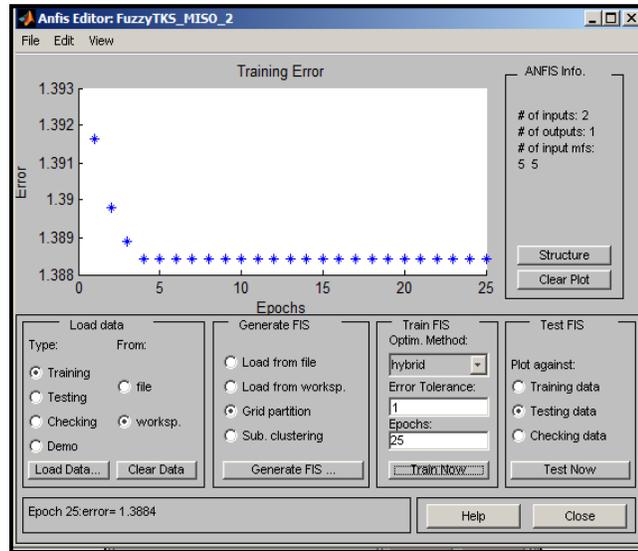


FIGURA 5.11. Curva do erro de treinamento da estrutura do controlador *Fuzzy S MISO*.

Na Figura 5.10 percebe-se que o universo de discurso proposto para as variáveis de entrada *TxDens* e *ErroTrt* representam um faixa mais estreita que a utilizada no ensaio de controle Fuzzy MISO do tipo Mamdani. Isto se deve a “generalização” efetuada pela etapa de “otimização” dos parâmetros do controlador Sugeno. Por exemplo, percebe-se em ensaios anteriores que no final da reação, quando a variação de densidade está em torno de 30 Kg/m^3 , já havia a necessidade de atuações com valores mais altos de temperatura, assim a função de pertinência GP da variável *TxDens* correspondeu a uma faixa menor.

Neste tipo de controlador a variável de saída não é *fuzzificada*, uma vez que para o controle tipo Takagi Sugeno, as regras de saída não são heurísticas e sim, matemáticas. Os parâmetros da variável de saída Sugeno empregados para este controlador são apresentados na Tabela 5.6.

TABELA 5.6. Parâmetros adotados para o controlador *Fuzzy S MISO*.

Função	Parâmetros Sugeno	Função	Parâmetros Sugeno
1	$f_1 = [26,64 \ -316,4 \ -261,5]$	14	$f_{14} = [56,07 \ 98,81 \ -208,1]$
2	$f_2 = [28,34 \ 157,8 \ 368,2]$	15	$f_{15} = [30,73 \ 103,4 \ -457,7]$
3	$f_3 = [-4,641 \ 212 \ 177,5]$	16	$f_{16} = [-12,26 \ 110,9 \ 147,2]$
4	$f_4 = [54,74 \ 214,9 \ 167]$	17	$f_{17} = [12,23 \ -69,54 \ -221]$
5	$f_5 = [29,85 \ 231,2 \ -23,65]$	18	$f_{18} = [-6,872 \ -47,78 \ 11,5]$
6	$f_6 = [27,4 \ 333 \ 415,4]$	19	$f_{19} = [55,91 \ -45,13 \ -261]$
7	$f_7 = [20,63 \ -64,08 \ -137,9]$	20	$f_{20} = [30,16 \ -44,34 \ -477]$
8	$f_8 = [-4,668 \ -110,4 \ 143,6]$	21	$f_{21} = [6,456 + 189,5 \ 68,17]$
9	$f_9 = [55,5 \ -110,3 \ -226,2]$	22	$f_{22} = [-9,506 \ 127,9 \ -5,08]$
10	$f_{10} = [30,29 \ -123,1 \ 32,19]$	23	$f_{23} = [-7,255 \ 102,1 \ 427,1]$
11	$f_{11} = [43,59 \ 111 \ -413,9]$	24	$f_{24} = [55,57 \ 98,93 \ -180,5]$
12	$f_{12} = [11,29 \ 109 \ 48,58]$	25	$f_{25} = [6,033 + 122,6 + 311,9]$
13	$f_{13} = [-5,612 \ 104,9 \ 255,3]$		

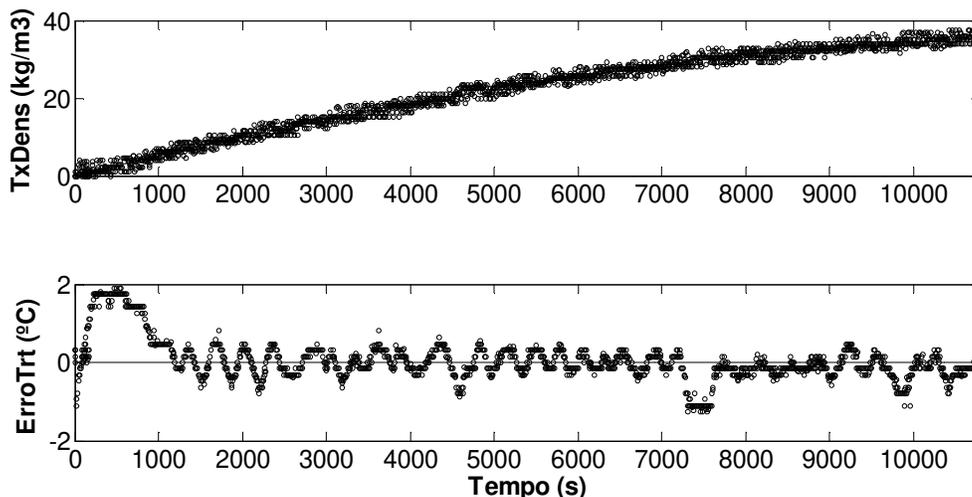
O controlador *Fuzzy S MISO*, utilizando modelo Sugeno, proporcionava valores de saída próximos aos valores fornecidos pelo controlador *Fuzzy MISO* utilizando modelo Mamdani.

Por exemplo, quando a variável de entrada *Txdens* assumia o valor de 18,2 kg/m e o erro assumia valor de -0,096°C, a saída do controlador Mamdani (*Fuzzy MISO*) enviava um valor de 142°C, como *set-point* da temperatura do tanque de aquecimento. No caso do controlador “*Fuzzy S MISO*”, baseado em modelo Sugeno, era enviado como saída um valor de 143,4°C.

Numa fase final da reação de polimerização, quando a variável T_{xDens} assume valor de 30 kg/m^3 , e erro da temperatura do reator de, por exemplo, $0,3^\circ\text{C}$ a $-0,5^\circ\text{C}$, o controlador Fuzzy MISO do tipo Mamdani envia um valor de saída de 153°C . O controlador tipo Sugeno para um erro de $-0,3^\circ$ envia valor de 151°C ; para um erro de $-0,4^\circ\text{C}$ envia valor de saída de 152°C ; e para um erro de $-0,5^\circ\text{C}$ envia valor de saída de 153°C . Assim, diante de simulações nos valores de saída dos controladores pode-se perceber que os dois controladores apresentam comportamentos semelhantes de saída, apesar de pequenas variações.

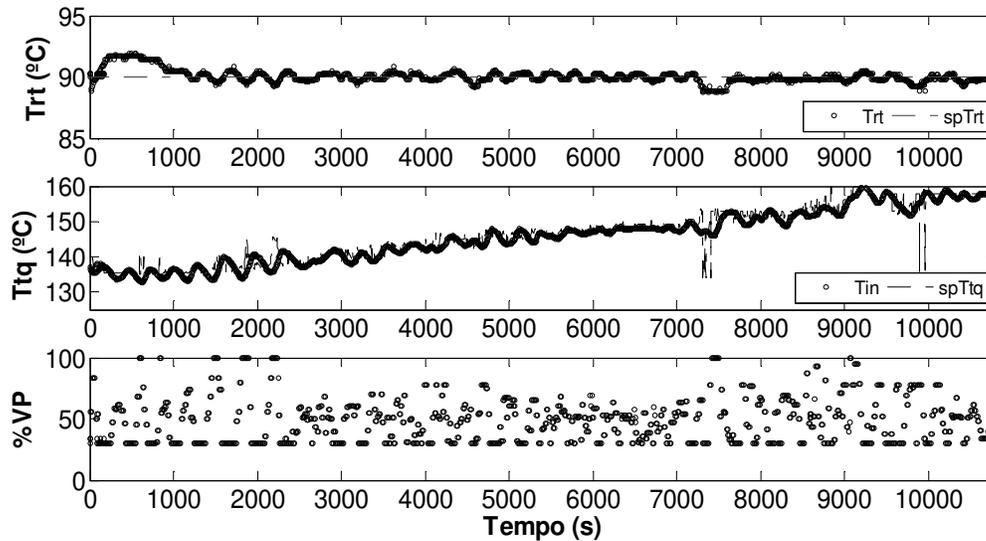
5.4.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR “FUZZY S MISO”

As variáveis de entrada deste controlador foram as mesmas utilizadas no ensaio utilizando controlador baseado em modelo Mamdani, cujos comportamentos são mostrados na Figura 5.12. E na Figura 5.13, os das variáveis controlada, de saída do controlador e manipulada.



$Erro_{RT}$ = diferença entre a temperatura interna do reator e o *set-point* estabelecido; T_{xDens} = variação de densidade do fluido polimérico.

FIGURA 5.12. Comportamento das variáveis de entrada do controlador denominado *Fuzzy S MISO*, ao longo da reação de polimerização.



T_{RT} = temperatura interna do reator; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento;

FIGURA 5.13. Comportamento das variáveis controlada e manipulada utilizando controlador *Fuzzy S MISO* na malha de processo.

Observa-se um maior desvio na variável controlada neste ensaio. Os valores de saída deste controlador foram mais oscilatórios, causando maior variação na temperatura do tanque e conseqüente na temperatura do reator. Paralelamente a isso, observa-se uma maior variação nas atuações da variável manipulada (Figura 5.13).

As oscilações da variável de saída do controlador *fuzzy* foram atribuídas à variabilidade dos dados provenientes do densímetro, a qual possui maior influencia neste controlador devido a mais ampla faixa do universo de discurso das funções de pertinência ajustadas pelo Anfis.

Ainda assim, este controlador foi implementado com sucesso, uma vez que proporcionou valores de saída que proporcionaram a manutenção da temperatura do reator. Com estes ensaios foi possível observar a atuação de dois controladores, utilizando iguais variáveis de entrada, para um sistema tipo Mamdani e tipo Sugeno.

Nota-se ainda que o tempo de subida e *overshoot* (Tabela 5.7) usando este controlador foram maiores que o do ensaio anterior (Tabela 5.6), o que pode ser atribuído a saída do controlador *fuzzy* na etapa inicial, que está ligada a variação de densidade.

Analisando as Figuras 5.6 e 5.12, pode-se observar que, no início do processo, os valores da temperatura do fluido térmico estão menos oscilatórios e um pouco menores no ensaio do *fuzzy* Mamdani, que no ensaio do *fuzzy* Sugeno. Ao observar em paralelo as Figuras 5.7 e 5.13, percebe-se que na verdade esta variação da temperatura do fluido térmico foi influenciada pelo comportamento da variação de densidade, onde no ensaio do controlador *fuzzy* Mamdani, esta variação foi mais sutil até aproximadamente os 3000s iniciais. Assim a saída *fuzzy* Sugeno forneceu valores de *set-point* um pouco maiores, o que fez com que houvesse este aumento no tempo necessário para a variável controlada voltar ao seu estado inicial. Na Tabela 5.7 são apresentados os parâmetros de desempenho para este controlador.

TABELA 5.7. Parâmetros de desempenho do controlador *Fuzzy S MISO*

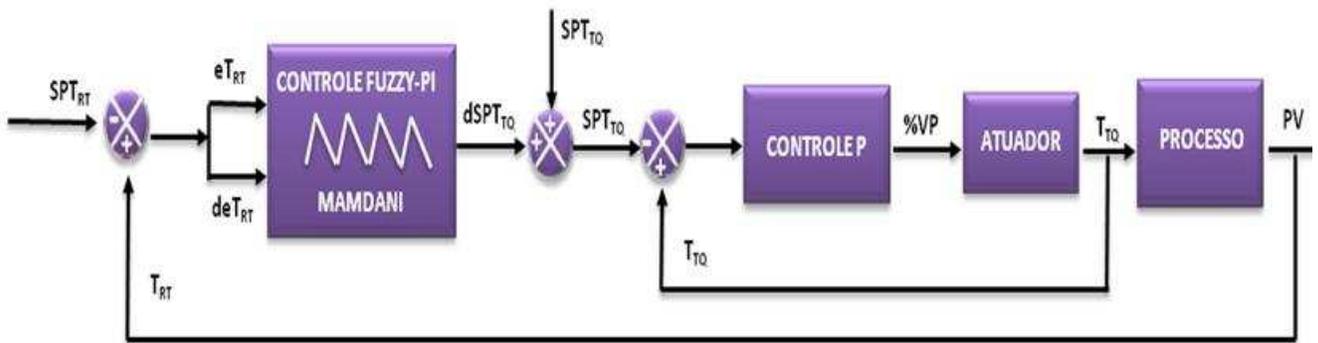
Parâmetros de Desempenho	
Controlador	<i>Fuzzy TKS MISO</i>
ISE	492,2
IAE	654,9
ITAE	2,787.10 ⁶
ITSE	11,8.10 ⁵
<i>Overshoot</i> (°C)	1,75
Tempo de subida (s)	1280
Tempo de estabilização (s)	1280
Consumo de energia elétrica (kWh)	2,85

5.5. CONTROLADOR “FUZZY PI” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE SISO/INCREMENTAL)

5.5.1. ESTRUTURA DO CONTROLADOR “FUZZY PI”

Para o desenvolvimento do controlador *Fuzzy-PI* incremental, foram utilizadas como variáveis de entrada o erro e a variação do erro da temperatura interna do reator de polimerização, definidas como eT_{RT} e deT_{RT} . A variação da temperatura do tanque contendo o fluido térmico que circula na camisa do reator, foi utilizada como variável de saída do controle *fuzzy*, definida como $dSPT_{TQ}$. A variável de saída do controle *fuzzy* se constituiu do *set-point* do controlador escravo.

Na Figura 5.14, é apresentada a estrutura para o controlador *Fuzzy-PI* utilizado neste esquema de controle.



SPT_{RT} = *set-point* da temperatura do reator; eT_{RT} = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; deT_{RT} = variação do erro relacionado à temperatura do reator; T_{RT} = temperatura do reator; $TxDens$ = variação da densidade do fluido polimérico; $dSPT_{TQ}$ = valor de saída incremental para o *set-point* da temperatura do fluido térmico; SPT_{TQ} = *set-point* da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento; PV = variável controlada do processo = T_{RT} .

FIGURA 5.14. Estrutura do controlador *Fuzzy-PI*, em cascata.

Uma vez determinadas as entradas do controlador *fuzzy*, esses valores foram *fuzzificados*, ou seja, foi mensurado o grau de pertinência de cada valor de entrada para cada função de pertinência (*membership*). Estabelecida uma lei de controle essas entradas foram processadas fornecendo um valor de ação de controle (aumento de T_{tq}).

A Figura 5.15 ilustra o início do desenvolvimento de um controlador *fuzzy* - PI, no toolbox *fis* do programa MATLAB.

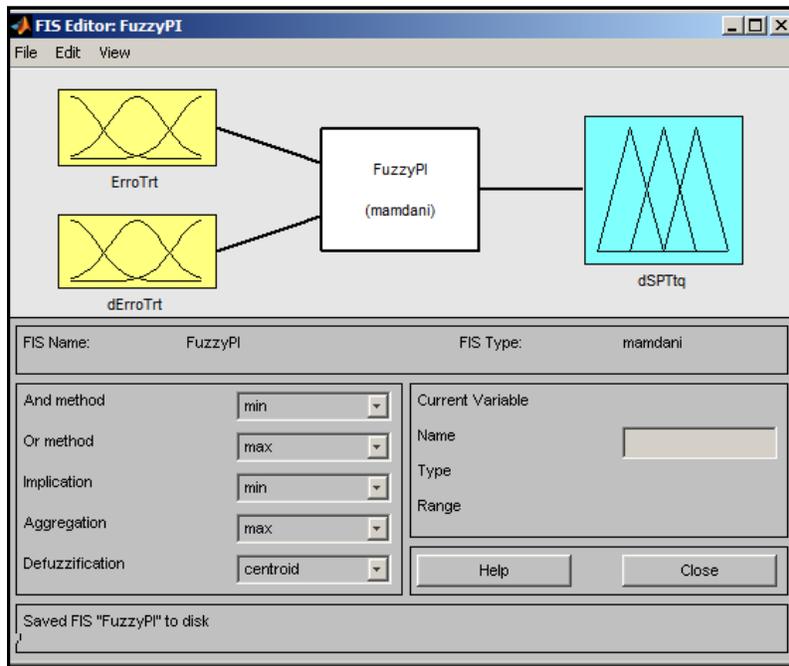


FIGURA 5.15. Desenvolvimento do controlador *Fuzzy*-PI no MATLAB 7.0.1.

5.5.2. PARÂMETROS DE SINTONIA DO CONTROLADOR “FUZZY PI”

Na Figura 5.16 são apresentadas as estruturas das funções de pertinência atribuídas ao controlador *Fuzzy* PI para as entradas erro (ErroTrt) e variação do erro (dErroTrt), e para a variável de saída, variação da temperatura do fluido

térmico (DspTtq). Na Tabela 5.8 (b) encontram-se as regras *fuzzy* que nortearam as ações do controlador *fuzzy*-PI, as quais praticamente permaneceram inalteradas quanto ao desenvolvimento inicial das regras para o controlador incremental (Tabela 5.8 a).

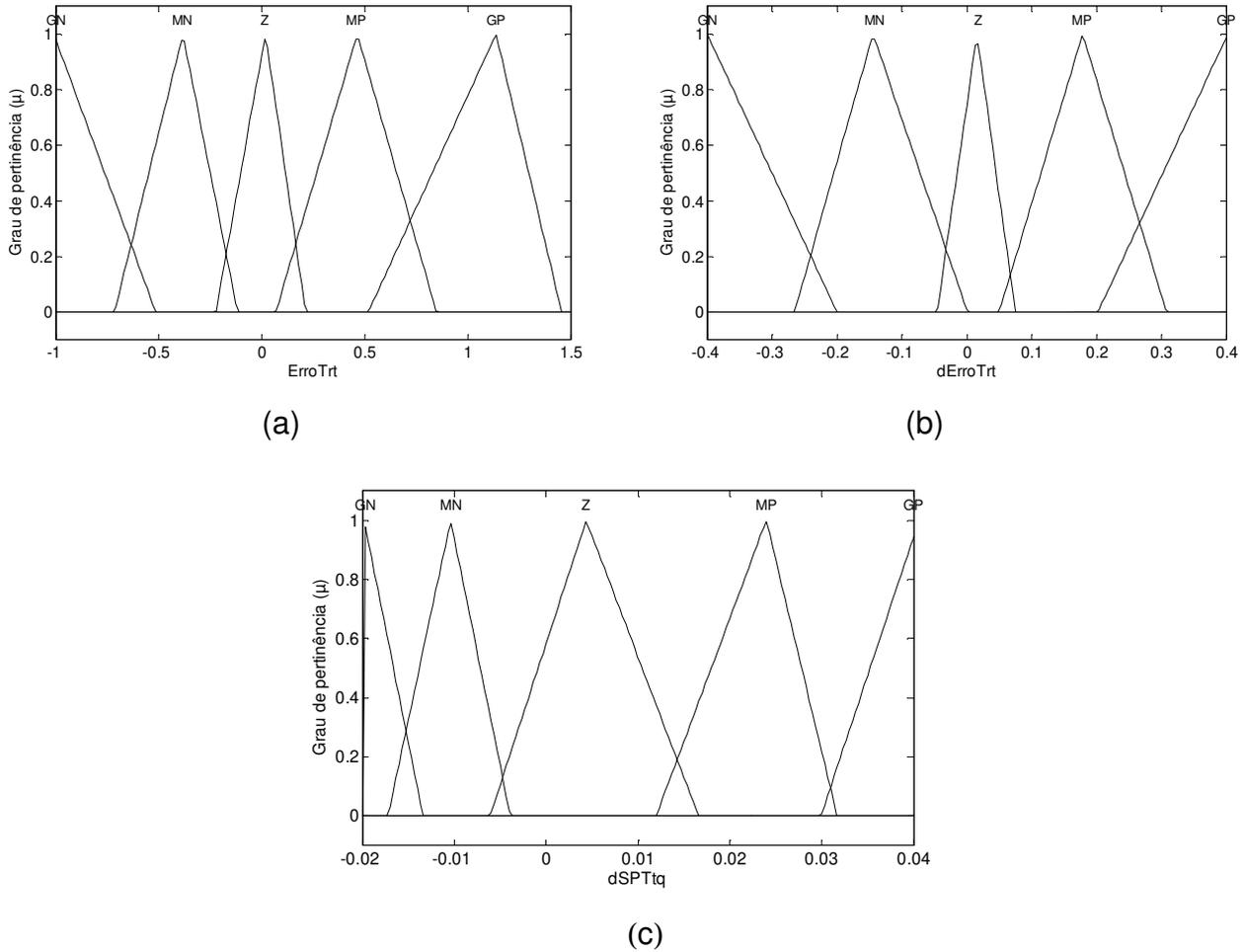


FIGURA 5.16. Estruturas das funções de pertinência para as variáveis (a) ErroTrt (b) dErroTrt e (c) DspTtq empregadas no desenvolvimento do controlador *fuzzy* PI.

No caso deste controlador a variável erroTrt possui maior potencial de influência para o cálculo do valor de saída. Assim as disposições das funções de pertinência e o universo de discurso proposto para a variável de entrada ErroTrt (Figura 5.16) foi de [-1, 1,5], faixa menor que a proposta por exemplo no

controlador *Fuzzy-MISO* anteriormente projetado [-1,5 a 1,5], a fim de se adequarem as regras que foram criadas anteriormente e as não linearidades do processo. Esta modificação foi realizada de acordo com observações da influência desta variável sobre o comportamento do valor de set point para a temperatura do tanque.

A faixa positiva para o erro foi maior que a negativa a fim de evitar atuações de redução no *set-point* do tanque de forma excessiva, o que provocaria grande queda na temperatura do fluido térmico que circulava na camisa do reator, e consequentemente provocaria também a queda da temperatura deste. Este comportamento seria observado quando da aplicação das regra: “*Se ErroTrt é GP e ΔErroTrt é GP então dSPT_{tq} é GN.*”

TABELA 5.8. Matriz bidimensional de base de regras adotadas para o controlador *Fuzzy-PI*.

(a)						(b)					
Δ ERRO	ERRO					Δ ERRO	ERRO				
	GN	MN	ZR	MP	GP		GN	MN	ZR	MP	GP
GN	GP	GP	GP	MP	Z	GN	GP	GP	GP	MP	<u>MN</u>
MN	GP	GP	MP	Z	MN	MN	GP	GP	MP	Z	MN
ZR	GP	MP	Z	MN	GN	ZR	GP	MP	Z	MN	GN
MP	MP	Z	MN	GN	GN	MP	MP	Z	MN	GN	GN
GP	Z	MN	GN	GN	GN	GP	Z	MN	GN	GN	GN

Observou-se que quando existia a queda na temperatura do reator, mesmo quando o controlador solicitava uma ação de aquecimento havia um “delay” na resposta da variável controlada, ou seja, mesmo com valores mais altos de saída do controlador , provocando aumento na atuação da variável manipulada, havia um tempo de atraso na resposta da variável controlada. Este fato propiciava

uma queda maior na temperatura do reator, e para evitar isso, diminuei-se a faixa negativa do universo de discurso, de forma a antecipar a ação do controlador facilitando a manutenção desta variável. Devido a mudanças nesta faixa praticamente não foram necessárias mudanças na base de regras inicialmente construída para este controlador.

Observando, na Tabela 5.8, a regra “*SE ErrpTrt é Z e dErroTrt é GN Então DspTtq é GP*”: neste caso, quando no momento não existia desvio da temperatura do reator, todavia esta temperatura apresentava uma queda, era necessário uma grande atuação positiva na variável de saída. Quanto mais cedo esta redução de Trt (temperatura do reator) fosse informada, mais adequados seriam os valores de saída fornecidos pelo controlador fuzzy, possibilitando maior eficiência na atuação da variável manipulada do processo.

Em torno desta mesma idéia, foi ajustado o universo de discurso da variável de saída $dSPT_{tq}$ [-0,02, 0,04]. Observa-se na Figura 5.16c, que a função de pertinência GP apresenta praticamente o dobro da faixa GN. A intenção foi de aumentar o potencial de aquecimento da saída para o processo, uma vez que o resfriamento era mais favorecido devido a “perturbações” inerentes provocadas pelo sistema experimental. Estas alterações foram baseadas no conhecimento do comportamento das variáveis do processo no sistema experimental utilizado. Ao longo da reação, era mais difícil proporcionar o aumento que a redução da temperatura do reator, pois mesmo a reação sendo exotérmica, era necessário o fornecimento de energia para o sistema, uma vez que a linha de circulação do fluido polimérico possuía potencial de retirada de calor do próprio sistema, o que tendenciava a provocar oscilações na variável controlada. Devido a isso, a parte positiva do universo de discurso da variável de saída ($dSPT_{tq}$) é maior que a parte negativa (Figura 5.16 c).

Observando a Figura 5.16 a, percebe-se também que o conjunto suporte da função de pertinência Z foi restringido (com relação a disposição desta função no controlador posicional) para a variável de entrada ErroTrt deste controlador; e a função de pertinência Z da variável de saída foi levemente deslocada para o eixo

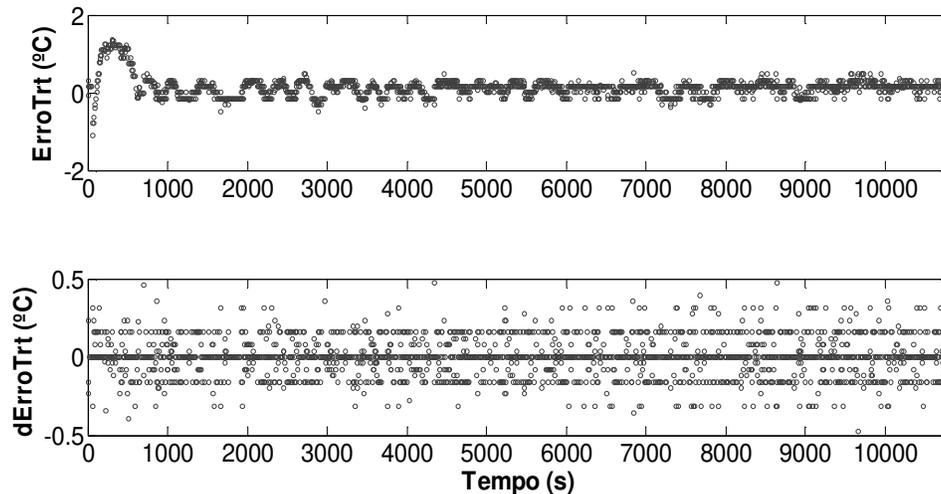
positivo. Estas disposições foram adotadas a fim de garantir pequenas variações no valor de *set-point* de temperatura do tanque quando a mesma se encontrava num valor que proporcionasse mínimos desvios na variável controlada, assim o valor de sp_{Ttq} permaneceria praticamente inalterado nesta condição. Entretanto, mesmo nesta condição desejada induzia-se um mínimo aumento na saída do controlador *fuzzy*, uma vez que, como mencionado anteriormente, a medida que a reação se processava era mais provável de se observar uma redução na temperatura do reator.

Devido ao que foi comentado sobre disposição na função de pertinência *Z*, da variável de saída, foi necessário alterar a base de regra inicialmente estabelecida como: *SE ErrpTrt é GP e dErroTrt é GN Então DspTtq é Z* (Tabela 5.8 a). Como a função de pertinência estava com um pequeno deslocamento para o eixo positivo, esta regra foi alterada para: *SE ErrpTrt é GP e dErroTrt é GN Então DspTtq é MN*, o que implica dizer que se a temperatura do reator esta acima do valor desejado, mas está diminuindo, a ação do controlador *fuzzy* deve ser “médio-negativa”, pois se a ação fosse *Z*, a saída fuzzy não iria permitir que a redução da temperatura continuasse a ocorrer, provocando valores de *set-point* na saída maiores que o adequado e impedindo que *ErroTrt* voltasse para valores próximos a zero, podendo ocasionar então um *off-set* na resposta.

5.5.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR “FUZZY PI”

O controlador *Fuzzy-PI* foi desenvolvido utilizando como variáveis de entrada a variação da temperatura do reator, erro, e a variação deste erro, a qual indicaria a tendência da temperatura, em aumentar ou diminuir, sendo assim um indicativo sobre as ações da variável de saída do controlador.

O comportamento das variáveis de entrada neste controlador, e as variáveis de saída, controlada e manipulada, podem ser observados nas Figuras 5.17 e 5.18, respectivamente.

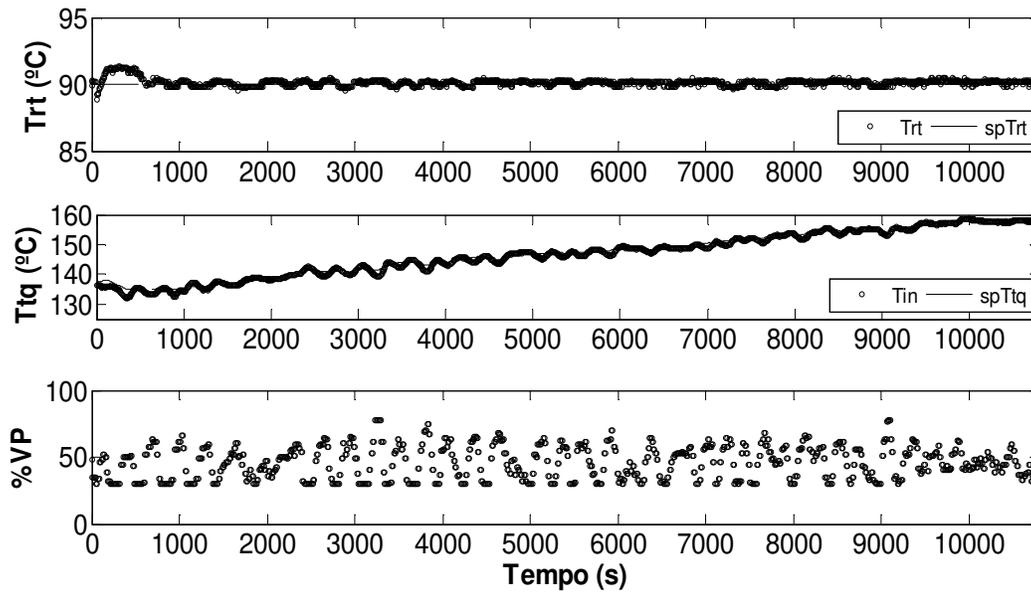


ErroT_{RT} = diferença entre a temperatura interna do reator e o *set-point* estabelecido; $d\text{ErroT}_{\text{RT}}$ = variação do erro relacionado à temperatura do reator.

FIGURA 5.17. Comportamento das variáveis de entrada do controlador *Fuzzy-PI*, ao longo da reação de polimerização.

Conforme Figura 5.18, observa-se que as curvas de *set-point* e de temperatura do tanque se sobrepõem. Este fato deve-se a valores de saída mais suave deste controlador, que contribuíram para menores oscilações na variável manipulada. A variável controlada se manteve praticamente constante durante todo o processo.

Como o controle *fuzzy-PI* apresenta apenas funções de pertinência incrementais, uma ação mais suave nos valores de saída foram obtidos, o que viabilizou uma ação de controle mais satisfatória.



T_{RT} = temperatura do reator; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento.

FIGURA 5.18. Comportamento das variáveis controlada e manipulada utilizando controlador *Fuzzy-PI* na malha de processo.

Os parâmetros de desempenho para este controlador são apresentados na Tabela 5.9.

Através da análise do comportamento das variáveis controlada e manipulada, bem como os índices de desempenho apresentados na Tabela 5.9, pode ser constatada a eficiência do controlador *fuzzy-PI* na malha de controle implementada.

TABELA 5.9. Parâmetros de desempenho do controlador *Fuzzy PI SISO*.

Parâmetros de Desempenho	
Controlador	<i>Fuzzy PI SISO</i>
ISE	180
IAE	423,5
ITAE	$1,854 \cdot 10^6$
ITSE	$4,412 \cdot 10^5$
<i>Overshoot</i> (°C)	1,37
Tempo de subida (s)	700
Tempo de estabilização (s)	700
Consumo de energia elétrica (kWh)	2,63

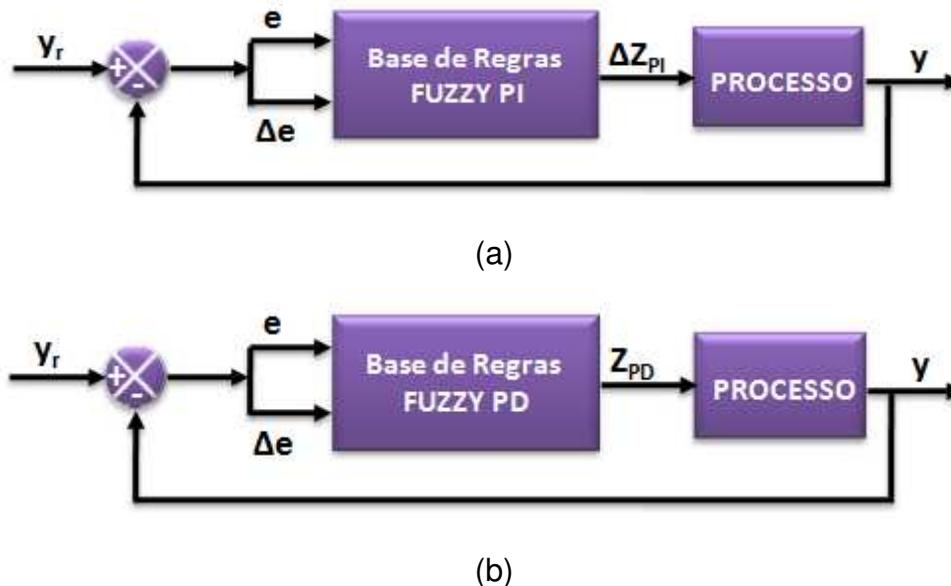
5.6. CONTROLADOR “FUZZY PID” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE SISO/POSICIONAL)

5.6.1. ESTRUTURA DO CONTROLADOR “FUZZY PID”

O algoritmo *fuzzy*-PID é constituído de três entradas: erro, variação do erro e taxa da variação do erro. No entanto, esta configuração necessitaria de um conhecimento subjetivo mais especializado quanto à definição da base de regras ao se utilizar o conceito da taxa de variação do erro, e ainda apresentaria um esforço computacional adicional para a inferência de um maior número de entradas (HARRIS et al., 1993; ZIMMERMANN, 1991).

Para contornar este problema, foi implementado neste trabalho uma configuração híbrida proposta por Li e Gatland, 1996. O projeto do controlador *fuzzy*-PID consistiu da ação conjunta de um controlador *fuzzy*-PI incremental atuando em paralelo com um controlador *fuzzy*-PD posicional, utilizando como entradas o erro e a variação do erro.

Os controladores *fuzzy*-PI e *fuzzy*-PD foram implementados separadamente. Nas Figuras 5.19 a e b é apresentada a estrutura dos dois controladores em paralelo:



Y_r = valor de referência do controlador; e = erro; Δe = variação do erro; Z_{PD} = saída posicional do controlador do controlador Fuzzy-PD; Z_{PI} = saída posicional do controlador do controlador Fuzzy-PI; Y = valor de saída do processo.

FIGURA 5.19. Estrutura de controladores (a) *Fuzzy*-PI incremental e (b) *Fuzzy*-PD posicional com duas entradas.

A implementação de um controlador *Fuzzy*-PID utilizando a estrutura híbrida proposta por Li e Galtland (1996), onde a ação de controle é definida pelas

saídas do controlador *Fuzzy-PI* incremental e do *Fuzzy-PD* posicional, é apresentada na Equação 5.1:

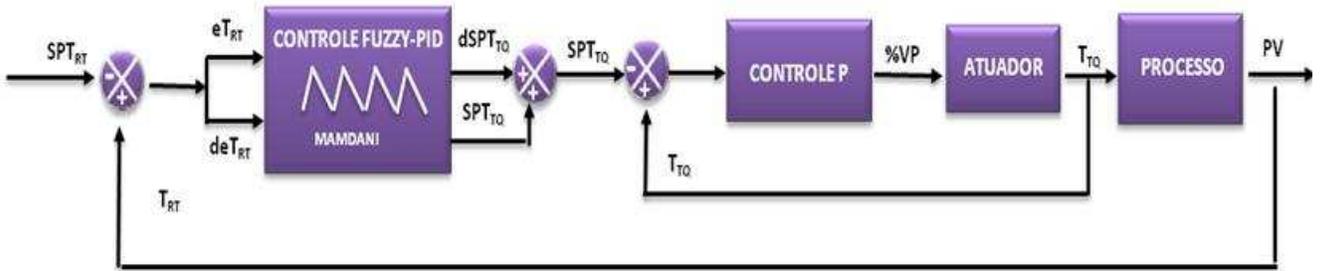
$$Z_K^{PID} = Z_K^{PI} + Z_K^{PD} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

O controlador *Fuzzy-PID* apresenta uma base de regras para o controlador *Fuzzy-PI* e para o controlador *Fuzzy-PD*, utilizando a composição das ações das duas saídas do controlador. A estrutura híbrida proposta e implementada é apresentada na Figura 5.20.



FIGURA 5.20. Estrutura híbrida do controlador *Fuzzy-PID*.

Na Figura 5.21 é apresentado um esquema que mostra a utilização do controlador *Fuzzy-PID* neste trabalho.



SPT_{RT} = *set-point* da temperatura do reator; eT_{RT} = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; deT_{RT} = variação do erro relacionado à temperatura do reator; T_{RT} = temperatura do reator; $dSPT_{TQ}$ = valor de saída incremental para o *set-point* da temperatura do fluido térmico; SPT_{TQ} = *set-point* da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento; PV = variável controlada do processo = T_{RT} .

FIGURA 5.21. Estrutura do controlador *Fuzzy-PID*, em cascata.

A ação do controlador *Fuzzy-PID* consistiu da combinação das ações independentes de um controlador *Fuzzy-PI* e um *Fuzzy-PD*, com 25 regras cada um. O controlador *Fuzzy-PI* utilizado foi o do controlador anteriormente sintonizado e implementado. Assim, nesta etapa foi necessário sintonizar o *Fuzzy-PD* que seria combinado ao *Fuzzy-PI* de forma a propiciar valores mais adequados de spT_{tq} .

5.6.2. PARÂMETROS DE SINTONIA DO CONTROLADOR “FUZZY PID”

Nas Tabelas 5.10b e 5.11b encontram-se as regras que dirigiram as ações do controlador *Fuzzy-PID*, sendo constituída da junção das regras *Fuzzy-PD* e *Fuzzy-PI*, a partir das relações de entrada dos respectivos controladores *fuzzy*. As Tabelas 5.10a e 5.11a representam as bases de regras desenvolvidas inicialmente, antes da finalização da sintonia dos controladores *Fuzzy-PD* e *Fuzzy-PI*, respectivamente.

TABELA 5.10. Matriz bidimensional de base de regras adotadas para o controlador *Fuzzy*-PD, que constitui o *Fuzzy*-PID.

		(a)					(b)					
ΔERRO	ERRO					ΔERRO	ERRO					
	GN	MN	ZR	MP	GP		GN	MN	ZR	MP	GP	
GN	GP	GP	MP	MN	MN	GN	GP	GP	<u>Z</u>	MN	MN	
MN	GP	GP	MP	MN	MN	MN	GP	GP	MP	MN	MN	
ZR	GP	MP	Z	MN	GN	ZR	GP	MP	Z	MN	<u>MN</u>	
MP	MP	MP	MN	GN	GN	MP	MP	MP	MN	GN	GN	
GP	MP	MP	MN	GN	GN	GP	MP	<u>Z</u>	MN	GN	GN	

TABELA 5.11. Matriz bidimensional de base de regras adotadas para o controlador *Fuzzy*-PI, que constitui o *Fuzzy*-PID.

		(a)					(b)					
ΔERRO	ERRO					ΔERRO	ERRO					
	GN	MN	ZR	MP	GP		GN	MN	ZR	MP	GP	
GN	GP	GP	GP	MP	Z	GN	GP	GP	GP	MP	<u>MN</u>	
MN	GP	GP	MP	Z	MN	MN	GP	GP	MP	Z	MN	
ZR	GP	MP	Z	MN	GN	ZR	GP	MP	Z	MN	GN	
MP	MP	Z	MN	GN	GN	MP	MP	Z	MN	GN	GN	
GP	Z	MN	GN	GN	GN	GP	Z	MN	GN	GN	GN	

Nas Figuras 5.22 (a e b) e 5.22 (c e d) são apresentadas as estruturas das funções de pertinência de entrada para os controladores *Fuzzy*-PI e *Fuzzy*-PD, respectivamente. As disposições das funções de pertinência das variáveis de saída destes controladores encontram-se na Figura 5.22 (e e f).

De acordo com a Figura 5.22f pode-se perceber faixas de funções de pertinência bastante irregulares. Isto ocorreu na etapa de sintonia do controlador

Fuzzy-PD, uma vez que devido ao comportamento não linear do sistema, foi difícil embutir para o controlador o conhecimento sobre as faixas de atuação de $spTtq$, utilizando com variáveis de entrada apenas valores referentes ao erro, uma vez que trata-se de um controle posicional.

Iniciou-se primeiro a sintonia da faixa de valores que a função de pertinência *Z*, da variável de saída, iria assumir. No início da reação era válida a regra: “*SE ErroTrt é Z e dErroTrt é Z Então spTtq é Z*”. Assim, o valor de *set-point* do tanque ($spTtq$) deveria ser igual ao valor da temperatura do tanque (Ttq) no início da reação (condição operacional), valor o qual foi estabelecido como valor mínimo de $spTtq$. Para permitir uma atuação, ainda que mínima mas não nula das funções *GN* e *MN*, foi selecionada uma faixa de valores para *Z* próxima ao valor de Ttq inicial.

A dificuldade de sintonia neste tipo de controlador encontrava-se justamente no fato de que durante a reação de polimerização, os valores de erro e derro variavam entre *Z*, *MP* e *MN*, no entanto os valores de atuações para $spTtq$ deveriam ser diferentes a depender do momento em que estas variações aconteciam, se no início ou fim da reação. Analisando por exemplo a mesma regra que é válida para o início da reação: “*SE ErroTrt é Z e dErroTrt é Z Então spTtq é Z*”; esta regra não se aplicaria para o final da reação onde há a necessidade de valores maiores para a variável Ttq . Desta forma, os valores de saída posicional para o controlador *Fuzzy-PD* tenderiam a fornecer valores mais oscilatórios de $spTtq$, o que poderia ser amenizado com a ação combinada de um *Fuzzy-PI*.

Observando a Figura 5.22f, percebe-se que foram utilizados conjuntos suporte para as funções de pertinência *MP* e *GP* com valores menores que as utilizadas no controle posicional *MISO* (Figura 5.7c), uma vez deveria ser ponderada a ação incremental do *Fuzzy-PI*, evitando valores muito altos para a entrada $spTtq$ na malha de controle secundária.

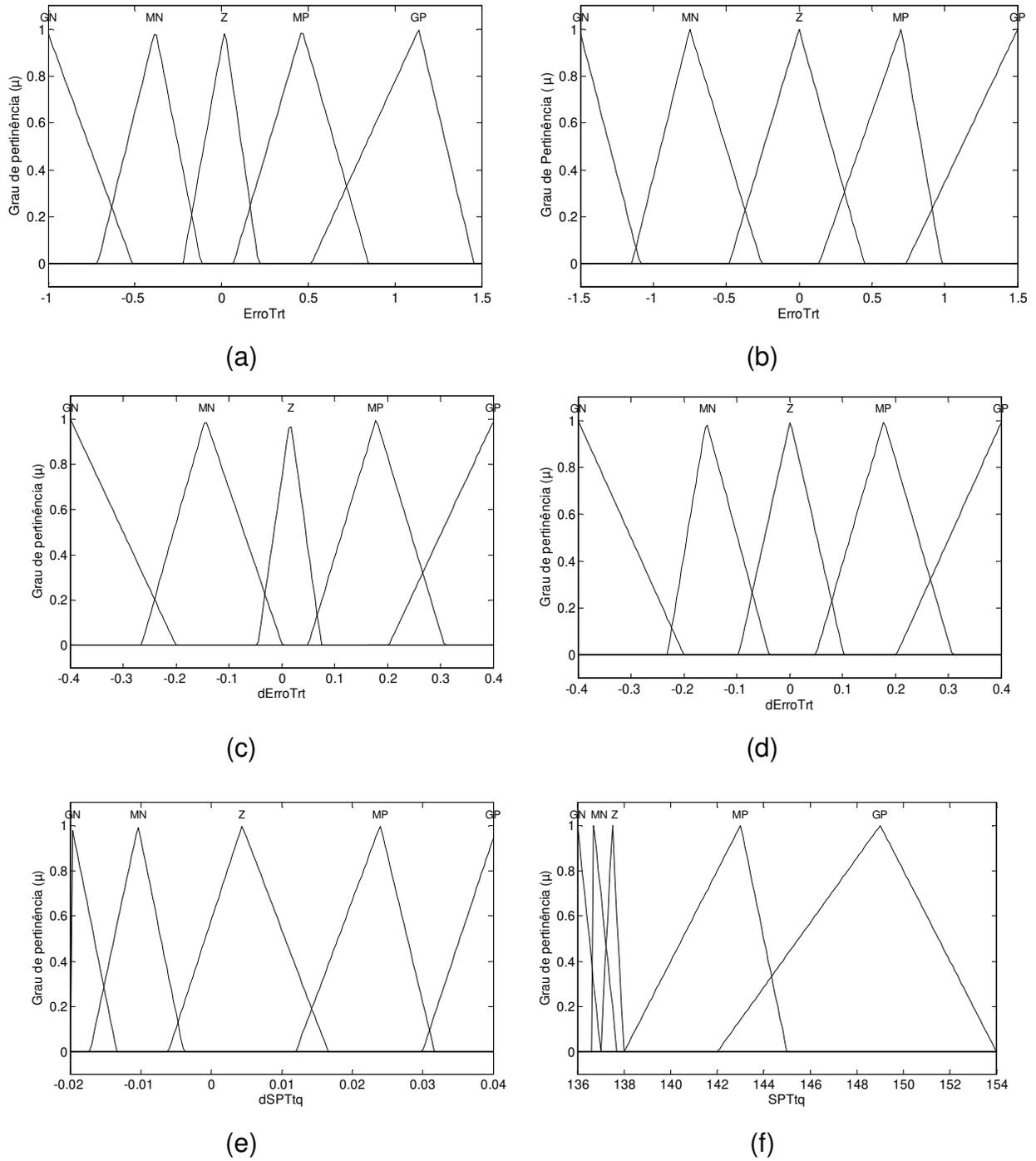
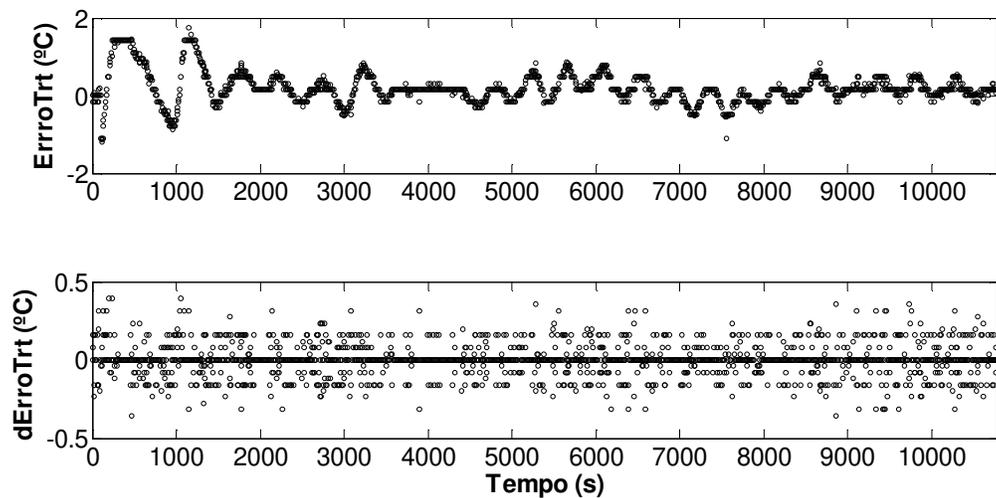


FIGURA 5.22. Estruturas das funções de pertinência para as variáveis (a) ErroTrt (b) dErroTrt e (c) dSPTtq empregadas no desenvolvimento do controlador *Fuzzy-PID (Fuzzy-PI+Fuzzy-PD)*.

Com base na observação feita no parágrafo anterior, algumas regras relativas as saídas do controlador *Fuzzy*-PD (Tabela 5.10b), foram alteradas a fim de diminuir estas oscilações nos valores de saída do controlador *Fuzzy*.

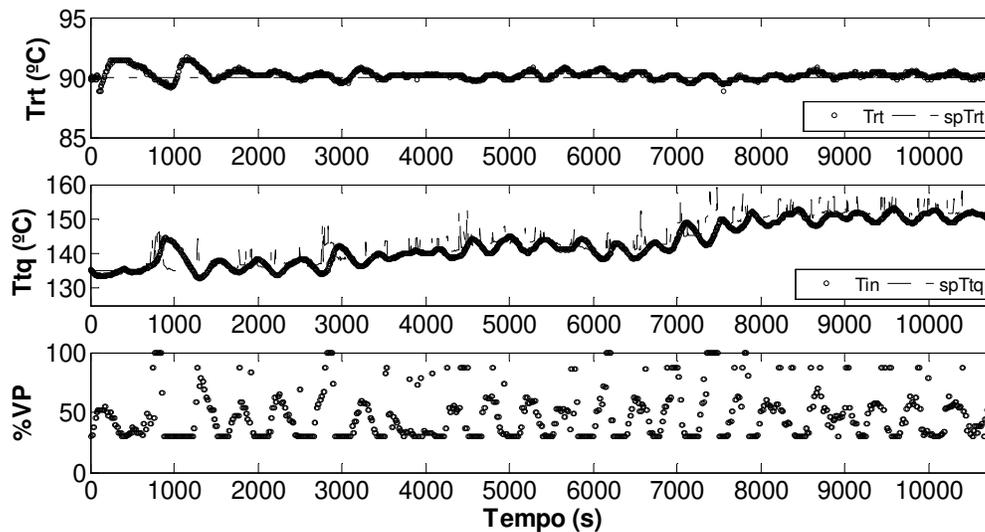
5.6.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR “FUZZY PID”

Partindo da atuação do controlador *Fuzzy*-PI foi desenvolvido um controlador PD, e a ação conjunta das saída posicionais e incrementais foi empregada para a implementação do controlador. Os comportamentos das variáveis de entrada do controlador *Fuzzy*-PID, bem como sua saída (ação conjunta das saídas posicional e incremental) e o perfil das variáveis manipulada e controlada podem ser observados nas Figuras 5.23 e 5.24.



Erro_{RT} = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; $d\text{Erro}_{\text{RT}}$ = variação do erro relacionado à temperatura do reator.

FIGURA 5.23. Comportamento das variáveis de entrada do controlador *Fuzzy*-PID, ao longo da reação de polimerização.



T_{RT} = temperatura do reator; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento.

FIGURA 5.24. Comportamento das variáveis controlada e manipulada utilizando controlador *Fuzzy-PID*, na malha de processo.

Observa-se um comportamento mais oscilatório na saída do controlador *Fuzzy-PID*, quando comparado ao controlador *Fuzzy-PI*. Em aproximadamente 1000s nota-se uma elevação na temperatura do reator, podendo ser atribuída a uma ação brusca na saída do controlador *fuzzy*, com fornecimento de valores inadequados de *set-point* para a malha do variador de potência. Estas oscilações (Figura 5.23) são atribuídas às ações do controlador *Fuzzy-PD*, as quais fizeram com que houvesse um aumento no tempo de estabilização da variável controlada, conforme pode ser observado na Tabela 5.12, na qual estão apresentados os parâmetros de desempenho obtidos para esta estratégia de controle.

Seriam necessários ajustes nas funções de pertinência do controlador posicional, e ainda nas do controlador incremental para melhorar sua atuação conjunta, na tentativa de reduzir as instabilidades apresentadas. Entretanto, a utilização apenas do controlador *Fuzzy-PI* neste sistema seria o mais adequado, uma vez que consegue fazer com que a saída do controlador se adeque as não

linearidades que ocorrem no decorrer do processo, de forma gradativa, contribuindo para menores oscilações no sistema.

TABELA 5.12. Parâmetros de desempenho do controlador *Fuzzy*-PID.

Parâmetros de Desempenho	
Controlador	<i>Fuzzy</i>-PID
ISE	407,2
IAE	647,3
ITAE	2,567.10 ⁶
ITSE	10,542.10 ⁵
<i>Overshoot</i> (°C)	1,73
Tempo de subida (s)	815
Tempo de estabilização (s)	1535
Consumo de energia elétrica (kWh)	2,91

5.7. CONTROLADOR “FUZZY PI SIMO” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE SIMO/INCREMENTAL E POSICIONAL)

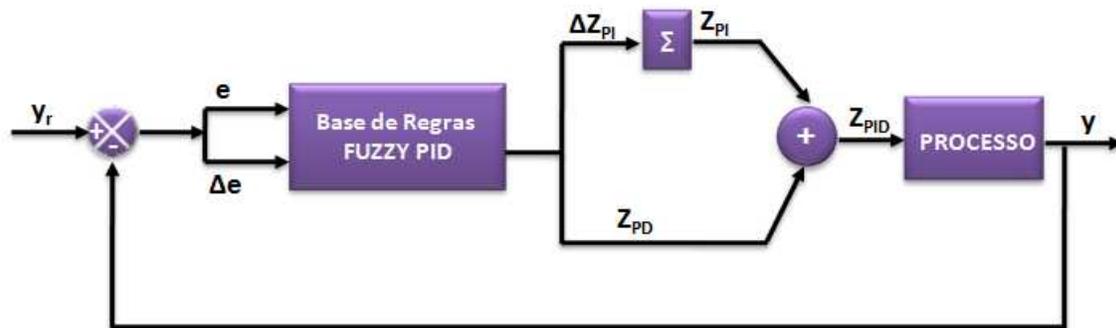
5.7.1. ESTRUTURA DO CONTROLADOR “FUZZY PI SIMO”

Neste trabalho foi desenvolvido um controlador *fuzzy*, do tipo *SIMO*, que utilizou-se de informações de uma mesma variável, (variação da variável controlada, *Trt*), para atuar em duas variáveis manipuladas simultaneamente. As

variáveis de saída deste controlador estavam relacionadas a temperatura e a vazão do fluido que circula na camisa do reator, respectivamente. Este controlador possuía uma saída incremental e uma saída posicional, independentes.

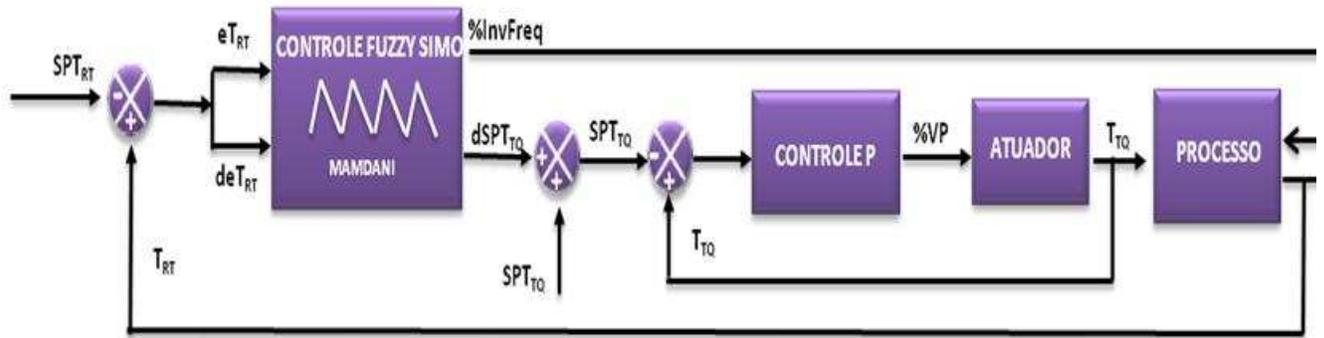
Com o objetivo de reduzir a complexidade do projeto da base de regras e aumentar a eficiência de controle, foi implementada uma estrutura simplificada, definida por uma base de regras comum, formadas pelas bases de regras de controladores do tipo *Fuzzy-PI* e *Fuzzy-PD*. Esta estrutura simplificada é similar a idéia utilizada por Li e Gatland (1997), para controladores *Fuzzy-PID* (Figura 5.25).

A estrutura utilizada para o desenvolvimento do controlador *fuzzy* com saída multivariável, apresentada na Figura 5.11, se caracteriza pela simplicidade, fácil implementação e rápido processamento computacional, uma vez que é reduzida a base de regras do controlador. Esta estratégia utiliza duas variáveis manipuladas no processo para atuar na mesma variável controlada, a partir de diferentes malhas de controle.



Y_r = valor de referência do controlador; e = erro; Δe = variação do erro; Z_{PD} = saída posicional do controlador do controlador *Fuzzy-PD*; Z_{PI} = saída posicional do controlador do controlador *Fuzzy-PI*; Y = valor de saída do processo.

FIGURA 5.25. Estrutura simplificada para controlador tipo *Fuzzy-PID*.



SPT_{RT} = *set-point* da temperatura do reator; eT_{RT} = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; deT_{RT} = variação do erro relacionado à temperatura do reator; T_{RT} = temperatura do reator; $dSPT_{TQ}$ = valor de saída incremental para o *set-point* da temperatura do fluido térmico; SPT_{TQ} = *set-point* da temperatura do fluido térmico presente no tanque de aquecimento; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento; %InvFreq = % de variação do inversor de frequência da bomba volumétrica que impulsiona o fluido térmico pela camisa do reator, variando assim a sua vazão; %VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento; PV = variável controlada do processo = T_{RT} .

FIGURA 5.26. Estrutura do controlador *Fuzzy-SIMO*, em cascata.

Na Figura 5.27 está ilustrado o início do desenvolvimento do controlador *Fuzzy-SIMO*, no toolbox fis do programa MATLAB.

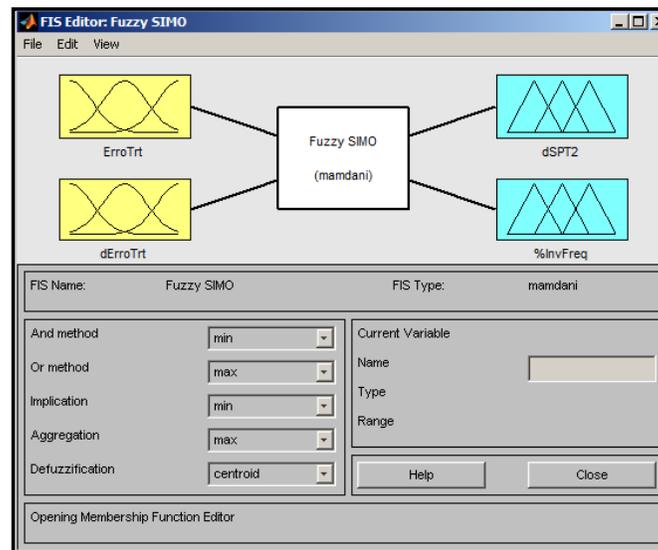


FIGURA 5.27. Desenvolvimento do controlador *Fuzzy-SIMO* no MATLAB 7.0.1.

5.7.2. PARÂMETROS DE SINTONIA DO CONTROLADOR “FUZZY PI SIMO”

A ação do controlador *Fuzzy-PI SIMO* consistiu no fornecimento de valores de saída independentes, para duas variáveis diferentes, utilizando uma base de regras em comum, a qual relaciona as mesmas variáveis de entrada do controlador. Esta estratégia possibilita utilizar apenas um único controlador para atuar em duas variáveis manipuladas.

Nesta estratégia a intenção foi utilizar a variação da vazão do fluido térmico ao redor da camisa como uma segunda variável manipulada no processo. Esta variável não foi utilizada como variável manipulada principal, uma vez que foi constatado pelas características do sistema que a sua influência na variável controlada (temperatura do reator, T_{rt}) era menos significativa (item 3.5.5.1). Um dos aspectos a ser observado é devido a configuração do sistema de polimerização e ainda, devido ao dimensionamento do reator de polimerização. O reator utilizado possuía um volume útil de pouco mais da metade do volume total. A área de troca térmica no reator era pequena e ineficiente para possibilitar a manutenção da temperatura do fluido polimérico ao longo de toda a reação de polimerização no sistema experimental em questão.

No entanto, o interessante em utilizar esta variável na estratégia de controle *fuzzy*, foi a de combinar as ações das duas variáveis manipuladas na tentativa de melhorar a resposta do controle geral.

Nas Figuras 5.28 a e 5.28 b são apresentadas as estruturas das funções de pertinência das variáveis de entrada, e nas Figuras 5.28 c e 5.28 d as das variáveis de saída para este controlador. E as ações de controle para as saídas do *Fuzzy-PI SIMO* foram regidas pelas regras apresentadas nas Tabela 5.13 b e 5.14 b.

No caso deste controlador a etapa final de sintonia consistiu das alterações das disposições das funções de pertinência e dos conjuntos suporte

das variáveis de entrada e saída, sendo que praticamente não houve alterações nas bases de regras desenvolvidas inicialmente (Tabelas 5.13 a e 5.14 a) para este sistema.

TABELA 5.13. Matriz bidimensional de base de regras adotadas para o controlador *Fuzzy*-PD SIMO, parte posicional.

		ERRO				
		GN	MN	ZR	MP	GP
ΔERRO	GN	GP	GP	MP	MN	MN
	MN	GP	GP	MP	MN	MN
	ZR	GP	MP	Z	MN	GN
	MP	MP	MP	MN	GN	GN
	GP	MP	MP	MN	GN	GN

		ERRO				
		GN	MN	ZR	MP	GP
ΔERRO	GN	GP	GP	MP	MN	MN
	MN	GP	GP	MP	MN	MN
	ZR	GP	MP	Z	MN	GN
	MP	MP	MP	MN	GN	GN
	GP	MP	MP	MN	GN	GN

TABELA 5.14. Matriz bidimensional de base de regras adotadas para o controlador *Fuzzy*-PI SIMO, parte incremental.

		ERRO				
		GN	MN	ZR	MP	GP
ΔERRO	GN	GP	GP	GP	MP	Z
	MN	GP	GP	MP	Z	MN
	ZR	GP	MP	Z	MN	GN
	MP	MP	Z	MN	GN	GN
	GP	Z	MN	GN	GN	GN

		ERRO				
		GN	MN	ZR	MP	GP
ΔERRO	GN	GP	GP	GP	MP	<u>MN</u>
	MN	GP	GP	MP	Z	MN
	ZR	GP	MP	Z	MN	GN
	MP	MP	Z	MN	GN	GN
	GP	Z	MN	GN	GN	GN

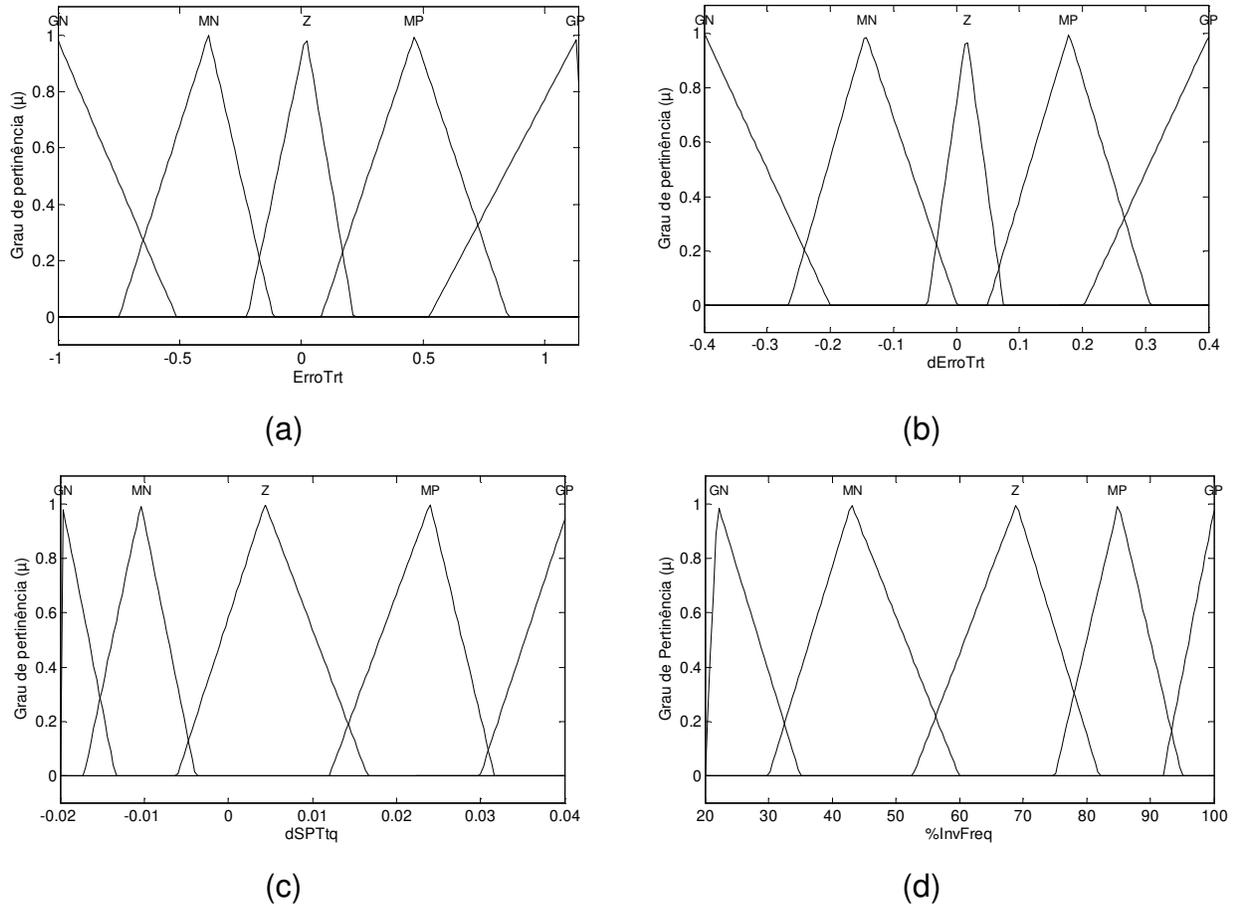


FIGURA 5.28. Estruturas das funções de pertinência para as variáveis de entrada (a) ErroTrt e (b) dErroTrt e para as variáveis de saída (c) dSPTtq e (d) %InvFreq utilizadas no desenvolvimento do controlador *Fuzzy-PI (SIMO)*.

As funções de pertinência das variáveis de entrada foram ajustadas a fim de satisfazer as condições do conjunto de regras de maneira mais adequada às duas saídas. Na Figura 5.28 d, observa-se que o universo de discurso da variável %InvFreq foi de [20 a 100]. Foi limitada a atuação mínima de 20% do inversor de frequência a fim de impedir o “desligamento” deste inversor, levando a valores nulos a vazão do fluido térmico que circula na camisa do reator e proporciona o aquecimento do sistema.

Esta ação foi de extrema importância e imprescindível, uma vez que valores nulos de vazão impediriam as leituras de temperatura de entrada e saída do fluido térmico na camisa do reator. Isso ocasionaria erro gravíssimo nas malhas de controle, uma vez que comprometeria o monitoramento da variável T_{tq} a qual exerce total influência sobre o comportamento das variáveis controlada e manipulada do processo de polimerização.

A faixa adotada para a função de pertinência Z foi adotada tomando como base a ação fixa que esta variável exerceu no processo nos ensaios anteriores, 70%.

5.7.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR “FUZZY PI SIMO”

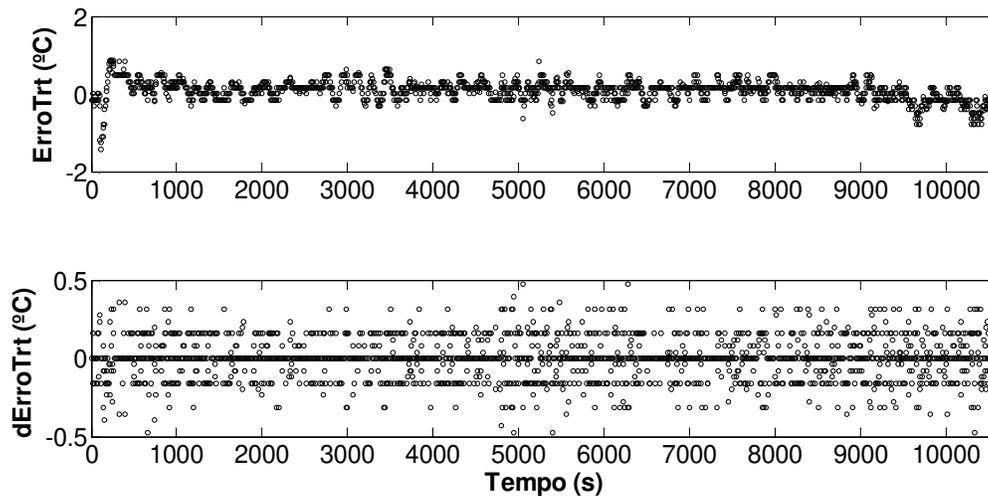
Com o objetivo de observar a ação conjunta de duas variáveis que possuíam influência no processo foi desenvolvido um controlador *Fuzzy-PI* multivariável, com saídas incremental e posicional.

Foi projetado um controlador incremental com as mesmas características do *Fuzzy-PI* SISO anteriormente implementado. Diferentemente do controlador *Fuzzy-PID* que também utilizou da ação conjunta de duas ações, neste controlador as ações distintas eram enviadas para duas variáveis diferentes, entretanto utilizando-se de um mesmo controlador, de uma base de regras em comum.

As variáveis de saída deste controlador consistiram da variação do *set-point* da temperatura do fluido térmico que promove o aquecimento do reator e a variação da rotação do inversor de frequência empregado para permitir alterações na vazão do fluido térmico através da camisa do reator. Esta estrutura poderia contribuir para uma troca térmica mais eficiente do sistema.

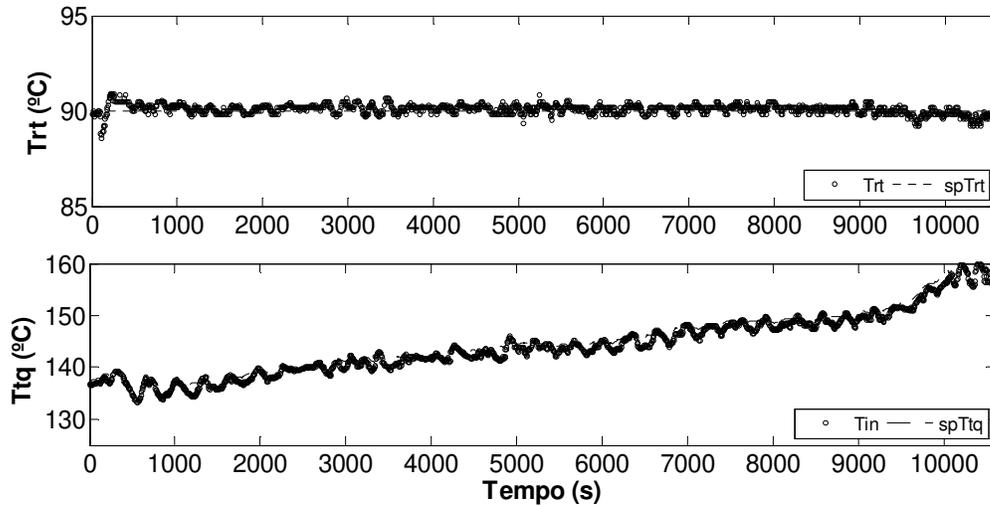
O objetivo da utilização da estrutura utilizada (Figura 5.25) foi de reduzir a complexidade do projeto da base de regras e aumentar a eficiência de controle. Esta estratégia de controle se caracteriza então pela sua simplicidade, fácil implementação e rápido processamento computacional.

Os comportamentos das variáveis envolvidas nesta malha, perante atuação das variáveis manipuladas do processo são apresentados nas Figuras 5.29, 5.30 e 5.31, a seguir. Na Tabela 5.15 são apresentados os parâmetros de desempenho para esta aplicação.



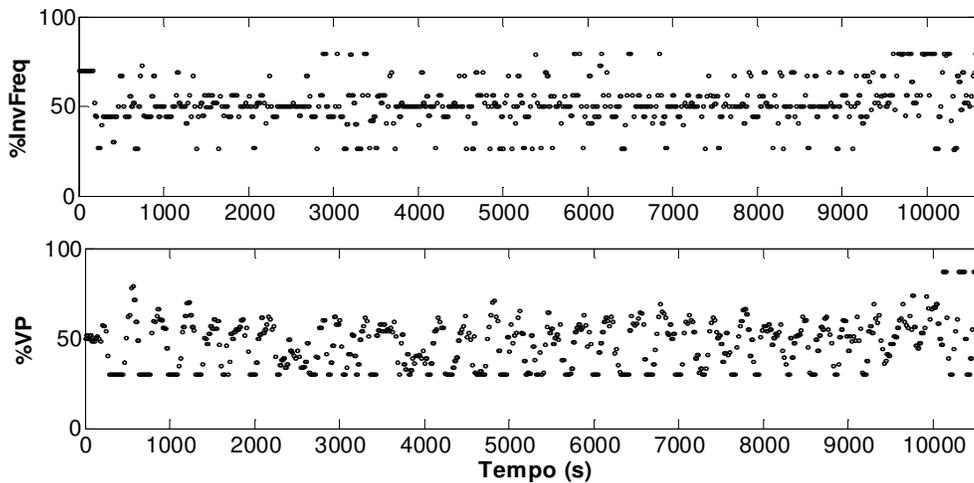
$Erro_{RT}$ = diferença entre a temperatura do reator e o *set-point* estabelecido; $dErro_{RT}$ = variação do erro relacionado à temperatura do reator.

FIGURA 5.29. Comportamento das variáveis de entrada do controlador *Fuzzy* SIMO, ao longo da reação de polimerização.



T_{RT} = temperatura do reator; T_{TQ} = temperatura do tanque de aquecimento;

FIGURA 5.30. Comportamento das variáveis controlada e de saída do controlador *Fuzzy SIMO* na malha de processo.



%VP = % de variação da potência da resistência imersa no fluido de aquecimento. %InvFreq = % de variação do inversor de frequência da bomba volumétrica que impulsiona o fluido térmico pela camisa do reator, variando assim a sua vazão;

FIGURA 5.31. Comportamento das variáveis manipulada e de saída do controlador *Fuzzy SIMO* na malha de processo.

TABELA 5.15. Parâmetros de desempenho do controlador *Fuzzy SIMO*.

Parâmetros de Desempenho	
Controlador	<i>Fuzzy SIMO</i>
ISE	135,4
IAE	417,1
ITAE	1,99.10 ⁶
ITSE	5,67.10 ⁵
<i>Overshoot</i> (°C)	0,87
Tempo de subida (s)	520
Tempo de estabilização (s)	520
Consumo de energia elétrica (kWh)	2,70

Diferente dos outros ensaios de controle em malha fechada realizados anteriormente, a vazão do fluido térmico através da camisa do reator não foi mantida fixa em 70%, mas variou de acordo com a ação de saída do controlador *fuzzy*. Como restrição foi adotado um valor mínimo de atuação de 20%, a fim de impedir que o fluido deixasse de circular na camisa do reator em qualquer momento, ou com vazões muito baixas a ponto de prejudicar a leitura desta temperatura pelos sensores instalados nesta linha de circulação.

A temperatura do reator se manteve praticamente constante durante todo o ensaio de polimerização. Observa-se que a atuação conjunta com o inversor de frequência contribui para diminuir o *overshoot* e o tempo de resposta da variável controlada. Com a implementação desta estratégia de controle o inversor de frequência operou em valores próximos a 50%, o qual está relacionado com a disposição da função de pertinência *fuzzy Z* desta variável, favorecendo uma pequena redução no consumo de energia pelo inversor de frequência.

A partir deste ensaio pôde-se perceber que esta estratégia de controle pode ser empregada como uma forma alternativa de controle deste processo, de forma a propiciar melhorias na resposta da variável controlada, principalmente na fase inicial da reação.

5.8. CONTROLADOR “NEURO-FUZZY” (ESTRATÉGIA DE CONTROLE MISO/ POSICIONAL/ANTECIPATIVO)

5.8.1. ESTRUTURA DO CONTROLADOR “NEURO-FUZZY”

A partir da observação do comportamento das variáveis envolvidas no sistema de controle do processo de polimerização (temperatura do reator, temperatura do tanque, variação da potência) foi idealizada uma estratégia de controle *fuzzy*, utilizando modelo neural, com o intuito de captar a dinâmica do processo e possibilitar um controle mais efetivo.

Foi então desenvolvido um controlador baseado num sistema híbrido *Neuro-fuzzy/Anfis*, para testar a capacidade do sistema de modelar o conhecimento especialista e simultaneamente o conhecimento existente nos dados fornecidos.

Quando um conjunto de dados experimentais contendo as informações necessárias para descrição de um sistema está disponível, a implementação de redes neurais surge como uma solução suficiente para a tarefa de modelagem e controle, devido a sua capacidade de auto-aprendizagem a partir de dados de treinamento (PADILHA, 2001). A lógica neuro-fuzzy é uma técnica de inteligência artificial que gera regras diretamente de um conjunto de dados numéricos e

associa probabilidades a estas regras, combinando a lógica *fuzzy* com o aprendizado e capacidades adaptativas das redes neurais.

Na Figura 5.32 é apresentado um desenho esquemático da arquitetura de um sistema *neuro-fuzzy*. O sistema contém três diferentes camadas, sendo elas: camada de *fuzzificação*, camada de inferência (regras *fuzzy*) e camada de *defuzzificação*. Na camada de *fuzzificação* cada neurônio representa uma função de pertinência de entrada do antecedente de uma regra *fuzzy*; na camada de inferência as regras são ativadas e os valores ao final de cada regra representam o peso inicial da regra e são ajustados após a etapa de treinamento; na camada de *defuzzificação* cada neurônio representa uma proposição conseqüente e o peso de cada saída é representado pelo cálculo do método 'centro de gravidade' de cada saída da função de pertinência (BERENGI E KHEDHKAR, 1992; JANG, 1993; BUCKLEY E HAYASHI, 1995). Após adquirir a saída correspondente, o ajuste é feito na conexão do peso e nas funções de pertinências visando compensar o erro e produzir um novo sinal de controle.



FIGURA 5.32. Diagrama esquemático de um sistema *neuro-fuzzy*.

O controlador *neuro-fuzzy* do tipo ANFIS se baseia na equivalência funcional das redes neurais e do modelo *fuzzy*. De uma maneira simples o sistema *neuro-fuzzy Anfis* utilizado neste trabalho pode ser visto como um mecanismo de aprendizado da rede neural que determina as funções de pertinência e regras *fuzzy* do tipo Takagi-Sugeno a partir de dados de treinamento (Figura 5.33). Uma

vez que os parâmetros *fuzzy* foram determinados a parte de rede neural foi então “desativada”, ou seja, esta técnica neural foi somente utilizada em modo *off-line*.

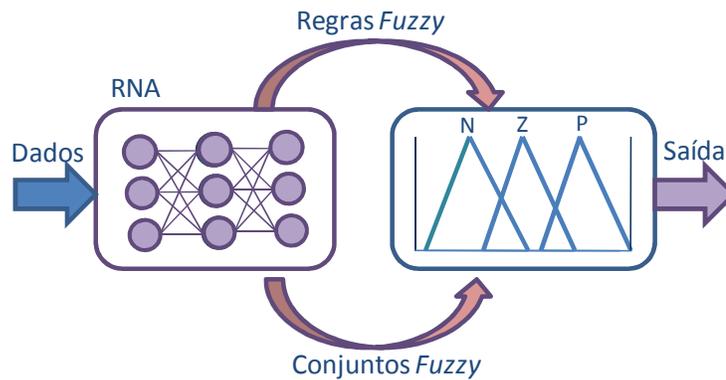


FIGURA 5.33. Esquema ilustrativo de um modelo Neuro-*fuzzy*.

Foram utilizados conjuntos de dados obtidos de ensaios anteriores que refletiam informações sobre o sistema de polimerização para o desenvolvimento de um controlador *fuzzy*-neural que aprendesse a dinâmica do sistema e fosse utilizado como controlador principal do processo.

Esta estratégia de controle foi desenvolvida de forma a utilizar variáveis de influencia no processo e fornecer atuações diretas na variável manipulada, de forma a manter a variável de processo dentro dos valores pré-estabelecidos. A intenção foi a de implementar um controlador antecipativo, que fornecesse valores de % de variação de potência que antecipasse a influencia de sua atuação no comportamento da temperatura do reator, de forma a amenizar o *delay* entre as respostas.

A intenção era que este controlador “observasse” principalmente o comportamento das temperaturas do reator e da temperatura do tanque, não apenas no momento atual (t_k), mas também em instantes anteriores (t_{k-1}), assim

como dos valores de atuação da variável manipulada anteriormente impostos no processo, de forma a propor uma atuação antecipativa na variável manipulada.

Dessa forma, este controlador estaria contribuindo para diminuir oscilações nas variáveis de processo e de controle, contribuindo para melhorar o desempenho do controlador implementado. O tempo de antecipação definido foi de 20s, uma vez que era possível observar variações nos valores das variáveis após este intervalo de tempo. As variáveis de entrada para este controlador foram: temperatura do reator no instante atual ($T_{rt(k)}$), temperatura do reator em instante anterior ($T_{rt(k-20)}$), temperatura do fluido térmico na entrada da camisa do reator no instante atual ($T_{in(k)}$), temperatura do fluido térmico na entrada da camisa do reator num instante anterior ($T_{in(k-20)}$), variação de potência da resistência do fluido térmico no instante atual ($\%VP_{(k)}$) e variação de potência da resistência do fluido térmico num instante anterior ($\%VP_{(k-20)}$). A variável $\%VP_{(k+20)}$ (variação de potência da resistência do fluido térmico num instante posterior) foi estabelecida como variável de saída deste controlador.

Sendo assim o conjunto de dados de treinamento foi utilizado de forma que a saída deste controlador tivesse uma característica de 'prever' qual deveria ser a atuação da variação de potência em instantes futuros. Desta forma, esta estratégia de controle de caráter antecipativo, teve como objetivo diminuir as oscilações da temperatura do tanque e proporcionar menor variação da temperatura do reator em torno do *set-point*. Isto foi devido ao fato de se perceber que as mudanças na variação de potência, obviamente, possuem maior influência na temperatura do tanque que na temperatura do reator, e então a variável T_{rt} apresentava um efeito retardado quanto à variações em T_{tq} .

As definições das variáveis de entrada e saída do controlador inteligente foram realizadas após análise do comportamento dinâmico das variáveis do processo, a partir dos ensaios realizados em malha fechada.

A criação do controlador neuro-*fuzzy* consistiu da edição do bloco ANFIS, no qual foi permitido configurar a arquitetura da rede neural a ser treinada para a construção das bases de regras do controlador.

O início do desenvolvimento do controlador Neuro-*fuzzy* multivariável, no toolbox *fis* do programa MATLAB é ilustrado na Figura 5.34. E na Figura 5.35 é apresentada a estrutura deste controlador.

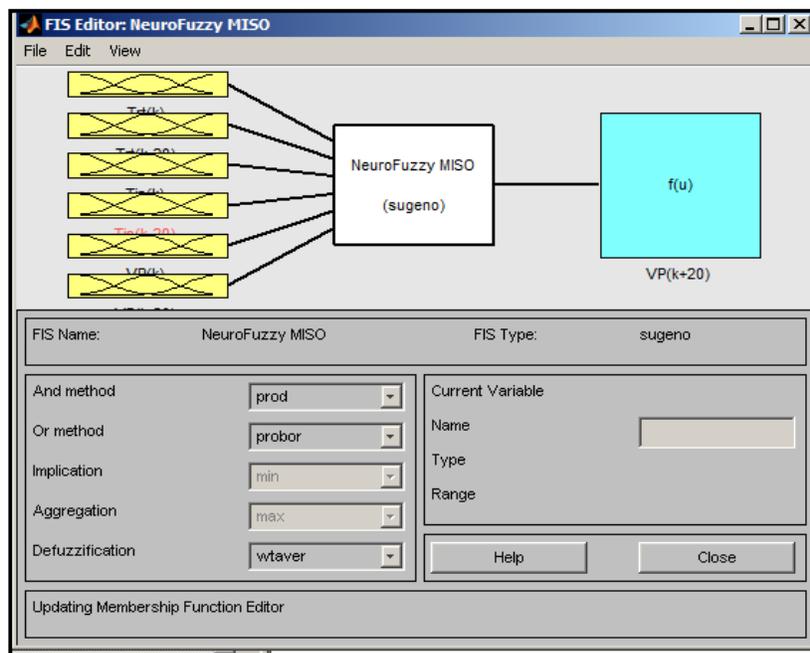
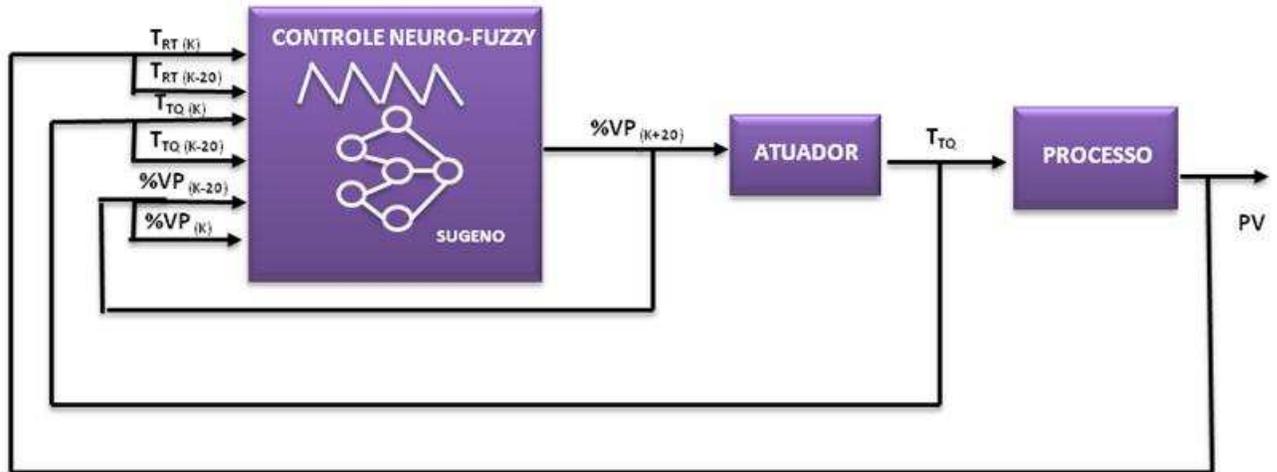


FIGURA 5.34. Desenvolvimento do controlador Neuro-fuzzy no MATLAB 7.0.1.

Os dados utilizados para treinamento e teste para a arquitetura neural foram obtidos a partir de ensaios realizados anteriormente, com diferentes aplicações de estratégias de controle. Os dados de cada ensaio foram separados aleatoriamente de forma a obter 75% de conjunto de dados, de cada ensaio, para treinamento e 25% para testar o modelo.

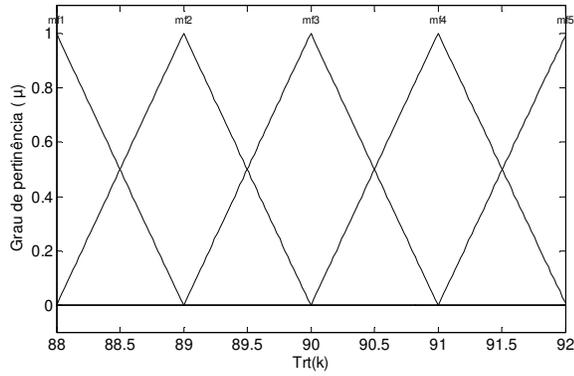


$T_{rt}(k)$ = temperatura do reator no instante atual; $T_{rt}(k-20)$ = temperatura do reator em instante anterior;
 $T_{tq}(k)$ = $T_{in}(k)$ = temperatura do fluido térmico na entrada da camisa do reator no instante atual;
 $T_{tq}(k-20)$ = $T_{in}(k-20)$ = temperatura do fluido térmico na entrada da camisa do reator num instante anterior;
 $\%VP(k-20)$ = variação de potência da resistência do fluido térmico num instante anterior; $\%VP(k)$ = variação de potência da resistência do fluido térmico no instante atual; $\%VP(k+20)$ = variação de potência da resistência do fluido térmico num instante posterior; $PV = T_{rt}$ = variável de processo.

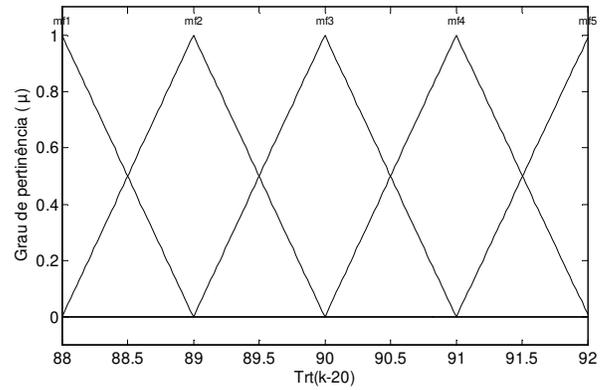
FIGURA 5.35. Estrutura do controlador Neuro-Fuzzy.

5.8.2. PARÂMETROS DE SINTONIA DO CONTROLADOR “NEURO-FUZZY”

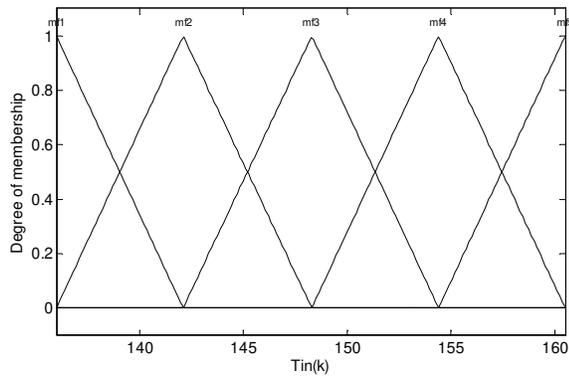
Não houve a necessidade de modificação na estrutura das funções de pertinência na fase inicial do desenvolvimento deste controlador já que estas iriam ser tratadas em uma fase posterior. Nas Figuras 5.36 (a, b, c, d, e e f) são apresentadas as estruturas iniciais das funções de pertinência das variáveis de entrada antes do processo de aprendizagem.



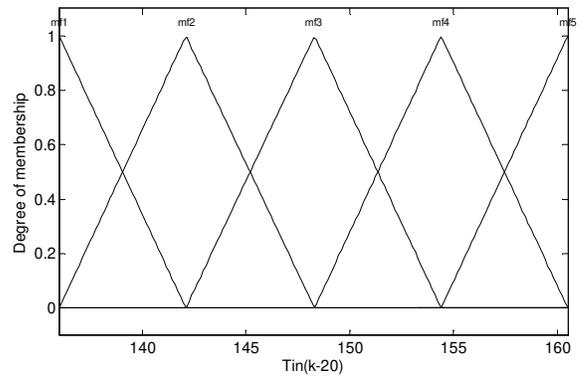
(a)



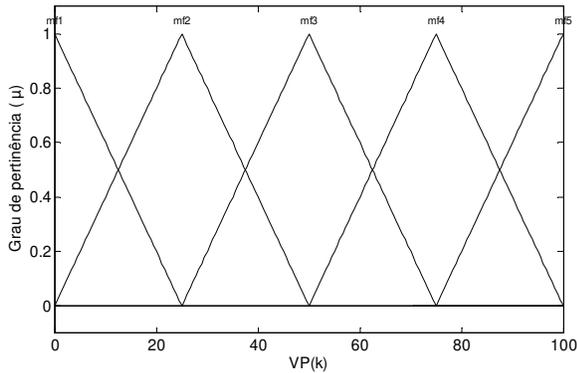
(b)



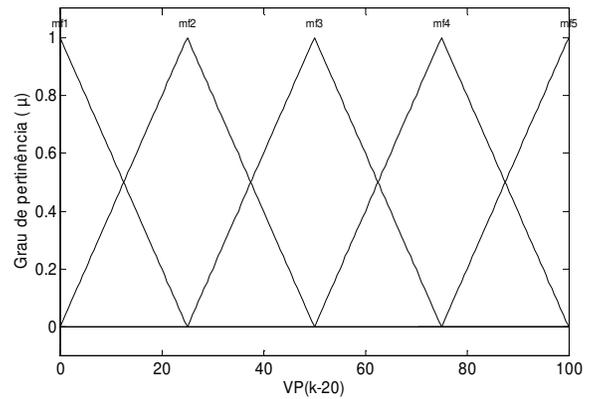
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURA 5.36 - Estruturas iniciais das funções de pertinência para as variáveis de entrada (a) $T_{rt(k)}$, (b) $T_{rt(k-20)}$, (c) $T_{in(k)}$, (d) $T_{in(k-20)}$, (e) $\%VP_{(k)}$ e (f) $\%VP_{(k-20)}$ utilizadas no projeto do controlador *Neuro-Fuzzy*.

Atualmente técnicas estatísticas têm sido aplicadas em pesquisas para quantificar os fatores que causam influencia significativa sobre os resultados dos experimentos. Entre estas técnicas destaca-se a análise de agrupamento *cluster*, cujo objetivo está em agrupar dados semelhantes segundo as suas características (MYIAMOTO et al., 2001; BAROUCHE E SAPORTA, 1982).

Devido à grande quantidade de informações e com comportamento similar das variáveis em algumas faixas do processo, os dados foram “clusterizados”, ativando-se a função *clustering* do toolbox Anfis, antes do processo de otimização.

As funções de pertinência *fuzzy* foram ajustadas utilizando o algoritmo de aprendizagem *backpropagation*, através de uma arquitetura baseada em redes neurais artificiais.

O sistema ANFIS foi utilizado para fazer a otimização dos parâmetros *fuzzy*. Este sistema faz uma adaptação dos valores de entrada e saída para uma base de regra que interliga todas as entradas e saídas, formando assim uma base de regras que cria um sistema de inferência *fuzzy* que contempla todas as entradas.

A estrutura neural do controlador neuro-*fuzzy* criada pelo software MATLAB é apresentada na Figura 5.37. Inicialmente a estrutura neural foi treinada com 50 épocas, mas constatou-se que utilizando-se 25 épocas já se alcançava o valor mínimo de erro de treinamento. Assim, a estrutura neural foi treinada com 25 épocas, apresentado um erro de treinamento de aproximadamente 16% (Figura 5.38), considerado aceitável para a variável de saída %VP, de acordo com a variação desta variável em ensaios anteriores.

Nas Figuras 5.39 (a, b, c, d, e, f e g) são apresentadas as estruturas das funções de pertinência após a etapa de aprendizagem.

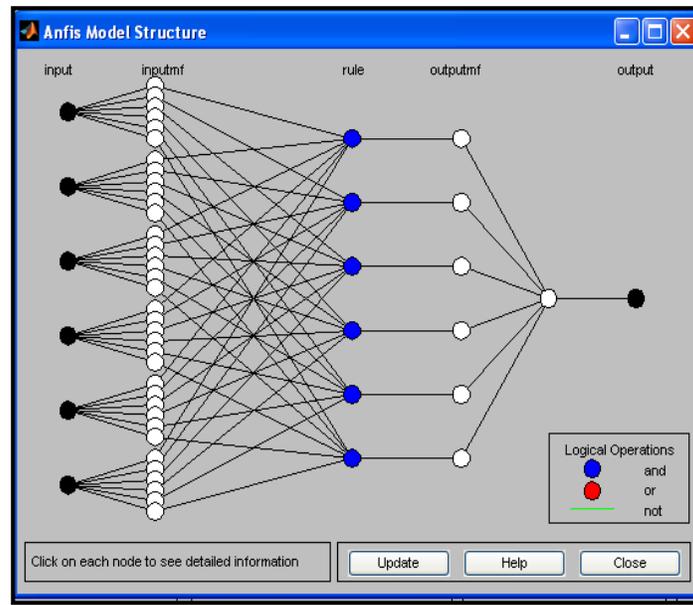


FIGURA 5.37. Estrutura neural do controlador neuro-fuzzy.

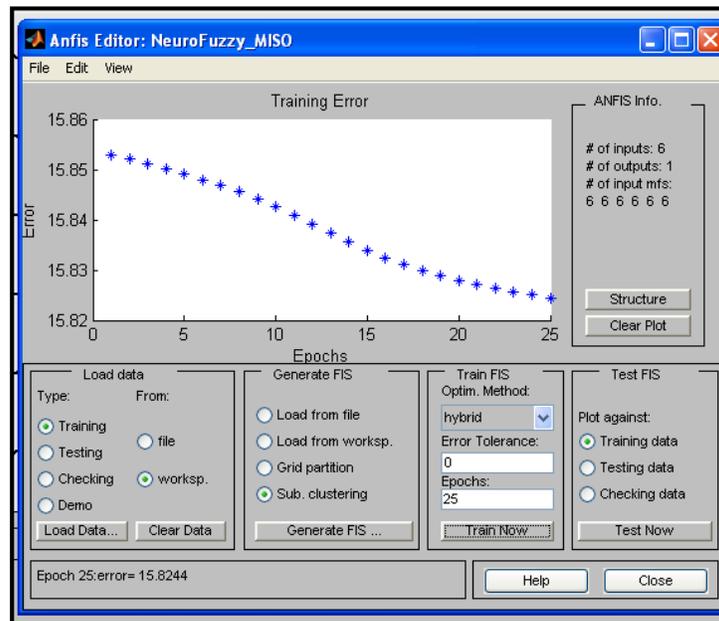
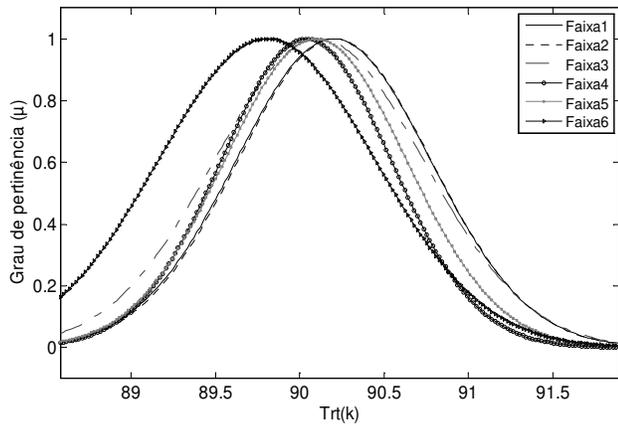
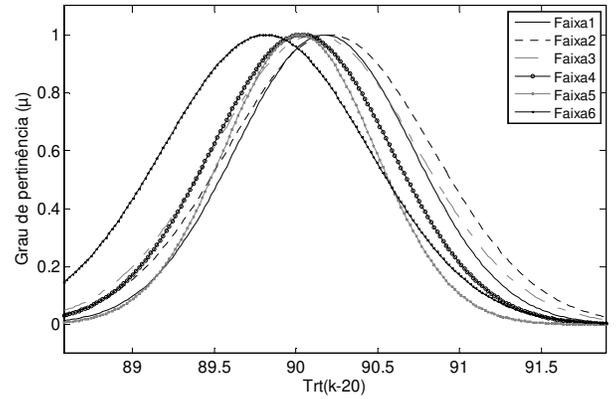


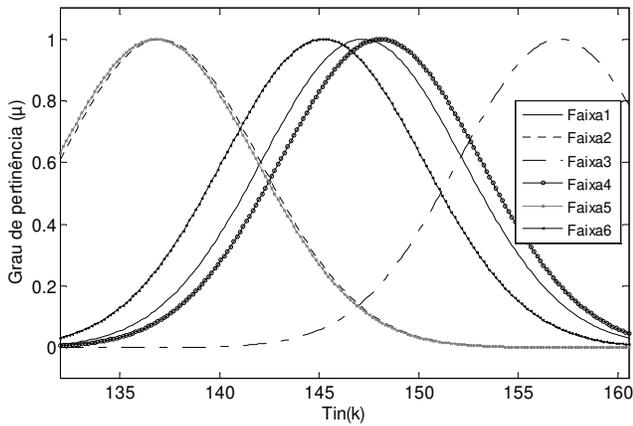
FIGURA 5.38. Curva do erro de treinamento da estrutura do controlador Neuro-fuzzy.



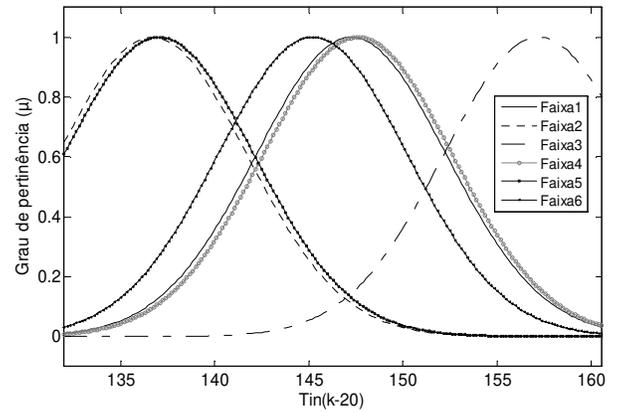
(a)



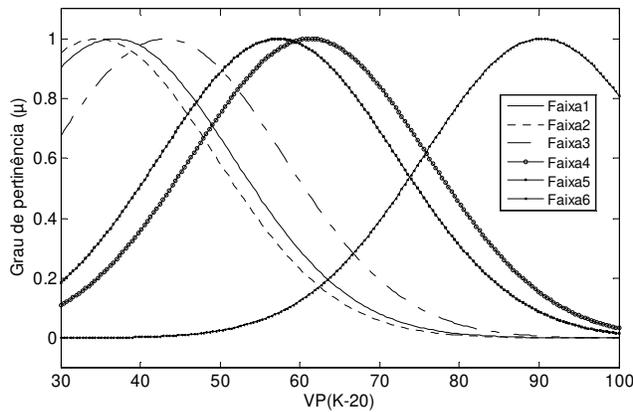
(b)



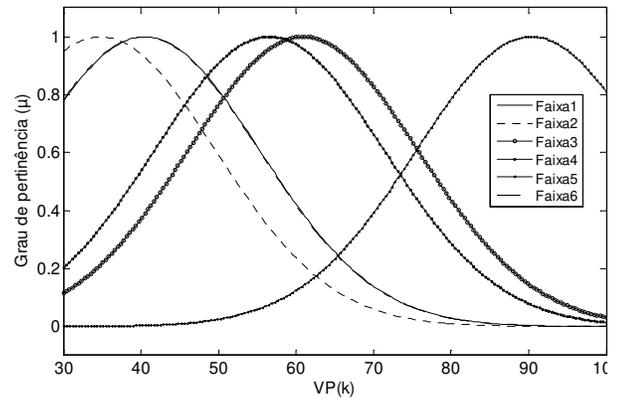
(c)



(d)



(e)



(f)

FIGURA 5.39 - Estruturas das funções de pertinência, otimizadas pelo Anfis, para as variáveis de entrada (a) $T_{rt(k)}$, (b) $T_{rt(k-20)}$, (c) $T_{in(k)}$, (d) $T_{in(k-20)}$, (e) $VP_{(k-20)}$ e (f) $VP_{(k)}$, utilizadas no desenvolvimento do controlador *Neuro-Fuzzy*.

Na Tabela 5.16 são apresentadas as regras do sistema para cada faixa de operação, de cada variável. Vale ressaltar que as faixas selecionadas pela função *clustering* são diferentes para cada variável de entrada.

TABELA 5.16. Parâmetros adotados para o controlador Neuro-Fuzzy, com dados ‘clusterizados’.

Função	Parâmetros Sugeno (<i>clustering</i>)
1	$f_1 = [-6,237 \ -18,02 \ 18,09 \ -18,26 \ 0,5048 \ 0,765 \ 177]$
2	$f_2 = [2,017 \ -1,14 \ 10,32 \ -10,28 \ -0,2997 \ 1,394 \ -83,14]$
3	$f_3 = [1,931 \ -5,829 \ 16,06 \ -15,94 \ 0,3532 \ 0,5704 \ 334,8]$
4	$f_4 = [-5,81 \ -11,48 \ 23,11 \ -23,98 \ -0,00459 \ 0,825 \ 176]$
5	$f_5 = [8,757 \ -13,04 \ 25,43 \ -24,63 \ 0,2852 \ 0,4927 \ 290,2]$
6	$f_6 = [0,2397 \ -4,723 \ 16,62 \ -16,99 \ 0,1187 \ 0,3775 \ 486,9]$

Verifica-se nas Figuras 5.36 que antes do treinamento foram utilizadas cinco funções de pertinência igualmente espaçadas do tipo triangulares. Após a etapa de sintonia dos parâmetros *fuzzy*, com dados “clusterizados”, foram determinadas 6 faixas de atuações relacionando as variáveis de entrada. As funções foram alteradas automaticamente para gaussianas, após etapa de otimização (Figuras 5.39).

Observa-se também uma mudança no universo de discurso das variáveis, de forma utilizar todas as faixas de valores empregados no conjunto de dados a para a etapa de treinamento.

É importante ressaltar que este sistema será bem ‘modelado’ se o conjunto de treinamento for suficientemente representativo, ou seja, que possua

uma distribuição razoável de valores para que se torne possível interpolar todos os valores necessários para a operação do sistema.

De acordo com a base de regras *clustering* representadas na Tabela 5.16 pode-se perceber que os valores de saída são calculados com base na faixa que representa o conjunto de dados das variáveis de entrada. Por exemplo, considerando um conjunto de dados que está representado pela Faixa *clustering* 6 de todas as variáveis de entrada: $\{T_{rt(k-20)} T_{rt(k)} T_{in(k-20)} T_{in(k)} \%VP_{(k-20)} \%VP_{(k)} : 90,5 \ 142 \ 141 \ 80 \ 85\}$.

A saída do controlador exibida para a variável $\%VP_{(k+20)}$, e comandada pelos parâmetros da função f_6 , seria próxima a 87%. Ou seja, analisando o conjunto de dados o que ocorre é que em instantes anteriores a temperatura do reator estava sendo mantida em torno do valor de *set-point* de 90°C, mas esta temperatura apresentava um pequeno aumento no instante atual, apesar de a temperatura da camisa do reator está caindo, e provavelmente uma queda que faria com que o valor de T_{tq} ficasse abaixo do esperado para aquele momento da reação, e por isso seria necessário um aumento na variação de potência da resistência do fluido térmico.

Este aumento antecipado que o controlador propõe é justamente para evitar que haja uma queda na temperatura da camisa do reator provocando posteriormente oscilações no comportamento da variável controlada.

Analisando outra situação, foi selecionado um conjunto de dados das variáveis de entrada que, por exemplo, se encontraria na Faixa *clustering* 3: $\{T_{rt(k-20)} T_{rt(k)} T_{in(k-20)} T_{in(k)} \%VP_{(k-20)} \%VP_{(k)} : 90,3 \ 89,7 \ 147 \ 148 \ 48 \ 51\}$. A variável $\%VP_{(k+20)}$, comandada pelos parâmetros da função f_3 , assumiria um valor em torno de 37%. A atuação do controlador quanto ao envio dos valores de saída variava de acordo com a fase em que se encontrava a reação, mediante observação do conhecimento adquirido de ensaios anteriores.

Num instante atual percebe-se que a temperatura do reator encontra-se em torno do valor do *set-point*. No entanto, nota-se um aumento na temperatura da camisa do reator e aumento da variação de potencia da resistência, o que culminaria em um maior aquecimento desnecessário do fluido térmico e provocaria um aumento posterior da temperatura interna do reator, causando oscilações fora do limite aceitável. A saída do controlador tende então a reduzir esta ação de aquecimento para que a temperatura do tanque não sofra elevações.

Desta forma pode-se perceber a saída antecipativa do controlador projetado, o qual se caracteriza como uma estratégia de controle direta que pode ser implementada com eficácia, desde que se tenha disponível um conjunto de informações a respeito do processo.

5.8.3. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR “NEURO-FUZZY”

O objetivo da implementação deste controlador foi o de promover um controle direto, atuando na variável manipulada do processo, ponderando-se as não linearidades, as quais poderiam ser “inseridas” neste controlador a partir do conjunto de dados com informações sobre a dinâmica do sistema.

Assim utilizou-se das variáveis monitoradas nos ensaios anteriores como variáveis de entrada para este controlador, o qual fornecia uma saída antecipativa a fim de diminuir o tempo de resposta entre a variável de controle e de processo.

Na Figura 5.40 é apresentado o perfil de comportamento das variáveis controlada e manipulada.

Os parâmetros de desempenho são apresentados na Tabela 5.17.

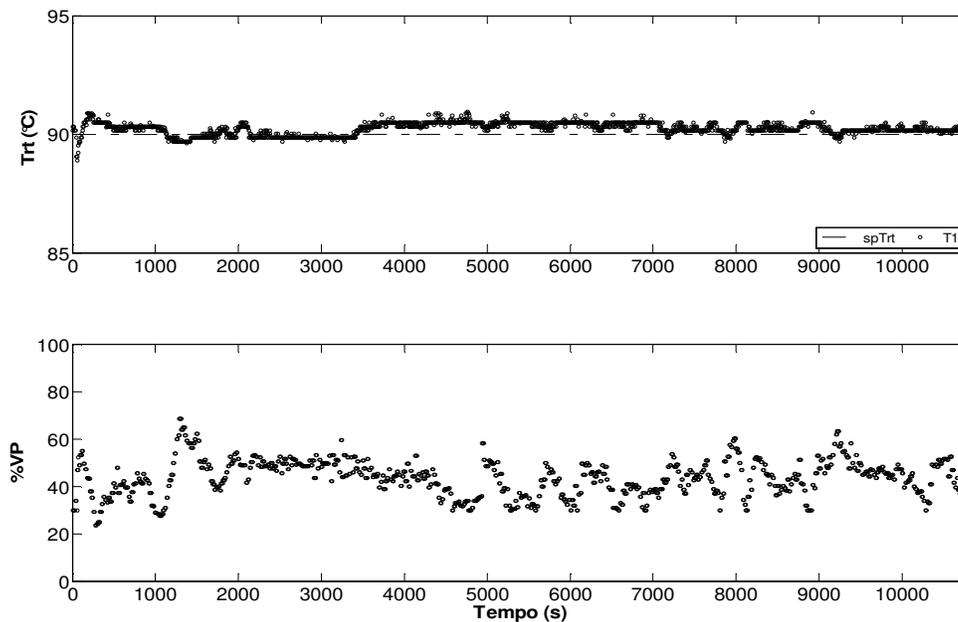


FIGURA 5.40. Comportamento das variáveis controlada e manipulada com a implementação do controlador Neuro-Fuzzy no processo.

As variáveis controlada e manipulada do processo de polimerização apresentaram melhor desempenho a partir da implementação desta estratégia de controle inteligente. Esta estratégia de controle (MISO) difere bastante das outras anteriormente empregadas. Trata-se de uma estratégia de controle direta, ou seja, o próprio controlador avançado atua sobre a variável manipulada do processo. Neste caso não foi utilizado o esquema de controle cascata. Foi possível “embutir” a dinâmica do processo neste controlador, o que *consequentemente* conseguiu lidar com as não-linearidades presentes no sistema.

Esta característica é atribuída à ação das redes neurais que apresenta a capacidade de armazenar conhecimentos pela experiência adquirida nos dados utilizados para o processo de aprendizagem. Desta forma foi possível utilizar-se desta técnica para o controle do processo em questão.

TABELA 5.17. Parâmetros de desempenho do controlador *Neuro-Fuzzy*.

Parâmetros de Desempenho	
Controlador	<i>Neuro-Fuzzy</i>
ISE	253,2
IAE	630,7
ITAE	$3,212 \cdot 10^6$
ITSE	$12,57 \cdot 10^5$
<i>Overshoot</i> (°C)	0,87
Tempo de subida (s)	655
Tempo de estabilização (s)	655
Consumo de energia elétrica (kWh)	2,49

A temperatura do reator foi mantida praticamente constante durante todo o processo e as ações da variação de potência foram bastante suavizadas, as quais foram favorecidas pela ação antecipativa da saída do controlador *neuro-fuzzy*. Esta melhoria significativa da resposta do controlador propiciou uma eficiente atuação do elemento final de controle e provocou uma queda no consumo de energia elétrica do sistema.

5.9. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas as etapas de projeto, desenvolvimento e sintonia dos controladores inteligentes baseados em lógica *fuzzy*, as quais foram

possibilitadas e realizadas com êxito devido o conhecimento especialista obtido para este processo, a partir de ensaios preliminares que permitiram a verificação do comportamento transiente do sistema experimental.

O projeto e a implementação dos controladores *fuzzy* utilizando como ferramenta os toolboxes do MatLab 7.0.1 se mostrou viável, e simplificado para o desenvolvimento tanto de controladores monovariáveis quanto para os multivariáveis (SISO, MISO e SIMO).

A sintonia dos controladores *fuzzy*, que neste estudo consistiu em alterações no conjunto suporte do universo de discurso das variáveis, na disposição das funções de pertinência, e alterações na base de regras que compuseram cada controlador. Esta foi a etapa mais crítica e de extrema importância no projeto de controle e apresentou total dependência do conhecimento especialista.

As diferentes estratégias de controle inteligentes foram implementadas com sucesso no protótipo experimental de polimerização, propiciando o devido controle da variável controlada, mantendo a temperatura interna do reator dentro do valor estabelecido para a reação.

A utilização dos controladores inteligentes na malha de controle mestre do processo de polimerização se mostrou eficiente, uma vez que os controladores conseguiram fornecer valores gradativos de saída para a malha escravo, de acordo com o comportamento transiente do processo. Dessa forma, contribuiu para atuações da variável manipulada de forma mais suavizada contribuindo para uma maior vida útil do atuador. Este fato comprova o melhor desempenho do controlador avançado diante de processos que apresentam não-linearidades.

Foram calculados os parâmetros de desempenho (conforme definições no Capítulo 6) de cada controlador ao final de cada ensaio, para permitir posteriormente uma avaliação entre as diferentes estratégias de controle desenvolvidas e implementadas.

5.10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAROUCHE, J. M.; SAPORTA, G. **Análise de dados**, Ed Zahar, Rio de Janeiro, 1982.

BERENJI, H. R.; KHEDKAR, P. **Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements**. IEEE Trans. Neural Networks, 3, 724-740, 1992.

BUCKLEY, J. J.; HAYASHI, Y. **Neural networks for fuzzy systems**, **Fuzzy Sets and Systems**, 71, 265-276, 1995.

CAMPOS, M. M.; SAITU, K. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos**, Ed. Ciência Moderna, 2004.

HARRIS, C. J.; MOORE, C. G.; BROWN, M. **Intelligent Control – Aspects of fuzzy logic and neural nets**, World Scientific Publishing, 1993.

JANG, J. S. R. **ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems**, IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics 23, 665-685, 1993.

LI, H.-X. e GATLAND, H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, oct, 1996.

LI, X. H. A comparative design and tuning for conventional fuzzy control. . **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part B**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

MACHADO, P. F. M. P. B. **Polimerização via radical livre para polímeros lineares e ramificados usando iniciadores mono e difuncional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 186p, 2004.

MAMDANI, E. H. Advances in the linguistic syntesis of fuzzy controllers, **International Journal Man-Mach**, pp. 669 – 678, 1976.

MIYAMOTO, S. **Fuzzy sets in information retrieval and cluster analysis**, Ed.Kluwer, Londres, 1990.

PADILHA, P. C. C. **Desenvolvimento de uma metodologia de sintonia de controladores “fuzzy” utilizando redes neurais – Aplicação em processos petroquímicos**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica. Instituto Militar de Engenharia. 2001. 95p.

SANDRI, S.; CORRÊA, C. **Lógica Nebulosa**. INPE, 1999. Disponível em: <http://www.ele.ita.br/cnrrn/minicursos-5ern/log-neb.pdf>. Acessado em: novembro de 2007.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy set theory and its applications**, Kluwer Academic Publishers, 1991.

CAPÍTULO 6. ANÁLISE DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE IMPLEMENTADAS

6.1. INTRODUÇÃO

Os controladores *fuzzy* foram desenvolvidos e em seguida implementados no processo de polimerização em malha fechada. Cada estratégia de controle seguinte utilizou-se de conhecimentos de ensaios de controle realizados. Todos os ensaios em malha fechada apresentados foram realizados numa mesma época, sob mesmas condições. Os dados da análise gravimétrica foram registrados e os cálculos de conversão foram realizados posteriormente. Amostras foram reservadas para possibilitar análise em cromatografia em gel.

6.2. CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

Para proporcionar uma análise comparativa entre os diferentes controladores implementados, foi necessário definir os critérios de desempenho a serem utilizados.

Qualitativamente, o desempenho de um controlador pode ser avaliado pela sua capacidade de manter a variável controlada próximo ao valor desejado (*set-point*).

Em aplicações práticas, porém, pode ser desejável "medir" o desempenho de um controlador por meio de um índice que permita buscar melhoras de desempenho.

Um sistema de controle é dito ótimo se os parâmetros do controlador são escolhidos de forma a minimizar ou maximizar o índice de desempenho escolhido. O desempenho em regime transitório de um sistema é avaliado, em geral, pela resposta do sistema a uma perturbação degrau.

Encontram-se na literatura critérios que podem definir um sistema como ótimo. Os índices mais amplamente sugeridos na literatura são dados a seguir (STEPHANOPOULOS, 1984):

- **Máximo sobre-sinal (*overshoot*):** Caso que o valor da saída ultrapasse o valor de *set-point*, o máximo sobre-sinal definido como a máxima diferença entre os valores de saída e de entrada durante o período transitório, ou seja, o valor de um pico máximo atingido pela resposta. Se a saída não ultrapassa o valor da entrada o sobre-sinal é por definição, igual a zero.

- **Tempo de subida:** É definido como o tempo necessário para a resposta atingir pela primeira vez o valor desejado. O tempo de subida é um indicativo de quão rápido reage o sistema a aplicação de uma perturbação em sua entrada.

- **Tempo de estabilização:** é o tempo necessário para que a resposta entre e permaneça dentro de uma faixa percentual em torno do valor de regime permanente.

Outros critérios que são também amplamente utilizados são os índices de desempenho dados pela integral de uma função ponderada do desvio da saída em relação à entrada ou referência. Diferentemente dos critérios simples que usam somente características isoladas da resposta dinâmica os critérios da integral no tempo são baseados na resposta do processo como um todo.

Um índice de desempenho é um número que serve como indicativo da qualidade do desempenho do sistema. O sistema de controle é dito ótimo se os parâmetros são escolhidos de forma a minimizar ou maximizar o índice de desempenho escolhido (CAON Jr., 1999).

Considerando-se $e(t) = Y(t) - Y_{SP}(t)$ onde $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ implica em um sistema estável e com índice de desempenho finito, pode-se estabelecer os seguintes índices de desempenho mais conhecidos (STEPHANOPOULOS, 1984; OGATA, 1993; ASTROM E HAGGLUND, 1995):

- **Integral do Erro Quadrático (ISE):** (*ISE-Integral of the Square Error*), Este foi um dos primeiros índices de desempenho a serem propostos. Este critério bastante utilizado devido à facilidade de ser computado, além de proporcionar grandes ponderações para erros grandes e pequenas ponderações para erros pequenos. Matematicamente o ISE é definido conforme Equação 6.1, a seguir:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t). dt \quad \text{Equação 6.1}$$

- **Integral Absoluta do Erro (IAE):** (*IAE-Integral of the Absolute value of the Error*), este critério considera o módulo do erro, sendo muito utilizado em simulações, é de fácil implementação e entendimento, mas não apresenta muita seletividade quanto a variações dos parâmetros. Matematicamente o IAE é definido pela Equação 6.2, a seguir:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|. dt \quad \text{Equação 6.2}$$

- **Integral do Erro Quadrático ponderado pelo Tempo (ITSE):** (*ISE-Integral of the Time-weighted Square Error*), neste critério, o erro quadrático é ponderado pelo tempo, resultando que para um desvio inicial grande há uma pequena ponderação, enquanto que um desvio pequeno na resposta para os tempos finais é bastante penalizado. Matematicamente o ISE é definido conforme equação 6.3, a seguir:

$$ITSE = \int_0^{\infty} t. e^2(t). dt \quad \text{Equação 6.3}$$

- **Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (ITAE):** (*ITAE-Integral of the Time-weighted Absolute Error*), onde neste critério, o erro absoluto é ponderado pelo tempo, resultando que para um erro inicial grande há uma pequena ponderação, enquanto que um erro pequeno na resposta para os tempos finais é muito penalizado. Matematicamente o ITAE é assim definido conforme equação 6.4 a seguir:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t. |e(t)|. dt \quad \text{Equação 6.4}$$

Para alcançar um desempenho ótimo de um sistema de controle devem minimizar os ISE, IAE, ITSE, ITAE das respostas. Qualquer um dos critérios de erro apresentados pode ser utilizado dependendo da característica da resposta transiente do sistema. Sendo assim, algumas regras podem ser ponderadas:

- Se é importante evitar grandes erros, ISE é melhor do que IAE porque os erros estão elevados ao quadrado e assim contribuem mais para o valor da integral;

- Para evitar pequenos erros, IAE é melhor do que ISE porque quando elevamos números pequenos ao quadrado (menores que um) eles se tornam menores ainda;

- Para evitar erros que persistem por longos tempos, o critério ITAE ou ITSE são adequados porque grandes tempos amplificam o efeito de erros mesmo pequenos no valor da integral.

6.3. ENSAIOS EM MALHA FECHADA COM CONTROLADORES INTELIGENTES

Foram utilizadas as mesmas condições e procedimentos experimentais para a realização dos controladores *fuzzy*, a fim de possibilitar a avaliação de cada estratégia de controle inteligente implementada, bem como o desempenho dos controladores desenvolvidos. Todas as estratégias de controle foram implementadas no Matlab.

Serão apresentadas neste tópico as alterações das variáveis de entrada nas malhas de controle e os comportamentos das variáveis de processo e de

controle ao longo da reação de polimerização no sistema experimental proposto, com a utilização de controladores.

Nos ensaios realizados em cascata foi utilizado o mesmo controlador P para todas as implementações de controle inteligente, a fim de permitir uma comparação entre as respostas dos mesmos.

6.4. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS POLIMÉRICAS

6.4.1. DETERMINAÇÃO DA CONVERSÃO

Para se determinar os perfis de conversão de cada ensaio, foi implementado o método de análise gravimétrica para cada reação de polimerização. A análise gravimétrica ou gravimetria é um método analítico quantitativo cujo processo envolve a separação e pesagem de um elemento ou um composto do elemento na forma mais pura possível. O elemento é separado de uma quantidade conhecida da amostra (GARY, 1994).

A medida gravimétrica está então baseada na medida indireta da massa de um ou mais constituintes da amostra. A determinada espécie química deve poder ser separada do meio em que se encontra e, através de cálculos estequiométricos, é determinada a quantidade real de certo elemento ou composto químico constituinte da amostra inicial.

Durante a realização de cada ensaio foram coletadas pequenas amostras de 5 mL em béckeres previamente pesados. As amostras foram coletadas nos seguintes intervalos de tempo: 30 min; 1h; 2h; 2,5h; 3h. Após o recolhimento de

cada amostra eram adicionadas duas gotas de solução aquosa de hidroquinona 1g/l. A hidroquinona foi adicionada de forma a interromper a reação de polimerização em cada instante. A secagem das amostras foi feita inicialmente em capela com circulação forçada e em seguida foram colocadas em estufa a uma temperatura de aproximadamente 60-70°C, para evaporação do solvente e monômero residual. As amostras eram pesadas até que os pesos fossem constantes, o que significava que o solvente e monômero haviam evaporado.

Os cálculos de conversão por análise gravimétrica foram obtidos segundo a Equação 6.5:

$$X = \frac{P}{M} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 6.5})$$

X – Conversão em %; P - Massa do polímero; M – Massa inicial do monômero.

6.4.2 DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E MASSAS MOLECULARES MÉDIAS

O controle rigoroso da temperatura na reação de polimerização é muito importante uma vez que variações nesta variável possuem influência direta na qualidade final do polímero.

Como uma cadeia de polímero é formada pela adição de uma grande quantidade de monômeros, durante a polimerização, cadeias com diferentes comprimentos serão formadas e, portanto, uma distribuição de comprimentos de cadeia será obtida. Conseqüentemente, uma distribuição de massas moleculares também existirá, não sendo possível obter um valor único e definido para a massa molecular do polímero.

As propriedades mecânicas e o comportamento do polímero durante o processamento são altamente dependentes do tamanho médio e da distribuição

de comprimentos das cadeias do polímero. Embora a estrutura química do polímero seja igual, massas moleculares diferentes podem mudar completamente as propriedades do polímero (propriedades físicas, mecânicas, térmicas, reológicas, de processamento e outras), e por esta razão, a qualidade final do polímero obtido está relacionada à massa molecular (GONÇALVES, 2006; SILVA e SILVA, 2003; MANO, 1991).

A massa deve ser calculada baseada numa média das massas moleculares da distribuição. As principais medidas da massa molecular média são: **Mn**: Massa molecular média numérica (Equação 6.6) e **Mw**: Massa molecular média ponderal (Equação 6.7)

$$Mn = \frac{\textit{peso total do polímero}}{\textit{número total de moléculas do polímero}} \quad (\text{Eq. 6.6})$$

$$Mw = \frac{\sum c_i \cdot M_i}{\textit{peso total}} = \frac{\sum c_i \cdot M_i}{\sum c_i} = \sum w_i \cdot M_i \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Onde: C_i : peso total das moléculas de comprimento de cadeia i ; M_i : peso do polímero de comprimento de cadeia i ; W_i : fração mássica das moléculas de comprimento i .

Além das massas moleculares médias, a amplitude da distribuição das massas moleculares pode ser caracterizada pela polidispersidade, ou índice de polidispersidade do polímero (PDI), segundo Equação 6.8:

$$PDI = \frac{Mw}{Mn} \quad (\text{Eq.6.8})$$

A determinação da distribuição de massas moleculares de um polímero é muito importante na sua caracterização, pois nem sempre as massas moleculares médias nos remetem a verdade sobre um polímero. Entre os métodos de determinação da distribuição de massas moleculares a cromatografia de permeação em gel é a mais utilizada (MANO, 2000; HUNT e JAMES, 1993).

6.4.2.1. Análise de cromatografia de permeação em gel (GPC)

A técnica de Cromatografia de Permeação em Gel é extremamente poderosa para fracionamento de um polímero e sua distribuição de massa molecular. É utilizada para determinar as massas moleculares médias e a distribuição destas no polímero (FERREIRA, 2009; MANO, 2000; MAGALHÃES e FEITOSA, 1999; HUNT e JAMES, 1993).

Em essência a técnica consiste na separação molecular com base no tamanho efetivo das moléculas em solução. A solução da amostra permeia através dos poros de um material em gel, com seleção das moléculas da amostra de acordo com seus tamanhos efetivos na solução (seus volumes hidrodinâmicos). Durante o percurso as moléculas maiores eluem primeiro, já as moléculas menores que permeiam num grande número de poros, eluem por último, pois penetram mais nas partículas, permanecendo mais tempo na coluna do que as moléculas maiores (MIJS, 1992; HUNT e JAMES, 1993).

Na Figura 6.1 é apresentado um esquema ilustrativo de uma amostra polimérica polidispersa em uma coluna de permeação em gel, mostrando a separação das moléculas por tamanho, na técnica de GPC.

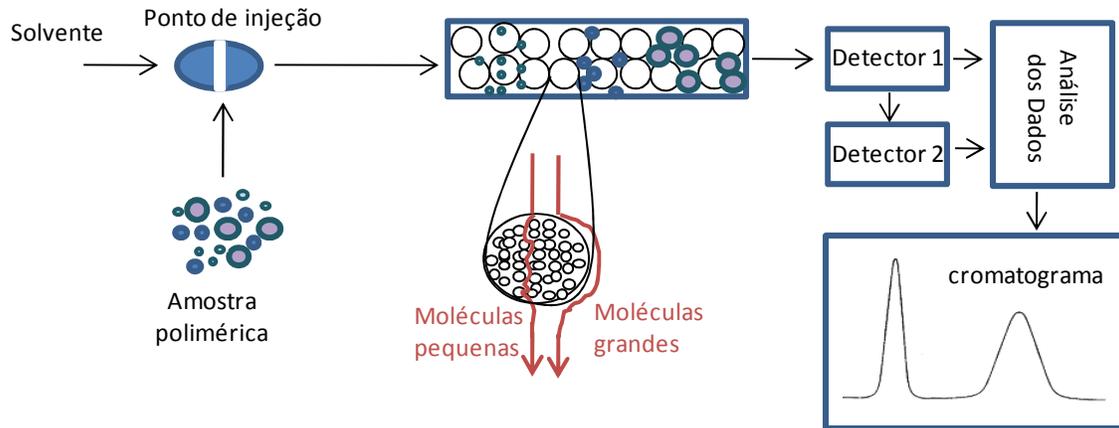


FIGURA 6.1. Esquema representativo das análises de cromatografia de amostras poliméricas em uma coluna de permeação em gel.

Os cromatógrafos de permeação em gel consistem essencialmente de um sistema contendo injetor, colunas, detectores e registradores. O fluxo de solvente se divide em dois: uma metade vai para uma coluna de referência, e a outra, para a coluna que conterá a amostra. A solução de polímero é injetada na corrente da amostra. As duas correntes, após passarem pelos dois sistemas de colunas (cada um com três ou quatro colunas em série com pérolas de diferentes tamanhos) são analisadas pelo detector.

Neste trabalho, durante cada batelada foram coletadas amostras em diferentes tempos de reação. A partir destas amostras foram preparadas soluções de concentrações em torno de 2 ppm do polímero formado, as quais foram filtradas com filtros de 0,45Um. Para determinação da massa molar média e ponderada ao longo da batelada, e sua distribuição, as amostras foram injetadas em um cromatógrafo Viscotek, modelo VE2001, utilizando o solvente Tetrahidrofurano (THF) p.a., grau HPLC, marca Tedia.

6.5. AVALIAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE IMPLEMENTADAS

Para se determinar o desempenho entre os controladores desenvolvidos neste trabalho foram realizadas análises qualitativas e quantitativas do comportamento das variáveis do processo.

As análises qualitativas correspondem à observação geral do comportamento transiente das variáveis envolvidas nas malhas de controle.

As análises quantitativas correspondem à determinação do *overshoot*, do tempo de subida, do tempo de estabilização, de índices de desempenho baseados no erro da variável controlada (ISE, IAE, ITAE, ITSE), da energia consumida durante os ensaios em batelada.

Os ensaios finais foram efetuados utilizando as mesmas condições experimentais, tais como: proporção de monomero/solvente, temperatura inicial do reator e do tanque de aquecimento, vazão do fluido polimérico e térmico, adição de N₂, concentração de iniciador, velocidade de agitação.

A utilização destes controladores consistiu na implementação de diferentes estratégias que fossem capazes de fornecer valores de *set-point* menos oscilatórios, acompanhando o comportamento transiente do processo, e que contribuíssem para suavizar as atuações da variável manipulada. Isto consistiu de um desafio ao desenvolvimento destes controladores, e possibilitou realizar uma análise da performance de cada estrutura implementada no sistema experimental.

6.5.1. QUANTO AO OVERSHOOT, TEMPO DE SUBIDA E TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO

Nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 são observados o *overshoot*, o tempo de subida e o tempo de estabilização em cada ensaio.

Os valores de *overshoot* e tempos de subida e de estabilização maiores foram observados quando do uso de controladores posicionais. Isto pode ser atribuído ao comportamento mais oscilatório no início do processo, da temperatura do fluido térmico. O tempo de subida em todos os ensaios de controle foi igual ao tempo de estabilização, com exceção do ensaio com controlador *Fuzzy-PID*, que devido a uma ação brusca na saída, provocou uma instabilidade no sistema, combinada com a ação de um controlador P com elevado ganho.

No início do processo, as ações variações da temperatura do fluido térmico afetam mais a temperatura do reator, devido à baixa viscosidade no fluido polimérico que facilita a troca térmica do sistema.

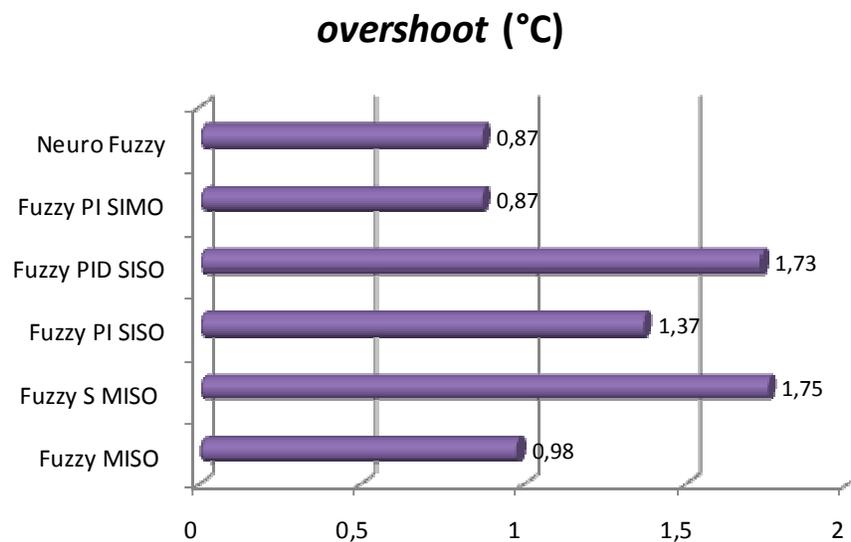


FIGURA 6.2. Comparação entre valores de *overshoot* (sobressinal) observados no processo de polimerização, sob diferentes estratégias de controle.

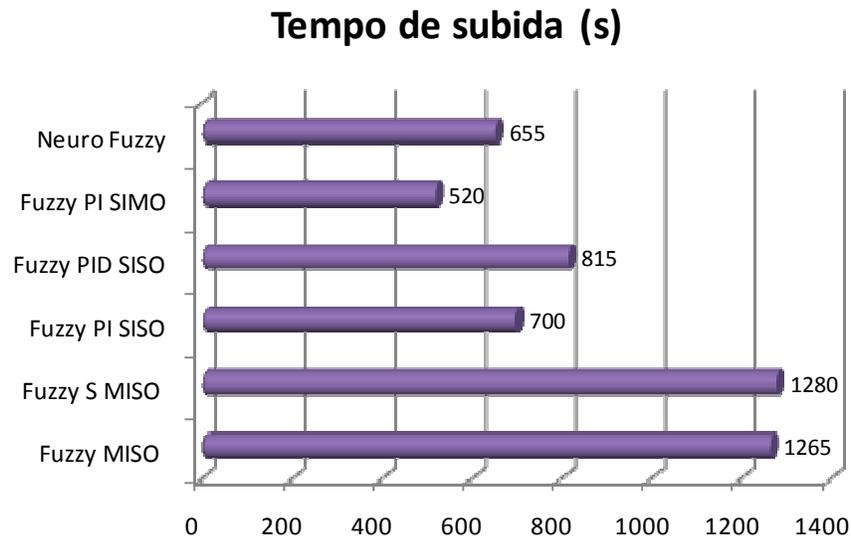


FIGURA 6.3. Comparação entre tempos de subida observados no processo de polimerização, sob diferentes estratégias de controle.

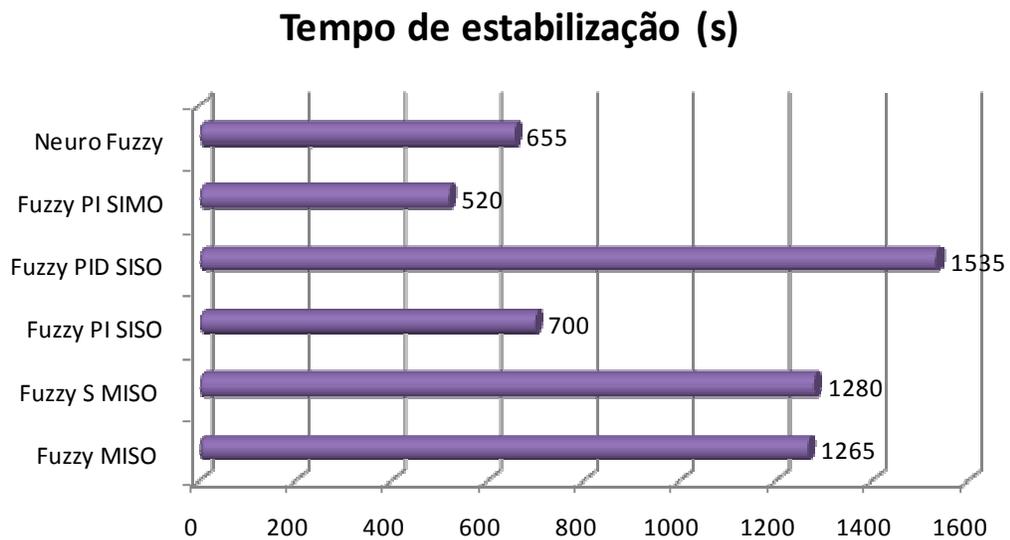


FIGURA 6.4. Comparação entre tempos de estabilização observados no processo de polimerização, sob diferentes estratégias de controle.

Comparando os controladores Fuzzy-PI e Fuzzy-PI SIMO, observa-se que a ação do inversor de frequência sobre a vazão do fluido térmico na camisa do reator, contribuiu para diminuir o tempo de resposta e sobressinal da variável controlada.

A manutenção da temperatura, ao longo da reação de polimerização, foi realizada com eficiência entre todos os controladores implementados. Em todos os ensaios observa-se pequenas variações da temperatura no decorrer do processo. Para quantificar estas variações foram utilizados os parâmetros de desempenho baseados no erro.

Os índices de desempenho baseados em critérios do erro da variável controlada são apresentados nas Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8.

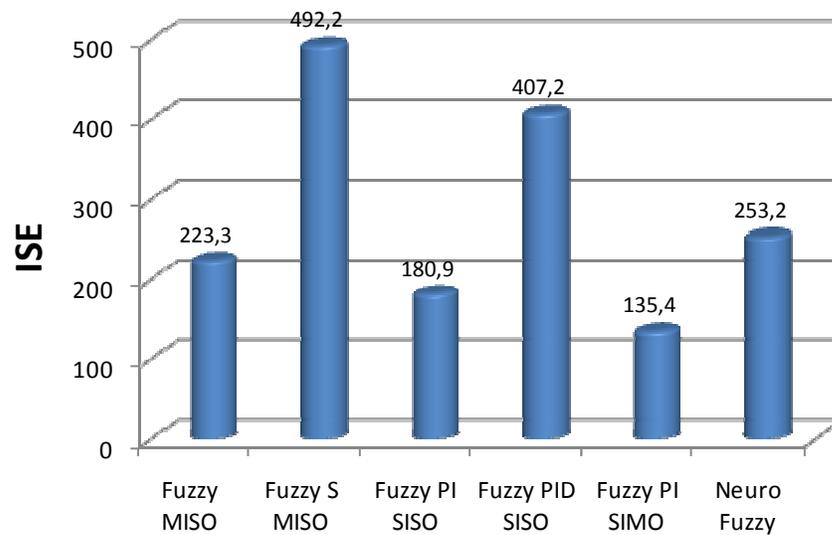


FIGURA 6.5. Valor do parâmetro ISE (Integral do quadrado do erro) para ensaios realizados sob diferentes estratégias de controle inteligente.

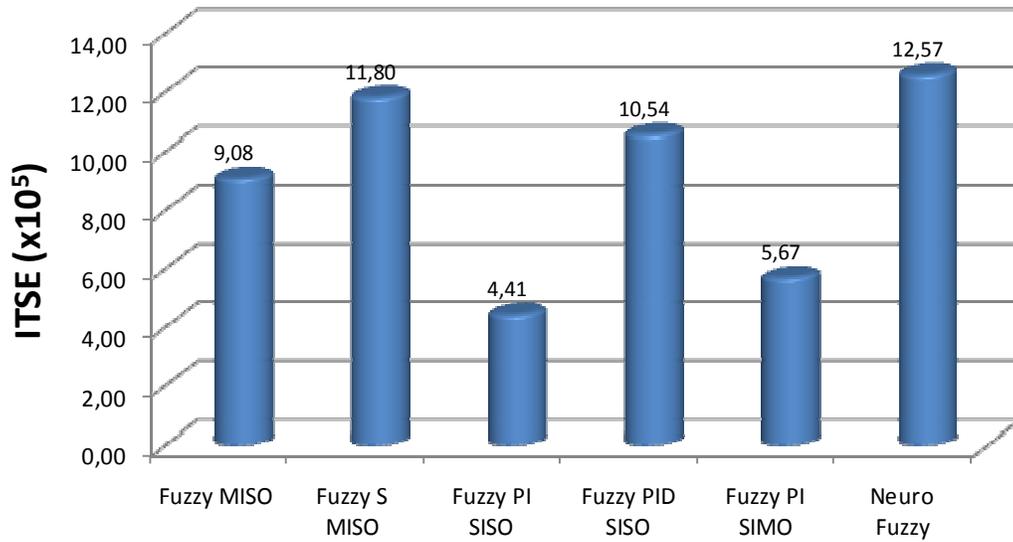


FIGURA 6.6. Valor do parâmetro ITSE (Integral do quadrado do erro, com peso temporal) para ensaios realizados sob diferentes estratégias de controle inteligente.

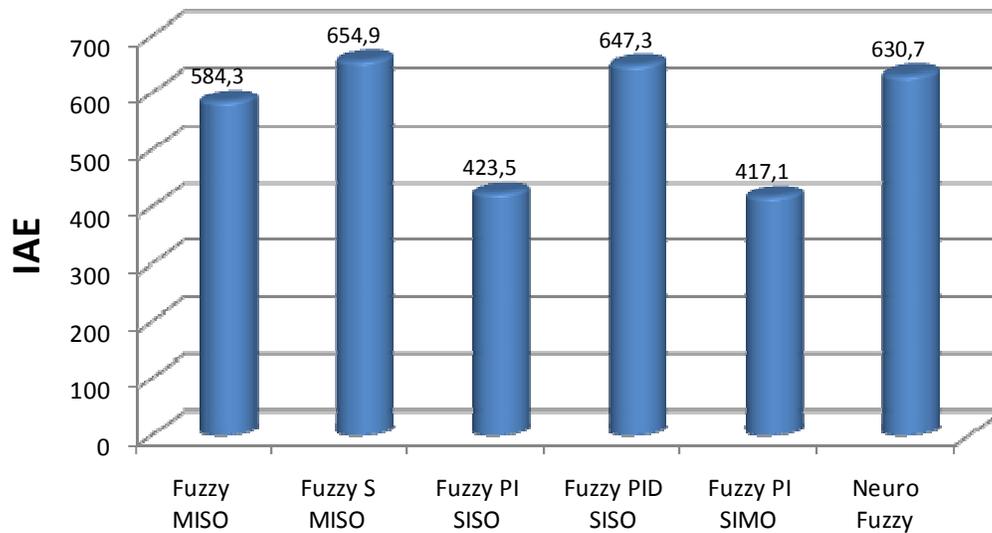


FIGURA 6.7. Valor do parâmetro IAE (Integral do erro absoluto) para ensaios realizados sob diferentes estratégias de controle inteligente.

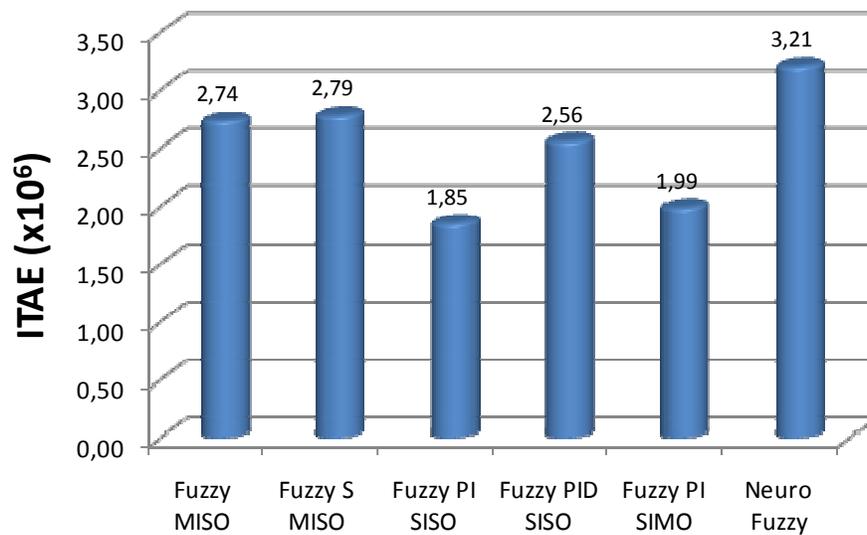


FIGURA 6.8. Valor do parâmetro ITAE (Integral do erro absoluto, com peso temporal) para ensaios realizados sob diferentes estratégias de controle inteligente.

A principal diferença entre os critérios IAE e ISE é que o ISE pondera mais os erros de grande intensidade, o que ocorre usualmente no início da resposta, e menos os erros de pequena intensidade, o que ocorre no final da resposta. O ITAE reduz a contribuição de erros iniciais e aumenta a contribuição para tempos maiores.

De acordo com as Figuras 6.5 a 6.8, percebe-se que os ensaios utilizando os controladores posicionais *Fuzzy S MISO* e *Fuzzy PID*, proporcionaram maiores valores em todos os índices de critério do erro apresentados. Observando as Figuras 5.12 e 5.23, percebe-se que nestes ensaios houve uma maior oscilação da variável controlada, e foram os ensaios que apresentaram maiores valores de *overshoot*.

Os controladores que apresentaram menores índices de desempenho foram os controles baseados nas saídas incrementais (*Fuzzy-PI* e *Fuzzy-PI SIMO*)

e o que utilizou a variação de densidade como variável de entrada (*Fuzzy-MISO*). Nestes ensaios houve menores oscilações na variável controlada. Os índices de erro para os controladores incrementais foram muito semelhantes, salvo uma pequena melhoria para o controlador *Fuzzy-PI SIMO*.

Apesar da eficiência do controlador *Neuro-fuzzy* observa-se que este apresenta índices mais elevados do critério do erro. Isto se deve as variações da temperatura que persistiram ao longo da reação. No entanto deve-se ponderar o comportamento geral da variável, uma vez que estas variações estavam dentro de uma faixa de variação permitida.

6.5.2. QUANTO A ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELO VARIADOR DE POTÊNCIA

Quanto ao consumo de energia elétrica durante os ensaios, de acordo com a Figura 6.9, percebe-se que os ensaios que proporcionaram maior consumo de energia foram aqueles que utilizaram controladores posicionais na malha.

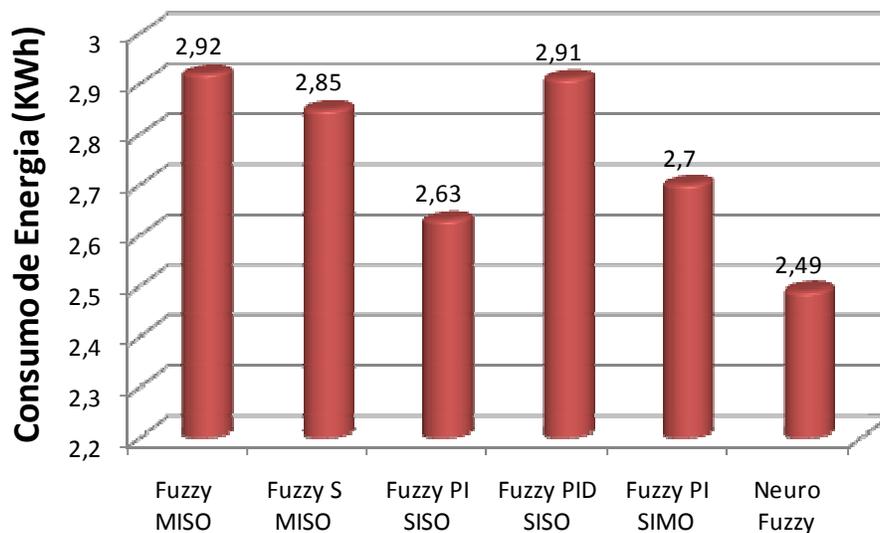


FIGURA 6.9. Comparação o consumo de energia elétrica, devido à variação de potência, para ensaios realizados sob diferentes estratégias de controle inteligente.

Apesar de diferentes atuações na variável manipulada, os controladores posicionais apresentaram valores de consumo de energia muito próximos. Entretanto vale ressaltar que as ações provenientes da utilização do controlador *Fuzzy-PID* foram as de menor qualidade, pois mesmo proporcionando o mesmo consumo de energia as ações provocadas na variável manipulada propiciaram um maior desgaste no elemento final de controle.

Em se tratando do sistema cascata, os controladores *Fuzzy-PI* proporcionaram menores gastos no consumo de energia elétrica. Através da análise do comportamento das variáveis controlada e manipulada, bem como os índices de desempenho, pode ser constatada a maior eficiência do controlador *Fuzzy-PI*, na malha cascata.

A estratégia *Neuro-Fuzzy* foi a que propiciou atuações mais suavizadas na variação de potência de forma a controlar a temperatura do reator, e consequentemente, proporcionou uma maior redução no consumo de energia

elétrica. Além disso, esta estratégia contribuiu para um menor desgaste do equipamento utilizado como elemento final de controle neste sistema experimental.

6.5.3. QUANTO À CONVERSÃO

Uma vez que a temperatura do fluido polimérico foi mantida em torno do *set-point* em todos os ensaios, salvo algumas variações, os perfis de densidade mediante utilização de cada estratégia de controle foram bastante similares, apresentando uma variação de densidade média de aproximadamente 35 kg/m³. Esperou-se então semelhantes perfis de conversão para cada batelada.

Os perfis de conversão experimental apresentaram comportamentos semelhantes ao perfil de conversão obtido através de simulação computacional, utilizando o programa Fortran 90, conforme podem ser observados na Figura 6.10.

O programa em Fortran utilizado foi desenvolvido por Lona e Penlidis (2005), e os dados dos parâmetros foram retirados de Machado (2004).

Nas Figuras 6.11 a 6.16 são apresentados os perfis da conversão experimental e da variação de densidade ao longo da reação, para cada ensaio utilizando os diferentes tipos de controladores.

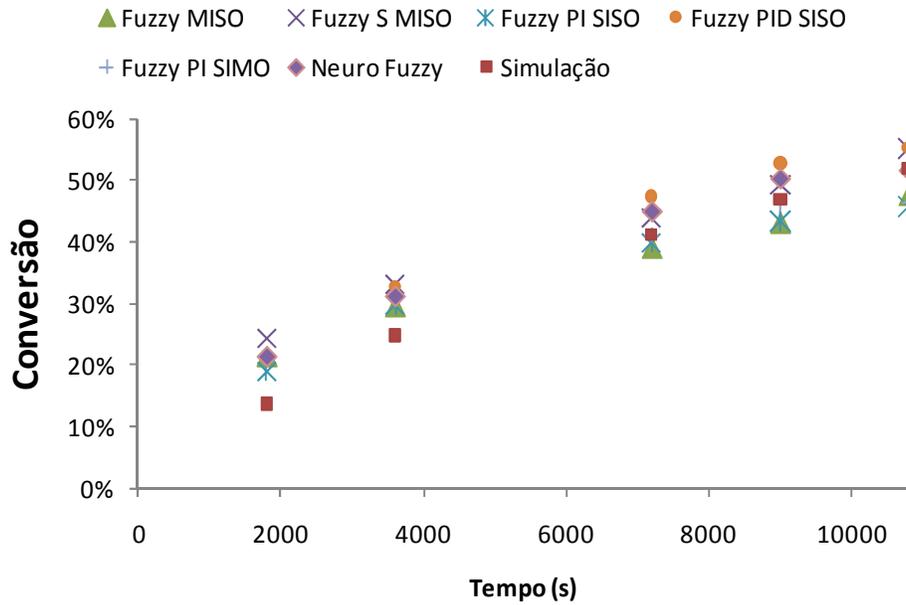


FIGURA 6.10. Perfil de conversões experimentais utilizando diferentes controladores x conversão por simulação.

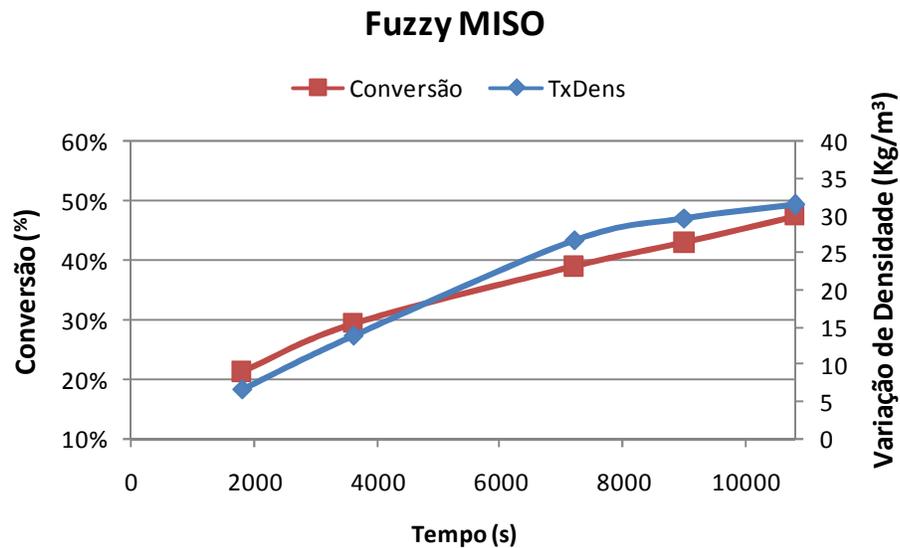


FIGURA 6.11. Perfil de conversão x variação de densidade no ensaio utilizando o controlador *Fuzzy MISO*.

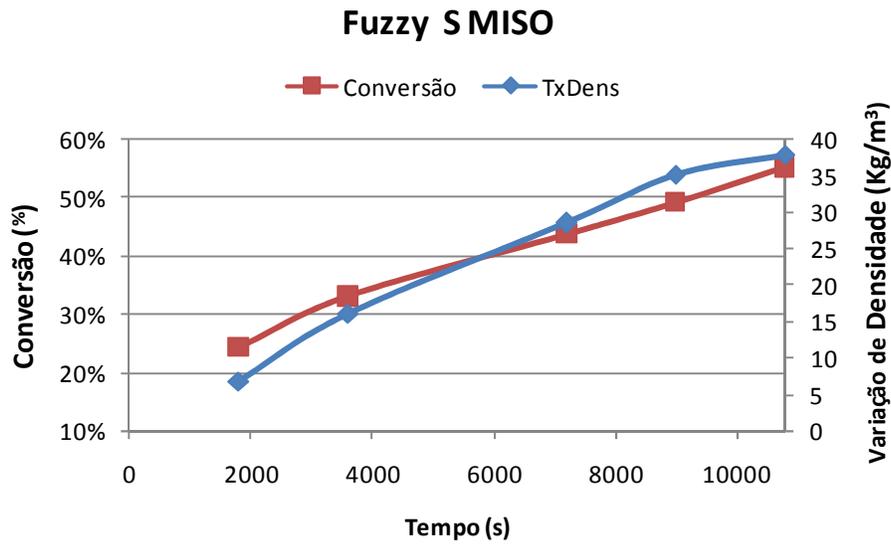


FIGURA 6.12. Perfil de conversão x variação de densidade no ensaio utilizando o controlador *Fuzzy S MISO*.

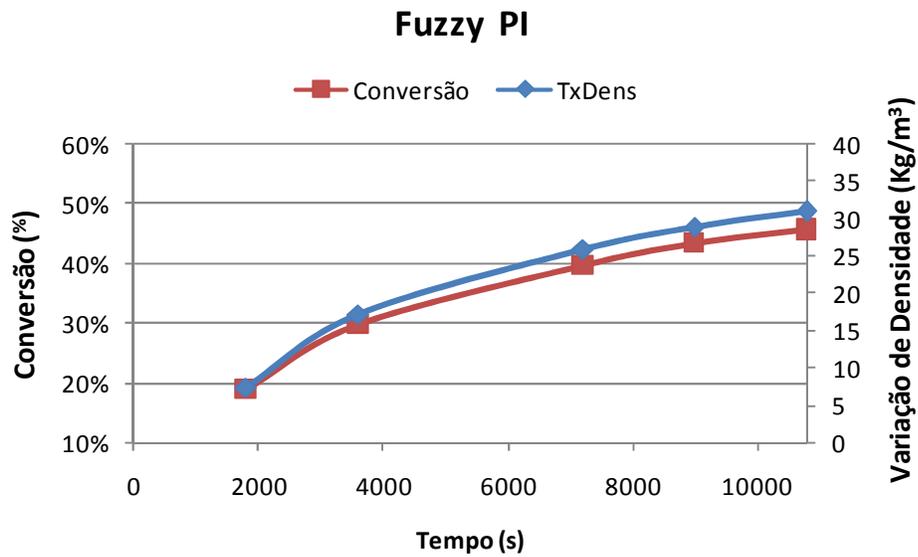


FIGURA 6.13. Perfil de conversão x variação de densidade no ensaio utilizando o controlador *Fuzzy PI*.

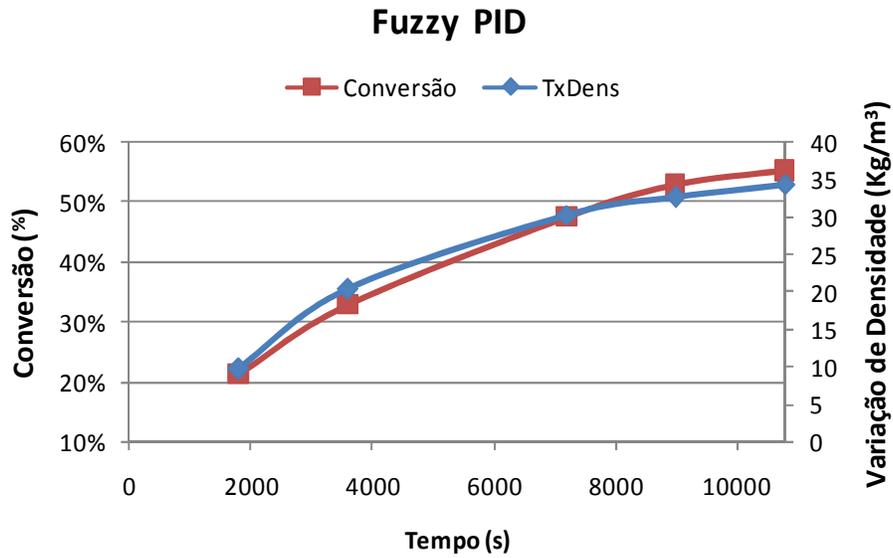


FIGURA 6.14. Perfil de conversão x variação de densidade no ensaio utilizando o controlador *Fuzzy* PID.

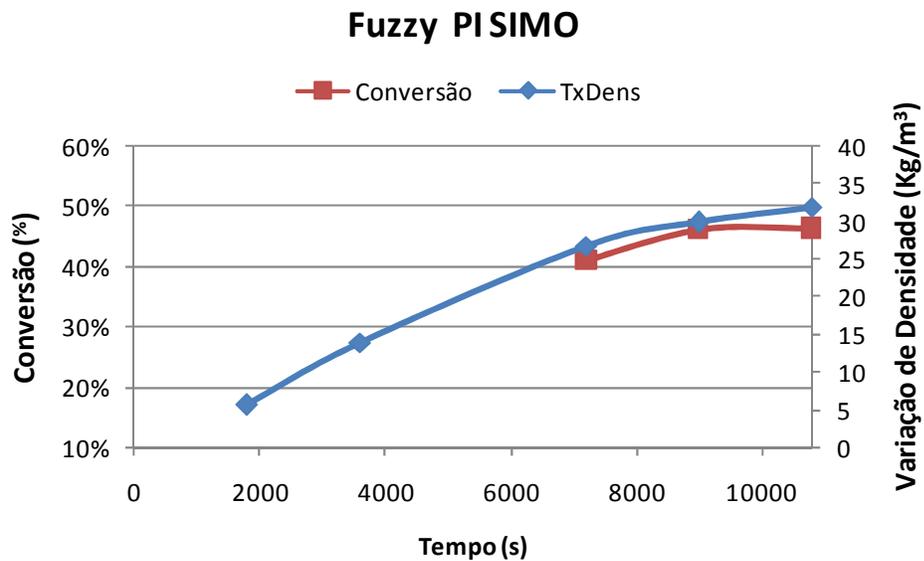


FIGURA 6.15. Perfil de conversão x variação de densidade no ensaio utilizando o controlador *Fuzzy* PI SIMO.

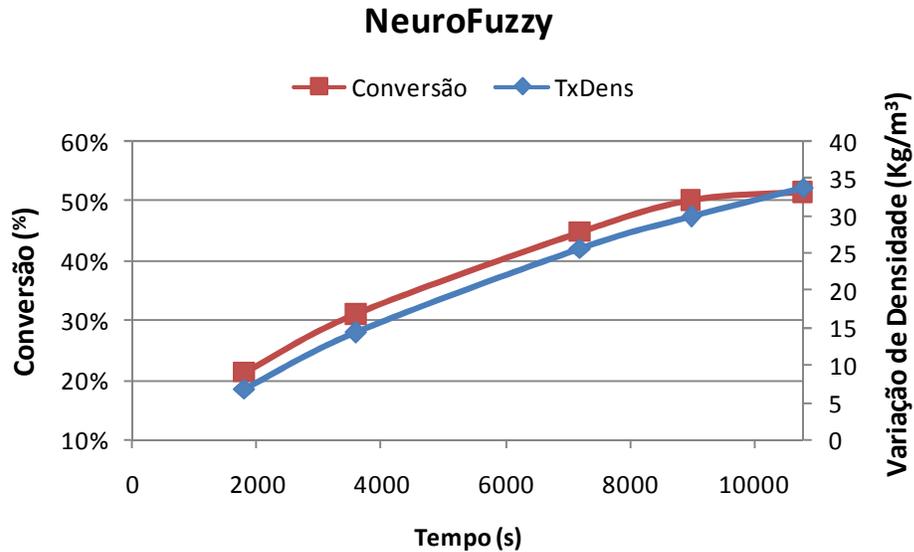


FIGURA 6.16. Perfil de conversão x variação de densidade no ensaio utilizando o controlador Neuro-fuzzy MISO.

Verifica-se que, a partir das análises gravimétricas, a conversão final média apresentada ao final dos ensaios foi em torno de 50%. No entanto nota-se valores mais elevados de conversão ao final do processo, para os ensaios com controladores *Fuzzy S MISO* e *Fuzzy PID*. Ao analisar o perfil do fluido polimérico (Figuras 5.13 e 5.24), nota-se também que estes ensaios apresentaram maiores valores de *overshoot*, e de tempo de estabilização, ou seja, permaneceram mais tempo com a temperatura acima da estabelecida. Esta elevação na temperatura ocorre justamente no início da reação, onde são intensas as ligações da cadeia polimérica, devido à grande quantidade de radicais livres presentes no meio. Uma vez que a conversão é favorecida pelo aumento da temperatura, este fato pode ter propiciado um pequeno acréscimo nos valores de conversão nestes ensaios.

A partir da observação das Figuras 6.11 a 6.16 pode-se constatar que conforme esperado, os perfis de densidade acompanham a tendência dos perfis de conversão ao longo da reação de polimerização. Comprova-se então que é

possível acompanhar a conversão *on-line* indiretamente através do monitoramento da densidade do fluido polimérico.

6.5.4. QUANTO ÀS MASSAS MOLARES

O controle rigoroso da temperatura na reação de polimerização é muito importante uma vez que variações nesta variável possuem influência direta na qualidade final do polímero.

As propriedades mecânicas e o comportamento do polímero durante o processamento são altamente dependentes do tamanho médio e da distribuição de comprimentos das cadeias de polímero. Embora a estrutura química do polímero seja igual, massas moleculares diferentes podem mudar completamente as propriedades do polímero (propriedades físicas, mecânicas, térmicas, reológicas, de processamento e outras), e por esta razão, a qualidade final do polímero obtido está relacionada à massa molecular.

Tanto a massa molecular quanto a distribuição de massas moleculares são determinadas pelas condições operacionais da reação, sendo que diferentes condições operacionais produzirão polímeros com massas moleculares médias diferentes e condições operacionais fixas, produzirão massas moleculares mais uniformes. Neste caso deve-se então ponderar a aplicação final do polímero a ser obtido.

Diante do comportamento similar do perfil de temperatura no interior do reator, todas as bateladas com diferentes controladores aplicados, apresentaram a mesma faixa de valores ($\times 10^4$) de massa molecular numérica (M_n) e ponderal (M_w) ao longo da reação de polimerização.

Os perfis experimentais da massa molecular numérica e ponderal apresentaram comportamentos semelhantes ao perfil obtido através de simulação

computacional, utilizando o programa Fortran 90 (Lona e Penlidis, 2005), conforme podem ser observados nas Figuras 6.17 e 6.18.

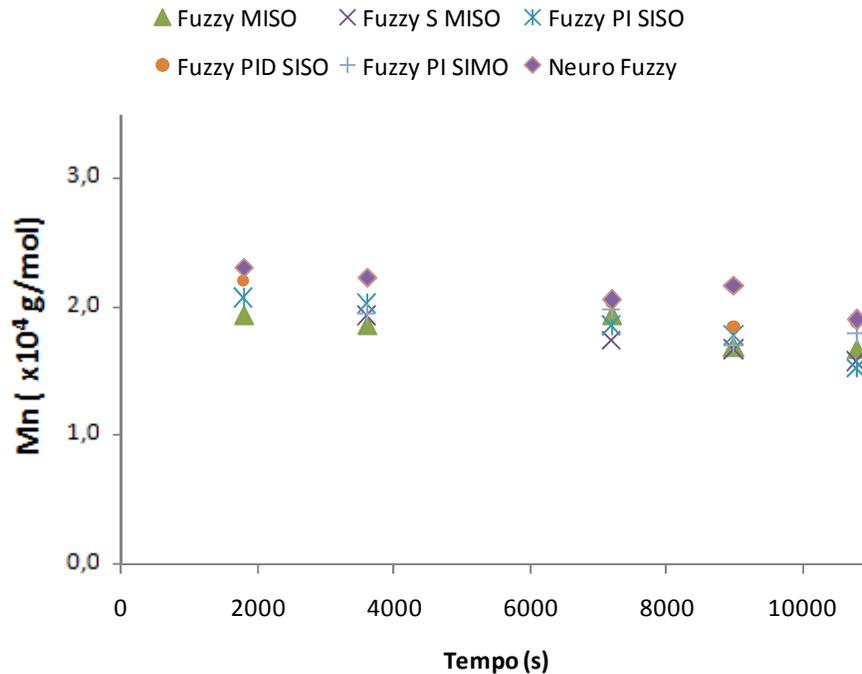


FIGURA 6.17. Perfis de massa molecular numérica, M_n , de ensaios em malha fechada utilizando as diferentes técnicas de controles, ao longo da reação de polimerização.

De acordo com as Figuras 6.17 e 6.18 pode-se notar que os perfis de M_n e M_w , a partir da aplicação dos diferentes tipos de controladores, foram similares. Isto se justifica pelo perfil semelhante de temperatura do reator, apesar de pequenas variações desta variável em torno do valor de temperatura de *set-point* desejado.

Os perfis de M_n e M_w experimentais seguem um comportamento de acordo com os dados obtidos por simulação, onde observa-se a manutenção destes valores próximo a uma faixa, praticamente constantes ao longo da reação.

O perfil um pouco descendente de massas molares é uma característica comum observada em processos de polimerização via radical livre, sobretudo quando as reações de transferência de cadeia para monômero e solvente estão presentes, pois estas reações causam uma redução das massas moleculares. Quando ocorrem reações de transferência de cadeia para polímero, que causam ramificações da cadeia polimérica (este não é o caso do poliestireno, que apresenta cadeia linear), pode haver um aumento da massa molecular ao longo da reação. Polimerizações em massa, que apresentam uma autoaceleração acentuada, também podem causar um aumento da massa molecular ao longo da conversão.

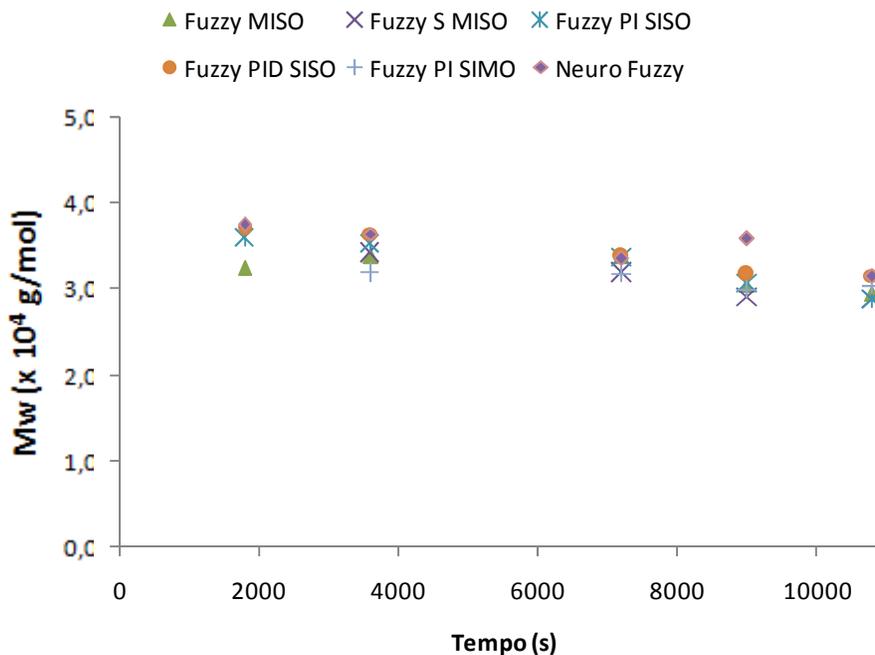


FIGURA 6.18. Perfis de massa molecular ponderal, M_w , de ensaios em malha fechada utilizando as diferentes técnicas de controles inteligentes, ao longo da reação de polimerização.

Nas Figuras 6.19 e 6.20 estão apresentados os perfis de M_n e M_w , respectivamente, para ensaios de malha aberta (sem controle), ensaio com

controle que permitiu a manutenção efetiva da temperatura do reator (*Neuro-fuzzy* e *Fuzzy MISO*), e um ensaio com controle (estratégia de controle manual), no entanto com grandes variações de temperatura, principalmente na etapa inicial (crítica) da reação, denominado CM3. Este ensaio de controle foi realizado utilizando controle manual e o perfil de temperatura interno do reator de polimerização encontra-se apresentado no Apêndice A.

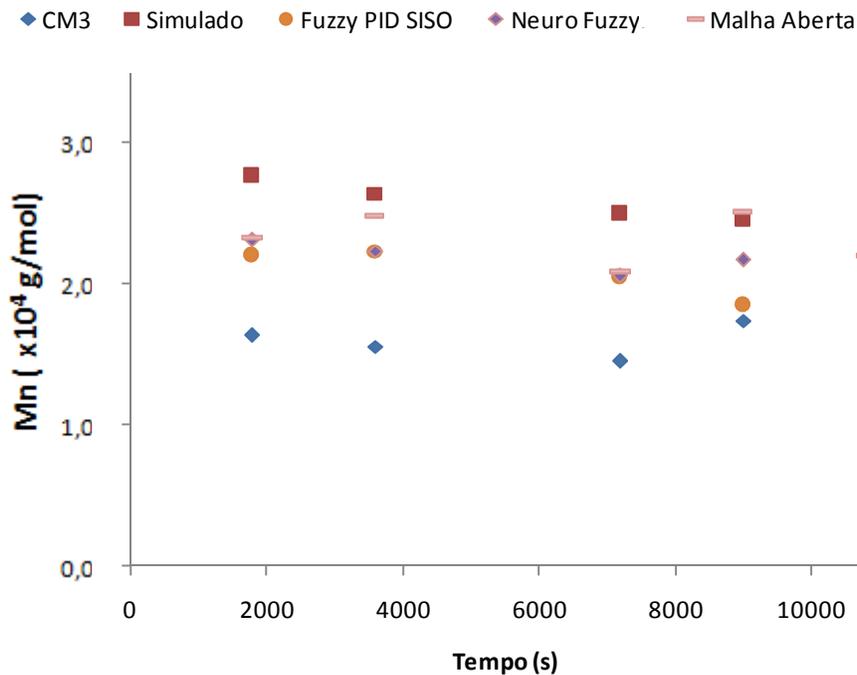


FIGURA 6.19. Perfis de massa molecular numérica, M_n , de ensaios em malha aberta, malha fechada (*Neuro-Fuzzy* e *Fuzzy-PID*), ensaio de controle manual (CM3) e por simulação, ao longo da reação.

Observa-se que os perfis de M_n e M_w , obtidos para o ensaio com controle denominado CM3, apresentaram valores mais baixos, o que pode ser justificado devido às variações de temperatura da variável controlada neste ensaio, onde a temperatura do reator encontrou-se em valores acima do estabelecido,

principalmente na etapa inicial da reação (Apêndice A). Esta elevação da temperatura e permanência acima do valor de referência pode ter propiciado o aumento da quantidade de radicais livres no meio reacional, provocando a diminuição da massa molar do produto formado. Isso ocorre porque a liberação de radicais livres no meio é favorecida com o aumento da temperatura, e se existe uma grande quantidade de radicais competindo por monômero então as moléculas de monômeros disponíveis serão divididas entre o número maior de radicais e conseqüentemente a massa molecular do polímero será menor.

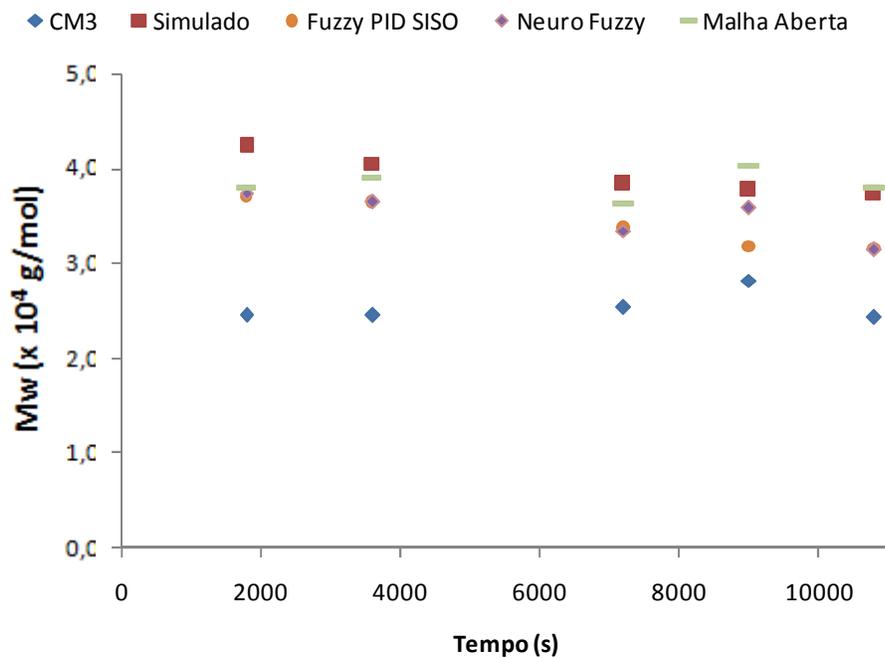
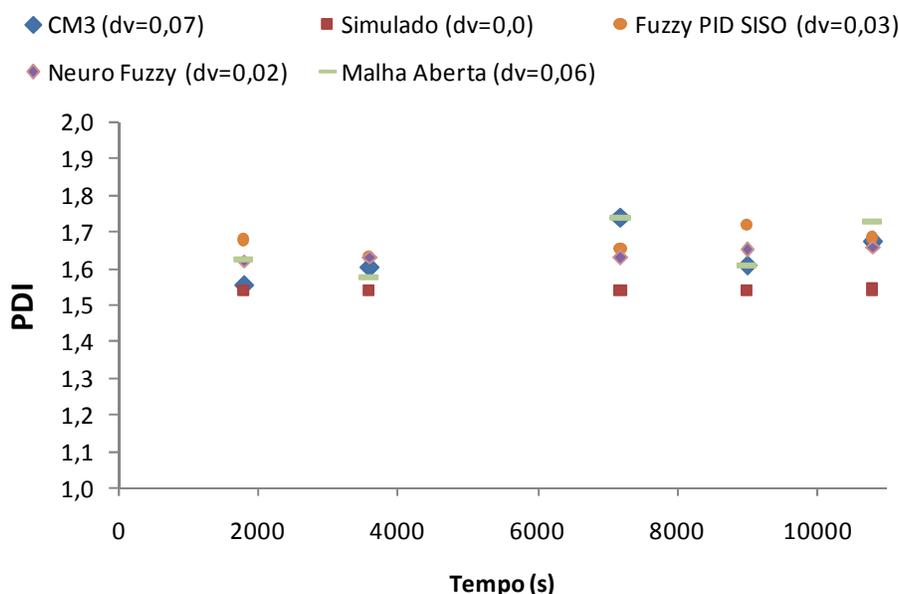


FIGURA 6.20. Perfis de massa molecular ponderal, M_w , de ensaios em malha aberta, malha fechada (*Neuro-Fuzzy* e *Fuzzy-PID*), ensaio de controle manual (CM3) e por simulação, ao longo da reação.

Analogamente pode-se perceber que os dados obtidos para o ensaio realizado em malha aberta, onde ocorre queda na temperatura do meio reacional,

apresentam valores um pouco maiores dos obtidos para aqueles em que a temperatura do meio manteve-se constante, próxima ao valor de referência. Entretanto, apresenta maior variabilidade do índice de polidispersidade, o qual está relacionado com a distribuição da massa molecular, um parâmetro importante que define as características do material obtido.

Na Figura 6.21 estão apresentados os perfis dos índices de polidispersão dos ensaios apresentados nas Figuras 6.19 e 6.20.



Sendo dv o desvio padrão calculado para o conjunto de dados de cada ensaio, e que está relacionado com variabilidade do índice PDI durante a batelada.

FIGURA 6.21. Perfis de índice de polidispersidade, PDI, de ensaios em malha aberta, malha fechada (Neuro-Fuzzy e Fuzzy-PID), ensaio de controle manual (CM3) e por simulação, ao longo da reação.

O processo de polimerização conduz a formação de cadeias poliméricas de diferentes tamanhos, e conseqüentemente de massas moleculares diferentes. O índice de polidispersão, ou polidispersidade (PDI) indica a distribuição das massas

moleculares dos polímeros. Por exemplo, se todas as cadeias poliméricas tiverem a mesma massa molecular a polidispersão será igual a um. Todavia, a polidispersão da maioria dos polímeros comerciais é próxima de dois (HUNT e JAMES, 1993; ALLCOCK e LAMPE, 1990; VAN KREVELEN, 1990).

Dois polímeros de mesma estrutura química podem ter mesma massa molecular média, mas distribuições diferentes. No entanto, vale ressaltar que, neste caso, quanto menor a variabilidade do índice de polidispersidade (PDI) ao longo da reação menor a influência nas características do produto final.

Observando a Figura 6.21 pode-se perceber que, para os dados obtidos por simulação, é constante o perfil de PDI, não apresentando variações de polidispersão ao longo da reação. Sendo assim, foram calculados os desvios-padrão dos dados de polidispersidade obtidos para as bateladas com pequenas e maiores variações de temperatura do meio reacional. Os valores estão apresentados nesta mesma Figura (6.21) e indicam a variabilidade do índice de polidispersão.

É desejada uma menor variabilidade do índice de polidispersão (PDI) ao longo da reação, o que indica a menor variação das massas moleculares no decorrer da batelada. Esta variabilidade pôde ser quantificada através de cálculos de desvio padrão do conjunto de dados relacionados ao índice PDI durante a reação de polimerização. Quanto mais próximo de zero for este valor, indica a menor variação de massas moleculares médias, favorecendo a formação de um polímero mais uniforme.

De acordo com a Figura 6.21 pode-se notar que os ensaios em que o controle de temperatura foi mais rigoroso obteve-se uma menor variabilidade da polidispersidade em comparação aos ensaios em que houve maiores variações da temperatura do meio reacional.

Este comportamento está relacionado com a influência do controle da temperatura na distribuição das massas moleculares, o qual pode ser constatado a partir dos perfis obtidos para as curvas de distribuição, em diferentes momentos da reação, representados por *a*, *b*, *c*, *d* e *e*, apresentados nas Figuras 6.22 a 6.25.

O comportamento das curvas de distribuição dos ensaios em que foram aplicados os controladores inteligentes foi semelhante, sendo então apresentados os comportamentos dos ensaios que apresentaram menor e maior desvio do *set-point* da temperatura dentre os ensaios em malha fechada realizados: controle *Neuro-fuzzy* e controle *Fuzzy-PID*, representados pelas figuras 6.22 e 6.25, respectivamente.

Algumas das bateladas apresentaram variação na temperatura de polimerização, o que pode influenciar significativamente às constantes cinéticas de polimerização ao longo do tempo e conseqüentemente a forma da curva de distribuição de massa molar. Convém lembrar que a distribuição da massa molecular correlaciona-se as principais características de processamento e propriedades do polímero.

Quanto mais uniforme, estreita e regular for esta curva, remete a melhor distribuição da massa molecular do produto e menor a influência negativa sobre as propriedades mecânicas e físicas do mesmo (ex: temperatura de transição vítrea, resistência a tração, etc.).

Analisando-se as Figuras 6.22 a 6.25, as curvas de distribuição que apresentam maior uniformidade e regularidade são as apresentadas pelas Figuras 6.22 (a, b, c, d e e) , onde houve uma maior manutenção da temperatura de reação de polimerização. As curvas de distribuição das massas moleculares com maiores irregularidades são as obtidas para a batelada que apresentou maior variação de temperatura do meio reacional ao longo da reação de polimerização, referente ao ensaio realizado em malha aberta (Figuras 6.25). Estas irregularidades mostram o impacto sofrido na estrutura deste material devido à variação indesejada de temperatura.

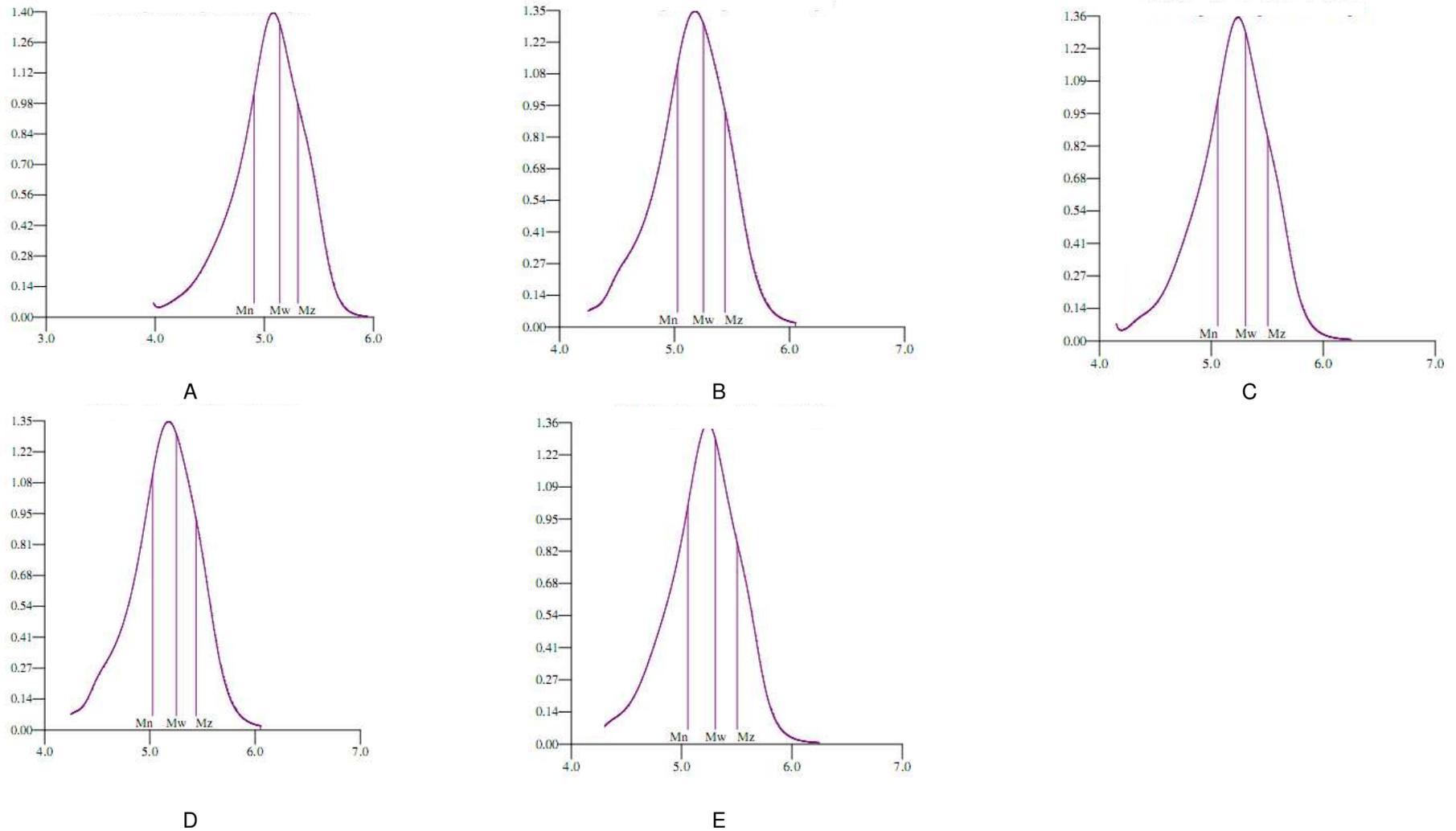


FIGURA 6.22. Curvas de distribuição de massa molecular, ao longo da reação, referente ao ensaio de malha fechada com controle Neuro-Fuzzy. (eixo x = log massa molecular; eixo y=fração da massa)

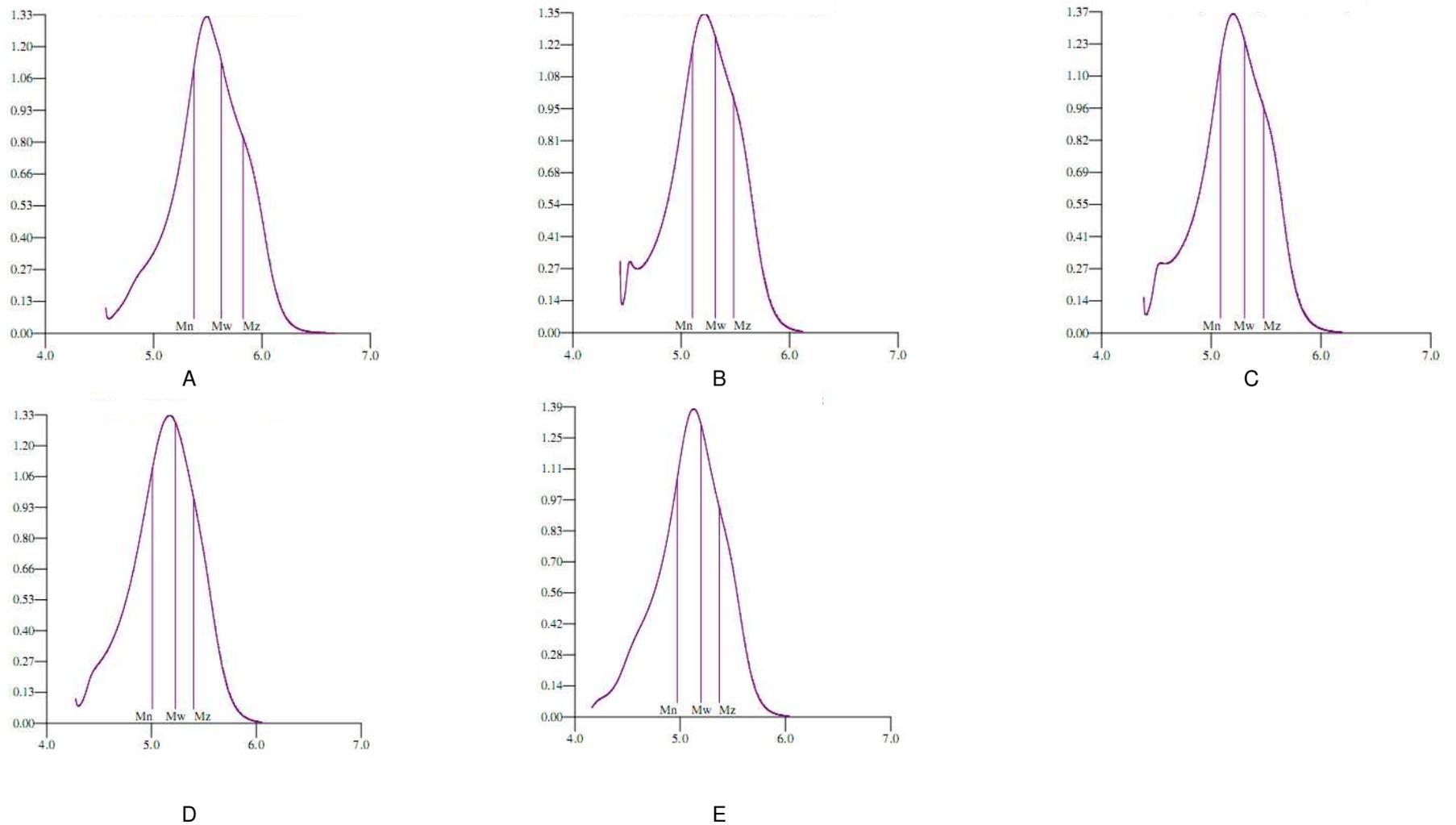


FIGURA 6.23. Curvas de distribuição de massa molecular, ao longo da reação, referente ao ensaio de malha fechada com controle Fuzzy-PID. (eixo x = log massa molecular; eixo y=fração da massa)

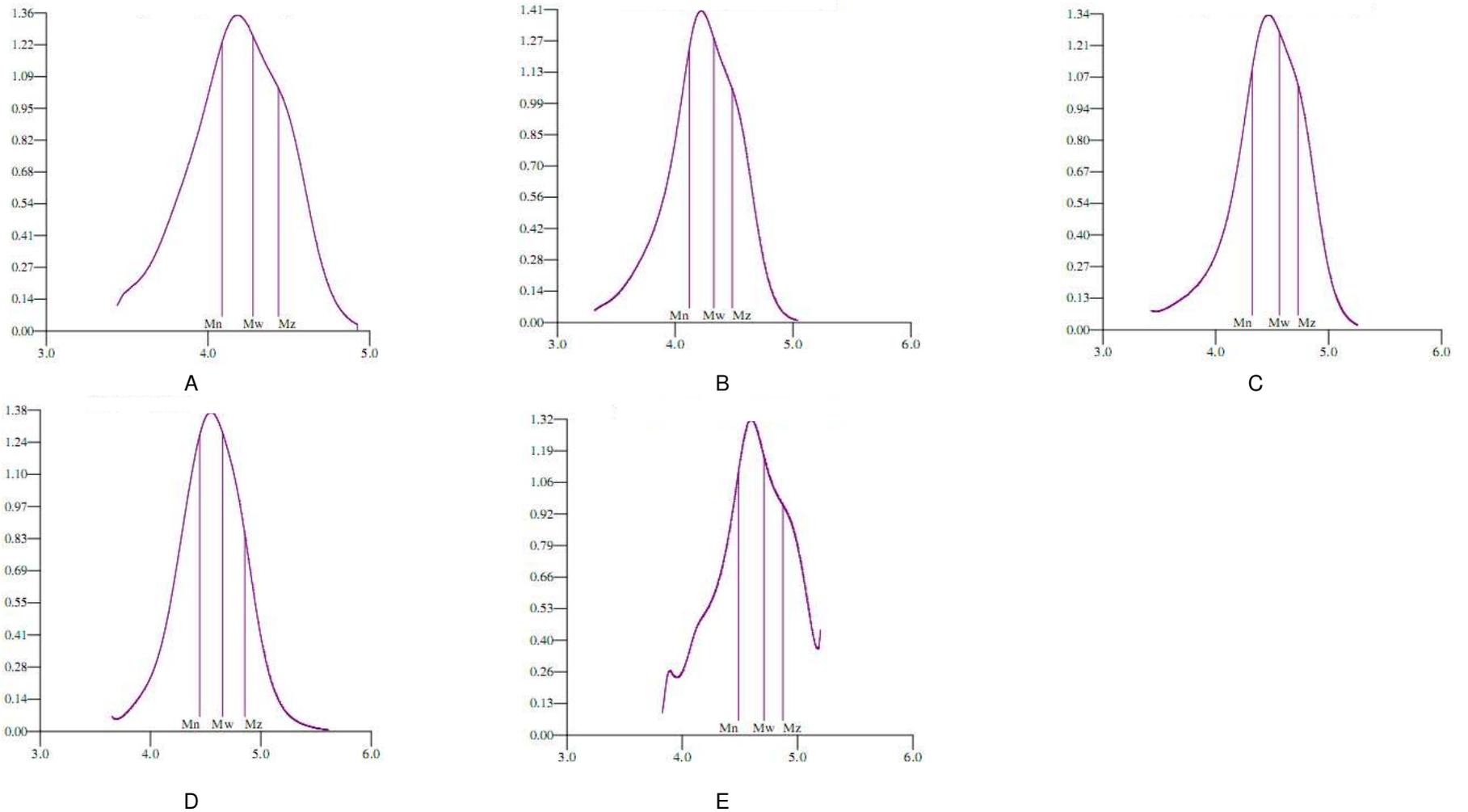


FIGURA 6.24. Curvas de distribuição de massa molecular, ao longo da reação, referente ao ensaio de controle manual CM3. (eixo x = log massa molecular; eixo y=fração da massa)

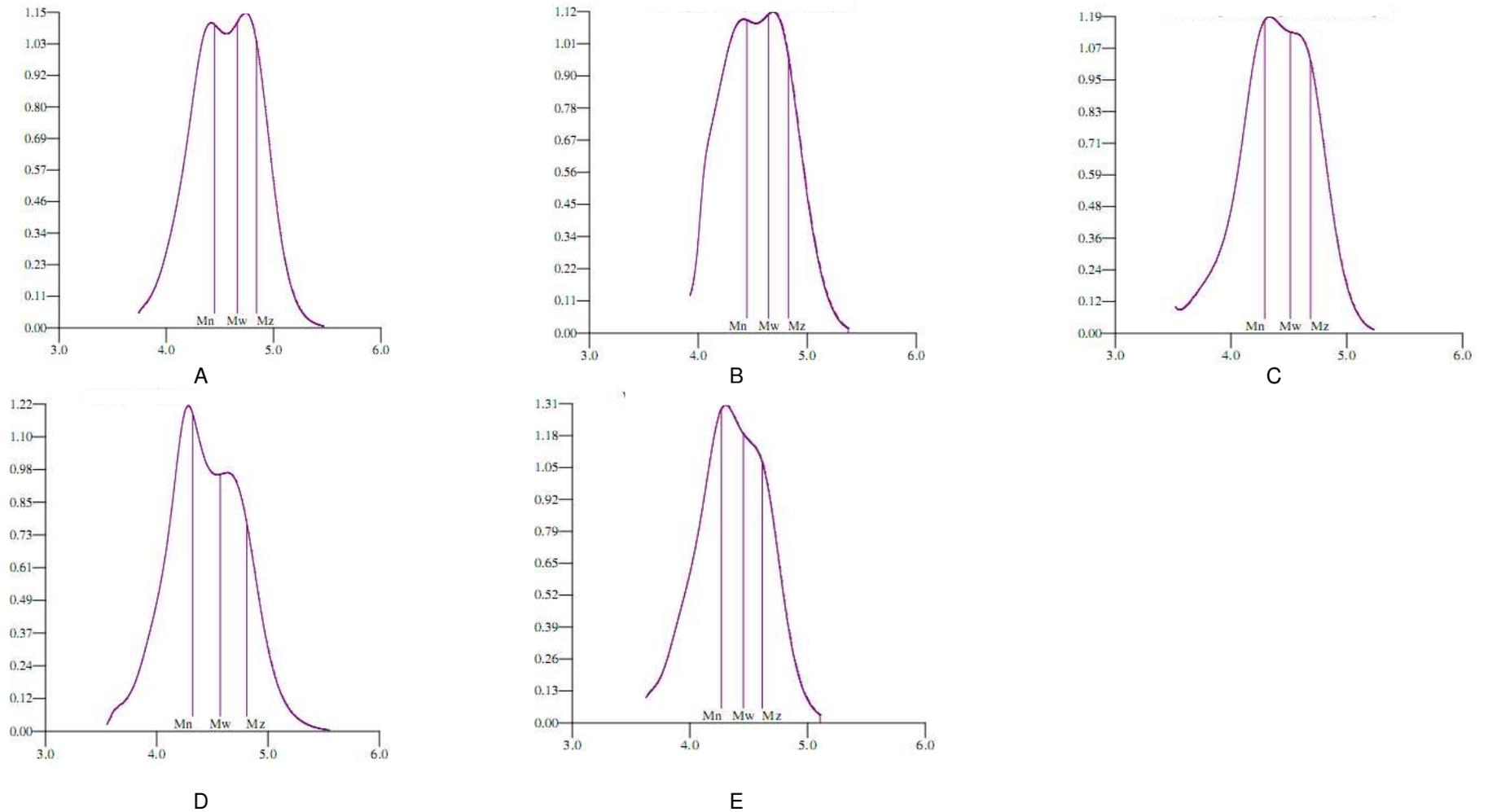


FIGURA 6.25. Curvas de distribuição de massa molecular, ao longo da reação, referente ao ensaio em malha aberta (MA). (eixo x = log massa molecular; eixo y= fração da massa)

As menores massas moleculares foram obtidas pela batelada em que houve maior permanência da temperatura acima do valor de *set-point*, referentes ao ensaio de controle CM3. Neste ensaio percebe-se maior variabilidade da massa molecular, que pode ser visualizada pelas variações dos valores no eixo y das Figuras 6.24, quando comparadas aos perfis das distribuições moleculares obtidas para os ensaios de controle em malha fechada com maior eficiência no controle de temperatura da reação (Figuras 6.22 e 6.23).

6.7. CONCLUSÕES

Neste capítulo, foram definidos parâmetros de desempenho para uma avaliação entre as diferentes estratégias de controle desenvolvidas e implementadas em cada batelada.

Os resultados apresentados indicam similaridades e características comuns entre os diferentes tipos de controladores *fuzzy*. Foram observados desempenhos satisfatórios nos ensaios envolvendo controladores mono e multivariáveis.

As estratégias de controle *fuzzy* incremental foram escolhidas como a mais apropriada para compor a malha de controle cascata, pois combina uma saída com menores oscilações, contribuindo para atenuar as atuação da variável manipulada, bom desempenho nos parâmetros de erro e menor consumo de energia elétrica. Na malha cascata, os controladores incrementais apresentaram uma redução no consumo de energia de aproximadamente 8% quando comparado com os controladores *fuzzy* posicionais.

A estratégia do controlador Neuro-*fuzzy* foi a que melhor proporcionou índices de desempenho, ações de saída mais eficientes, menor desgaste do equipamento e menor consumo de energia (redução de 12%) comparado aos outros controladores implementados.

Os perfis de densidade e conversão apresentam similaridades nos ensaios em batelada, comprovando a eficiência do uso desta variável como medida indireta sobre a propriedade do fluido polimérico no decorrer da reação de polimerização.

Após análises de amostras poliméricas retiradas durante a reação de polimerização de cada ensaio de controle, foi possível a obtenção do perfil de massa molecular numérica e ponderal em diferentes momentos da batelada e perceber que as curvas de distribuição de massa molecular, a qual afeta as propriedades do produto final, foram semelhantes entre os ensaios em malha fechada.

Através do comportamento das curvas de distribuição das massas moleculares constatou-se a importância do controle da temperatura na reação de polimerização.

6.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLCOCK, H. R.; LAMPE, F. W. **Contemporary Polymer Chemistry**, 2ª Edição, Ed. Prentice Hall, 1990.

ASTROM, K.; HAGGLUND, T. **PID Controllers Theory, Design and Tuning**. 2ª Ed., ISA (*Instrument Society of America*), 1995.

CAON, J. R. **Controladores PID Industriais com Sintonia Automática por. Realimentação a Relé**. Dissertação de Mestrado, Engenharia elétrica, Iniversidade de São Paulo (USP), 187 p., 1999.

FERREIRA, L. C. J. **Estudo experimental e simulação de propriedades finais do polibutadieno alto-cis produzido por sistemas catalíticos à base de neodímio**. Tese de Doutorado. Engenharia Química, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 176p., 2009.

GARY, D. C. **Analytical Chemistry**. Ed. John Wiley & Sons, 5ª Edição, 1994..

GONÇALVES, M. C. **Estudo experimental da polimerização via radical livre controlada em presença de radicais nitroxido (NMRP)**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 155p., 2006.

HUNT , B. J.; JAMES M. I. **Polymer Characterization**, Ed. Blackie, 1993.

LONA, L.M.F.; PENLIDIS, A. A Practical Approach To Simulate Polymerizations with Minimal Information. **Industrial Engineering Chemistry Research**, 44, 2634-2648, 2005.

MAGALHÃES, A. S. G.; FEITOSA, J. P. A. Degradação ultra-sônica da borracha natural de seringueira (*Hevea brasiliensis*) em solução toluênica: estudo por GPC. **Polímeros**, São Carlos, v. 9, n. 4, 1999.

MANO, E. B. ; MENDES, L. C. **Identificação de Plásticos, Borrachas e Fibras**. Edgard Blucher, São Paulo,, 2000.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 2ª Edição, Edgard Blucher, São Paulo, 1991.

MIJS, W. J. **New Methods for Polymer Synthesis**, Ed.Plenum, 1992.

OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**, 4ª Ed., Ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 1993.

SILVA, A. L. B. B.; SILVA, E. O. **Conhecendo os materiais poliméricos**. Apostila didática. Departamento de Física, Universidade Federal do Mato Grosso. 2003.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control: An introduction to theory and practice**. 1ª Ed. Prentice-Hall International Inc, New Jersey, 1984.

VAN KREVELEN, D. W. **Properties of Polymers**, 3ª Edição, Ed.Elsevier, 1990.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES GERAIS

Foi realizada com sucesso a construção e instrumentação do protótipo experimental de um sistema de polimerização, apresentando versatilidade de aplicações para o desenvolvimento de trabalhos a serem desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP. A construção do painel elétrico de comando facilita as futuras etapas de manutenção ou correção que sejam necessárias. O protótipo experimental desenvolvido neste trabalho e a disponibilidade de informações a respeito do sistema em batelada de polimerização, via radicais livres, do estireno em solução abre uma nova linha de pesquisa na faculdade e permite diversas possibilidades de desenvolvimento de trabalhos científicos na área de controle de processos.

A realização de testes iniciais, fase relevante neste trabalho, permitiu a determinação das condições operacionais do sistema e conhecimento prévio sobre o comportamento dinâmico do processo, possibilitando a partir daí a aplicação dos controladores inteligentes utilizando o sistema de polimerização como estudo de caso.

Observou-se que a implementação de controle cascata foi de fundamental importância uma vez que foi constatada a relação indireta entre as variáveis controlada (temperatura do reator de polimerização) e manipulada (variação de potência da resistência elétrica contida no tanque de aquecimento do fluido que circula na camisa do reator). Assim, evitaram-se maiores oscilações no comportamento da temperatura e propiciou-se o desenvolvimento de controle adequado para a aplicação.

Os controladores inteligentes aplicados foram baseados, principalmente, em sistema especialista, ou seja, sistemas baseado em conhecimento, que é o caso dos controladores *fuzzy*. Assim, o desenvolvimento destes controladores

tornou-se viável a partir de ensaios realizados preliminarmente, em malha aberta e malha fechada, que possibilitaram a obtenção de um conhecimento especialista sobre o processo de polimerização via radicais livres do estireno em solução, no sistema experimental.

Os controladores desenvolvidos e implementados na malha mestre do sistema conseguiram fornecer valores de saída para a malha escravo de acordo com a não-linearidade e comportamento transiente do processo, contribuindo para atuações mais adequadas da variável manipulada.

O protótipo possibilitou o desenvolvimento e implementação de diferentes estratégias de controle, envolvendo controladores monovariáveis e multivariáveis, com saídas incrementais e posicionais. Além dos controladores baseados em lógica *fuzzy*, foi possível implementar sistema neuro-*fuzzy*, que podem ser analisado como um sistema de inferência *fuzzy*, implementado sob a arquitetura das redes neurais. Assim foi possível implementar uma estratégia de controle com a vantagem da lógica *fuzzy* no que se diz respeito ao processo de raciocínio e com a capacidade de aprendizagem de comportamento das redes.

Foram constatadas similaridades e características favoráveis entre as estratégias de controle aplicadas. Na malha cascata, os controladores incrementais apresentaram uma redução no consumo de energia de aproximadamente 10% quando comparado com os controladores *fuzzy* posicionais. A estratégia do controlador Neuro-*fuzzy* apresentou menor desgaste do equipamento e menor consumo de energia (redução de 15%) comparado aos outros controladores implementados.

Todas as estratégias proporcionaram eficiente manutenção da temperatura do reator de polimerização. A conversão final média do estireno para poliestireno foi em torno de 50% para os ensaios de controle implementados, sob as condições operacionais estabelecidas. A massa molecular numérica média obtida foi de $2,5 \times 10^4$ g/mol. Estes valores encontram-se dentro do esperado de

acordo com dados obtidos através de simulação computacional e satisfatórios quando comparados aos resultados de trabalhos encontrados na literatura.

Foi constatada, a partir dos resultados obtidos através de análise em cromatografia em gel, que a variação de temperatura interna do reator, dentro das condições operacionais estabelecidas neste trabalho, afeta a forma da curva de distribuição das massas moleculares. Desta forma ratifica-se a importância e necessidade de o controlador aplicado no processo de polimerização garantir a manutenção eficiente desta variável, a fim de evitar variações nas características finais do produto final obtido.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para continuação desta linha de pesquisa, em realização de trabalhos futuros, propõe-se:

- A partir da idéia desenvolvida neste trabalho e disponibilidade do protótipo experimental projetado, sugere-se a realização de novos ensaios experimentais utilizando-se da leitura dos dados de pressão diferencial e vazão mássica, para a inferência da viscosidade e acompanhamento desta importante variável.
- Desenvolvimento de estratégias de controle multivariáveis que utilizem-se das informações de densidade e viscosidade como variáveis de entrada do controlador.
 - Avaliação da eficiência e robustez dos controladores implementados;
 - Desenvolvimento de controladores preditivos baseados em redes neurais artificiais;
 - Ensaio experimentais utilizando diferentes condições operacionais;
 - Utilização dos dados obtidos no presente trabalho para desenvolver outras estratégias de controle, objetivando melhores resultados de desempenho geral;

- Desenvolvimento de estratégias que utilizem, em sua estrutura, modelo fenomenológico, a partir do balanço de energia do sistema de polimerização;
- Controle utilizando perfil de temperatura, visando à qualidade final do produto e a adequado tempo de batelada.

APÊNDICE A

Comportamento da temperatura interna do reator de polimerização aplicando-se controle manual denominado CM3.

