

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**SISTEMA CLP/MICROCOMPUTADOR PARA CONTROLE E
MONITORAÇÃO DE UM PROCESSO DE TERMOFORMAGEM**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

EURÍPEDES BARSANULPHO LUZ JÚNIOR

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1999

**SISTEMA CLP/MICROCOMPUTADOR PARA CONTROLE E MONITORAÇÃO DE
UM PROCESSO DE TERMOFORMAGEM**

EURÍPEDES BARSANULPHO LUZ JÚNIOR

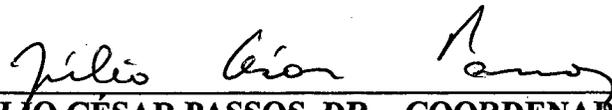
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



PROF. CZESŁAW LUBOMIRO BARCZAK, DR. - ORIENTADOR



PROF. JÚLIO CÉSAR PASSOS, DR. - COORDENADOR

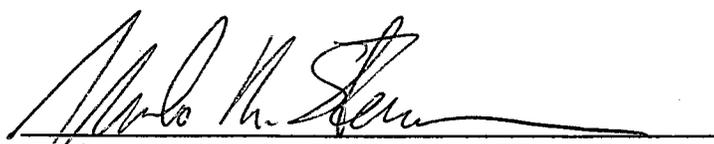
BANCA EXAMINADORA



PROF. CARLOS ALBERTO MARTIN, DR.ING. - PRESIDENTE



PROF. CARLOS HENRIQUE AHRENS, DR. ENG.



PROF. MARCELO RICARDO STEMMER, DR.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha mãe Izabel que de longe certamente me manteve com suas orações, confiando plenamente em meu trabalho e aos meus irmãos e cunhadas que também torciam por meu sucesso. Agradeço também à minha noiva Leandra que nestes últimos dias de trabalho tanto me ouviu falar a respeito deste trabalho, me incentivando a terminá-lo.

Gostaria também de expressar os meus mais sinceros agradecimentos ao professor Czeslau Lubomiro Barczak por sua orientação e motivação no período em que trabalhamos juntos, orientação esta, feita com paciência e compreensão.

Agradeço também ao professor Carlos Alberto Martin por sua disposição em colaborar em momentos de dificuldade no desenvolvimento do trabalho.

Por seu coleguismo, amizade e principalmente por sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho e que direta ou indiretamente foram responsáveis por sua conclusão, agradeço a todos os integrantes do Laboratório de Hardware do GRUCON.

Agradeço também aos meus irmãos da Igreja Presbiteriana de Florianópolis, que durante permanência nesta cidade foram minha família.

O apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) bem como da Universidade Federal de Santa Catarina que através da pós graduação em Engenharia Mecânica me possibilitou realizar este trabalho.

Índice Analítico

1	Introdução.....	1
1.1	Automação de um processo de Termoformagem.....	1
1.2	Atual situação da tecnologia no Brasil.....	1
1.3	Estratégia da automação.....	3
2	Processo de Termoformagem (Descrição Geral).....	6
2.1	Introdução.	6
2.2	Descrição do processo.....	7
2.2.1	Aquecimento dos plásticos.....	8
2.2.1.1	Propriedade térmica dos plásticos.....	8
2.2.1.2	Determinação da temperatura correta de aquecimento.....	11
2.2.2	Monitoração da temperatura através de sensores.....	12
2.2.2.1	Sensores de temperatura de medição por contato.....	12
2.2.2.2	Sensores de temperatura sem contato.....	14
2.2.3	Formas de Aquecimento do Plástico.....	15
2.2.3.1	Aquecimento por condução.....	16
2.2.3.2	Aquecimento por convecção.....	16
2.2.3.3	Aquecimento por radiação infravermelha.....	17
2.3	Conformação da manta plástica.....	22
2.3.1	Moldes para termoformagem.....	22
3	Sistemas de Controle e Automação de Processos....	24
3.1	Introdução.....	24
3.2	Vantagens e características de um sistema automatizado.....	24
3.3	Características dos sistemas de controle atuais..	27

3.4	Estratégias de controle.....	29
3.4.1	Sistemas de Controle Distribuído ou DCS.....	29
3.4.2	Sistemas de controle baseados em computadores pessoais.....	31
3.4.3	Controlador Lógico Programável.....	34
3.4.3.1	Estado da Arte dos CLPs de pequeno porte.....	36
4	Levantamento do Processo.....	38
4.1	Processo convencional de termoformagem de uma empresa.....	38
4.1.1	Produção da matéria prima: manta plástica de polietileno expandido.....	39
4.1.2	Revestimento da manta.....	39
4.1.3	Corte da manta.....	40
4.1.4	Processo de termoformagem.....	41
4.1.5	Corte das palmilhas.....	43
4.1.6	Seleção, Contagem e Embalagem.....	43
4.2	Proposta de automação do sistema.....	44
4.2.1	Identificação dos objetivos.....	44
4.2.2	Estudo do objeto de controle.....	45
4.3	Proposta de Implementação de Parte do Sistema em Laboratório.....	49
4.3.1	Bancada experimental: objeto de controle.....	49
4.3.2	Software de controle.....	50
4.3.3	Software de monitoração.....	50
5	Sistema de Aquecimento.....	51
5.1	Equacionamento matemático do sistema. Relação entre a temperatura interna do forno e a manta.....	51

5.2	Perdas de calor do túnel de aquecimento para o meio ambiente.....	55
5.2.1	Equacionamento das perdas de calor.....	55
5.3	Projeto do túnel de aquecimento (protótipo laboratorial).....	57
5.3.1	Requisitos de projeto.....	57
5.3.2	Determinação da potência do túnel.....	59
5.4	Construção do túnel de aquecimento.....	60
5.4.1	Caixa metálica.....	61
5.4.2	Isolamento térmico.....	62
5.4.3	Elementos de aquecimento.....	62
5.4.4	Sistema de medição de temperatura.....	63
5.4.5	Caixa de ligações.....	65
6	Modelagem do sistema.....	67
6.1	Modelagem do túnel de aquecimento.....	67
6.2	Determinação teórica das constantes do sistema...70	
6.3	Simulação em malha aberta.....	70
6.4	Testes em malha aberta.....	72
6.5	Comparação dos resultados teóricos e práticos do sistema em malha aberta.....	75
6.6	Simulação em malha fechada.....	75
6.7	Teste em malha fechada.....	76
7	Controle do sistema.....	78
7.1	Seleção do CLP.....	78
7.2	Medição de temperatura no Sistema.....	80
7.3	Sistema de Transporte.....	81
7.4	Programação do CLP para o controle do sistema....	82
7.4.1	Descrição do funcionamento do sistema.....	82

7.4.2	Programação do CLP.....	84
7.4.2.1	Estruturação do software de controle.....	84
7.4.2.2	Características especiais do programa de controle.....	86
8	O Sistema de Monitoração do Processo.....	88
8.1	Plataforma multitarefa.....	88
8.2	Comunicação entre CLP e microcomputador.....	89
8.2.1	Características da forma de comunicação entre o CLP e o microcomputador do sistema implementado..	90
8.2.2	Protocolos de Comunicação.....	92
8.2.2.1	Protocolo de Comunicação do CLP Utilizado.....	92
8.2.2.2	Implementação do Protocolo.....	94
8.3	Desenvolvimento do software de monitoração.....	96
8.3.1	Etapas de desenvolvimento do software.....	97
8.3.1.1	Programação.....	98
8.4	Características do Software.....	99
8.4.1	Informações discretas.....	100
8.4.2	Informações contínuas.....	100
8.4.3	Formas de apresentação dos dados.....	100
9	Resultados, Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	103
9.1	Processo de termoformagem.....	103
9.2	Bancada Experimental.....	103
9.3	Programação.....	104
9.4	Sistema de Controle.....	106
9.5	Sistema de Monitoração.....	108
9.6	Comentários finais.....	109
10	Anexos.....	110

11	Referências Bibliográficas.....	116
----	---------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

1	- Tabela das propriedades térmicas dos materiais.....	9
2	- Perfil de temperatura ao longo da espessura de uma manta plástica.....	10
3	- Faixa de temperaturas de termoformagem.....	12
4	- Radiação de Corpo Negro.....	19
5	- Posicionamento dos elementos de aquecimento para obtenção de uma boa distribuição de radiação.....	21
6	- Tabela de vantagens e desvantagens da automação.....	26
7	- Sistema distribuído e hierárquico.....	28
8	- Arquitetura de um DCS.....	30
9	- Sistemas baseados em computadores pessoais.....	31
10	- Sistema de controle baseado em CLP.....	35
11	- Representação esquemática da manta.....	40
12	- Processo de termoformagem.....	42
13	- Representação esquemática do novo sistema.....	46
14	- Tabela dos elementos de detecção.....	47
15	- Tabela dos elementos atuadores.....	47
16	- Tabela de Sensores.....	48
17	- Montagem laboratorial.....	49
18	- Representação esquemática do sistema forno/manta.....	52
19	- Tabela de dados de projeto.....	58
20	- Representação do túnel de aquecimento.....	58
21	- Tabela dos resultados dos cálculos para o projeto do túnel de aquecimento.....	60
22	- Foto do túnel de aquecimento.....	61
23	- Estrutura metálica do túnel de aquecimento. Caixa metálica bipartida.....	62
24	- Banco de resistências.....	63

25	- Representação esquemática do sistema elétrico de potência e de controle do túnel de aquecimento.....	64
26	- Sistema de aquisição de dados.....	65
27	- Representação esquemática da caixa de ligações.....	66
28	- Representação em diagrama de blocos da equação 6.10, sistema em malha aberta.....	69
29	- Representação do túnel de aquecimento em malha fechada....	69
30	- Simulação do sistema em malha aberta: Potência de entrada 576 W.....	71
31	- Simulação do sistema em malha aberta: Potência de entrada 192 W.....	71
32	- Gráfico do teste 1.....	73
33	- Gráfico do teste 2.....	74
34	- Tabela de resultados Teóricos.....	74
35	- Tabela de resultados Experimentais.....	74
36	- Simulação do sistema em malha fechada.....	76
37	- Sistema de aquecimento com controlador PID.....	77
38	- Tabela de características mínimas para o CLP.....	78
39	- Tabela de características técnicas do CLP S5-95U.....	79
40	- Painel frontal do CLP.....	80
41	- Programação linear do CLP.....	85
42	- Programação estruturada do CLP.....	85
43	- Representação do protocolo de comunicação.....	93
44	- Tela principal do aplicativo.....	99

Resumo

O objetivo deste trabalho é o estudo de um processo de termoformagem de uma indústria e o desenvolvimento de um sistema de controle e monitoração para o mesmo.

A partir dos resultados obtidos com a análise do processo de termoformagem e o estudo de bibliografias referentes a este, foi efetuada a identificação de várias estratégias de controle e automação, objetivando a seleção de uma estratégia para aplicar ao trabalho proposto. A estratégia selecionada, foi a utilização de um CLP de pequeno porte para o controle direto e a coleta de dados do sistema, estando este equipamento acoplado via interface serial RS232 a um computador responsável pela monitoração e interface com o processo.

Com o intuito de simular o processo industrial, optou-se pelo desenvolvimento de uma bancada experimental, composta por um sistema de aquecimento e um sistema de transporte da manta plástica. Esta bancada constitui-se no meio físico a ser controlado e monitorado pelo sistema de controle concebido neste trabalho, utilizando-se de rotina PID do CLP e suas entradas analógicas para o controle do túnel de aquecimento, e de lógica de relés para o controle do sistema de transporte. Cabe ressaltar que o CLP tem que ser configurado para suportar a comunicação de dados com o microcomputador.

O software de monitoração (software para Windows) foi desenvolvido por meio de programação Orientada a Objetos em C++. Utilizou-se a biblioteca de objetos para programação Windows da Borland, a OWL, o que evidenciou a facilidade de reutilização de códigos em programação Orientada a Objetos. Desenvolveu-se também rotinas de comunicação de dados com o CLP, as quais foram desenvolvidas em forma de uma DLL (Direct Link Library).

Com o sistema já desenvolvido, passou-se então à etapa de testes, onde as simulações realizadas ainda na etapa de projeto

do túnel de aquecimento puderam ser comparadas com testes com o sistema real (malha aberta e malha fechada).

Nesta etapa, também foi avaliada a eficiência do sistema de controle e monitoração desenvolvido, cuja performance foi satisfatória. O software de monitoração, no atual estado de desenvolvimento é carente de implementações que o habilite a aplicação em um processo produtivo real, sendo apresentadas propostas no final do trabalho para tais melhorias, bem como sugestões de trabalhos futuros e aplicações da bancada desenvolvida.

Abstract

The main objective of this work is to study a thermoforming process of an industry and the development of a monitoring and control system for it.

From the results obtained by the analysis of the thermoforming process and the study of bibliographies referring to this process, an identification of several automation and control strategies was done, aiming the selection of one to apply in the proposed work. The selected strategy was the utilization of a small PLC for the direct control and data acquisition. This equipment was linked to a computer by RS232 serial interface, which is responsible for monitoring and the interface the process.

Once selected the control and monitoring strategies, the next step was the development of a real process simulation plant as well as the control and monitoring softwares. The simulation plant is composed of a heating and a transport system, as a validation way of the selected strategy. PID control functions of the PLC and its analogical inputs were utilized in order to control the heating system. Furthermore, the relay logic for the transport system control was applied. The PLC also had to be configured in order to support the data communication with the computer.

The monitoring software (Windows software) was developed through an Object Oriented Programming (OOP) in C++ language. The Object Windows Library (OWL) from Borland was applied, to assure the facility of the reutilization of OOP codes. Data communication functions with the PLC were also developed, in a Direct Link Library (DLL) form.

After the system development, the next step was the tests stage. This stage consists on heating system project that was compared with the real system tests (open and closed loop).

Finally, the system efficiency was evaluated for control and monitoring the related process, which produced satisfactory results. The monitoring software, in the actual development phase, lacks implementations which could enable it for application in a real productive process. These implementations were suggested at the end of the work, as well as, future work suggestions and the applications of the developed system.

1) Introdução

1.1) Automação de um processo de Termoformagem

Neste trabalho descreve-se a implementação a nível laboratorial de um projeto para a automação de um sistema de termoformagem de palmilhas de tênis a partir de manta de polietileno expandido, sendo este, o principal processo de fabricação de uma empresa local. Desenvolveu-se uma bancada de ensaios de aquecimento da manta plástica utilizada no processo, composta por um túnel de aquecimento e um sistema de transporte para a manta plástica. Para controlar a bancada, utilizou-se um Controlador Lógico Programável (CLP) de pequeno porte, acoplado a um microcomputador. A bancada foi desenvolvida com o fim de testar o sistema computacional implementado e a estratégia de controle adotada.

1.2) Atual situação da tecnologia no Brasil

O crescimento da indústria brasileira de um modo geral se deu dentro de um contexto de protecionismo, onde a necessidade de um desenvolvimento tecnológico fundamentado em pesquisas não parecia ser fundamental. Nesta década este contexto modificou, os governos vêm implantando uma política de abertura de mercado, a tão falada economia globalizada. Tal situação provocou uma corrida na indústria brasileira visando sua modernização, aumentando desta forma sua competitividade.

Existem, basicamente, duas alternativas para a modernização do setor produtivo brasileiro. Uma é através da importação de tecnologia de outros países, com a compra de

equipamentos e de processos. Outra é através do projeto e construção de equipamentos mais modernos no próprio país.

A primeira alternativa é de implementação mais rápida, porém, muitas vezes mais cara e com o grande inconveniente da dependência de uma assistência técnica especializada de outro país, criando uma forte dependência tecnológica.

Já o desenvolvimento de equipamentos, apesar de ser uma alternativa de implementação relativamente mais complexa e mais lenta, pode trazer melhores resultados a médio e longo prazo. Esta alternativa é muito interessante porque o equipamento é desenvolvido tomando-se como base as necessidades e restrições inerentes a um processo específico, possibilitando assim uma melhor adequação deste equipamento ao processo e à situação particular e, ainda, às peculiaridades tanto da empresa quanto do mercado. A utilização conjunta destas duas alternativas com critérios é a melhor saída.

Existe um distanciamento entre os institutos de pesquisa e a realidade empresarial brasileira, o que é muito ruim para o país e para as próprias empresas. Acontece que a maioria dos institutos de pesquisa se volta para um desenvolvimento tecnológico distanciado da "necessidade" das empresas brasileiras

Estes centros de pesquisas podem ser decisivos no desenvolvimento de equipamentos modernos adequados à realidade da indústria nacional, desde que passem a analisar as verdadeiras necessidades deste setor, capacitando-o a concorrer com a indústria estrangeira. Também é necessário um maior entrosamento entre as empresas e estes centros de pesquisas, facilitando a troca de experiências entre estes dois setores. O aumento da concorrência promovido pela abertura de mercado pode promover este melhor entrosamento.

O presente trabalho busca através do estudo do processo de fabricação de uma indústria local, uma maior integração com o setor produtivo. Desta forma, desenvolvendo um projeto adequado à realidade de indústrias de pequeno porte pertencentes a este setor específico.

1.3) Estratégia de automação

Atualmente o mercado de automação apresenta inúmeras alternativas para a modernização ou para a atualização de equipamentos e de processo, facilitando esta tarefa, pois para os mais variados problemas uma alternativa para automação provavelmente existirá. Por outro lado, esta situação dificulta a tomada de decisão, pois podem existir várias abordagens para um mesmo caso. No entanto, geralmente uma entre as três estratégias de controle mais comuns, sistemas de controle distribuídos (*DCS - Distributed Control System*), controlador lógico programável (CLP) e *personal computer / front end* (PC/FE), é selecionada [Uitenham and Munjal, 1991] ou até mesmo a utilização conjunta destas estratégias.

Com base na redução do custo e dos preços de CLP's e PC's, proporcionada pelo avanço tecnológico e devido ao potencial apresentado por estes equipamentos como ferramentas de controle, a estratégia escolhida para a automação do processo alvo deste trabalho foi a integração destes dois equipamentos na forma de um sistema completo. Estas duas poderosas ferramentas, cada uma com suas peculiaridades, apresentam vantagens e desvantagens. A sua integração se apresenta como uma forte estratégia na automação de processos, pois assim pode-se sanar muitas das deficiências individuais de cada ferramenta, utilizando as vantagens que o outro apresenta. Segundo Vora [Vora, 1992], muitas das desvantagens dos CLP's podem ser sanadas com o uso de co-processadores. Um sistema

CLP/microcomputador pode funcionar de forma que o CLP seja responsável pelo controle direto do processo, aquisição de dados e por passar informações ao microcomputador e este, por sua vez, analisa e armazena estas informações, podendo ainda atuar sobre o CLP através de um software controlador. O microcomputador pode também promover a interface com o operador, melhorar os alarmes do sistema e mensagens e cobrir deficiências no controle analógico fornecido pelo CLP.

O sistema CLP/microcomputador implementado destina-se à supervisão e controle de uma bancada experimental (processo piloto desenvolvido em laboratório), já visando uma futura implementação no controle de um processo industrial. O microcomputador é responsável pela monitoração do processo e por promover a interface entre o operador e o processo (IHM-Interface Homem/Máquina). O CLP é responsável pelo controle direto da bancada experimental, ou seja, pelo controle da temperatura da manta plástica, pelo comando do sistema de transporte, pela aquisição de dados (temperatura, estados, etc...) diretamente do processo e por realizar a transferência de informações ao microcomputador.

O CLP é programado por meio do microcomputador, sendo a ligação física entre estes estabelecida por uma interface RS232C. O microcomputador também é utilizado como depósito para variantes de programas a serem executados pelo CLP, já que a memória deste é mais limitada.

A função de IHM é realizada por um software que roda no microcomputador, software também desenvolvido no laboratório. O conjunto de funções programadas disponibiliza uma interface gráfica entre o processo e o operador e fica responsável também por armazenar dados de produção e de comportamento do processo, adquiridos junto ao CLP, agilizando a confecção de relatórios. O software contém, ainda, funções para ajuste do controlador de temperatura que está implementado no CLP.

Para estabelecer a comunicação entre o microcomputador e o CLP durante a execução do programa de supervisão, é necessário que um protocolo de comunicação esteja residente no microcomputador. Este é um protocolo proprietário do fabricante do CLP, para rede do tipo mestre/escravo e que é utilizado para comunicação ponto a ponto neste caso específico. Dispondo-se de uma descrição em linguagem natural do protocolo de comunicação, implementou-se no laboratório de Hardware do GRUCON um arquivo de ligação dinâmica adequado para promover a comunicação do CLP com o microcomputador.

Uma das principais preocupações no desenvolvimento da interface para usuário (*GUI - Graphical User Interface*) foi a de apresentar esta interface ao operador de uma forma amigável, mostrando os dados essenciais do processo, pois esta é uma deficiência do CLP. Optou-se pelo desenvolvimento do software para a plataforma Windows, devido à interface gráfica bem acabada que esta proporciona. Os programas foram escritos em linguagem C++ com base na concepção de Linguagem Orientada a Objetos.

2) PROCESSO DE TERMOFORMAGEM (DESCRIÇÃO GERAL)

2.1) Introdução

Tratar-se-á como termoformagem, a conformação de uma manta de polietileno expandido, material já previamente processado, na confecção de peças. Faz-se neste capítulo uma descrição mais geral do processo de termoformagem, deixando-se para o capítulo 4 uma descrição mais detalhada do processo específico que deu origem ao projeto desenvolvido neste trabalho.

A termoformagem é um processo que abrange várias áreas tecnológicas, tais como a química, física, materiais, engenharia mecânica e termodinâmica. No entanto, o domínio deste processo não é muito difundido, o que motiva e justifica fazer pesquisas nesta área específica.

O desenvolvimento técnico deste processo de produção, teve por incentivo inicial a confecção de embalagens dos mais variados tipos de produtos [Blass, 1988; Gruenwald, 1987]. Porém com o avanço tecnológico, o desenvolvimento de novos equipamentos e de materiais relacionados com esta área específica, difundiu a sua aplicação. O processo, atualmente, é de grande importância na produção de peças para a indústria automobilística, de eletrodomésticos, na produção de objetos plásticos descartáveis e, em geral, para produção de peças de plástico que substituem as de metal [Gruenwald, 1987].

2.2) Descrição do processo

Existem tipos diferentes de plásticos, e uma das características que os diferenciam é o seu comportamento após aquecidos. No que se refere a esta diferença, os plásticos podem ser classificados como termofixos e termoplásticos. Os termofixos passam por uma alteração química e de fase quando aquecidos. Suas moléculas formam uma estrutura tridimensional entrelaçada, e assim, após aquecidos não podem ser reprocessados e também não derretem [Provenza; Michaeli e Kaufmann, 1995; Blass, 1988], não sendo recomendados para a utilização neste processo específico.

Os termoplásticos por outro lado, podem ser aquecidos e conformados, e se reaquecidos podem ser novamente conformados. Estes materiais voltam a apresentar as características originais após serem resfriados, desde que suas características físico-químicas não tenham sido alteradas com o aquecimento [Blass, 1988]. Cada material apresenta uma faixa de temperatura na qual pode ser processado, dentro da qual não sofre estas alterações físico-químicas. Porque os materiais termoplásticos têm estas características, é que são utilizados no processo de termoformagem [Michaeli e Kaufmann, 1995]. O material plástico utilizado neste processo de termoformagem é o polietileno expandido, que é um termoplástico.

O processo de termoformagem (ver também descrição no item 4.1.4 e Blass, 1988, capítulo 10), conforme definição adotada neste trabalho, que tem como matéria prima um termoplástico, pode ser dividido em duas etapas básicas, que são, o aquecimento e a conformação da manta.

2.2.1) Aquecimento dos plásticos

O aquecimento da manta plástica é uma etapa de suma importância no resultado final da produção, pois uma boa qualidade final do produto no processo de termoformagem, está relacionada com um controle eficiente da temperatura de conformação da manta plástica. O grau de controle requerido depende do tipo de material a ser conformado. Materiais como o polistireno de alto impacto que tem uma faixa de amolecimento não requerem um controle de temperatura muito rígido, porém materiais de amolecimento abrupto (como o polietileno) requerem um controle rigoroso da temperatura [Blass, 1988].

É uma etapa que consome muito tempo no ciclo produtivo, devido à característica de má condutividade térmica do polietileno. Porém requer cuidados no seu processamento, tais como a potência máxima fornecida, máxima temperatura, entre outros.

Para que se tenha o controle desta etapa e para que seja efetuado de maneira satisfatória, é necessário se conhecer as leis que o regem, as características do material e também o equipamento que realiza esta função de aquecimento dentro do processo, o que será exposto a seguir.

2.2.1.1) Propriedades térmicas dos plásticos

As propriedades térmicas dos plásticos constituem um fator importante na seleção do método de aquecimento e do tamanho do aquecedor.

Plásticos são maus condutores de calor (ver figura 1) e por esta razão, mantas relativamente finas requerem um tempo de aquecimento grande considerando a sua espessura. Aquecimento pelos dois lados minimiza este tempo de aquecimento, já que a

área de aquecimento é dobrada. Em alguns casos, um preaquecimento do material é interessante, mas raramente é feito para materiais com menos de 6-mm de espessura por causa da complexidade imposta ao processo, os dois estágios de aquecimento [Gruenwald, 1987].

Figura 1 - Tabela das propriedades térmicas dos materiais [Thermoforming, A Plastics Processing Guide, pag. 8].

	Peso específico [g/cm ³]	Calor específico [J/Kg ^x K]	Calor latente de fusão [J/Kg]	Condutividade térmica [W/mK]
Ar	0,0012	100	***	0,0242
Água	1	418,66	33492	0,594
Gelo	0,92	209,33	33492	2,181
Polietileno	0,05	1550	127899	0,2527
Acrílico	1,19	146,53	***	0,187
Polycarbonato	1,2	125,6	***	0,194
Grafite	1,5	83,73	***	150,57
Vidro	2,5	83,73	***	1,02
Alumínio	2,7	96,29	39772	155,76
Aço	7,8	41,87	27212	46,73

A temperatura do centro é elevada somente por condução de calor a partir da parte externa da manta. Como os plásticos são maus condutores, a manta plástica durante o processo de aquecimento apresentará um grande gradiente de temperatura ao longo de sua espessura, semelhante ao apresentado na figura 2.

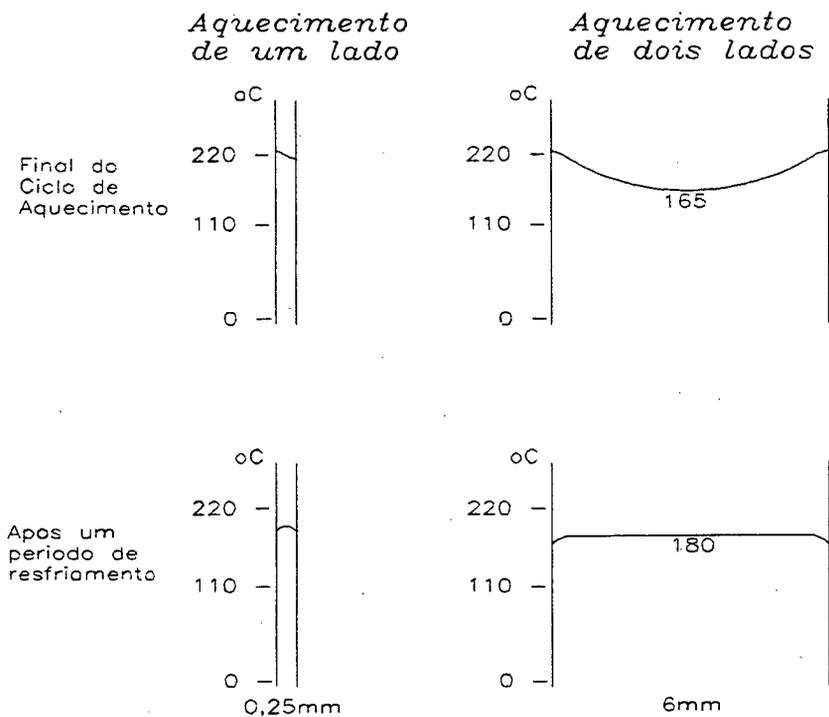


Figura 2: Perfil de temperatura ao longo da espessura de uma manta plástica [Thermoforming, A Plastics Processing Guide, pag.14].

Outra característica marcante nos plásticos, é o seu elevado calor específico se comparado a outros materiais, conforme pode ser verificado na figura 1.

A quantidade de calor necessário para tornar o material conformável pode ser obtida pela equação (1) [Thermoforming, A Plastics Processing Guide, pag.9]:

$$Q = C \times L \times e \times m \times (C_p \times \Delta T + C_f) \tag{1}$$

Q = Quantidade de Calor [J];

C = Comprimento da manta, interna ao túnel de aquecimento [m];

e = Espessura da manta [m];

m = densidade [Kg/m³];

C_p = Calor específico [J/Kg °C];

ΔT = Variação de temperatura desejada [°C];

C_f = Calor latente de fusão [J/Kg].

O fornecimento da grande quantidade de calor à manta para que esta alcance a temperatura necessária (devido seu elevado calor específico, conforme Figura 1), não deve ocorrer a uma taxa muito alta, pois como foi dito anteriormente o material plástico é um mau condutor de calor. Caso isto ocorra, a superfície da manta pode alcançar temperaturas elevadas, podendo até mesmo deteriorar-se, ao mesmo tempo que o interior da mesma se mantém a uma baixa temperatura [Blass, 1988; Gruenwald, 1987].

2.2.1.2) Determinação da temperatura correta de aquecimento.

Na verdade não existe apenas uma temperatura ideal para a conformação de um material específico. Como pode ser observado na figura 3, cada material tem uma faixa de temperaturas indicadas para a sua termoformagem. A melhor temperatura dentro desta faixa, depende de características do processo. Por exemplo, para conformação simples, onde o material é pouco deformado (entende-se aqui por deformação, a relação entre a profundidade da cavidade conformada e as dimensões laterais da manta), o limite inferior da faixa indicada na figura 3 é suficiente. Para conformações mais complexas, onde o material é muito deformado, o limite superior é o mais indicado.

Um outro problema que surge, é a medição da temperatura da manta durante o processo. Muitas vezes o controle de temperatura é feito através das características físicas da manta, sem que haja a monitoração desta temperatura, devido às dificuldades existentes com a aplicação de sensores, (este assunto é abordado mais à frente).

Uma característica física importante, que pode ser utilizada como determinante da temperatura correta para a

termoformagem, é o quanto a manta verga durante o processo de aquecimento. A qualidade final do produto também pode ser utilizada para este controle da temperatura. Este último método é um processo interativo, cuja eficiência depende muito da experiência do operador.

Figura 3 - Faixa de temperaturas de termoformagem [Thermoforming, A Plastics Processing Guide, pags.21 e 22].

	Temperatura de termoformagem		Temperatura de fusão	
	temp. da manta (°C)	temp. do molde (°C)	polímero amorfo Tg (°C)	polímero cristalino Tm (°C)
Polímero metacrilato:				
Estrudado	135 a 175	65 a 75	105	160
Fundido	145 a 180	65 a 75	105	160
Polioléfinas:				
Poliétileno de alta densidade	145 a 190	95	**	130
Polipropileno	145 a 200	**	**	175
Polímeros estirenos:				
Polistireno	145 a 175	50 a 65	75 a 105	**
Poliestireno de alto impacto	170 a 180	50 a 65	95 a 105	**
PVC (Poly Vinyl Chloride)				
Não plasticizado	140 a 175	50	105	**

2.2.2) Monitoração da temperatura através de sensores

Existem vários tipos de sensores de temperatura, os quais se diferenciam quanto ao fenômeno físico que utilizam para a determinação da temperatura e também quanto a forma de monitorar esta temperatura. No que tange à forma de monitoração, há os sensores de medição por contato e os sensores de medição sem contato.

2.2.2.1) Sensores de temperatura de medição por contato

Existe uma gama muito grande de sensores de temperatura por contato, dentre os quais os principais são: os termopares,

os termorresistores e os termistores. Cada um com suas características peculiares, muitas vezes sendo indicados para aplicações distintas, conforme as restrições quanto à precisão, resolução, custo entre outras.

É impraticável a aplicação deste tipo de sensores para determinação da temperatura correta da manta [Welch, 1993]. Os principais problemas que envolvem a utilização deste tipo de sensores no caso em questão são:

- O sensor, ao entrar em contato com a manta plástica, absorve calor desta para entrar em equilíbrio térmico. Como os plásticos são maus condutores térmicos, a região em contato com o sensor é resfriada e o sensor apresenta um valor errôneo da temperatura. Outro fator também relacionado à troca de calor entre a manta plástica e o sensor, é o elevado tempo de resposta;
- Com o contato entre o sensor e a manta, esta é marcada, o que pode resultar, em alguns processos, em uma redução na qualidade final do produto;
- O sensor fornece um valor de temperatura puntual, que pode não ser um valor representativo da temperatura da manta como um todo.
- Tempo de resposta do sensor é muito lento.

Estas são algumas características dos fenômenos que ocorrem durante a utilização de sensores de contato na determinação da temperatura da manta plástica durante o processo de termoformagem, as quais não recomendam a utilização destes sensores durante o processo.

Uma forma de sensoriamento da temperatura por contato que merece destaque é a utilização de tintas ou faixas sensíveis à temperatura, aplicadas à superfície da manta. É um método de baixo custo, que pode ser uma boa opção para se fazer uma calibração do sistema. Uma marca originalmente branca se torna transparente, ou no caso da faixa se torna escura quando determinada temperatura é excedida.

A calibração do sistema (utilizando o método da faixa ou tinta sensíveis a temperatura), se dá mediante um levantamento da correlação entre a temperatura de entrada da manta, temperatura interna do túnel de aquecimento, a temperatura de saída da manta e o tempo de aquecimento. Com um sistema que permite monitorar a temperatura do túnel e a ambiente, estes valores podem ser armazenados e utilizados durante o processo, evitando uma constante atuação do operador sobre o processo, ficando esta tarefa para o sistema automatizado. Este procedimento também pode ser efetuado com a monitoração da qualidade final do produto, que é uma característica de mais fácil determinação que a temperatura de saída da manta.

2.2.2.2) Sensor de temperatura sem contato

O pirômetro de radiação é um bom método para a determinação da temperatura real da superfície da manta. Trata-se de um dispositivo óptico, que pode ser montado à distância do material, ou seja, é um medidor de temperatura sem contato. É um sensor que apresenta uma rápida resposta à variações de temperatura.

O projeto básico de um pirômetro de radiação é composto de: 1- lentes que coletam a energia emitida pela fonte; 2- um detetor que transforma esta energia em sinal elétrico; 3- um ajuste do valor da emissividade da fonte de energia, calibrando o sensor para o caso específico; 4- um circuito de compensação, habilitando o sensor a corrigir erros devido a variações de temperatura do meio ambiente [Merchant, 1996].

Alguns cuidados devem ser tomados, pois são sensores sensíveis somente à radiação infravermelha e a específicos comprimentos de onda. Em certas áreas espectrais interferências podem ocorrer devido a absorção da radiação emitida por vapores

d'água ou por dióxido de carbono no ar. Em uma faixa de radiação infravermelha, próxima à faixa visível, ou seja, ondas infravermelhas curtas, as leituras podem ser falsificadas quando filamentos de tungstênio à altas temperaturas são utilizados no aquecimento. Por causa da sua reflexão, ondas curtas são detectadas pelo sensor provenientes desta reflexão. Outro problema que pode ocorrer, é que o comprimento de onda do sensor coincida com uma faixa de alta absorção (transmissão 0) no espectro infravermelho do plástico utilizado, assim a medição não será satisfatória. É um sistema de medição eficiente, mas estes agravantes devem ser levados em conta na utilização destes sensores [Gruenwald, 1987].

Até pouco tempo, um dos principais problemas na utilização de sensores ópticos de temperatura, era o seu elevado preço. Este elevado preço inviabilizava a utilização deste tipo de sensor em muitas aplicações industriais. Porém o desenvolvimento desta tecnologia tem tornado estes sensores mais acessíveis e com melhor qualidade de medição, o que tem difundido sua utilização.

Existem atualmente no mercado sensores ópticos, onde o sinal de saída do detetor é linearizado e amplificado sendo também fornecido em valores padronizados tais como 4-20mA e 0-10V assim como os transmissores de termopares. São sensores que, devido às suas características podem, ser utilizados para o controle *on-line* do processo, ou para promover uma calibração do sistema forno/manta, onde se controla a temperatura da manta indiretamente pelo controle da temperatura do forno.

2.2.3) Formas de Aquecimento do Plástico

Existem três formas básicas de transferência de calor: condução; a convecção; e radiação. Geralmente estas três são

concorrentes no processo de aquecimento, porém uma pode ser predominante, caracterizando o processo [Gruenwald, 1987].

2.2.3.1) Aquecimento por condução

O aquecimento por condução pode ocorrer de três maneiras distintas, pelo contato do material plástico com um meio sólido, líquido ou gasoso.

O meio mais rápido de aquecimento é pelo contato da manta de plástico com uma placa de metal uniformemente aquecida. É um método geralmente utilizado na produção em massa de pequenas peças, chamado de *trapped sheet heating*. O material é fixado à placa de metal pela retirada do ar que fica entre os dois elementos, o que é feito por intermédio de furos existentes na superfície da chapa metálica.

A imersão da manta em um meio líquido também é um processo rápido de aquecimento, porém, é restrito a peças grandes e espessas, pois a remoção do líquido é complicada e lenta [Gruenwald, 1987]. Aplicando-se este método de aquecimento a uma manta plástica fina, com o tempo de remoção de líquido, o material pode resfriar-se, prejudicando a qualidade final do produto.

Já em meio gasoso, a transmissão de calor por condução é muito baixa comparada com os meios líquido [da ordem de 4% se comparada com água] e sólido [da ordem 0,002% se comparada ao cobre] [Kreith, 1969], podendo em muitos casos ser desprezada.

2.2.3.2) Aquecimento por convecção

Fornos de aquecimento por convecção são largamente utilizados. Suas principais características são o aquecimento

uniforme e a secagem de materiais que se encontram sobre a superfície da manta. São largamente utilizados para termoformagem de mantas finas, e onde a uniformidade de aquecimento é de muita importância.

A taxa de transferência de calor para a manta, nestes fornos é pequena, o que lhes dá uma larga margem de segurança quanto a variações no tempo de aquecimento. Com este método, um considerável tempo de preaquecimento do equipamento para que se possa iniciar o aquecimento da primeira peça, é necessário.

Os elementos de aquecimento podem ser queimadores de gás inflamável ou resistores elétricos de potência. Para promover uma melhor transferência de calor e uma melhor uniformidade na distribuição interna de temperatura, estes fornos são providos de circuladores de ar.

2.2.3.3) Aquecimento por radiação infravermelha

Ao lado do aquecimento por contato da manta com um meio sólido ou líquido, o aquecimento por radiação infravermelha, é o meio aquecimento mais rápido no processo de termoformagem.

Em fornos cuja transferência de calor predominante é a radiação infravermelha, não é necessário um tempo de preaquecimento longo, pois os elementos de aquecimento possuem pequena massa, alcançando elevadas temperaturas quase que instantaneamente após serem ligados.

Existem algumas características que devem ser levadas em consideração durante o projeto de um túnel de aquecimento onde este tipo de transferência de calor é predominante:

- Quanto maior a densidade de energia, menor o tempo de aquecimento;
-

- Fontes com alta temperatura, como as lâmpadas de quartzo emitem radiação na faixa visível e na região infravermelha de ondas mais curtas, são muito potentes, e devem ser usadas com os devidos cuidados quando a manta a ser aquecida é fina (0,13mm é praticamente transparente a comprimentos de onda menores que 7,5 μ m).
- Resistências revestidas com cerâmica ou metal emitem menor energia, sendo a maior porção na região infravermelha de maior comprimento de onda, mas ainda têm densidade suficiente para o aquecimento na maioria das aplicações.

A temperatura da superfície dos aquecedores por radiação estão na faixa dos 320 a 700°C. O elemento de aquecimento estabiliza a sua temperatura, quando a potência de entrada e a energia irradiada se igualam. A figura 4 ilustra a potência irradiada relativa emitida pela superfície de um corpo negro ideal. O aquecedor real tem menor emissividade alcançando temperaturas mais elevadas com a mesma potência de entrada. A área compreendida entre a curva e a linha de base expressam a energia emitida pelo aquecedor. Para aquecedores com temperaturas mais elevadas a maior porção de energia emitida é a baixos comprimentos de onda e para aquecedores com temperaturas menores ocorre a comprimentos de onda maiores. Este fato é importante, pois os plásticos absorvem energia em comprimentos de onda distintos e somente a energia absorvida é utilizada para o aquecimento.

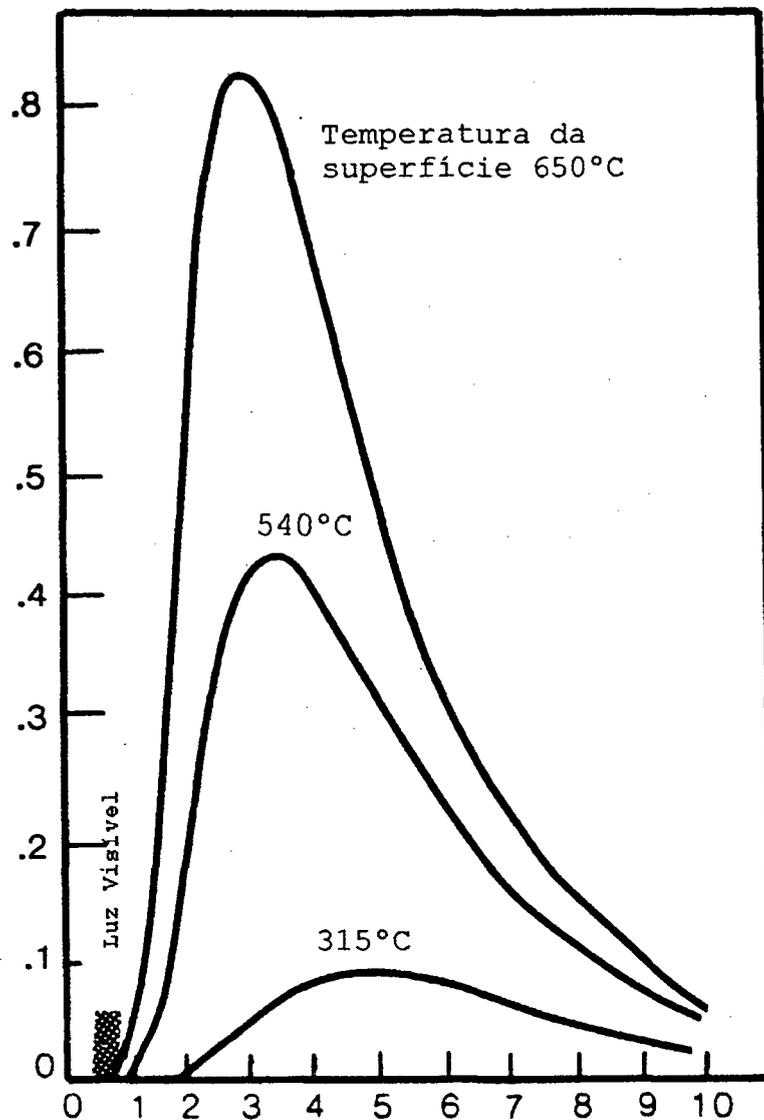


Figura 4 - Radiação de Corpo Negro [*Thermoforming, A Plastics Processing Guide*, pag4].

No processo de transmissão de calor, existem perdas por reflexão e difração. As perdas de calor neste processo são caracterizadas da seguinte forma [Gruenwald, 1987]:

- **Reflexão:** A porção de radiação que é refletida pela manta é insignificante e quase independente do comprimento de onda e naturalmente independente da espessura da manta. Pode haver perdas de calor significativas, somente se o material utilizado for plástico metalizado (revestido com tinta a base de alumínio);

- **Difração:** A energia perdida devido a transparência em certas regiões de comprimento de onda pode ser significativa. A transparência para radiação na região visível não determina se a manta é opaca ou transparente à frequência de radiação de máxima energia. A transparência aumenta com a diminuição da espessura, logo para mantas finas, a transparência da manta para a radiação é uma fator de grande importância. Mantas com espessura maior que 3mm, absorverão praticamente toda a energia irradiada.

Outros cuidados também devem ser tomados na utilização deste tipo de aquecimento no processo de termoformagem. A densidade interna de potência irradiada deve receber uma especial atenção neste caso. Isto porque os plásticos, conforme citado acima, são elementos mau condutores térmicos. A superfície que está exposta diretamente à radiação infravermelha pode alcançar temperaturas muito elevadas, sem que a manta esteja na temperatura ideal para a conformação. Esta elevada temperatura pode provocar a deterioração da manta. A densidade de potência e a velocidade de aquecimento ficam então limitados por esta característica.

Os filmes finos perdem calor em frações de segundo, portanto o tempo disponível para mover o filme do forno à estação de conformação é reduzido. Mantas mais espessas podem ser mantidas em trânsito ou paradas por alguns minutos, esperando o estágio de conformação. Esta espera se torna interessante para que ocorra transferência de calor da superfície para o centro da manta, conforme ilustração na figura 2. Tal procedimento minimiza a impressão de imperfeições na superfície da manta, causada por rugosidade da matriz, partículas de poeira ou até mesmo rugosidade das luvas do operador quando no caso do transporte manual.

Outro problema é o fato de que o elemento aquecedor emite radiação em todas as direções, e como suas dimensões geralmente são reduzida, o posicionamento destes elementos no

interior do túnel tem que ser feito de maneira inteligente. A figura 5 ilustra como compensar a menor densidade de radiação que ocorre na região próxima às bordas da manta, quando se mantém igualmente espaçados os elementos de aquecimento. Ela indica como fazer a distribuição do elementos de aquecimento a fim se ter uma boa distribuição de energia.

Pode-se observar que menos energia alcança a região próxima às bordas da manta, quando os elementos de aquecimento estão igualmente espaçados, fig. 2.3a. Por isto, deve-se colocar aquecedores adicionais próximos à esta região, figura 5b ou dispor os aquecedores internos mais espaçados, figura 5c. Deve-se lembrar que o calor irradiado para fora da manta não é perdido para o meio ambiente diretamente, parte deste calor é irradiado para a manta pelas paredes do túnel, outra parte é perdida para o meio ambiente por condução das paredes e por convecção pelas portas de entrada e saída da manta.

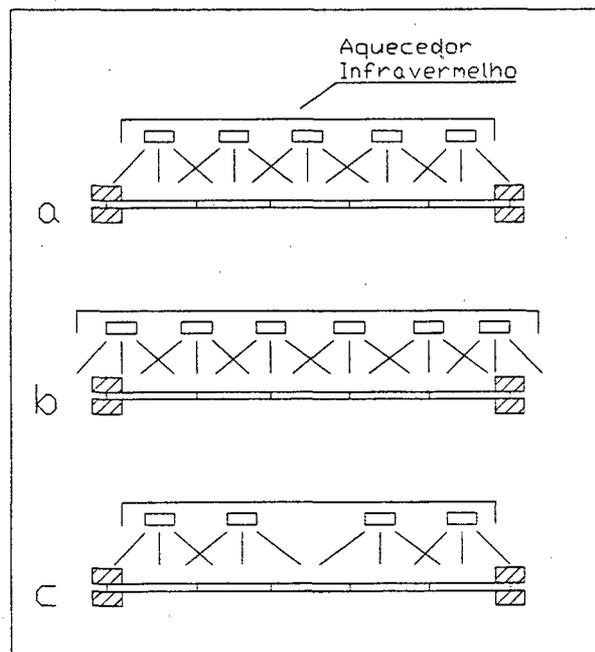


Figura 5 - Posicionamento dos elementos de aquecimento para obtenção de uma boa distribuição de radiação [Thermoforming, A Plastics Processing Guide pag18].

2.3) Conformação da manta plástica

A conformação da manta plástica na termoformagem, é a etapa posterior ao aquecimento. A manta é transportada por um sistema de transporte adequado, da etapa de aquecimento para a conformação. Este sistema de transporte deve apresentar características especiais, tal como fixar a manta ao longo de toda sua lateral, pois a manta após ser aquecida apresenta pequena resistência mecânica.

2.3.1) Moldes para termoformagem

Existem vários tipos de moldes para termoformagem. A seleção de um ou outro tipo é baseada nas características do processo, nos custos do molde e no tempo morto do equipamento no ato da troca de moldes.

No que se refere às características do processo, o tipo de força utilizada para a conformação é um fator importante. Pode-se utilizar vácuo, compressão entre dois moldes ou os dois conjuntamente, vácuo e compressão.

Para agilizar o processo de termoformagem, duas outras tarefas podem ser efetuadas simultaneamente à conformação e no mesmo molde. O resfriamento forçado da manta plástica e o corte das peças. Para isto o molde deve apresentar características especiais.

Existem vários detalhes que devem ser levados em consideração no projeto de moldes, os quais são imprescindíveis a um bom projeto. Detalhes como precisão dimensional da peça, redução das paredes da peça, entre outras. Porém o detalhamento da etapa de conformação não é alvo deste trabalho. Os livros "*Thermoforming, a plastics processing guide*", "Moldes para

plásticos" da PRO-TEC Centro Escolar e Editorial Ltda e "PLÁSTICOS, Moldes & Matrizes" da editora Hemus, são boas referências para esta área específica.

3) Sistemas de Controle e Automação de Processos.

3.1) Introdução

São vários os motivos que levam à automação dos sistemas industriais de produção nos tempos atuais. A ação conjunta da necessidade de se tornar uma determinada indústria mais competitiva, com o desenvolvimento progressivo dos sistemas de controle, forma um cenário muito propício para a automação de processos industriais.

No que diz respeito à competitividade de uma indústria, pode-se falar em custos de produção e produtividade. É necessário que uma empresa seja eficiente no que faz para ser competitiva. A automação de um processo tem geralmente como fim aumentar a eficiência de uma empresa. O aumento desta eficiência pode vir também através da atualização da tecnologia aplicada em um processo já automatizado e até mesmo em mudanças no processo de produção atual com tecnologias mais recentes.

3.2) Vantagens e características de um sistema automatizado

Com a automação de um processo específico certamente se reduzirá a mão de obra empreendida na sua execução, porém esta redução não necessariamente corresponde a uma redução no custo desta mão de obra. Com a introdução de equipamentos modernos em uma linha de produção, a necessidade de formação ou contratação de pessoal qualificado, com salários mais altos é evidente. Com isto muitas vezes a redução nos custos de produção no que diz

respeito à gastos com folha de pagamento, podem ser aquém dos resultados esperados.

Porém, há muitas outras vantagens na introdução do controle automático na indústria. O aumento na produtividade bem como a redução no refugo de peças acabadas são duas importantes características em processos automatizados. Sistemas automáticos, uma vez operando e produzindo produtos finais com qualidade aceitável, continuam operando sem erros que poderiam ocorrer devido à desatenção de operadores do processo, e erros humanos normais, desta forma uma redução no custo de produção é conseguido. Muitas vezes a automação de um processo, que pode ser cara, é justificada apenas pela redução destes refugos de produtos acabados.

Sistemas de controle automático podem ser ajustados para que o produto final esteja dentro de uma faixa de tolerância de qualidade mais apertada do que o que se conseguiria por um operador humano. Muitos sistemas devem ser automatizados porque requerem uma qualidade final tal que não é economicamente viável através de um operador humano, ou até mesmo é impossível de se conseguir.

Existem situações em que um operador humano não pode atuar. Processos em extremo isolamento (espaço e no fundo do mar); em total escuridão, onde o processo reage a estímulos de extrema velocidade (controle e interceptação de mísseis militares); em áreas perigosas (região de alta radiação nuclear, elevadas temperaturas, baixas temperaturas, gases tóxicos, etc...); onde o grau de complexidade do controle é excessivo (dutos transcontinentais de gás natural) e onde certas características de controle são muito críticas para se confiar à capacidade humana. Como pode ser visto, sistemas automatizados são imprescindíveis em alguns casos.

Porém uma variável na implantação de sistemas de controle automático, que sempre será importante, é o custo desta

automação. O avanço tecnológico tem resultado no desenvolvimento de novos hardwares disponíveis para o uso em sistemas de controle de processos tais como microcomputadores, CLP e robôs. Também tem ocorrido uma significativa redução nos custos e um aumento contínuo da capacidade destes equipamentos usados no controle de processos. A figura 6 apresenta uma tabela das principais vantagens e desvantagens da automação.

Levando em consideração todas estas justificativas e a disponibilidade de ambos, tecnologia e hardware, uma das áreas de estudo que mais cresce nos tempos atuais tem sido a automação do controle de processos industriais.

Figura 6 - Tabela de vantagens e desvantagens da automação [Markus e Pires, 1995].

Vantagens	Desvantagens
Redução da mão de obra	Mão de obra cara
Aumenta a confiabilidade, qualidade e repetibilidade	falta a sensibilidade inerente ao homem
Aumento da oferta de emprego qualificado	Diminuição de emprego não qualificado
Aumento significativo da produtividade	Custo inicial elevado
Melhoria do conforto	Rápida obsolescência tecnológica
Aumenta a competitividade	Deslocamento da mão de obra
Rapidez de solução	Nível de manutenção elevado
Execução de tarefas impossíveis para o homem e monitoração precisa do processo	****

3.3) Características dos sistemas de controle atuais.

Os sistemas de controle podem ser divididos basicamente em duas áreas, os Sistemas a Variáveis Contínuas (SVC) e os Sistemas a Eventos Discretos (SED).

Os SVCs são caracterizados por uma grandeza física que varia continuamente no tempo, e para o seu controle são aplicadas técnicas de controle Tradicional ou Clássico. Quando estas não são satisfatórias são aplicadas teorias de Controle Robusto e Controle Moderno [Miyagi, 1996].

Já os SEDs, como o próprio nome define, são caracterizados por eventos discretos, provenientes de um objeto de controle formado por elementos estruturais independentes, mas que se relacionam entre si e que podem assumir um número finito de estados. Por exemplo: Motor ligado, tanque cheio, objeto na posição correta, etc. O controle destes sistemas geralmente é caracterizado por funções como operações lógicas, seqüencialização, temporização e computação numérica.

Porém, com o desenvolvimento dos equipamentos que desenvolvem o controle destes sistemas, estão ficando cada vez mais comuns os sistemas de controle que tratam em conjunto estas duas classes de controle, de SVC e SED. São os sistemas híbridos. Adicionado a isto, com a redução do custo dos controladores e o desenvolvimento das técnicas de comunicação de dados, estão sendo concebidos sistemas que funcionam como um organismo único. Estes sistemas apresentam funções distribuídas em nível de planejamento (gerenciamento) e níveis de operação.

A arquitetura de um sistema de controle moderno pode ser resumida conforme a figura 7. Nestes sistemas as funções são hierarquizadas para assegurar a segurança e manutenção do sistema, e cada função está associada a um tipo de hardware e

nível de controle. Atualmente, apesar de que diferentes arquiteturas de controle são desenvolvidas, todas elas compartilham o conceito de camadas de automação. Cada camada é construída sobre a outra, e manipula informações importantes oriundas da camada diretamente inferior.

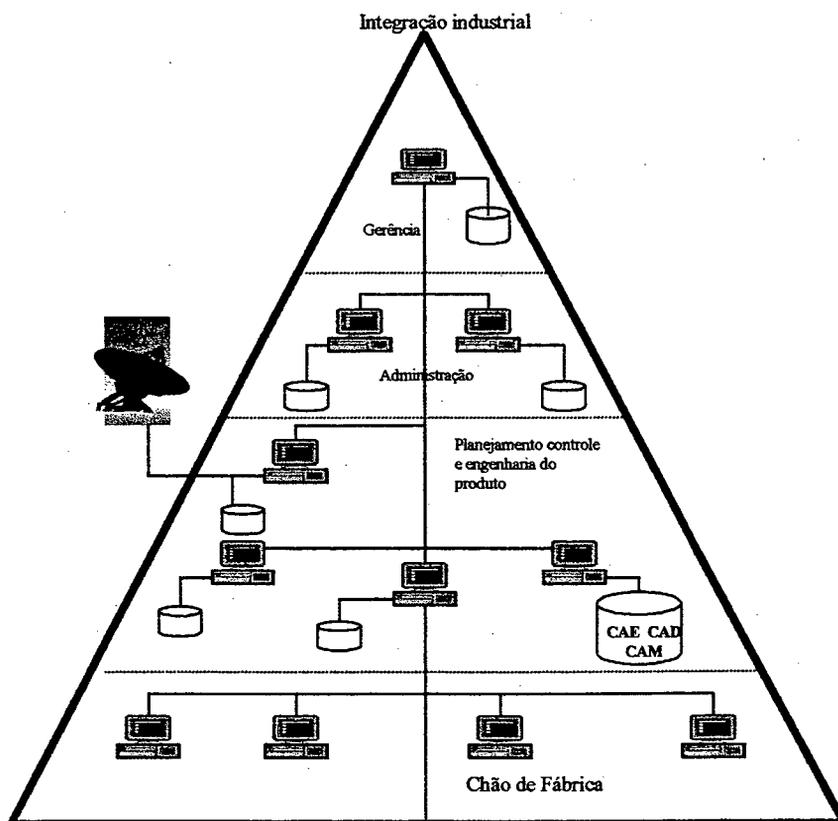


Figura 7 - Sistema distribuído e hierárquico.

Os dispositivos que controlam as instalações e máquinas diretamente no chão de fábrica são os dispositivos de controle distribuído. Já os dispositivos que controlam e gerenciam a produção são chamados de dispositivo de controle em nível superior. Estes níveis de controle são ligados fisicamente através de redes de comunicação e funcionam da seguinte maneira: As ordens de produção, montagem, entre outras funções, dependendo do sistema são enviadas dos níveis superiores para os níveis inferiores, e as respostas (relatórios, avisos, etc.) que especificam o estado da produção percorrem o caminho inverso. No

nível inferior existem trocas de informações de estado, intertravamentos, etc. Desta forma, assegura-se a supervisão geral do sistema durante seu funcionamento (garantia da qualidade), ao mesmo tempo em que podem ser executados estudos para melhorar (otimizar) a produção (alta produtividade).

3.4) Estratégias de controle

Assim como a abertura de mercado aumenta a concorrência entre as indústrias, é ela que fornece subsídios tecnológicos para o desenvolvimento da produção. A gama de hardware e softwares disponíveis para a modernização e automação de processos atualmente é muito grande. Um bom projeto, consiste em se alcançar os objetivos traçados com um bom casamento entre hardware e software e a baixo custo.

Neste contexto, existem três estratégias de controle ou sistemas de controle mais usuais, que são: Sistemas de Controle Distribuído (DCS - *Distributed Control Systems*), CLP - Controlador Lógico Programável (PLC - *Programmable Logic Controller*) e sistemas de controle baseados em computadores pessoais (*Personal Computer/Front End systems*) [Uitenham e Munjal, 1991]. As fronteiras entre estas estratégias estão desaparecendo e a utilização de uma ou outra ou delas em conjunto, depende do tipo de sistema a automatizar.

3.4.1) Sistemas de Controle Distribuído ou DCS

Estes sistemas são caracterizados por alocar módulos inteligentes ao longo do processo. A sua arquitetura consiste em distribuir geograficamente na planta industrial, controladores e módulos de entrada e saída. Sendo outra característica, um

sistema central onde as informações são armazenadas e se pode atuar e monitorar o processo. Atualmente são chamados de Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD).

Este tipo de arquitetura de controle é de suma importância, pois as informações de controle de processo são mais úteis quando são integradas, desta forma pode-se relacionar informações de todas as áreas da empresa, o que facilita a tomada de decisões na solução de problemas empresariais [Furness, 1992]. Os usuários e fabricantes, devem estar cientes da importância da integração destas camadas, gerando assim um fluxo de informações do chão de fábrica aos mais elevados níveis de controle de uma empresa. A figura 8 apresenta a arquitetura de um DCS.

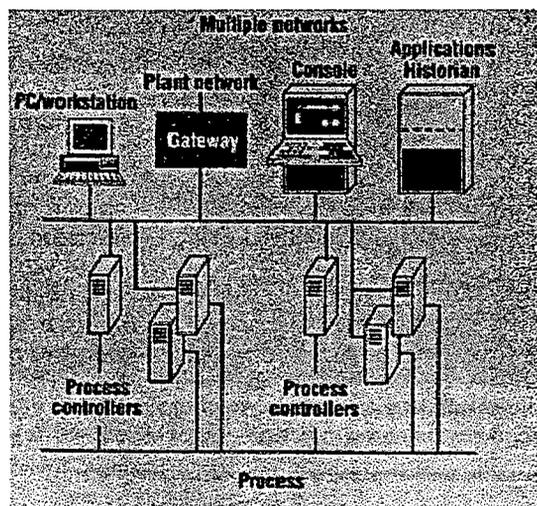


Figura 8 - Arquitetura de um DCS [Furness, 1992]

Como vantagens desta estratégia de controle temos a ausência de falhas pontuais na planta e baixo custo de instalação e fiação. Atualmente avançados algoritmos de controle podem ser implementados.

Porém, este esquema de controle é indicado para plantas de médio ou grande porte e requer técnicas e linguagem de programação especializadas, que em grande parte dos casos é

desconhecida pelos usuários. O sistema computacional central, geralmente deve ser alocado em salas com ambiente controlado e falhas neste sistema podem paralisar toda a produção.

3.4.2) Sistemas de controle baseados em computadores pessoais

É um sistema de controle simples, que consiste de um computador pessoal, uma placa de entradas e de saídas que podem ser analógicas e/ou digitais, dispositivos de sinal e um software de controle, conforme figura 9.



Figura 9 - Sistemas baseados em computadores pessoais [Uitenham e Munjal, 1991].

O microcomputador recebe diretamente os estados de um objeto de controle através de um dispositivo de entrada/saída, apresenta graficamente estas informações ao operador, processa os sinais tomando decisões de controle e controla o objeto de controle através dos dispositivos de entrada/saída e de atuação [Uitenham e Munjal, 1991].

O uso de PC's no controle direto não é um conceito novo, desde a metade da década de 80, várias companhias de software desenvolveram pacotes de controle para atuação [Uitenham e Munjal, 1991 ; Gerold, 1995]. Devido a facilidade em se desenvolver algoritmos de controle onde geralmente a forma de programação era baseada em menus, a sua utilização era de fácil aprendizado, tanto para engenheiros experientes como inexperientes, o que lhe deu grande aceitação.

Existem muitos fornecedores destes softwares de controle, porém a maioria dos pacotes apresentam as seguintes características:

- boa apresentação gráfica;
 - tendência on-line das variáveis de saída do sistema monitorado;
 - status dos alarmes;
 - aquisição de dados (variáveis de controle);
 - apresentação de históricos;
 - gerenciamento on-line de arquivos;
 - drives para múltiplos dispositivos;
 - capacidade de cálculos;
 - arquitetura aberta;
 - seleção de receitas;
 - emissão de relatórios;
 - segurança do sistema;
 - controle estatístico do processo;
 - ligação em rede;
-

- configuração do sistema através de ícones.

A utilização conjunta de sistemas de controle baseados em computadores pessoais com CLP's também é uma estratégia muito utilizada, onde se pode aliar as vantagens dos dois sistemas [Vora, 1992].

A utilização de PC's no controle direto tem evoluído grandemente tanto por parte do princípio de funcionamento e configuração do sistema (programação), bem como por parte da evolução do hardware propriamente dito. Atualmente um novo conceito tem recebido bastante atenção por parte dos fabricantes de softwares e hardware, é o "Soft Logic" baseado em PC. Esta estratégia tem recebido especial atenção por parte daqueles que estão repensando a estratégia de controle de suas plantas, substituindo muitas vezes os antigos modelos de controle.

Isto se deve em parte ao fato de que a palavra do momento são os sistemas de arquitetura aberta [Babb, 1995b] uma de suas importantes características. Ou seja, existe um desejo por parte dos usuários de sistemas de controle em não se verem restritos a um sistema proprietário fechado (como os fornecedores de CLP's e CNC's), partindo para sistemas de controle abertos (como os PC's ou sistemas baseados em VME-bus) [Gerold, 1995]. Este comportamento dos usuários, motivou o desenvolvimento de trabalhos importantes de padronização em CLP/CNC. Existe hoje por exemplo a norma IEC 1131 que padroniza a comunicação dos CLP's.

Esta estratégia é baseada em um emulador de CLP. Um software em tempo real faz a varredura de um sistema industrial de entradas e saída dando as ações de controle, como faz um CLP. O sistema possui três principais funções:

- O controle em tempo real de variáveis discretas e analógicas através de uma interface com módulos de entrada/saída ou dispositivos;
-

- A função de programação, que pode ser on-line e off-line dependendo do sistema. Nesta função, também é feita a documentação e configuração do controle;
- As funções de interface gráfica com o operador e controle supervisorio.

No início do desenvolvimento desta estratégia, de utilização de PC's no controle direto, era tipicamente aplicada a laboratórios ou a plantas piloto, onde geralmente o número de entradas e saídas era pequeno. Porém, com o desenvolvimento, a performance dos sistemas melhorou significativamente possibilitando a utilização desta estratégia de controle para sistema de grande porte.

3.4.3) Controlador Lógico Programável

Os CLP's (Controladores Lógico Programáveis) surgiram no final da década de 60 para resolver problemas de automação da indústria automobilística americana, [Babb, 1995a; Babington, 1990 e Gerold, 1992], com a capacidade de substituir grupos de relés em funções lógicas, de tempo e contadores de eventos, [Furukawa, 1990; Morano, 1986]. Estes equipamentos proporcionaram uma revolução industrial no campo da automação. A sua introdução reduziu muito os custos e o trabalho penoso na construção de grandes gabinetes de relés.

Pode-se definir os CLP's como computadores especializados sem teclado ou vídeo e devem ser programados por outro dispositivo em linguagem própria. São simples dispositivos que podem ser programados para monitorar e controlar processos. Simplificadamente representa-se na figura 10 um sistema de controle baseado em CLP. Uma importante característica dos CLP's, é que podem ser alocados junto ao processo, no chão de fábrica, isto devido ao seu robusto hardware e gabinete.

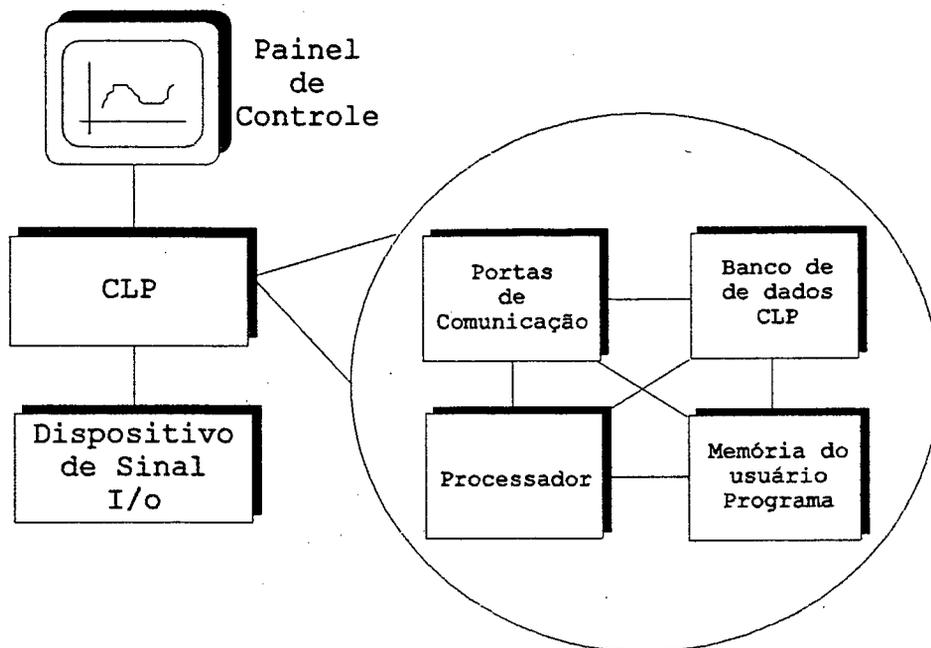


Figura 10 - Sistema de controle baseado em CLP [Uitenham e Munjal, 1991].

Já com quase três décadas de existência, os CLP's como os demais equipamentos eletrônicos, passaram por um grande desenvolvimento tecnológico, o que lhes conferiu mais funções, menores dimensões, maior confiabilidade e uma grande redução nos custos e principalmente uma grande melhora na performance. Aliando a estes fatos, a utilização de painéis para interface com o operador, os CLP's tornaram-se grandes rivais dos sistemas de controle distribuído de pequeno porte [Uitenham e Munjal, 1991].

Duas importantes características, adicionadas aos CLP's, popularizaram a sua utilização, a aquisição de dados e a capacidade de comunicação com outros equipamentos. Assim, puderam ser ligados a outros equipamentos proporcionando uma ótima interface com o operador ou mesmo o controle supervisor de múltiplas plantas industriais.

Os CLP's podem ser classificados como de grande, médio e pequeno porte. São caracterizados principalmente por seu tamanho de memória, número e tipo de entradas e saídas e velocidade de processamento.

3.4.3.1) Estado da Arte dos CLPs de pequeno porte

O mercado dos CLPs de pequeno porte é muito competitivo, e muito sensível ao preço [Babb, 1995b] e existe por parte dos fabricantes uma luta muito grande para manter e aumentar a sua fatia do mercado. Como esta concorrência é grande e a exigência dos usuários é cada vez maior, nos últimos anos tem surgido um grande número de novos equipamentos, de menor porte e preço.

A esta nova geração de CLPs foram conferidas muitas características especiais: entradas rápidas, controle PID, controle de temperatura, contadores rápidos, saída PWM, memória "Flash", dupla precisão matemática, entre outras. Por este fato, a concepção de muitos sistemas de controle, que eram caracterizados por módulos de entrada e saída inteligentes e comunicação com um controlador de maior porte, está migrando para a utilização de microCLPs. Estas características até pouco tempo eram possíveis somente em CLPs de grande porte. Estas novas ferramentas nos microCLP's também mudou o perfil dos CLPs, que antes eram vistos como uma caixa dedicada programada em diagrama ladder e que era conectada a um módulo de entrada e saída dedicado. Atualmente são vistos mais como um grupo de funções do que um hardware de pequeno porte [Cleveland, 1995].

Como citado anteriormente, a palavra do momento no meio dos usuários de sistemas de controle, são arquiteturas abertas. Os fabricantes de CLP's por sua vez não poderiam de outra forma ficar de fora apesar de no passado relutarem em fazê-lo. Estes

4) Levantamento do processo

4.1) Processo convencional de termoformagem da uma empresa

Neste trabalho, tem-se como alvo o processo de termoformagem para a produção de palmilhas de tênis de uma indústria de pequeno porte especializada na manufatura de vários produtos de polietileno.

A produção de palmilhas é realizada com matéria prima produzida na própria empresa, manta plástica de polietileno expandido, fabricada em uma extrusora a partir de polietileno granulado. A partir da manta produzida pelo processo de extrusão, a produção consiste nas seguintes etapas:

- Preparação da manta plástica;
- Corte da manta;
- Processo de termoformagem;
- Corte das peças;
- Contagem, seleção e embalagem das peças.

A fabricação de palmilhas é o processo mais complexo da empresa e que consome maior quantidade de mão de obra. São utilizados quatro equipamentos distintos para o desenvolvimento das etapas e o transporte do material ao longo da produção é feito manualmente. Os equipamentos são de certa forma rudimentares ficando a qualidade e produtividade do processo muito dependentes da habilidade dos operadores.

novos produtos estão sendo desenvolvidos com uma grande preocupação no que diz respeito a comunicação com equipamentos externos e também estão sendo concebidos baseados em uma estrutura padrão o que facilita a conexão com equipamentos de outros fabricantes.

Outra característica no desenvolvimento destes equipamentos é o número de entradas e saídas, muitos foram desenvolvidos para aplicações muito simples, onde a utilização de equipamentos de controle caros seriam inviáveis. O custo e o tamanho destes novos equipamentos foram reduzidos, existem CLPs cujo tamanho é pouco maior que um maço de cigarros e o preço não ultrapassa U\$200.

Os sistemas de controle baseados na aplicação direta de computadores pessoais é uma área que está se desenvolvendo muito, conforme citado em item anterior. Muitos dizem que esta estratégia ameaça muito a utilização de CLPs, o que já é uma realidade em sistemas de grande porte, onde companhias estão migrando seus sistemas de controle para esta estratégia. Porém, para os sistemas de pequeno porte, a realidade é um pouco diferente. Acredita-se que por mais que esta tecnologia se desenvolva, parece improvável que os fabricantes de sistemas baseados em PCs possam desenvolver um produto que possua entradas e saídas, suporte para rede e funções especiais pelo mesmo preço e tamanho dos atuais microCLPs [Babb, 1995a].

A associação de PC/CLP é hoje muito difundida e também aceita no mercado. Existem também vários softwares supervisórios que integram PC's a CLP's, tais como FIX-MMI, FIX-SCADA, Intouch, Elipse21, Unisoft, etc... Estes softwares podem supervisionar milhares de pontos de controle e também possuem protocolo para comunicação com CLP's de vários fabricantes.

4.1.1) Produção da matéria prima: manta plástica de polietileno expandido.

A manta plástica utilizada como matéria prima é produzida por um processo de extrusão e expansão de polietileno. Este processo, consiste no aquecimento do material plástico granulado (polietileno), e posterior injeção de Freon para expansão do material. O processo de expansão do material lhe confere melhores características de isolamento térmico, acústico e melhores propriedades de amortecimento de choque mecânico, sendo esta última muito importante em palmilhas de tênis.

O processo de extrusão e expansão é desempenhado por uma extrusora de plástico com adaptações para a expansão do material. Este processo é supervisionado por um operador.

Outros produtos na empresa também são obtido por este mesmo processo de extrusão do polietileno. Com a alteração de algumas variáveis no processo de extrusão e expansão, as características da manta produzida podem ser modificadas conforme a necessidade.

Podemos citar como outros produtos desta empresa, tubos para isolamento de dutos de água aquecida, mantas para isolamento acústico de ambientes e revestimento para pranchas de bodyboard.

O processo de extrusão de plásticos pode ser estudado com mais detalhes em Blass 1988.

4.1.2) Revestimento da manta.

Para a obtenção de produtos de melhor qualidade, a espessura final da manta é obtida com a composição de duas

mantas de espessuras e granulação diferentes, uma fina e outra grossa, (o material é como uma espuma, com bolhas de gases em seu interior) as quais são fixadas por meio de um processo desenvolvido na empresa, chamado "dublagem".

Após a dublagem, a manta é revestida com um tecido de algodão, por meio de outro processo, também desenvolvido pela empresa. Deve-se lembrar, que a composição de mantas é feita justamente para melhorar a qualidade final da manta após o revestimento, que deve apresentar uma textura lisa na superfície para maior conforto do usuário (manta de granulação fina na superfície). A figura 11 apresenta uma representação da manta. No desenvolvimento destas etapas, de dublagem e revestimento, trabalham dois operadores.



Figura 11 - Representação esquemática da manta.

4.1.3) Corte da manta

Após o revestimento, a manta é cortada em formato retangular, no tamanho do molde de conformação. A largura original da manta é o dobro da largura do molde. Assim, primeiramente se corta a manta em duas tiras de mesma largura e a partir desta tira é que se corta a manta no tamanho desejado. É previsto um excedente na largura por causa das bordas irregulares da manta, que devem ser acertadas. Para este processo de corte, também existe um equipamento específico. Na

figura 12 é apresentado o formato final da matéria prima pronta para a conformação.

4.1.4) Processo de termoformagem

O processo de termoformagem da empresa é representado esquematicamente na figura 12. Primeiramente a manta cortada em placas, já no formato específico do molde que será utilizado, é introduzida em um túnel de aquecimento por um operário, iniciando o processo de termoformagem pelo aquecimento. Este túnel de aquecimento possui ventilação forçada do ar em seu interior, o que faz com que a transferência de calor seja a conjugação de convecção e radiação, itens 2.2.3.2 e 2.2.3.3.

O túnel possui internamente um sistema com esteira para transporte da manta em seu interior. Esta esteira é acionada por um motor de corrente contínua, o que possibilita uma variação contínua da velocidade de transporte de manta. A velocidade de transporte é controlada pelo operador do processo através de um sistema potenciométrico.

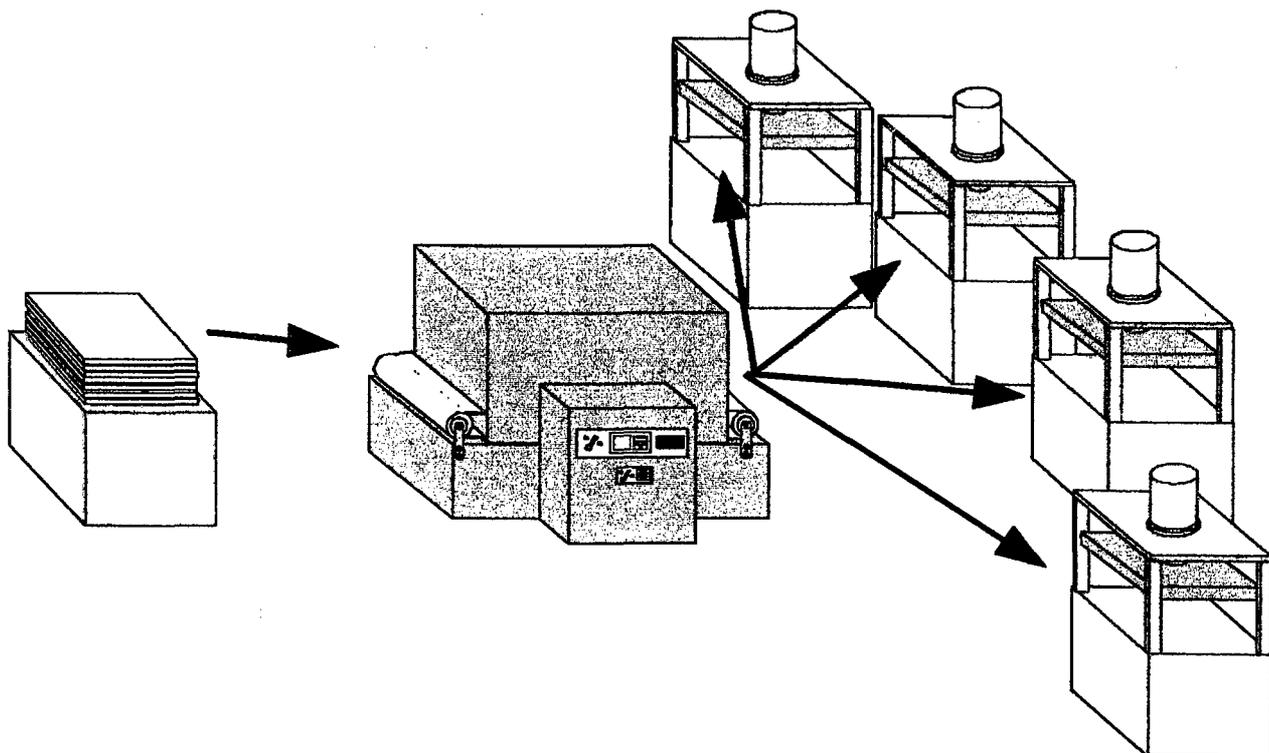


Figura 12 - Processo de termoformagem.

O túnel de aquecimento é alimentado por corrente elétrica alternada e possui um sistema de controle On/Off dentro de uma faixa de temperatura, no limite superior a potência é desligada e no limite inferior a potência é ligada. O operador também é responsável pelo ajuste da temperatura do túnel. Esta temperatura é determinada pelo tipo de manta, temperatura ambiente e tempo de aquecimento (velocidade da esteira de transporte).

A temperatura do túnel é ajustada para que após o tempo de permanência da manta no interior do túnel, ela alcance a temperatura adequada para a conformação. O controle da temperatura da manta é feito indiretamente, através do controle da temperatura do túnel de aquecimento e da velocidade da esteira de transporte. A temperatura do túnel e a velocidade da esteira são ajustadas de acordo com a experiência do operador,

tomando-se como base o aspecto físico da manta na saída e a qualidade da peça após ser conformada.

Após a etapa de aquecimento, a manta é manipulada até o sistema de prensagem do material, onde o molde lhe confere o formato desejado.

Como o plástico aquecido é conformado no molde, com o resfriamento o plástico permanece na forma adquirida. Para acelerar o processo de resfriamento, os moldes de conformação são resfriados continuamente por um sistema de refrigeração, conforme item 2.3.1.

Como foi relatado, três operadores são responsáveis pela realização desta etapa, um na introdução da manta no túnel de aquecimento e dois na conformação do material.

4.1.5) Corte das palmilhas

Com a manta já conformada, passa-se à obtenção dos contornos da palmilha. Esta etapa é feita por meio do corte da manta já conformada, em posições específicas. É utilizada uma prensa excêntrica e facas no tamanho da numeração de calçados específica da palmilha. O processo de corte é feito separadamente do processo de termoformagem, sendo necessário mais um operário para desempenhar este trabalho.

4.1.6) Seleção, Contagem e Embalagem.

Esta é a última etapa na fabricação de palmilhas. As palmilhas passam por um processo de verificação visual da qualidade, visando separar as que apresentam algum defeito de

fabricação para efeito de contagem das demais. As peças são separadas em pacotes de 100 pares, conforme numeração e espessura da manta. Este processo é desempenhado por 2 funcionários.

4.2) Proposta de automação do sistema.

O processo apresentado no item 4.1, envolve um total de 10 operários ao longo de toda a cadeia de produção (considerando-se a partir da matéria prima pronta), sendo que só no processo de termoformagem e corte trabalham 4 pessoas.

O presente trabalho busca apresentar uma alternativa de automação apenas para a etapa de termoformagem e corte das peças. É necessário também uma alteração na etapa anterior à termoformagem, o corte da manta, tornando-a adequada à nova forma de processamento. Esta alteração consiste em uma simplificação do processo de corte, pois será necessário somente partir a manta original em duas. As demais etapas ficam como proposta para trabalhos posteriores.

4.2.1) Identificação dos objetivos

Como citado acima tratar-se-á neste trabalho somente as etapas de termoformagem e corte das peças. Neste contexto, os principais objetivos a serem alcançados com a modernização destas etapas são:

- Redução na mão de obra aplicada ao processo;
 - Redução da influência da experiência do operador do processo na qualidade final do produto bem como na produtividade;
 - Expansão da produção;
-

- Melhoria na qualidade final do produto;
- Um melhor gerenciamento e monitoração da produção.

O levantamento destes objetivos é de grande importância e é utilizado como referência para a tomada de decisões. Com base nestes objetivos e na pesquisa sobre as estratégias de controle feita previamente, optou-se pela automação do processo através do uso de um controlador programável acoplado a um microcomputador.

Esta estratégia, possibilita o desenvolvimento de sistemas altamente automatizados, onde uma de suas principais características é a redução da intervenção humana e um bom nível de monitoração e gerenciamento da produção. O uso conjunto destes equipamentos é de uso comum, já comprovada a sua efetividade, o que também contribuiu para a utilização desta estratégia.

4.2.2) Estudo do objeto de controle

Para possibilitar a automação do processo e com isto alcançar os objetivos traçados no item anterior, o processo tem que sofrer alterações. As etapas de termoformagem e corte serão efetuadas em um único módulo. As principais modificações nestas etapas são apresentadas figura 13, onde apresenta-se suas novas características:

- O túnel de aquecimento passa a ter um sistema de transporte da manta que o integra à prensa de conformação;
- A prensa de conformação que já era incumbida de resfriar o material também cortará as peças.

Estas modificações promovem uma redução no número de operadores do sistema de corte e termoformagem. Esta redução

pode ser da ordem de 50% ou mais. Porém um sistema de controle eficiente deve ser implementado.

O objeto de controle é um conjunto formado por vários elementos, os quais são responsáveis pelo desenvolvimento do processo. Para se conhecer o objeto de controle, é necessário conhecer os seus elementos através do estudo de suas funções e características [Miyagi, 1996].

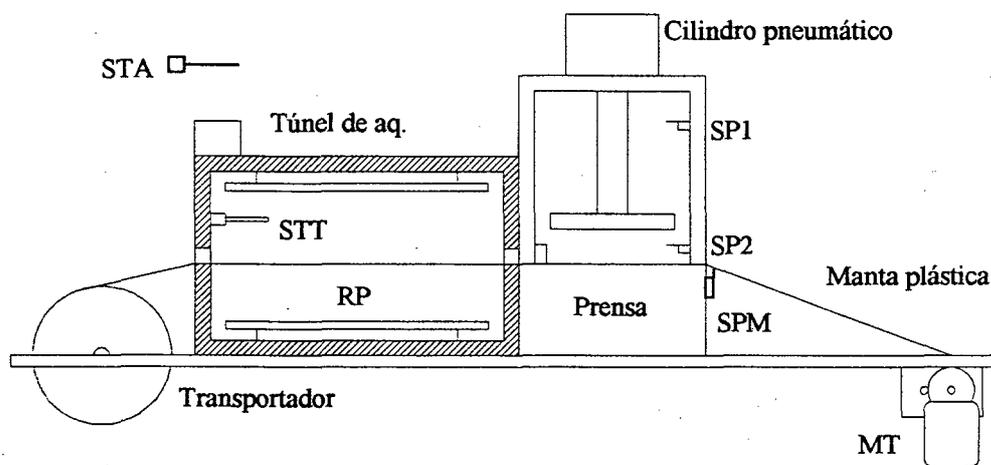


Figura 13 - Representação esquemática do novo sistema.

A representação esquemática, figura 13, que apresenta a proposta de alterações no processo necessárias para a sua automação, é um diagrama estrutural do objeto de controle a ser implementado.

O sistema como um todo tem uma função principal, a produção de palmilhas. Para que este sistema ou o objeto de controle desempenhe seu papel, cada dos elemento deste objeto de controle desempenha funções dentro do processo, que são:

- túnel de aquecimento deve aquecer o material a uma faixa de temperatura ideal para a conformação;

- transportador deve transportar o material do túnel para a prensa;
- prensa deve conformar, resfriar e cortar as peças.

Para que estas funções sejam acionadas e sincronizadas, é necessário a existência de elementos de detecção de estados e sensores e elementos atuadores. São estes elementos que possibilitam o controle efetivo do objeto de controle. Na figura 13 também estão representados estes elementos e suas descrições são apresentadas nas figuras 14, 15 e 16.

Figura 14 - Tabela dos elementos de detecção.

número	1	2	3
equipamento	prensa	prensa	transportador
aplicação	posicionamento da prensa na posição superior	posicionamento da prensa na posição inferior	posicionamento da manta
nome	sensor de posição superior	sensor de posição inferior	sensor de posição da manta
código	SP1	SP2	SPM
quantidade	1	1	1
tipo de sinal	chave de duas posições ON/OFF	chave de duas posições ON/OFF	Sensor óptico
alimentação	24V CC	24V CC	24V CC

Figura 15 - Tabela dos elementos atuadores.

número	1	2	3
equipamento	transportador	prensa	túnel de aquecimento
aplicação	motorização do transportador	conformação	aquecimento da manta
nome	motor do transportador	cilindro	resistências de potência
código	MT	CP	RP
tipo	corrente contínua	pneumático	
tensão [V]	12 V DC	220 V AC	220 V AC
potência [kW]	0.25	5	1.2
tipo de controle	ON/OFF	ON/OFF	PWM

Figura 16 - Tabela de Sensores.

número	1	2
equipamento	túnel de aquecimento	***
aplicação	temperatura do túnel	temperatura ambiente
nome	sensor de temp. do túnel	sensor de temp. ambiente
código	STT	STA
tipo	termopar J	termopar J
faixa de op.	0 a 200 °C	0 a 200 °C
alimentação	3 a 30 V DC	3 a 30 V DC
saída	2 a 10 V DC	2 a 10 V DC

Como pode-se observar, o sistema a ser controlado não apresenta grandes complicações. Como características mais marcantes, tem-se o controle analógico da temperatura do túnel de aquecimento e a inter-relação entre os outros elementos, prensa e sistema de transporte. Estes elementos apresentam uma relação de intertravamento, o transportador não pode ser acionado enquanto o material esta sendo conformado e a prensa não pode ser acionada enquanto o material está sendo transportado.

Outra característica do sistema está relacionada com o tempo em que os elementos encontram-se em cada estado. O material deve ser conformado durante um tempo mínimo necessário para o resfriamento da manta. Existe também o tempo de aquecimento, que é o tempo em que o material plástico fica no interior do túnel. É o tempo necessário para que a manta vá para a conformação em uma faixa de temperatura satisfatória para esta etapa. Estes dois tempos devem estar sincronizados, e para que isto aconteça a temperatura ideal do túnel de aquecimento deve ser encontrada.

4.3) Proposta de Implementação de Parte do Sistema em Laboratório.

Como forma de se analisar a viabilidade do sistema proposto, implementou-se parte do sistema no laboratório de

hardware do GRUCON. A figura 17 apresenta o sistema implementado. Divide-se este sistema em três partes distintas:

- bancada experimental;
- software de controle, para o CLP;
- software de monitoração, para o PC.

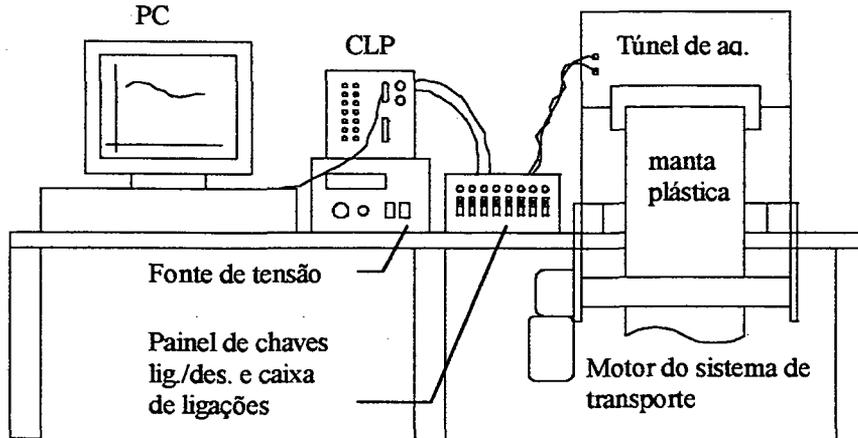


Figura 17 - Montagem laboratorial.

4.3.1) Bancada experimental: objeto de controle

Com base no diagrama estrutural da figura 13, o objeto de controle experimental será constituído dos seguintes elementos:

- túnel de aquecimento;
- sistema de transporte.

No sistema de conformação e corte, não utilizou-se uma prensa como no processo industrial, devido ao seu elevado custo. Este sistema foi então substituído por chaves liga/desliga que simulavam as posições alta e baixa da prensa.

O túnel de aquecimento e o sistema de transporte foram desenvolvidos em escala reduzida, com equipamentos de fácil

aquisição, porém proporcionaram uma boa simulação de um sistema industrial.

4.3.2) Software de controle

A bancada é controlada por um CLP de pequeno porte. O CLP deve ser programado para controlar o sistema como um todo, através da sincronização de seus elementos, afim de que estes elementos desempenhem suas funções. O programa é baseado na coordenação de cada elemento do objeto de controle respeitando a relação entre estes elementos e suas funções dentro do sistema. Tal programação é efetuada por meio de um microcomputador acoplado ao CLP, o mesmo utilizado para o software de monitoração.

4.3.3) Software de monitoração

A figura 17 apresenta o sistema implementado no laboratório de hardware do GRUCON. O PC acoplado ao CLP desempenha papel de programador do CLP e de interface entre operador e o processo. Para a monitoração do processo, um software de monitoração foi implementado. Detalhes do software e seu desenvolvimento são descritos em capítulo posterior.

Não foi utilizado um supervisor comercial, como os citados no item 3.4.3.1 do capítulo anterior, devido o seu elevado custo, por serem de grande porte para a aplicação e também como forma de desenvolver tecnicamente os técnicos envolvidos no trabalho.

5) Sistema de Aquecimento

Em etapa mais avançada da pesquisa, verificou-se a necessidade de implementar parte do processo em laboratório, para permitir o ensaio do sistema de monitoração e do sistema de controle do processo de termoformagem. Foi projetado e implementado um túnel para o aquecimento da manta de polietileno, similar ao de um processo de termoformagem industrial.

O túnel apresenta dimensões reduzidas, mas é capaz de aquecer o material a temperaturas semelhantes à do processo industrial, simulando as condições encontradas em campo. O tempo de aquecimento é um pouco maior, devido à menor potência do túnel de aquecimento desenvolvido, o que não interfere nos objetivos a serem alcançados. O controle da temperatura do túnel foi realizado por um Controlador Lógico Programável (CLP) conectado a um microcomputador, conforme proposta apresentada no item 4.2.

Com o sistema de aquecimento implementado, fez-se o levantamento de sua função de transferência em malha aberta, o que possibilitou a simulação e desenvolvimento de um controlador adequado. Tal levantamento, possibilita também a comparação entre os resultados teóricos, obtidos através da modelagem do sistema, e os resultados experimentais.

5.1) Equacionamento matemático do sistema.

Relação entre a temperatura interna do forno e a manta

Conforme explanado no capítulo 2, existem três formas básicas de transferência de calor: Radiação, convecção e condução que, geralmente, atuam concorrentemente. No entanto, no

sistema em questão, a transferência de calor entre o forno e a manta de polietileno, é predominantemente por radiação. Tal comportamento se deve à própria constituição do forno, onde a fonte de calor está isolada da manta por uma camada de ar que é má condutora de calor e que, por estar contida no forno praticamente sem movimento (não há circulação de ar forçada), a convecção não contribui apreciavelmente no aquecimento da manta. Na figura 18 apresenta-se um corte lateral do sistema de aquecimento.

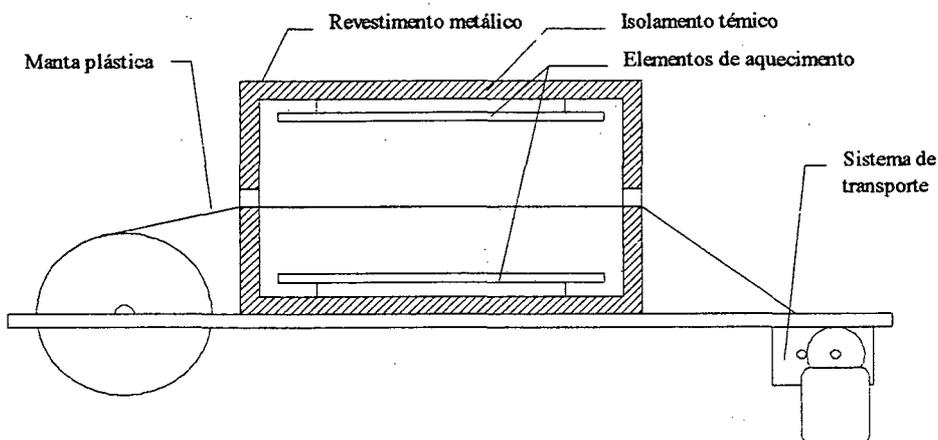


Figura 18 - Representação esquemática do sistema forno/manta.

Praticamente toda a energia fornecida aos elementos de aquecimento do túnel é revertida em aquecimento. Porém a temperatura destes não é elevada indefinidamente. Um equilíbrio térmico é alcançado, onde toda energia fornecida a eles é também transmitida. Devido a reduzida massa que estes elementos apresentam, o equilíbrio térmico é alcançado rapidamente.

A superfície de emissão dos elementos de aquecimento é relativamente pequena (fio de Cromo/Níquel) e estes são espaçados por um grande intervalo não ocupando toda a área interna do túnel. Como a irradiação de energia ocorre em todas

as direções, parte da desta incide diretamente na manta plástica e parte é irradiada para as paredes internas do túnel de aquecimento. As paredes recebem energia por muito mais tempo que a manta plástica, ficando a uma temperatura mais elevada, transmitindo energia por radiação para a manta. O total de energia irradiada para a manta, é a soma da energia irradiada pelos elementos de aquecimento e a energia irradiada pelas paredes do túnel, cuja fonte primária é constituída pelos elementos de aquecimento.

A energia emitida pelos elementos de aquecimento (resistências elétricas) para a manta, cresce proporcionalmente à quarta potência da diferença de temperatura da superfície do aquecedor e da manta conforme equação (2). Porém, como sabemos, toda energia fornecida a eles é irradiada, e como esta emissão é em todas as direções, a parcela que incide sobre a manta é proporcional à área que esta envolve os elementos de aquecimento (fator de forma).

A temperatura da parede interna da manta também é de suma importância na determinação do montante de energia que a manta recebe durante a sua permanência no interior do túnel. A quantidade de calor fornecida à manta pelas paredes internas do túnel de aquecimento, também pode ser estimada usando a relação de **Stefan-Boltzmann** equação (2) [Gruenwald, 1987].

$$E = \sigma \times \epsilon \left[(T_{pint})^4 - (T_m)^4 \right] \quad (2)$$

E = Potência por unidade de área [W/m^2];

σ = Constante de **Stefan-Boltzman** $5.67 \text{ E-}8$ [$j/(m^2 \text{ s K})$];

T_{pint} = Temperatura da parede interna do túnel [K];

T_m = Temperatura da manta [K].

Esta relação é não linear. No entanto pode-se determinar um coeficiente de transmissão de calor por irradiação, o que simplifica a representação da taxa de

transferência de calor e lineariza o sistema para pequenas faixas de variação de temperatura. A equação 5.2 representa este coeficiente:

$$h_{rad} = \sigma \times \epsilon \left[(T_p)^2 + (T_m)^2 \right] \times [T_p + T_m] \quad (3)$$

Conforme a representação esquemática do sistema, na figura 18, e através das relações apresentadas pode-se estabelecer a seguinte relação entre a temperatura interna do túnel e a temperatura da manta plástica (nesta relação é desconsiderada a energia que a manta recebe diretamente das resistências):

$$\frac{T_{pint} - T_{ms}}{T_{pint} - T_{me}} = e^{\frac{-h_{rad} \times P}{m \times c_p} \times L} \quad (4)$$

onde:

T_{pint} = Temperatura da parede interna do túnel [K];

T_{ms} = Temperatura de saída da manta [K];

T_{me} = Temperatura de entrada da manta [K];

h_{rad} = Coeficiente médio de radiação [$j/(m \cdot s^2 \cdot K)$];

P = Perímetro ou duas vezes a largura da manta [m];

L = Comprimento do forno [m];

m_v = Vazão mássica da manta [Kg/s];

c_p = Calor específico do polietileno [$j/(Kg \cdot K)$].

O coeficiente de irradiação h_{rad} é de difícil determinação, pois é um valor que se altera ao longo do percurso da manta no interior do túnel e a sua variação não é linear. Deve-se determinar um valor médio para todo o percurso da manta no interior do túnel de aquecimento, como forma de linearização do fenômeno.

Como o sistema não é linear, as constantes determinadas através da modelagem teórica são válidas apenas em torno das situações particulares utilizadas. Considera-se que o sistema é linear em torno de uma situação particular de T_{me} , T_p , T_{amb} , tempo de aquecimento e espessura de manta.

5.2) Perdas de calor do túnel de aquecimento para o meio ambiente

Conforme apresentado na figura 18, o túnel de aquecimento possui um revestimento interno em manta de fibra cerâmica, que é um bom isolante térmico e o seu exterior é em chapa de aço de 1mm de espessura. Este isolante térmico porém não é ideal, ocasionando fluxo de calor do interior do túnel para o seu exterior. Assim, sua superfície estará a uma temperatura superior à ambiente, provocando perda constante de calor. A perda de calor da superfície do túnel para o ambiente é por convecção e por radiação.

5.2.1) Equacionamento das perdas de calor

As características do sistema impõem perdas que podem ser equacionadas conforme a equação (5). Algumas simplificações são feitas nesta formulação, como a desconsideração de um gradiente térmico no revestimento metálico do túnel e a variação da condutividade térmica do isolante com a temperatura.

$$q_{cond} = \frac{k_{isol}}{\Delta X} \times A_f \times (T_{pint} - T_{pext}) \quad (5)$$

Onde:

q_{cond} = Calor perdido pelo forno por condução por unidade de tempo [J/s];

k_{isol} = Condutividade térmica do material isolante [J/(smK)];

ΔX = Espessura da camada de isolamento [m];

A_f = Área do forno [m²];

T_{pint} = Temperatura da parede interna do túnel [K];

T_{pext} = Temperatura da parede externa do forno [K].

A temperatura da parede externa depende da quantidade de calor que esta perde para o meio ambiente (radiação e convecção) e da quantidade de calor ou potência fornecida ao túnel. A perda de calor por radiação pode ser representada pela relação de Stefan-Boltzman (2) apresentada anteriormente, e a perda por convecção pode ser avaliada pela relação:

$$q_{conv} = h_{conv} \times A_f \times (T_{pext} - T_{amb}) \quad (6)$$

onde:

q_{conv} = Calor perdido pela parede externa do forno por convecção por unidade de tempo [J/s];

h_{conv} = Coeficiente de transferência de calor por convecção [J/(m²sK)];

A_f = Área externa do túnel de aquecimento [m²];

T_{pext} = Temperatura da parede externa do túnel [K];

T_{amb} = Temperatura ambiente [K].

O coeficiente de transferência de calor por convecção também é um coeficiente de difícil determinação, que também varia com as condições que envolvem o sistema, tais como a temperatura ambiente, a temperatura da parede externa do forno, velocidade do ar que envolve o forno dentre outras. Porém, pode-se aproximar o valor deste coeficiente para a seguinte relação:

$$h_{conv} = (T_{pext} - T_{amb})^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

A temperatura da parede externa se estabilizará quando o calor de condução através da camada de isolante, se igualar ao calor perdido para o ambiente por radiação e por convecção pelas faces externas da chapa de aço.

5.3) Projeto do túnel de aquecimento (protótipo laboratorial)

Com as relações descritas acima e a equação (1), que equaciona a quantidade de calor que se deve fornecer à manta para que alcance a temperatura desejada, determina-se a potência necessária a se fornecer ao túnel de aquecimento. Para os cálculos, utilizou-se condições de temperatura e tempo de aquecimento inferiores aos valores industriais, pois o objetivo do sistema desenvolvido é de testar a aplicabilidade da estratégia de controle selecionada e também avaliar a formulação aplicada.

5.3.1) Requisitos de projeto

Na figura 20, são apresentadas as dimensões desejadas do túnel de aquecimento. Ele deve possuir duas aberturas, uma na parte frontal e outra na parte posterior, de tal forma a permitir a passagem da manta plástica em seu interior. Deve também ser bipartido em seu eixo longitudinal, facilitando a introdução da manta no sistema e também a manutenção do túnel.

Na figura 19, apresenta-se os valores desejados de temperatura, tempo de aquecimento da manta plástica e valores necessários para a determinação da potência do túnel.

Figura 19 - Tabela de dados de projeto

Quesitos de Projeto para túnel de aquecimento de manta de polietileno	
Tempo de Aquec. [s]	30
Temperatura de Aquecimento [°C]	100
Espessura [mm]	4
Largura [m]	0.30
DT_{max}[°C]	100
Condutividade Térmica [(Kcal m)/(hr m² °C)]	0.07
Resolução de controle de temperatura [°C]	1
Temperatura externa máxima [°C]	65

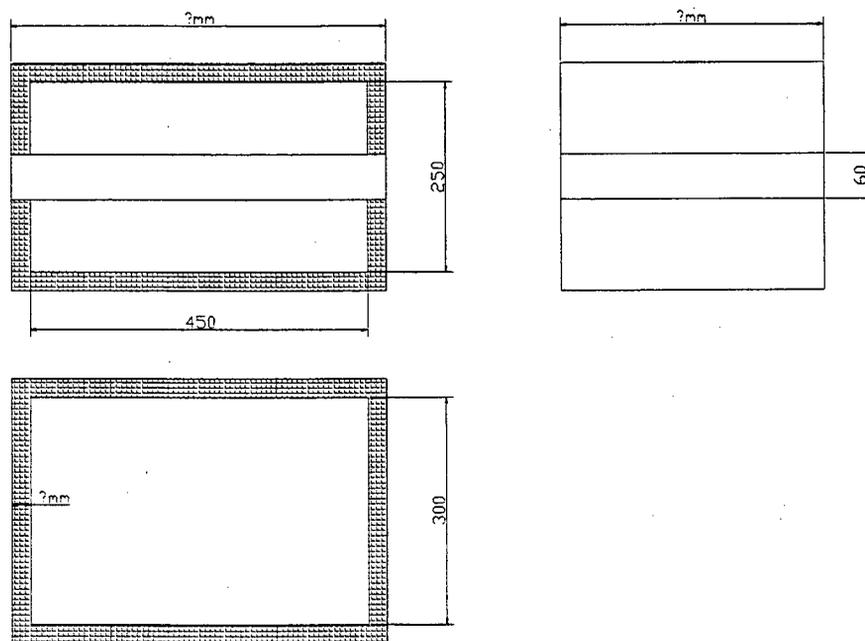


Figura 20 - Representação do túnel de aquecimento.

5.3.2) Determinação da potência do túnel

Para as condições de temperatura e tempo especificados para o aquecimento da manta plástica na figura 19 e tomando como base suas características especificadas na figura 1, é necessário que o túnel de aquecimento forneça à manta uma potência de 242W, cálculo efetuado a partir da equação [2.1]. Esta, porém, é a potência que deve ser transferida para a manta, ou seja, não está contabilizada a potência que o túnel perde para o meio ambiente. Vale comentar que na indústria analisada, o tempo de aquecimento da manta era em torno de 15s, porém, este dado não é relevante para se testar o sistema desenvolvido, pois trata-se de uma planta piloto.

Deve-se determinar a mínima temperatura do túnel para que este no tempo determinado, forneça a quantidade de calor necessária para que a manta seja aquecida à temperatura desejada. Desconsidera-se neste cálculo o calor recebido pela manta diretamente dos elementos de aquecimento para fins de facilidade de cálculo e de segurança, equação (4).

Faz-se necessário também determinar a espessura do isolante térmico a ser utilizado no isolamento do túnel de aquecimento, para tal especificaremos a temperatura externa máxima desejada para o túnel.

As equações utilizadas para os cálculos da temperatura interna do túnel e espessura do isolamento térmico foram implementadas em um programa de computador. Este procedimento foi utilizado para facilitar e agilizar os cálculos, e também para minimizar os erros de cálculo devido às não linearidades do comportamento dos fenômenos de radiação e convecção e também facilitar a utilização de um método recursivo para os cálculos.

Os quesitos de projeto foram apresentados no item anterior. O isolante térmico a ser utilizado é manta de fibra

cerâmica cuja condutividade térmica K_{cond} é 0.07 (Kcal m)/(hr m² °C) aproximadamente e a temperatura máxima externa de 65°C. Os resultados dos cálculos são apresentados na figura 21. Deve-se lembrar que este valor de potência é a soma da potência que deve ser fornecida à manta e as perdas de calor para o meio ambiente.

Figura 21 - Tabela dos resultados dos cálculos para o projeto do túnel de aquecimento.

Pot. para Manta[W]	Pot. perdida para ambiente [W]	Espessura da manta [mm]	Pot. total [W]	Temp. Interna do túnel [°C]
242	250	25	492	117

Estes resultados foram utilizados como uma referência para o projeto do túnel. Para que este apresentasse a performance especificada na figura 19, e para que também tivesse um tempo de resposta mais rápido, o túnel foi construído com uma potência 1200W. A espessura e o valor da condutibilidade térmica do isolante já foram mencionados. Vale ressaltar que os valores obtidos na figura 21, foram para uma temperatura ambiente de 0°C e $DT_{\text{max}} = 100^\circ\text{C}$ (diferença entre a temperatura de entrada e de saída da manta).

5.4) Construção do túnel de aquecimento.

No item anterior apresentou-se os quesitos de projeto do túnel e o resultado dos cálculos efetuados com base na teoria explanada anteriormente. Neste item, faz-se uma descrição da construção do túnel e apresenta-se esquematicamente as ligações elétricas do sistema de potência e controle do mesmo.

5.4.1) Caixa metálica

Conforme especificações de dimensões no item anterior, foi construída uma caixa em chapa de aço galvanizado de 1mm de espessura. Primeiramente fez-se a planificação da chapa e em seguida o seu corte. A forma de montagem das chapas foi por rebitagem, pois se trata de um material galvanizado, o que dificulta a utilização do processo de soldagem. A caixa é bipartida em seu eixo longitudinal (como um sanduiche) e apresenta aberturas na porção frontal e posterior, para permitir a passagem do material a ser aquecido, como pode ser verificado nas figura 22 e 23.

Nesta caixa metálica é que serão fixados o isolamento térmico (ao longo de todas as paredes internas) e os dois bancos de resistência de aquecimento do sistema.



Figura 22 - Foto do túnel de aquecimento.

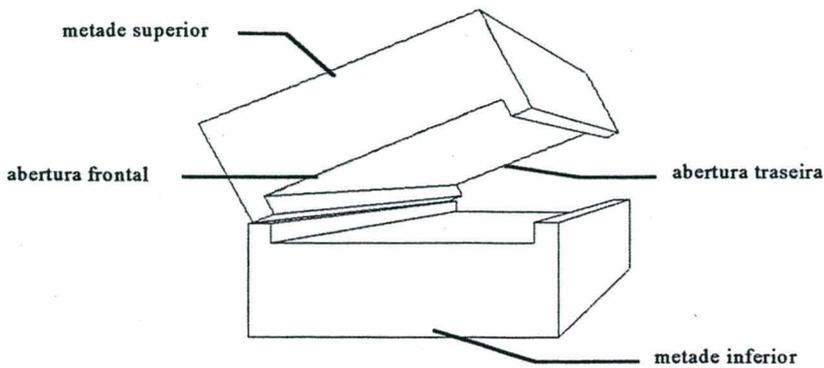


Figura 23 - Estrutura metálica do túnel de aquecimento. Caixa metálica bipartida. Representação esquemática.

5.4.2) Isolamento térmico

Conforme o resultado dos cálculos anteriores, a espessura do isolamento térmico do túnel, que é de manta de fibra cerâmica, é de 25mm. A caixa metálica foi construída de tal forma que aloja em suas paredes a manta cerâmica, facilitando a montagem do sistema. O material isolante, em forma de manta contínua, foi cortado em placas e encaixado nas devidas posições na caixa metálica.

5.4.3) Elementos de aquecimento

Os elementos de aquecimento foram distribuídos no interior do túnel de tal forma a possibilitar uma boa distribuição da emissão de potência irradiada. Foram confeccionados dois bancos de resistências, conforme a figura 24, sendo um para a metade superior do túnel e o outro para a metade inferior.

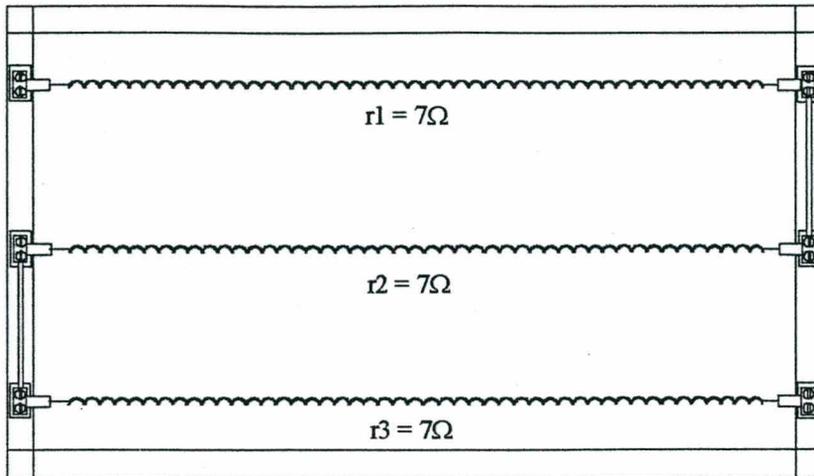


Figura 24 - Banco de resistências.

Cada banco de resistências é composto por três resistências em série, perfazendo uma resistência total de 21Ω , sendo $R_1 = R_2 = r_1 + r_2 + r_3$. Os bancos foram ligados em série, ficando a resistência total do sistema de potência do túnel de aquecimento em 42Ω . Como o sistema trabalha em 220 VAC, a potência total do sistema em carga máxima é de 1152W. A figura 25 apresenta esquematicamente a ligação elétrica do sistema de potência e o sistema de controle.

5.4.4) Sistema de medição de temperatura

Devido a impossibilidade de se adquirir um sensor de temperatura sem contato (pirômetro ótico) conforme indicado no item 2.2.2.2, optou-se pelo controle de temperatura da manta indiretamente pelo controle da temperatura do ar do túnel de aquecimento.

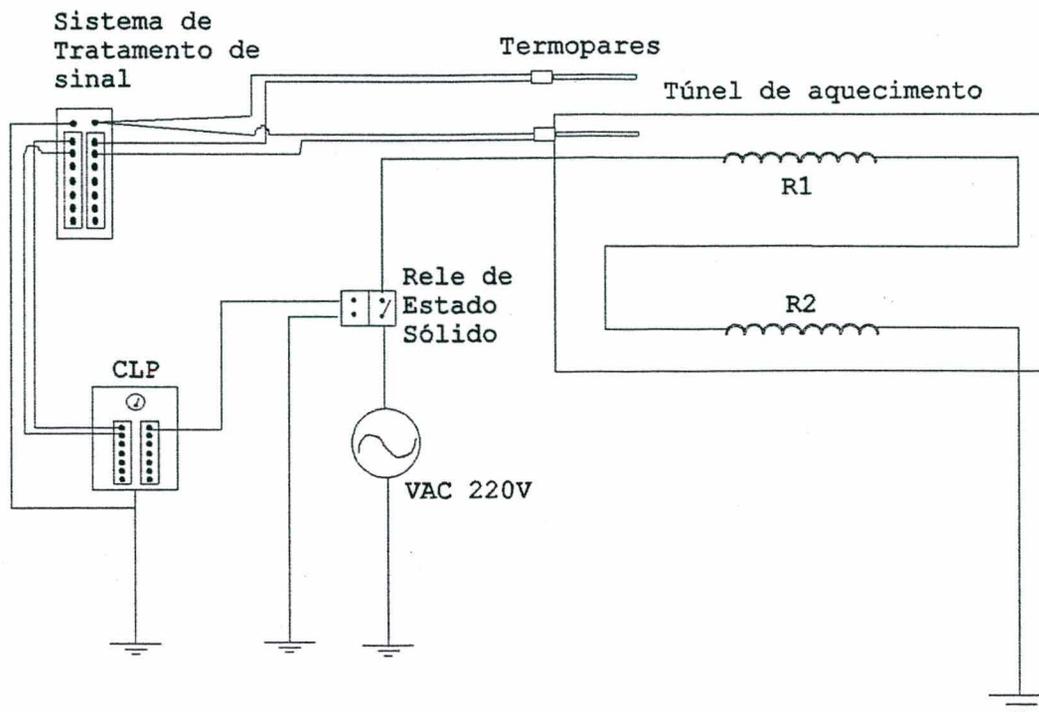


Figura 25 - Representação esquemática do sistema elétrico de potência e de controle do túnel de aquecimento.

Desta forma, o tipo de sensor selecionado para monitoração da temperatura do túnel e da temperatura ambiente, foi termopar do tipo J, tipo de termopar indicado para a faixa de temperatura utilizada. O termopar do túnel de aquecimento possui junta isolada, e o termopar da temperatura ambiente possui junta exposta, para garantir uma resposta mais rápida a variações de temperatura.

Para o tratamento do sinal do termopar utilizou-se transmissores de sinal em corrente. Os transmissores são sistemas que linearizam e amplificam o sinal em tensão do termopar, que são de uma ordem de grandeza de poucos milivolts, convertendo também o sinal para corrente, que é um tipo de sinal mais imune a ruídos. São muito utilizados em ambiente industrial que é muito contaminado com ruídos de origem eletromagnética.

Como o sistema de aquisição de dados utilizado, entrada analógica do CLP, não possui entradas em corrente, se fez necessário novamente converter o sinal do termopar em tensão. Os conversores de sinal em corrente para tensão são simples resistores. O sinal em corrente de 4 a 20 mA, saída do transmissor, foi convertido para uma faixa de 2 a 10 VDC, faixa compatível com a entrada analógica do CLP. As figuras 25 e 66 representam o sistema de aquisição de dados.

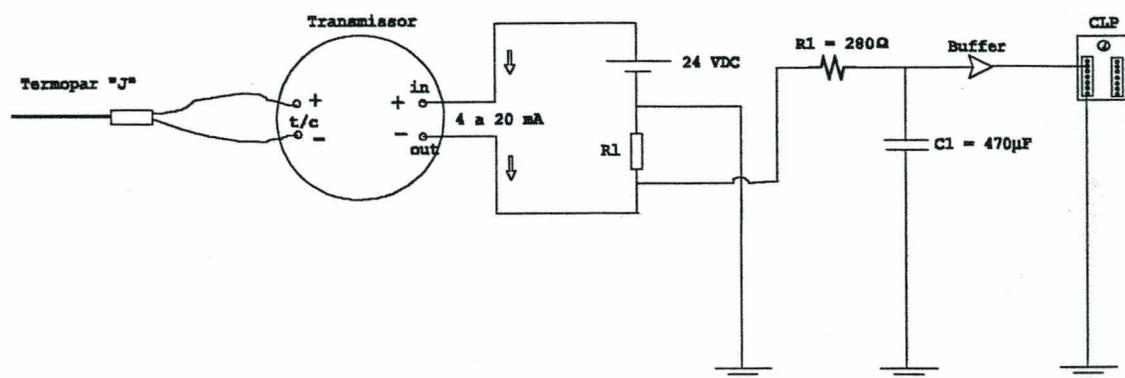
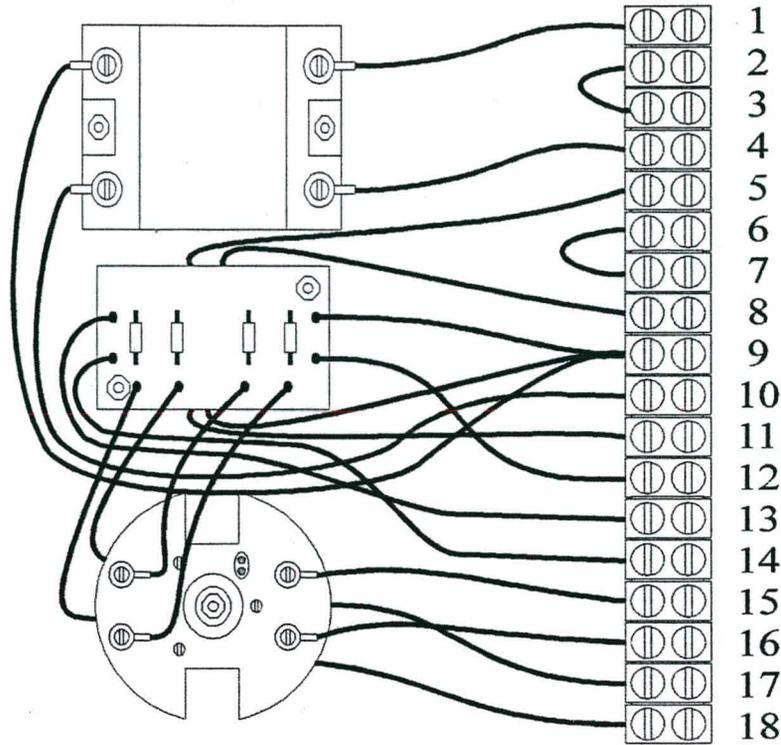


Figura 26 - Sistema de aquisição de dados.

5.4.5) Caixa de ligações

O sistema implementado apresenta um grande número de componentes como pode ser observado. Para simplificar a ligação destes componentes foi confeccionada uma caixa de ligações. Este sistema de ligações também agiliza as ligações e evita erros. A figura 27 apresenta um desenho esquemático desta caixa.



- 1 - Entrada AC (Fase)
- 2 - Entrada AC (Neutro)
- 3 - Saída AC (Resistências)
- 4 - Saída AC (Resistências)
- 5 - Entrada 24 VDC (Positivo)
- 6 - Entrada 24 VDC (Negativo)
- 7 - Saída 24 VDC (Negativo)
- 8 - Saída 24 VDC (Positivo)
- 9 - Comum (Termopares, relés)
- 10 - Comando do relé de estado sólido (Resistências)
- 11 - Comando do relé (Motor)
- 12 - Entrada 24 VDC (Positivo)
- 13 - Sinal do Termopar do forno (+)
- 14 - Sinal do Termopar da manta (+)
- 15 - Alimentação do Termopar da manta (-)
- 16 - Alimentação do Termopar da manta (+)
- 17 - Alimentação do Termopar do forno (-)
- 18 - Alimentação do Termopar do forno (+)

Figura 27 - Representação esquemática da caixa de ligações.

6) Modelagem do sistema

6.1) Modelagem do túnel de aquecimento

Com os dados do forno projetado e a teoria apresentada no capítulo anterior, passa-se à modelagem do túnel de aquecimento, para fins de projeto e simulação de um controlador de temperatura.

Fazendo-se o balanço de energia do túnel, obtém-se:

$$Q_{ent} - Q_{sai} = Mcp\Delta T_{pm} \quad (8)$$

$$q_i dt - (q_{irad} + q_{amb}) dt = Mcp dT_{pm} \quad (9)$$

$$q_i - q_{irad} - q_{amb} = \frac{Mcp dT_{pm}}{dt} \quad (10)$$

$$q_{amb} = \frac{A_f}{\frac{\Delta x}{k_{isol}} + \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}}} \times (T_{pint} - T_{amb}) \quad (11)$$

onde:

Q_{ent} = Quantidade de calor fornecido ao túnel, pelo sistema de potência;

Q_{sai} = Quantidade de calor perdido pelo túnel;

q_i = Potência fornecida ao forno pelo sistema de potência;

q_{irad} = Potência fornecida pelo túnel de aquecimento por irradiação à manta plástica, considerar-se-á este valor constante;

q_{amb} = Potência perdida pelas paredes externas do túnel, por convecção e irradiação para o ambiente;

c_p = Calor específico do material do túnel.

T_{pint} = Temperatura da parede.

T_{pm} = Temperatura média do túnel.

Para que possamos usar a temperatura interna do forno como temperatura representativa do sistema, faremos uma simplificação. A constante Mcp , que tem parcela da manta de isolamento e da chapa de aço que reveste o forno, passará a ser igual a Quantidade total de calor retida pelo forno até o momento de estabilização, dividido pela variação total da temperatura interna do forno. Com estas considerações e as fórmulas apresentadas, podemos tirar as seguintes constantes:

$$K_f = \frac{A_f}{\frac{\Delta x}{k_{isol}} + \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}}} \quad (12)$$

$$K_i = \frac{1}{K_f} \quad (13)$$

$$K_{amb} = 1 \quad (14)$$

$$\tau_p = \frac{Mcp}{K_f} \quad (15)$$

Levando-se as constantes apresentadas acima na equação (10), tem-se:

$$\tau_p \frac{dT_p}{dt} + T_p = K_i q_i - K_i q_{irad} + K_{amb} T_{amb} \quad (16)$$

A equação (16) é representada em diagrama de blocos na figura 28, conforme segue:

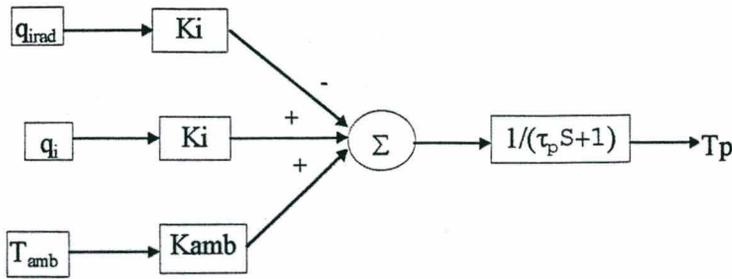


Figura 28 - Representação em diagrama de blocos da equação 6.10, sistema em malha aberta.

A figura 28 representa a modelagem do sistema forno em malha aberta, no que se refere à temperatura da parede interna do túnel. Já a figura 29, representa o sistema em malha fechada, com a atuação de um controlador onde a variável de controle é a temperatura interna do túnel de aquecimento.

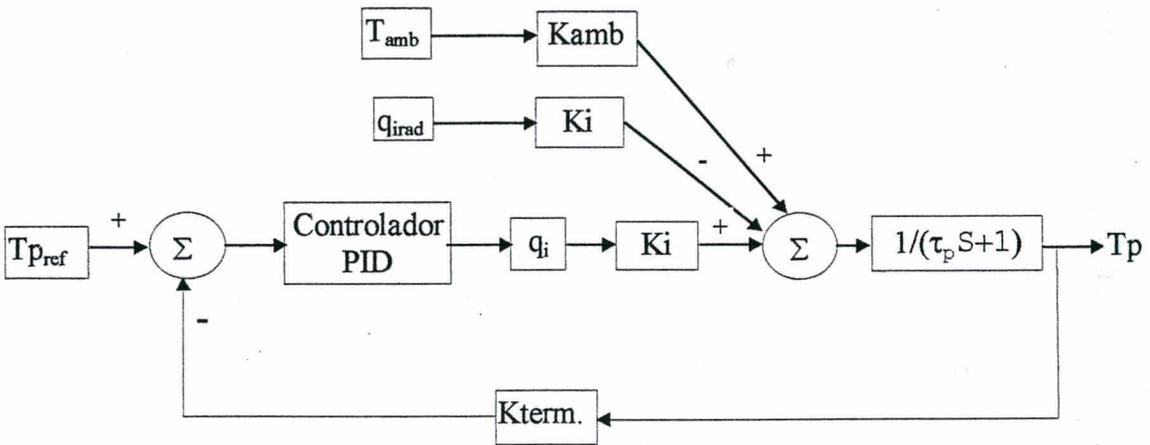


Figura 29 - Representação do túnel de aquecimento em malha fechada.

T_{pref} = Temperatura de referência para o túnel;

K_{term} = Constante de proporcionalidade do transdutor de temperatura;

Obs.: As demais constantes são conhecidas.

Vale lembrar, que para fins de simplificação do sistema, a potência fornecida à manta plástica entrará como um valor constante.

6.2) Determinação teórica das constantes do sistema

Com o modelamento matemático apresentado anteriormente e com condições de contorno particulares (as condições de contorno são apresentadas em cada item) obteve-se os seguintes resultados:

1. Para $T_{amb}=22^{\circ}\text{C}$, $K_{i\text{sol}}=0.102\text{W}/(^{\circ}\text{Cm}^2)$, $T_p=230^{\circ}\text{C}$ e $Pot_{ent}=576\text{W}$

- $\tau_p = 698\text{s};$
- $K_i = 0,360 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{w};$
- $K_{amb} = 1,0$

2. Para $T_{amb}=22^{\circ}\text{C}$, $K_{i\text{sol}}=0.06 \text{ W}/(^{\circ}\text{Cm}^2)$, $T_p=130^{\circ}\text{C}$ e $Pot_{ent}=192\text{W}$

- $\tau_p= 976\text{s};$
- $K_i= 0,566 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{w};$
- $K_{amb}=1,0$

6.3) Simulação em malha aberta

Com as constantes que caracterizam o sistema calculadas, passou-se a simulação do sistema e ao projeto do controlador. Para tal utilizou-se como ferramenta de projeto, um software de simulação o "Vissim". As figuras 30 e 31 apresentam a simulação do sistema em malha aberta para as duas condições especificadas anteriormente.



Figura 30 - Simulação do sistema em malha aberta: Potência de entrada 576 W.

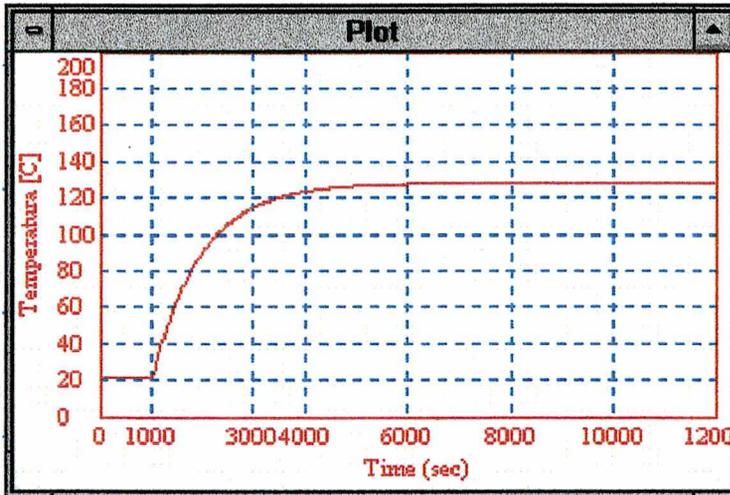


Figura 31 - Simulação do sistema em malha aberta: Potência de entrada 192 W.

6.4) Testes em malha aberta.

Para fins de comparação com os resultados teóricos obtidos acima e para o levantamento das verdadeiras características do sistema de aquecimento, foram efetuados testes com o sistema. Estes testes foram efetuados com as aberturas do túnel fechadas, para evitar perdas de calor por convecção, logo representando mais fielmente as situações simuladas. Foram executados testes em malha aberta onde obteve-se os valores da constante de tempo do túnel e do ganho do sistema pelo método de Hagglund, figuras 32 e 33. Realizou-se também testes em malha fechada para verificação do desempenho do controlador.

Os teste efetuados foram os seguintes:

1) Potência = 576W;

Temperatura ambiente = 22°C;

Temperatura inicial do túnel = 22°C;

Temperatura final do túnel = 230°C;

Constante de tempo do sistema = 654s;

Ganho do sistema = 0,361°C/W.

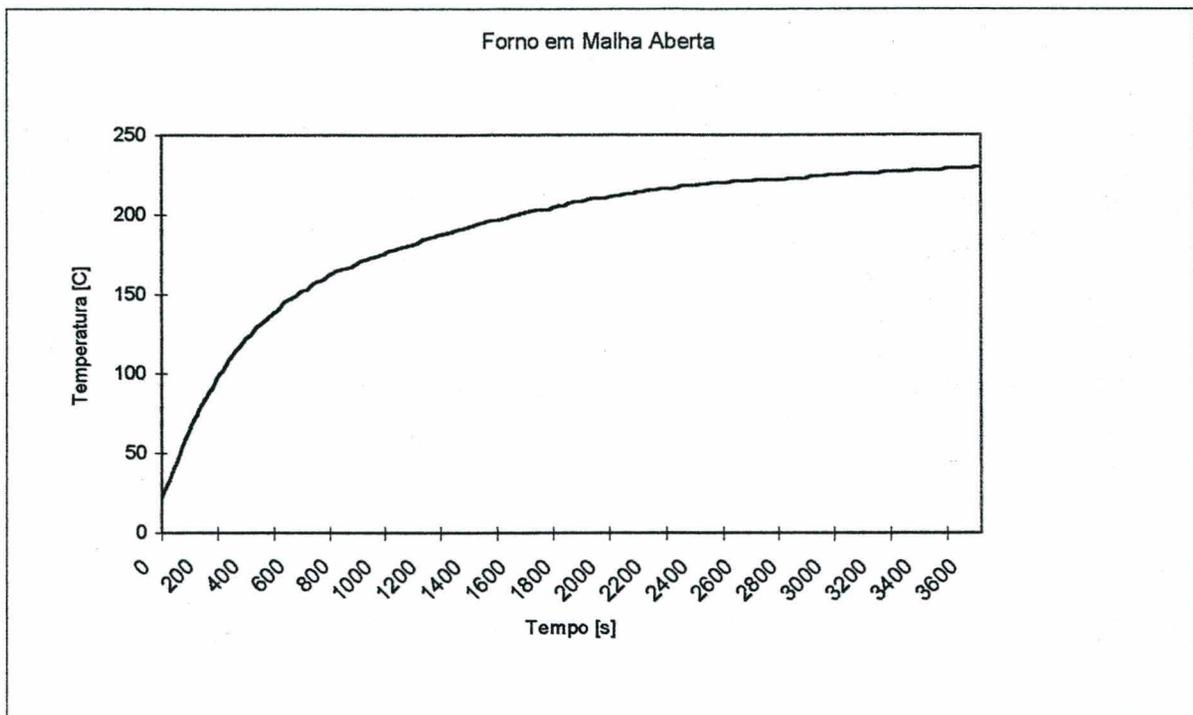


Figura 32 - Gráfico do teste 1.

2) Potência = 192W;

Temperatura ambiente = 23°C;

Temperatura inicial do túnel = 23°C;

Temperatura final do túnel = 130°C;

Constante de tempo do sistema = 872s;

Ganho do sistema = 0,563°C/W.

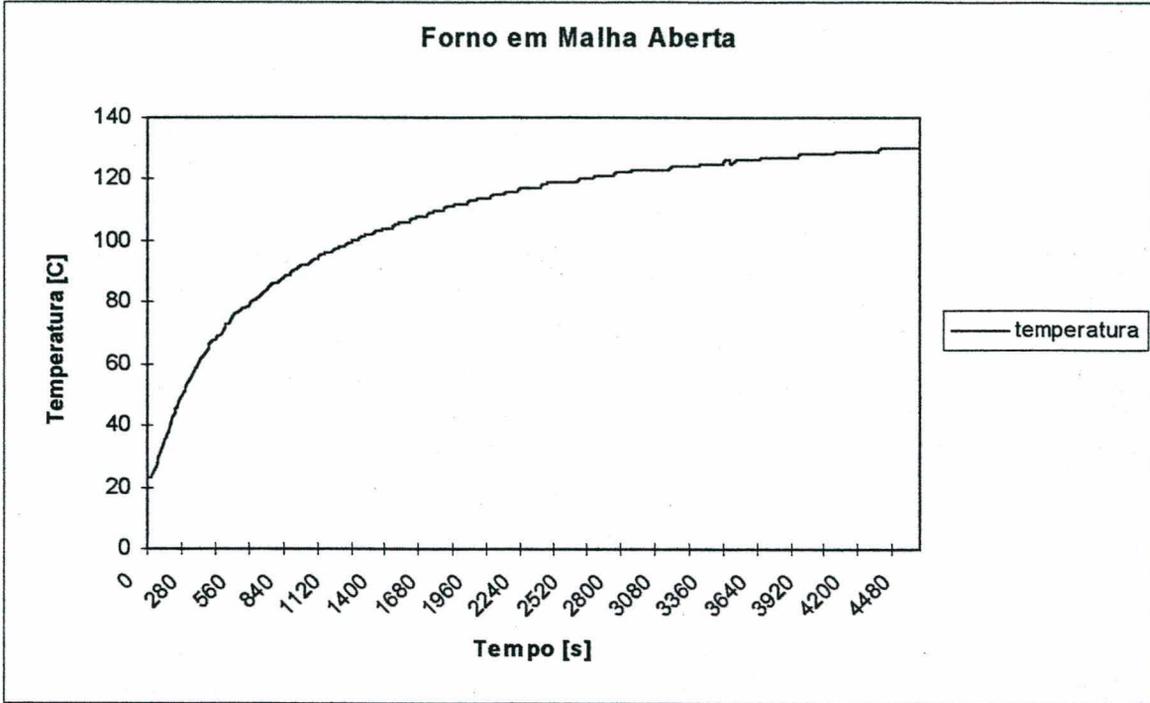


Figura 33 - Gráfico do teste 2.

Figura 34 - Tabela de resultados Teóricos.

Teste	Const. tempo [s]	Ganho[°C/W]	Temp. final [°C]
Pot.=576W	698	0.360	230
Pot.=192W	976	0.566	130

Figura 35 - Tabela de resultados Experimentais.

Teste	Const. tempo [s]	Ganho[°C/W]	Temp. final [°C]
Pot.=576W	654	0.361	230
Pot.=192W	872	0.563	130

6.5) Comparação dos resultados teóricos e práticos do sistema em malha aberta

Foram efetuados vários testes com o sistema, porém somente dois testes em malha aberta são apresentados. O primeiro teste em malha aberta o degrau de excitação foi de 576w e no segundo teste de 192w. Os testes foram efetuados sem o aquecimento da manta plástica, onde a perda de calor para o meio ambiente foi a única carga imposta ao sistema.

Com os dois testes apresentados, é possível evidenciar o comportamento não linear do sistema, pois os resultados de ganho e constante de tempo foram distintos nos dois. Esta não linearidade evidenciada, é devido ao comportamento da perda de calor para o meio ambiente, que neste caso é por convecção e radiação. Estas formas de transmissão de calor são não lineares, conforme exposto em teoria anteriormente.

Como principal característica do comportamento do sistema, observa-se que com o aumento da temperatura, este se torna mais rápido porém ocorre uma redução no ganho.

Já comparando-se estes resultados com o valores teóricos calculados, onde os cálculos foram efetuados para um caso particular observa-se uma pequena variação. No que se refere ao ganho do sistema, este erro é menor que 2%. Já com referência à constante de tempo do sistema o erro é da ordem de 10% do valor teórico em relação ao prático.

6.6 Simulação em malha fechada

Com a mesma ferramenta de projeto utilizada para a simulação do sistema em malha aberta, fez-se o projeto de um controlador PID. O resultado da simulação em malha fechada é

apresentado na figura 36 e as constantes do controlador são as seguintes:

Temperatura de Referência: 112°C

Ganho: 1

Constante proporcional K: 1000

Constante integral TI: 0.01

Constante diferencial TD: 1

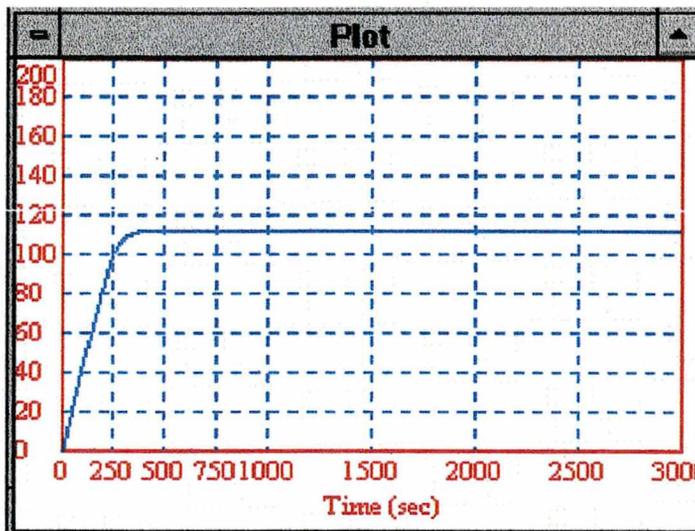


Figura 36 - Simulação do sistema em malha fechada.

6.7 Teste em malha fechada

Também com o objetivo de avaliar o sistema, foram desenvolvidos testes práticos com o sistema em malha fechada, sendo o resultado de um destes testes apresentado na figura 37.

Temperatura de Referência: 112°C

Ganho: 1

Constante proporcional K: 1000

Constante integral TI: 0.01

Constante diferencial TD: 1

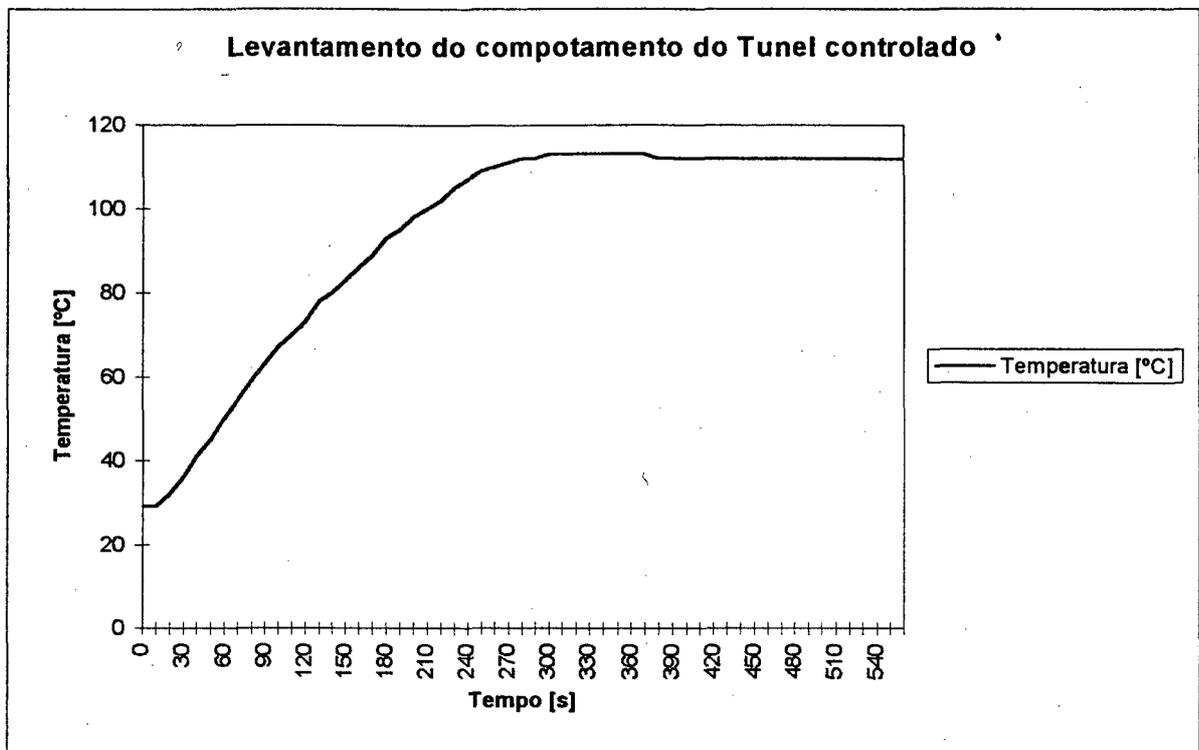


Figura 37 - Sistema de aquecimento com controlador PID.

Como pode-se observar, teve-se o cuidado de fazer-se o teste do sistema em malha fechada com o mesmo controlador simulado com o "Vissim". Os resultados foram próximos, onde a estabilização em ambos os casos foi alcançada por volta de 400s após ligação do sistema.

É bem verdade, que o controlador simulado foi tomado somente como ponto de partida no ajuste do controlador, pois um ajuste mais fino foi efetuado. Porém optou-se por apresentar este resultado a fim de comparar o teste com a simulação.

Vale ressaltar, que a resolução do sistema de aquecimento quanto a temperatura é menor que a resolução estabelecida como condição de projeto, porém o incremento do mostrador de temperatura no software de monitoração é de 1°C, igual à condição estabelecida para o projeto.

7) Controle do sistema

7.1) Seleção do CLP.

No projeto de automatização do processo de termoformagem da empresa, optou-se pela utilização de um CLP na automação do processo, integrado a um microcomputador para a monitoração, conforme especificado no capítulo 4 como proposta de solução.

As características mínimas que o CLP deve apresentar, necessárias para sua utilização no presente projeto, com base no objeto de controle apresentado também no capítulo 4, estão descritas na figura 38.

Figura 38 - Tabela de características mínimas para o CLP.

Características	Quantidade
Entradas digitais	4
Saídas digitais	4
Entradas analógicas	2
Porta serial	1

Uma opção de baixo custo, para uma aplicação com um pequeno número de entradas e saídas como o exposto, têm-se os nanoCLPs de última geração de vários fabricantes, tais como a família S7 da SIEMENS, Série 90 Micro PLC da GE Fanuc e o Micro-Logix 1000 da Allen-Bradley. São CLPs de no mínimo 8 ou 10 entradas e 6 saídas que se apresentam como ótima opção para pequenas aplicações[Babb, 1995b; Cleveland, 1995]. Apesar de alguns não possuírem rotina PID, com a estratégia de controle adotada, este processamento poderia perfeitamente ser desempenhado pelo PC. Vale lembrar que esta é uma entre as várias opções do mercado de CLPs de nova geração que também seriam satisfatórias para a montagem experimental.

Porém, por medida de redução de custos no desenvolvimento da bancada, optou-se pela aplicação do mini CLP compacto da marca Siemens, modelo S5-95U (geração anterior de microCLPs), pelo fato de o ter disponível no laboratório e por suas características técnicas, número de entradas digitais, tempo de processamento e o processamento analógico de sinais dentre outras, figura 39, serem satisfatórias para a aplicação. Uma característica que também reforçou sua seleção, é a porta serial RS232-C que possibilita comunicação com outros equipamentos e também utilização em rede de comunicação. Esta característica é imprescindível devido a estratégia de integração com microcomputador adotada.

Figura 39 - Tabela de características técnicas do CLP S5-95U.

Característica	Número ou tamanho
Memória RAM	16 Kbytes
Entradas digitais	16
Saídas digitais	16
Entradas analógicas	8
Saídas analógicas	1
Entradas de contador	2
Entradas de interrupção	4
Clock de hardware	1
Porta serial	1

As funções que o CLP pode desempenhar e a capacidade de controlar um determinado processo, estão relacionadas com os tipos e o número de entradas que ele dispõe. A capacidade de controle do CLP pode ser expandida através da inclusão de módulos de expansão. Para a aplicação deste CLP na montagem experimental não se fez necessário a utilização destes módulos adicionais, pois as características já existentes no S5-95U são suficientes para controlar o sistema.

A bancada experimental foi desenvolvida simulando-se as condições da indústria, sendo assim, o CLP utilizado pode perfeitamente ser aplicado também no processo industrial.

A figura 40 é uma representação da parte frontal da caixa do CLP.

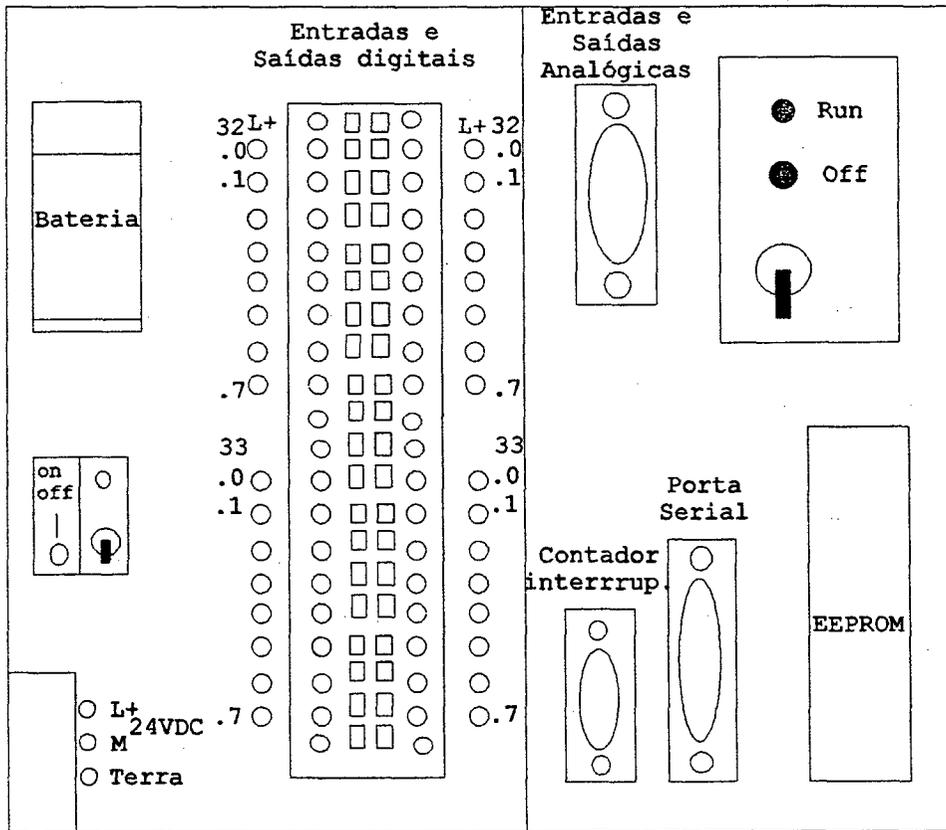


Figura 40 - Painel frontal do CLP.

7.2) Medição de temperatura no Sistema

Foram utilizados termopares do tipo J para a medição da temperatura do túnel e da temperatura ambiente. O condicionamento do sinal dos termopares, sua linearização e amplificação, são feitos analogicamente. Os termopares foram calibrados para a faixa de temperatura de 0 a 200 °C que

corresponde à faixa de saída dos transmissores de 4 a 20mA. A conversão do sinal do termopar, de baixo nível de tensão, para o sinal em corrente é feita próximo ao termopar para minimizar a interferência de ruídos.

Como o CLP não apresenta entrada analógica em corrente e também por motivos de redução de gastos, optou-se por utilizar conversores de corrente para tensão, compatibilizando os sinais com as entradas do CLP. Antes da entrada do sinal no CLP, este sinal é filtrado, eliminando-se os ruídos. Outra medida tomada para se garantir a qualidade do sinal, é a utilização de um buffer para isolar o sistema de sensoriamento do sistema de aquisição de sinal do CLP, o que minimiza erros.

A resolução do conversor AD do CLP é de 10 bits, que corresponde à resolução de aproximadamente 0.4 °C quanto à temperatura. Este valor é satisfatório, pois estabeleceu-se como especificação de projeto para o controle da temperatura da manta uma resolução de 1°C.

7.3) Sistema de Transporte

Na montagem desenvolvida no laboratório, o transportador da manta consiste em um motor de acionamento, de corrente contínua, com um redutor e rolos de tração, figura 18.

O sistema de transporte aqui implementado tem como objetivo transportar a manta com uma velocidade constante. Isto é feito através da fixação de uma alimentação constante do motor. Este transporte pode ser contínuo ou intermitente, o que é controlado pelo CLP.

Utiliza-se um relé para chavear a alimentação do sistema de transporte. Este relé, que também se encontra na caixa de ligações, é comandado por uma saída digital do CLP.

Conforme a programação do CLP ele pode permanecer acionado, transporte contínuo, ou ser ligado e desligado alternadamente, transporte intermitente.

7.4) Programação do CLP para o controle do sistema

A utilização de poderosos microprocessadores na construção dos CLPs ampliaram enormemente a capacidade de controle e a gama de utilização destes equipamentos. Atualmente o hardware não é fator limitante na maioria das aplicação.

Por outro lado, como as possibilidades de utilização aumentaram, a complexidade destas aplicações também. Conforme o nível de complexidade da aplicação, técnicas simples como os diagramas de relés não são suficientes. É necessário a utilização de métodos e técnicas mais modernos de programação, visando uma redução no custo de desenvolvimento e manutenção do software de controle, bem como melhoria na sua qualidade (confiabilidade e eficiência) [Furukawa, 1990]. O desenvolvimento do software de controle tornou-se um ponto determinante no sucesso da aplicação de CLPs.

7.4.1) Descrição do funcionamento do sistema

Baseando-se na proposta de solução para o problema apresentado no capítulo 4, passa-se a descrever o funcionamento do sistema em linguagem natural.

A figura 13 apresenta uma representação esquemática do sistema e pode-se descrever o processo da seguinte maneira:

- 1.A manta em forma contínua é introduzida no interior de túnel de aquecimento através do sistema de transporte;
-

2. Após um determinado tempo de aquecimento, esta manta é transportada para a prensa de conformação e corte;
3. É necessário um tempo de permanência da manta na prensa para resfriamento;
4. Após decorrido este tempo, a manta é retirada pelo mesmo sistema de transporte.

É importante observar que o tempo de conformação seja um divisor do tempo de aquecimento, e que o comprimento da prensa ou passo de avanço do transportador seja um divisor do comprimento do túnel de aquecimento.

O objeto de controle possui três elementos distintos conforme explanado no capítulo 4, e uma descrição mais detalhada quanto ao seu funcionamento e controle é exposta a seguir completando-se a descrição do parágrafo anterior (é importante lembrar que na montagem experimental, a prensa de conformação e corte será simulada por chaves):

1. Túnel de aquecimento: O controle deste sistema envolve a monitoração de uma variável contínua, a temperatura. Para tal, primeiramente um valor de setpoint é fixado, tomando-se como base o tempo de aquecimento e a espessura da manta, além da correção que deve ser feita devido a variação da temperatura ambiente. É utilizada uma rotina PID de controle interna ao CLP para controlar este elemento.
 2. Transportador: O sinal de três sensores são usados para se efetuar o controle deste elemento, o sensor de posição da manta e os sensores de posição da prensa. O tempo também é utilizado para atuar sobre este sistema. O sistema é acionado após um determinado tempo, que está relacionado ao tempo de conformação e resfriamento, e por consequente ao de aquecimento da manta. Após o término deste período, a manta é deslocada até que sua posição correta na prensa de conformação seja alcançada, posição esta indicada pelo sensor de posição da manta. Existe também uma relação de intertravamento entre o transportador e a prensa. Os sensores da prensa são utilizados para se
-

estabelecer esta relação, ou seja quando a prensa está acionada o transportador não pode ser ativado e vice-versa.

3. Prensa de conformação e corte: Existem dois sensores neste elemento, um sensor da prensa na posição alta e outro na posição baixa (período de conformação). O sinal destes sensores é utilizado para relação de intertravamento citada anteriormente e também para fins de monitoração do sistema.

Cada uma destas etapas (descrição dos elementos do sistema) foram detalhadas mais a fundo para possibilitar a programação do CLP. Este detalhamento não é apresentado neste trabalho.

7.4.2) Programação do CLP

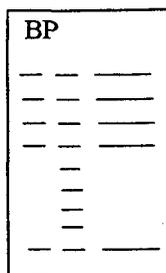
A partir do detalhamento das etapas, das funções e das ferramentas de programação do CLP utilizado, passou-se à programação do sistema.

7.4.2.1) Estruturação do software de controle

A execução de um programa de CLP é diferente da execução de um aplicativo para PC. Na verdade ocorre a leitura das portas de entrada e saída do CLP e posteriormente uma varredura completa do programa. De acordo com os estados das portas, o CLP faz tomadas de decisões conforme seu programa. Logo a seguir faz a atualização das portas de saída, completando assim um ciclo de execução. Após o término de um ciclo, outro é iniciado [Berger, 1989]. O tempo gasto na execução de um ciclo do programa é chamado de "Tempo de Varredura".

Embora trabalhando desta forma, a programação do CLP pode ser linear ou estruturada. Na linear, apenas um bloco de

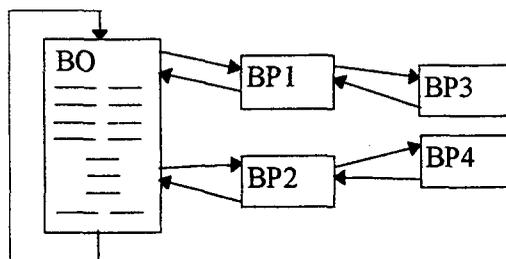
programa, onde todas as ações de controle são programadas. Este modo de programação é apresentado figura 41. É uma forma de programação de difícil entendimento, depuração e manutenção.



Programação Linear

Figura 41 - Programação linear do CLP.

Já a programação estruturada, figura 42, é feita utilizando-se os recursos de programação que o CLP oferece, onde são elaborados vários blocos de programa, onde as funções de controle podem ser modularizadas (por exemplo, bloco de programa para transporte, monitoração, intertravamento de equipamentos, etc.). Existe um programa principal, bloco organizacional, o qual organiza a execução de um ciclo de programa através da chamada condicional ou incondicional dos outros blocos de programa. Este recurso de programação auxilia a estruturação do software de controle, já iniciada a nível de análise e projeto, agora sendo aplicada a nível de programação do CLP.



Programação Estruturada

Figura 42 - Programação estruturada do CLP.

O software de controle do sistema implementado neste trabalho foi desenvolvido com a utilização destes recursos de

programação, que estão disponíveis no CLP utilizado. O programa foi escrito em "Ladder" e Listas de Instruções", em um micro computador a partir de um software de programação do fabricante. A partir de então o programa é carregado no CLP e testado no controle da bancada.

7.4.2.2) Características especiais do programa de controle

Uma função muito importante no software de controle que foi implementada, é o suporte do programa para a comunicação de dados com o microcomputador e interação entre eles.

O compartilhamento de dados entre o CLP e o microcomputador é feita através de um bloco de dados no CLP. Este bloco de dados é uma área de memória no CLP, onde o microcomputador pode solicitar dados. Utiliza-se para acessar estes dados, funções já prestabelecidas para a comunicação. Foram implementadas três funções no microcomputador para esta comunicação. Duas para leitura e escrita de uma palavra de 16 bits no CLP, respectivamente, e uma para leitura de um bloco de palavras do CLP.

Quanto ao controle de temperatura, utilizaremos uma função especial do CLP para controle PID. É uma função que usa uma entrada analógica e um bloco de dados para fazer o controle, tendo como resultado um número (resultado da função de controle para a amostragem de entrada de temperatura).

Para se transformar este número em uma saída de potência de alimentação do túnel, fez-se o seguinte (deve-se lembrar, que a alimentação do túnel é em tensão alternada, o que dificulta o processo). Implementou-se no CLP um módulo PWM (*Pulse Width Modulation*) por meio de dois temporizadores e uma saída digital. Um temporizador é responsável pela base de tempo

do módulo PWM e o outro responsável pela porcentagem deste tempo em que se terá a saída digital em estado 1. Esta saída comanda um relé de estado sólido que é o responsável pela alimentação do túnel. Como a constante de tempo do túnel é elevada, consegue-se por meio deste sistema uma saída de potência linear proporcional à saída do controlador PID, mesmo tratando-se neste caso de tensão alternada. A base de tempo utilizada nos testes executados foi de 2 segundos.

Esta função de controlador PID não é executada em todos os ciclos de programa. Existe neste CLP um bloco de programa que é acionado a cada ciclo de amostragem (definido no projeto do controlador), sendo os intervalos de atuação ajustados no CLP. Estes intervalos são determinados de acordo com as características do sistema a ser controlado, se é um sistema rápido ou lento. Como a função de controle é acionada neste bloco, em intervalos de tempos predeterminados, o tempo total de execução do programa é reduzido.

8) O Sistema de Monitoração do Processo

Os processos industriais são os meios pelos quais as empresas se munem para transformação da matéria prima em produto acabado. A qualidade deste produto está intimamente ligada ao controle das variáveis envolvidas no processo, o que torna imprescindível à obtenção de produtos de qualidade, o controle eficaz destas variáveis. A monitoração de processos é um forte fator para a obtenção desta qualidade.

A monitoração do processo é uma importante ação dentro da indústria, pois possibilita uma melhor interação entre o operador e o processo, promovendo um controle mais eficiente. Esta interface deve ser feita da maneira mais direta e representativa possível, para que possa ocorrer de forma natural, o que também torna mais fácil o aprendizado.

A utilização de ferramentas gráficas no desenvolvimento de softwares de monitoração é muito importante, pois estas melhoram a representação do processo por meio de gráficos, desenhos e cores, além de fornecer indicações de variáveis e seus valores.

8.1) Plataforma multitarefa

A plataforma Windows é um ambiente multitarefa, ou seja, que suporta a execução concorrente de vários programas. No entanto, até a versão 3.11, é uma plataforma multitarefa não preemptiva [Petzold, 1993], ou seja, ela permite que um programa tome o processador por um tempo indefinido, porém isto não ocorre com o Windows95.

Os aplicativos para Windows, têm a sua disposição diversas funções, que vão desde o suporte à multimídia até a interface com o usuário através de menus, ícones e desenhos.

O Windows promove uma interface gráfica com o usuário de ótima qualidade, e por este fato é muitas vezes caracterizado apenas como um ambiente que provê uma interface gráfica bem acabada aos aplicativos. O Windows também é um ambiente multitarefa, que fornece um sofisticado gerenciamento de memória para suportar a execução de vários programas concorrentes. É também um sistema orientado a eventos e que apresenta um mecanismo de Linkagem Dinâmica (DLL) e o conceito de entrada e saída independente do dispositivo (*Device Independent I/O*).

Uma característica que motivou a sua utilização no desenvolvimento do software de monitoração deste trabalho, é a sua interface gráfica bem acabada. O Windows possui a GDI, que é a interface de dispositivo gráfico que pode produzir efeitos visuais espetaculares e os gráficos fornecem um retorno visual instantâneo dos eventos de um programa. Estes eventos de programa podem estar relacionados diretamente com eventos ocorridos em um processo, ou seja os gráficos podem nos dar um retorno visual quase que instantâneo do processo.

8.2) Comunicação entre CLP e microcomputador

Na segunda metade dos anos 80, o processamento distribuído foi um dos campos de pesquisa e desenvolvimento de maior significado na aplicação de computadores nas diversas áreas sócio-econômicas. No setor industrial passou a ser uma realidade, onde a interligação de diversos níveis e áreas da empresa foi buscada, visando maior agilidade da empresa.

A utilização conjunta de CLPs e microcomputadores, pode ser encarada como um sistema de processamento distribuído. Os

CLPs, que processam os sinais para o controle do sistema diretamente no chão de fábrica, podem estar ligados a um microcomputador por meio de uma rede de comunicação onde o processo pode ser monitorado e gerenciado.

Atualmente o desenvolvimento tecnológico tem proporcionado maior facilidade na implementação destes sistemas distribuídos, tanto a nível de custo como na instalação dos sistemas, tornando-se viável até mesmo para simples processos industriais.

A estratégia utilizada neste trabalho liga estes dois sistemas, CLP e microcomputador, que atualmente é um sistema muito utilizado e de custo reduzido.

8.2.1) Características da forma de comunicação entre o CLP e o microcomputador do sistema implementado

Para se interligar equipamentos, é necessário a existência de hardware e software especializados. Esta ligação pode ser de várias formas, desde as mais complicadas e seguras topologias de redes de computadores, à mais simples forma de comunicação, que é a comunicação ponto a ponto entre equipamentos.

No que diz respeito ao hardware, módulos de rede e porta serial de comunicação de dados podem ser utilizados. Quanto a interface serial, pode-se utilizar um entre os diversos tipos de interface padrão, que são as interfaces RS 232C, RS 422, RS 485 dentre outras. O tipo de interface serial especifica as suas características elétricas, mecânicas e funcionais [Jourdain, 1986]. A opção por uma ou outra é determinada por muitos fatores, entre os quais:

- o meio no qual o sistema esta imerso;
-

- a distância entre os equipamentos;
- a velocidade de transferência de dados desejada;
- os recursos financeiros disponíveis para a implementação do sistema.

O CLP utilizado na montagem (SIEMENS S5-95U) possibilita duas formas de comunicação com equipamentos externos. Uma é através da porta serial de comunicação, interna ao CLP, a outra é um módulo externo também de porta serial. Esta última alternativa processa a comunicação independentemente da CPU do CLP, sendo recomendada para sistemas onde o tempo de processamento é crítico.

Na aplicação industrial alvo de estudo deste trabalho e na montagem laboratorial que simula este processo, o tempo de processamento não é um fator crítico devido às suas características, sistema térmico, prensa de conformação e distâncias reduzidas. Pelo fato do sistema apresentar estas características e por motivos de redução de custos na implementação do sistema, optou-se pela utilização da porta serial do CLP (com interface RS232-C), a mesma utilizada para a programação. O protocolo de comunicação é acionado por interrupção de hardware, o que reduz o tempo de processamento do CLP relacionado como a comunicação. Este tipo de comunicação por interrupção de hardware é explicado com mais detalhes no item 8.2.2.

Para a utilização da porta serial do CLP como meio de comunicação com um microcomputador, é necessário o uso de um conversor RS232C/TTY para compatibilizar o nível elétrico das portas seriais.

8.2.2) Protocolos de Comunicação

Para que se estabeleça a comunicação de dados digitais entre equipamentos, a existência do mesmo tipo de interface ou um dispositivo que compatibilize as entradas, não é a única restrição. Há necessidade de um protocolo de comunicação que controle e coordene a comunicação entre os equipamentos. Protocolo ou driver de protocolo é um software que trabalha entre o aplicativo, software de mais alto nível, e o software controlador da porta serial, empacotando os dados a serem enviados ou recebidos.

Existem duas formas de se estabelecer comunicação de dados entre equipamentos, por polling ou por interrupção de hardware [Jourdain, 1986]. Na comunicação por polling o programa tem que monitorar o buffer de comunicação sempre que está em comunicação. Já na comunicação por interrupção de hardware não é preciso. Sempre que um dado chega ao buffer de recepção, uma rotina é acionada para o tratamento do dado.

Os equipamentos que se comunicam, não podem estar restritos somente à comunicação de dados pois, na maioria das vezes, a comunicação de dados não é a sua principal função. Logo a implementação do protocolo através de rotinas que são acionadas por interrupção de hardware é uma boa alternativa, já que esta metodologia proporciona uma comunicação mais segura e eficiente, quando se trata de comunicação de dados assíncrona.

8.2.2.1) Protocolo de Comunicação do CLP Utilizado

O protocolo de comunicação utilizado, é um protocolo proprietário (Siemens), desenvolvido para ligação do CLP em uma rede local de comunicação. É um protocolo para topologia de rede de barramento do tipo mestre/escravo.

Uma descrição detalhada do protocolo é apresentada no anexo 1. O formato geral do protocolo é mostrado na figura 43, onde temos os principais pacotes de comunicação:

- endereçamento da mensagem;
- dados do mestre para o escravo;
- dados do escravo para o mestre;
- quitação do mestre para o escravo.

A implementação do protocolo foi feita com base em uma descrição simplificada, obtida junto à empresa fornecedora do CLP. É uma descrição simplificada pois contém somente as informações necessárias para estabelecer a comunicação entre dois equipamentos, ou seja, comunicação ponto a ponto.

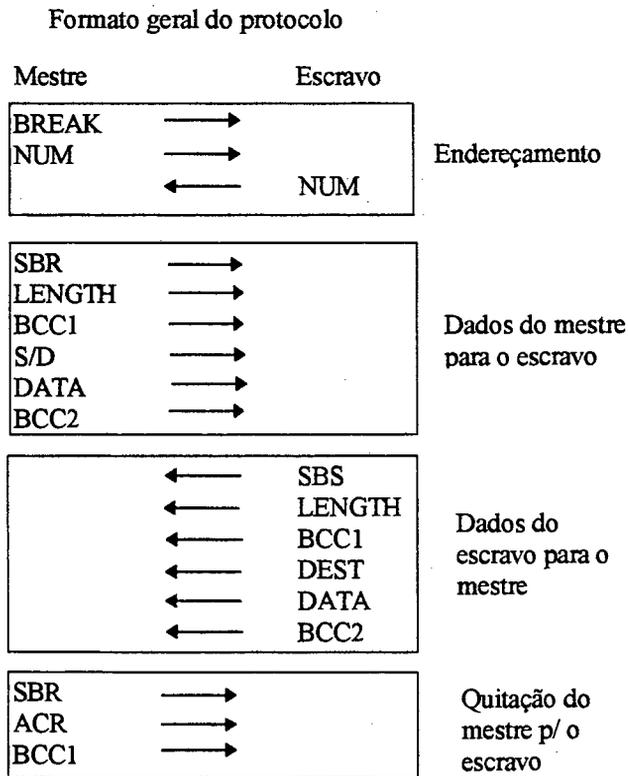


Figura 43 - Representação do protocolo de comunicação.

Como se trata de um protocolo de rede mestre/escravo, existe um protocolo para o escravo, no caso o CLP, e um para o mestre o qual foi implementado para o microcomputador.

8.2.2.2) Implementação do Protocolo

Houve a necessidade da implementação deste protocolo de comunicação específico em laboratório a partir de sua descrição em linguagem natural. Isto porque o fornecedor do CLP não dispunha de tal driver de comunicação implementado para microcomputador.

O CLP em questão apresenta um sistema de comunicação através da porta serial, muito fechado, e com isto, um protocolo de difícil implementação. Estabelecer a comunicação entre equipamentos é uma tarefa trabalhosa quando é necessária a implementação de drivers de comunicação. Isto porque a depuração da comunicação é muito difícil sem que haja o auxílio de um equipamento adicional ligado aos dois equipamento em questão.

A utilização de um analisador de protocolos facilita muito o trabalho, porém, ainda é uma tarefa trabalhosa. O analisador permite depurar a comunicação, ou seja, através dele se faz a monitoração dos dados que são enviados de um ou outro equipamento. Logo pode-se saber quais as respostas dos equipamentos às mensagens recebidas e que mensagens são estas.

O desenvolvimento do protocolo foi realizado nas instalações da Fundação CERTI, onde foi desenvolvida uma primeira versão do protocolo, para o sistema operacional DOS. Apesar da utilização do analisador de protocolos a implementação apresentou grande dificuldade, dispendendo-se um grande tempo de desenvolvimentos, aproximadamente um mês.

Esta primeira versão sofreu algumas alterações para a sua adaptação à plataforma Windows e também para uma mudança de concepção de programação, de estruturada para orientada a objetos. A implementação e adaptação foi realizada no ambiente de programação C/C++.

Como se trata de um protocolo para rede do tipo mestre/escravo, somente o mestre pode iniciar a comunicação. No CLP, o protocolo fica residente no sistema operacional e já vem implementado diretamente do fabricante. O CLP além de ter o protocolo residente, também deve ser configurado e programado para suportar a comunicação, conforme descrito em um item anteriormente.

Já no microcomputador, o protocolo faz parte de um software de monitoração e controle, sendo que o protocolo só estará ativo durante o período de funcionamento do software.

Optou-se pela implementação do protocolo em forma de uma DLL (*Dinamic Link Library*). A implementação em uma DLL possibilita que as funções, após terem sido testadas, sejam compiladas independentemente do software principal. A utilização de DLLs possibilita também que mais de um aplicativo utilize estas funções de comunicação (característica importante na utilização de apenas um PC para monitorar mais de um CLP) e possibilita também o compartilhamento de dados entre mais de um programa.

Existem implementadas na DLL de comunicação, quatro funções que podem ser acessadas pelo software de comunicação. São estas funções que estabelecem a interface entre o software e o driver de comunicação.

Uma destas funções tem como tarefa evitar choque de comunicação. Estes choques podem ocorrer, pois as rotinas de comunicação são acionadas por interrupção de hardware. O que pode ocorrer, é que antes que uma comunicação seja terminada, uma outra seja requisitada. Esta função simplesmente verifica o estado do protocolo de comunicação, sempre que uma comunicação for solicitada, seja para escrita ou leitura de dados. A função de verificação tem que ser acionada para que a comunicação seja autorizada ou não, evitando-se conflitos e com isto panes no sistema. A necessidade de implementação desta função foi

observada em teste com o sistema, que sem motivo aparente travava todo o sistema. Após tal procedimento estas panes cessaram.

As outras três funções, são as funções de comunicação propriamente ditas. Uma para escrita de uma palavra de 16 bits em uma área específica de memória do CLP. Os argumentos desta função são a área de armazenamento e a palavra a ser escrita. Outro argumento é o número do CLP com o qual desejamos estabelecer a comunicação, pois trata-se de um protocolo de comunicação para rede mestre/escravo.

As outras duas tratam da leitura de dados em áreas específicas da memória do CLP. Uma das funções é para leitura de apenas uma palavra de 16 bits, já a outra é para a leitura de um bloco de palavras. Neste caso os argumentos da função são o número do CLP que desejamos estabelecer comunicação e também o endereço da primeira palavra da área de memória que desejamos ler.

8.3) Desenvolvimento do software de monitoração

Optou-se pelo desenvolvimento do software de monitoração e controle para uma plataforma Windows, pelo fato da interface gráfica bem acabada que esta proporciona. O Windows proporciona um suporte para se implementar uma interface gráfica com o operador, que pode ser programada em linguagens de programação bem conhecidas. Segundo os expertos da informática a linguagem C é uma boa linguagem para programação de softwares para Windows, pois C e Windows combinam bastante. Por este, optou-se pelo desenvolvimento do software em C++ do compilador da Borland. É bem verdade que a forma de programação para Windows é bem diferente da programação DOS, mas os resultados gráficos são compensadores.

O Windows é um sistema orientado a eventos [Petzold, 1993], mas independente deste fato a sua programação pode ser orientada a objetos ou pode ser uma programação convencional para Windows.

Para o desenvolvimento de softwares mais simples e de pequeno porte, a programação C para Windows convencional é satisfatória. Mas para o desenvolvimento de softwares de grande porte esta metodologia se torna complicada e demorada.

A programação orientada a objeto, através do uso de bibliotecas de objetos, é aconselhável para o desenvolvimento de softwares de pequeno a grande porte, pois ela facilita o desenvolvimento de softwares no padrão Windows com todos os seus recursos, tais como barras de ferramentas, controles e diálogos e menus popup. Não que isto não seja possível na programação convencional, mas a utilização de bibliotecas de objetos torna o desenvolvimento mais rápido e menos sujeito a *bugs* de programas.

8.3.1) Etapas de desenvolvimento do software

Para o desenvolvimento do software de monitoração, foram necessárias 3 etapas distintas. Duas destas etapas foram executadas concorrentemente. Neste desenvolvimento trabalharam duas pessoas, um mestrando e um bolsista de iniciação científica.

Como uma primeira etapa, podemos citar o projeto do software. Nesta etapa foi realizado o levantamento das necessidades de informações e atuação do operador sobre o processo, bem como as principais características de um software de monitoração. Outra atividade desenvolvida nesta etapa foi o projeto da tela principal do aplicativo, onde se estabeleceu a forma de interface do operador e o software e com isto a interface com o processo.

A segunda etapa, foi a programação propriamente dita. Com os dados da etapa anterior, passou-se à implementação do software. Nesta etapa, cada característica do software foi desenvolvida passo a passo.

A atual versão do software possibilita o desenvolvimento de teste com a bancada, o que constitui a terceira etapa no desenvolvimento do software. Esta etapa foi desenvolvida conjuntamente com a segunda, o que possibilitou a identificação de problemas e da necessidade de novas características que foram acrescentadas ao software, o que permitiu o aprimoramento do sistema de monitoração.

8.3.1.1) Programação

Esta etapa de desenvolvimento merece especial atenção, pois nela os problemas surgiram. Como uma estratégia adotada para se obter um maior domínio da programação C para Windows, optou-se pelo desenvolvimento de uma primeira versão do software através da programação C convencional, já que se trata de um software de pequeno porte e esta forma de programação ser de maior domínio dos programadores.

Após a obtenção de um maior conhecimento do funcionamento da plataforma Windows, passou-se ao desenvolvimento de uma segunda versão do software através da programação C++ para Windows orientada a objetos, através do uso de uma biblioteca de objetos Windows. Esta segunda versão do software é mais elaborada.

8.4) Características do Software

O software apresenta uma interface simples com o usuário, onde as principais características de um software para Windows são apresentadas, tais como menus pop-up e quadros de diálogo. Na figura 44 é apresentada a tela principal do aplicativo.

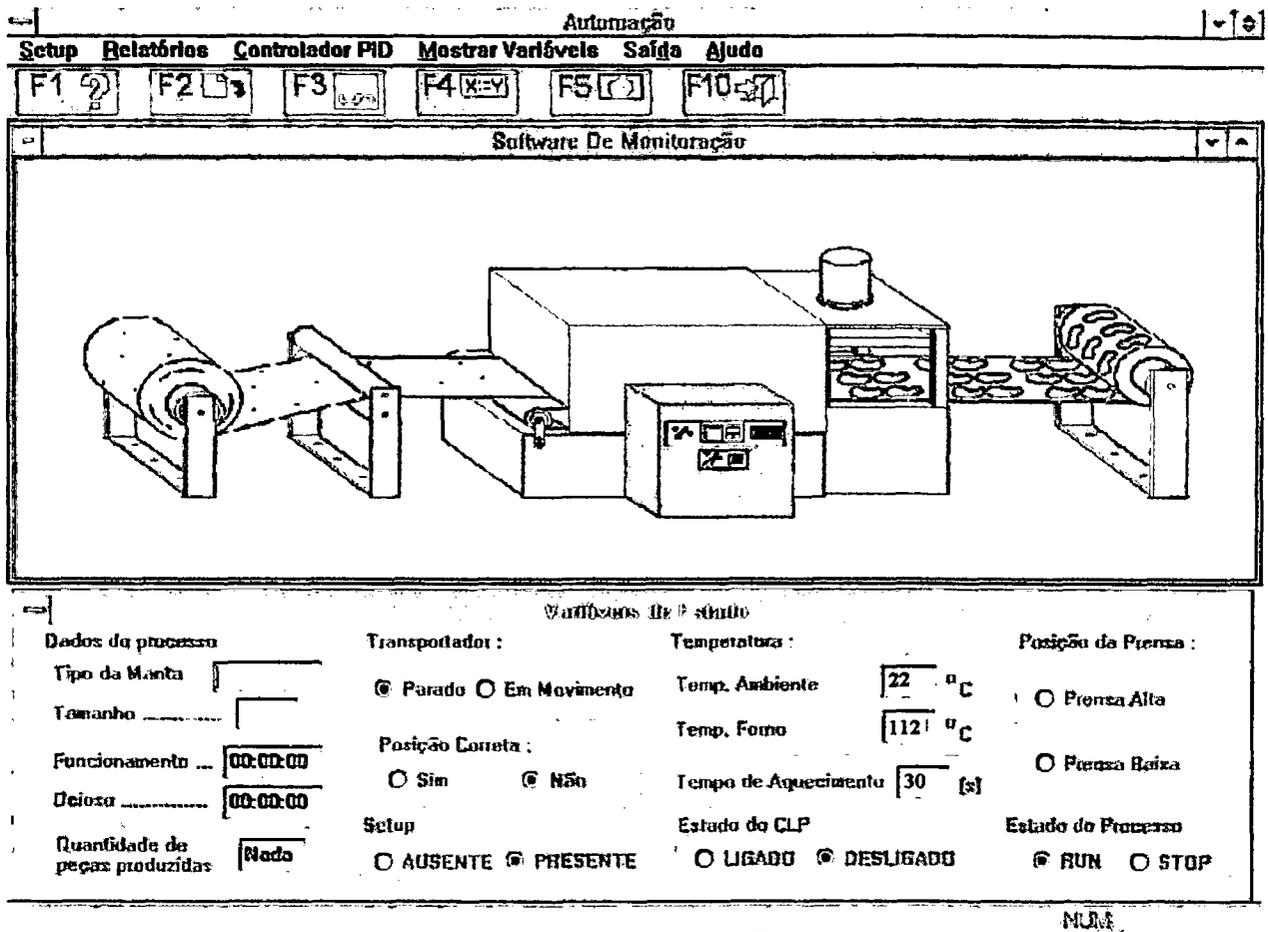


Figura 44 - Tela principal do aplicativo.

Através das funções de comunicação, informações do processo são adquiridas junto ao CLP. Estes dados, que chegam ao microcomputador em forma de bytes, são transformados em informações visuais para o operador, o que acelera o processo de interpretação dos resultados por parte do mesmo.

Existem duas formas de dados, os discretos (posição da prensa, acionamento do transportador, etc...) e os analógicos que são digitalizados que são utilizados para o controle contínuo (temperatura). Ambos são monitorados pelo sistema.

8.4.1) Informações discretas

As informações discretas (estados do transportador e prensa), são utilizados pelo CLP para se estabelecer as relações de intertravamento entre o transportador e a prensa, bem como para o comando destes equipamentos.

8.4.2) Informações contínuas

As informações analógicas (temperatura do túnel de aquecimento e ambiente) são digitalizadas a partir da entrada analógica do CLP, as quais são utilizadas no controle contínuo. A temperatura do túnel de aquecimento é utilizada para o controle do mesmo através de um sistema de controle por realimentação negativa, controlando-se de forma indireta a temperatura da manta plástica (devido a impossibilidade da monitoração desta temperatura através de sensores de contato, o termopar). A outra é a temperatura ambiente que também é monitorada. Esta temperatura também pode ser utilizada no controle indireto da temperatura da manta, conforme explicado no item 2.2.2.1 do capítulo 2.

8.4.3) Formas de apresentação dos dados

Na tela principal do programa, figura 44, é feita a visualização on-line das informações do processo. Como pode ser

observado, existe uma área principal que é chamada de área de trabalho do aplicativo, onde é apresentado um quadro sinóptico do processo e um quadro de diálogo onde são apresentadas informações numéricas e também gráficas.

Na representação esquemática do processo, (onde são representados o transportador, o túnel de aquecimento e a prensa de conformação e corte) podemos visualizar a movimentação da prensa, que conforme a posição real deste equipamento no processo o software indica.

Já no quadro de diálogos, um grande número de informações são apresentadas. Elas são divididas da seguinte forma: Informações sobre a produção, o transportador, temperaturas, a prensa, o setup do processo e sobre os estados do CLP e do processo:

- **Produção** - O tipo da manta e o tamanho da palmilha em produção, o tempo de funcionamento e o tempo ocioso do processo, e finalmente a quantidade de peças produzidas. Estas informações são apresentadas de forma numérica;
 - **Transportador** - São informações gráficas conforme pode ser observado. Informações do estado do transportador, se em movimento ou parado e também informações da posição da manta, se em posição correta ou não;
 - **Temperaturas** - A temperatura do túnel de aquecimento e a temperatura ambiente. São apresentações *on-line* e de forma numérica. Nesta região também é apresentado o tempo de aquecimento do material. É apresentado aqui devido ao estreito relacionamento deste tempo com as temperaturas ambiente e principalmente do túnel de aquecimento;
 - **Prensa** - É indicado aqui o posicionamento da prensa de conformação e corte, o que é coincidente com a representação esquemática;
 - **SetUp do processo** - É uma indicação de que o setup do processo já foi ou não carregado no software de monitoração;
-

- **Estado do CLP** - Se este está ligado ou não;
- **Estado do Processo** - Se o CLP está em modo *RUN* ou *STOP*, ou seja, se o processo está em andamento ou não.

Foram apresentadas acima informações sobre como as informações *on-line* são apresentadas ao operador. Porém também é possível uma apresentação *off-line* ou de históricos do processo. Estas informações são as seguintes:

- **Relatórios da produção** - Neste relatório são apresentadas as informações mais relevantes do processo, que são: O número de peças produzidas, o tipo da peça, o tempo de funcionamento e o tempo parado.
- **Gráfico de tendências** - São gráficos do comportamento da temperatura ao longo do tempo no decorrer do processo. São apresentados para ambas as temperaturas monitoradas, do túnel de aquecimento e da temperatura ambiente.
- **Gráfico de produção** - São gráficos de barra que especificam ao longo do dia a produção de palmilhas referentes a cada hora do dia.

Estas são as principais características do software de monitoração desenvolvido. Como citado anteriormente ainda não se encontra completamente concluído. O desenvolvimento foi interrompido na etapa dos gráficos, porém já está apto a ser utilizado. Alguns detalhes ainda são necessários para o seu aprimoramento.

O software no atual estágio de implementação ainda é muito restrito quanto a sua utilização, ou seja, ainda é muito particular, restrito ao processo para o qual foi desenvolvido. A sua generalização seria um processo trabalhoso e demorado, o que ultrapassa o escopo deste trabalho.

9) Resultados, Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

9.1) Processo de termoformagem

O processo de termoformagem estudado e estudado no segundo capítulo deste trabalho é, com certeza, um processo complexo, o qual envolve várias áreas da engenharia. O desenvolvimento do projeto do sistema de aquecimento, do sistema de controle e do sistema de supervisão foram baseados em um processo real de termoformagem, cujos requisitos foram levantados no estudo teórico e no levantamento de campo do processo industrial. O projeto foi direcionado para o sistema de controle e monitoração do processo, que foram considerados fundamentais para a modernização do processo industrial.

A bancada desenvolvida para a implementação e para os testes dos diversos módulos de controle pode ser utilizada para trabalhos futuros com testes de termoformagem. Podem ser realizadas modificações, adaptações e melhoramentos de forma a adequá-la a determinado tipo de estudo de termoformagem. Fica também como proposta para futuros trabalhos a otimização das outras etapas do processo de fabricação da empresa.

9.2) Bancada Experimental

A bancada experimental revelou-se a melhor alternativa encontrada para se criar uma aplicação para a estratégia de controle selecionada para o processo. Isto, porque a empresa que deu origem ao trabalho e inspirou a realização da pesquisa, não permitiu muita interferência ou interrupções no processo dado

que a produção permaneceu em três turnos durante praticamente todo o tempo da pesquisa. Por fim e por sua iniciativa, a empresa desligou-se do projeto. Este fato acabou por inviabilizar o desenvolvimento de um protótipo em escala industrial que seria um objetivo ambicionado.

O sistema, que foi desenvolvido com recursos do próprio GRUCON, apresentou uma boa performance, simulando em laboratório importantes características do processo, ou seja, o aquecimento da manta plástica e seu transporte. Estas características são, essencialmente, o aquecimento e o transporte do material, variáveis fundamentais para a obtenção de peças de boa qualidade. Nos processos de conformação e corte do material, que são realizados por máquinas diferentes, o comando foi simulado por botões e representação gráfica.

Pode-se, assim, por meio desta bancada, testar o sistema de controle, bem como o sistema de monitoração, uma vez que foi desenvolvida de forma a facilitar este controle por meio do CLP. Fez-se no capítulo 5 uma descrição detalhada deste sistema. A estratégia utilizada para o sistema foi a de controle de potência por meio de um sistema PWM e que atendeu plenamente os requisitos de projeto, o que pode ser observado através dos resultados obtidos no controle conforme é mostrado na figura 37.

9.3) Programação

No sistema desenvolvido, há duas partes de hardware eletrônico distintas envolvidas, que trabalham independentemente, porém trocando informações.

O CLP foi utilizado para o controle do processo, tanto no controle discreto como no contínuo. O controle discreto foi desenvolvido em linguagem "ladder" utilizando os recursos de programação do CLP. Já a programação do controle analógico foi

implementado em um bloco especial do CLP, dedicado exclusivamente para controle PID de sistemas.

Devido a simplicidade de programação da parte digital do CLP para este trabalho, esta programação foi desenvolvida de forma intuitiva. Porém, atualmente, existem vários métodos modernos de programação, que em muitos casos garantem o sucesso da aplicação de CLP's. Fica como proposta para trabalhos futuros o desenvolvimento de aplicações mais complexas com estes métodos, tais como Redes de Petri, Grafcet e *Mark Flow Graph*.

Em outra etapa de programação, foi implementada a comunicação entre o CLP e o PC. O CLP utilizado, apresenta uma interface de comunicação muito fechada, o que dificultou grandemente o processo de comunicação. Este fato, veio salientar a grande importância da tendência atual de desenvolvimento de sistemas abertos de comunicação [Babb, 1995; Pflieger, 1995]. Esta filosofia vem reduzir o custo de desenvolvimento, bem como agilizar este processo de desenvolvimento.

Toda a parte de comunicação foi desenvolvida no PC, pois o CLP já possui rotinas especializadas para esta tarefa, sendo porém somente necessário configurá-lo. Como em todas as etapas de programação da versão final, no desenvolvimento da comunicação também se utilizou de Linguagem Orientada a Objetos.

Foram desenvolvidas duas versões de software, uma primeira em programação para Windows convencional e outras em linguagem para Windows Orientada a Objetos. Comparando-se as duas formas de programação, pode-se constatar duas grandes vantagens da Linguagem Orientada a Objetos, a reutilização de códigos já desenvolvidos e alterações de projetos. Esta filosofia de programação, porém, apresentou para o autor deste trabalho uma grande desvantagem, a dificuldade em seu aprendizado.

9.4) Sistema de Controle

A estratégia de controle adotada para o sistema foi a utilização de um CLP integrado a um microcomputador. Com o CLP foram desenvolvidos os controles em sistemas digitais de transporte e de conformação da manta, de outro lado, o controle analógico do túnel de aquecimento, forma clássica PID.

Confrontando-se visualmente os resultados de simulações do sistema de aquecimento em malha aberta, apresentados nas figuras 30 e 31 (simulações teóricas por meio do software Vissim) com resultados práticos das figuras 32 e 33, constata-se que a formulação matemática utilizada está retratando satisfatoriamente a realidade.

Contraopondo os dados de constante de tempo e ganho do sistema real, figura 35, baseados no método de Hagglung, com os dados da formulação matemática figura 34, podemos ter uma visão quantitativa das diferenças entre os resultados teóricos e os práticos. As diferenças foram pequenas, da ordem de 2% para o ganho do sistema e 10% quanto à constante de tempo.

Este fato facilitou o desenvolvimento do controlador PID do CLP. Pode-se verificar um bom comportamento do sistema real, figura 37, que se tornou muito mais rápido. A simulação do sistema pelo "Vissim" foi também m condizente com a realidade, conforme podemos constatar comparando as figuras 36 e 37.

O controle de transporte da manta foi realizado em forma discreta, sendo que a presa foi simulada por meio de botões de acionamento. Este controle mostrou-se satisfatório pois a capacidade do CLP utilizado é amplamente superior às necessidades do projeto.

O microcomputador é responsável somente por facilitar a alteração dos parâmetros do controlador, bem como modificações

na referência de controle, não sendo responsável por controle do processo diretamente.

É importante ressaltar, que os dados de comportamento do túnel de aquecimento apresentados no capítulo 6, vêm reforçar a validade da formulação matemática utilizada para o projeto do sistema de aquecimento.

9.5) Sistema de Monitoração

O software de monitoração desenvolvido, satisfaz os objetivos propostos que incluem, facilitar a visualização do processo e realizar a interface do operador com o sistema.

O software possibilita a visualização gráfica do sistema real, bem como das variáveis do processo e seus valores de referência.

Devido às características do sistema desenvolvido, pode-se utilizá-lo como bancada de testes, tanto no que diz respeito ao processo de termoformagem, bem como no estudo de controle de um modo geral, constituindo por si só uma importante contribuição no que se refere a implementações em laboratório.

Neste último caso, a facilidade de utilização do sistema é muito grande, pois a interface do software desenvolvido para plataforma Windows, é muito simples e fácil de usar. Por meio de um software independente de simulação de sistemas, pode-se simular o sistema particular em questão e logo em seguida aplicar as constantes do controlador encontradas, no sistema real. Estas duas etapas, simulação e prática, podem ser desenvolvidas em apenas um posto de trabalho, que é a bancada experimental, como mostrado na figura 17.

É importante ressaltar que o modelo matemático proposto está muito próximo da realidade, o que torna o sistema amplamente didático para a aplicação de técnicas de controle.

Fica também como proposta para estudos futuros, a utilização da bancada não somente como uma aplicação de controle clássico, mas também para a aplicação de outras estratégias de controle, tais como as que se utilizam de Lógica Fuzzi, Redes Neurais e outras técnicas de inteligência artificial, fazendo-se apenas a incorporação do software de controle particular. Utilizando-se o sistema desenvolvido para este tipo de aplicação, o microcomputador deve ser responsável pelo controle contínuo, ficando o CLP apenas com a função de aquisição de dados do sistema.

Deve-se ressaltar, que o sistema desenvolvido em laboratório não foi implementado em moldes industriais em virtude do que está descrito no item 9.2, e que também é apresentado aqui como proposta para estudos futuros. Um sistema desenvolvido para trabalho em chão de fábrica teria uma configuração diferente: O sistema de termoformagem seria controlado pelo CLP e monitorado por um sistema de interface homem/máquina dedicado para o CLP em questão. O software de monitoração desenvolvido passaria por alterações, habilitando-o à supervisão de vários sistemas ligados em rede, ficando a estação de supervisão em uma sala de controle. Com tal sistema, poder-se-ia ter uma visão global da produção, ao mesmo tempo em que colher-se-ia dados do sistema (produção e tendências do sistema de controle) a cada instante, para confecção de históricos referentes à produção.

9.6 Comentários finais

Para o desenvolvimento da automação de um processo, é necessário primeiramente um conhecimento muito grande do processo em questão. Em seguida, é necessário se conhecer também as ferramentas que serão necessárias para a automação de cada tipo de processo.

Tal como ocorre em países de tecnologias avançadas, a necessidade de automação do parque fabril brasileiro a cada dia aumenta. Mudanças têm ocorrido de forma acelerada, às vezes tão rápido, que o que há dois anos em certas áreas podia ser considerado o estado da arte, hoje pode estar se tornando obsoleto.

Estas mudanças, que tão rapidamente têm ocorrido, não modificam somente o parque fabril, mas também o nível de necessidade de profissionais melhor qualificados e até mesmo o comportamento dos mesmos. A necessidade de mudanças radicais no curriculum dos profissionais da área técnica no Brasil em todos os níveis de formação é premente. O desenvolvimento de tecnologias, também é de suma importância para o país. Com a geração de tecnologia internamente no país, nos capacita a não apenas sermos meros usuários de caixas pretas desconhecidas, mas sim detentores destas tecnogias, tendo a capacidade de melhorar e criar novas ferramentas. Este desenvolvimento também gera qualificação de recursos humanos nas mais variadas áreas de formação.

O controle digital e analógico aqui apresentado constitui uma pequena mas importante contribuição neste sentido, pois permitiu não apenas o envolvimento do autor mas ainda de estagiários do laboratório que contribuíram auxiliando na construção e calibração da bancada, recebendo um grande incentivo no sentido de aprender mais sobre o controle de processos industriais modernos.

10) Anexo

Tipo de sistema de transmissão:

Serial TTY (Loop de corrente)

No Caso de a um microcomputador com saída RS232 padrão, é necessário o uso de um conversor RS232 - TTY para compatibilizar o nível elétrico.

Configuração de caracter:

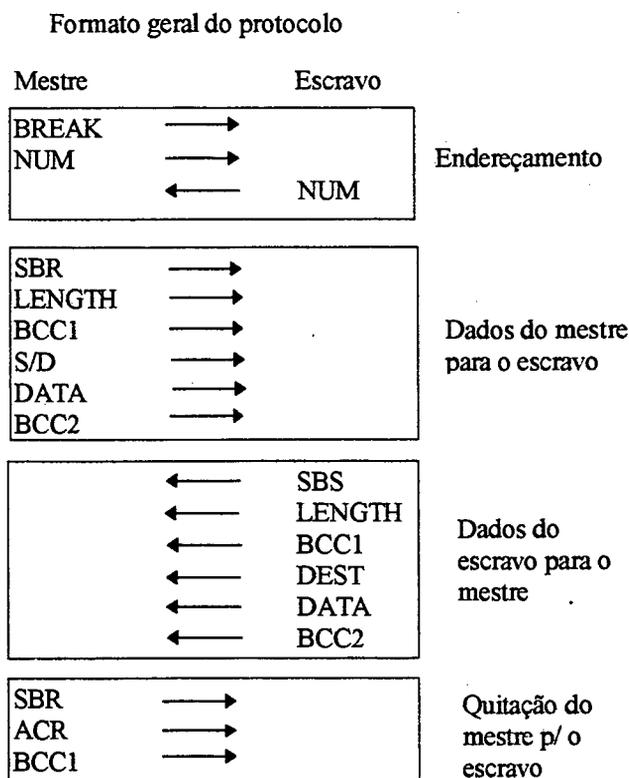
Velocidade : 9600 bps

Paridade: Par

Stop-bits: 1

Tamanho: 8bits

Formato Geral do Protocolo



Descrição dos estados do protocolo

1- **Break**: O mestre "abaixa" a linha por 5 ms, o que é interpretado pelo escravo como início de comunicação. Após "levantar" novamente a linha, deve-se aguardar um milissegundo antes de passar para o próximo estado.

2- **NUM+**: Número do escravo com o qual se deseja trocar dados com o bit 6 setado (fazer operação OU com 40h). Na ligação ponto a ponto este valor é configurável no CLP. Adotaremos como 1 (um).

3- **NUM**: Em resposta ao estado anterior, o escravo envia de volta o seu número de identificação, indicando que está pronto para a comunicação. Caso o caracter recebido não seja igual ao enviado (1), houve erro ou o CLP está em modo stop.

4- **SBR**: É um byte usado na coordenação entre o mestre e o escravo. Usar sempre o valor 40h.

5- **LENGTH**: Quantidade de bytes a serem transferidos para o escravo sendo válidos valores de 0 a 64.

6- **BCC1**: Block Check Character- é calculado através da operação Booleana OU EXCLUSIVO entre NUM+, SBR e LENGTH. Caso haja bytes a serem transmitidos (LENGTH>0), o próximo estado deve ser o 7, caso contrário deve-se saltar para o estado 10.

7- **S/D**: Usado para roteamento na rede. Na ligação ponto a ponto deve-se usar 0 (zero).

8- **DATA**: Dados a serem transmitidos para o escravo. O protocolo deve ficar neste estado até transmitir o número de bytes indicados no estado 5 (LENGTH).

9- **BCC2**: Byte composto através da operação Booleana OU EXCLUSIVO entre NUM+, SBR, LENGTH, S/D e os dados.

10- **SBS**:

Byte de coordenação. Valores possíveis:

1h, 41h - Protocolo ok, mas os dados enviados não foram aceitos. Neste caso, os dados devem ser transmitidos novamente na próxima comunicação.

40h - Protocolo ok.

80h, 81h - CLP em modo STOP.

Outros - Erro.

- 11- **LENGTH**: Indica o número de bytes de dados que o escravo irá transmitir ao mestre. O bit 6 vem setado e deve ser desconsiderado. Valores válidos: 0 a 64.
- 12- **BCC1**: Byte composto através da operação Booleana OU EXCLUSIVO entre SBS e LENGTH. Se o byte LENGTH recebido no estado anterior for maior que zero, o próximo estado deve ser o 13, caso contrário a transação está completa.
- 13- **DEST**: Byte indicador de destino. Na ligação ponto a ponto, deve ser sempre o valor 0 (zero).
- 14- **DATA**: Dados enviados pelo escravo. O mestre deve ficar neste estado até receber a quantidade de bytes indicada no byte recebido pelo estado 11.
- 15- **BCC2**: Byte composto através da operação Booleana OU EXCLUSIVO entre SBS, LENGTH, DEST e DATA.
- 16- **SBR**: Byte de coordenação. Usar 40h.
- 17- **ACK**: Byte de acknowledgement. Se o mestre receber os dados sem problema (não houve erro de paridade, stop bits, BCC2 calculado = ao recebido) , deve ser transmitido 128 (decimal), caso contrário (128+64), avisando assim ao escravo que os dados por ele enviados foram recebidos com erros.
- 18- **BCC1**: Byte composto através da operação Booleana OU EXCLUSIVO entre SBR e ACK.
-

Considerações:

- 1- Entende-se como MESTRE o microcomputador que estará ligado a um CLP (Controlador Lógico Programável) no papel de ESCRAVO.
 - 2- O escravo fica permanentemente aguardando uma transação (comunicação completa, do estado 1 ao 18 descritos anteriormente) com o mestre, sendo que a periodicidade destas transações fica a critério do mestre (a cada 100ms, uma vez por segundo, cada minuto, etc.), sendo que não deve ser inferior a 0.8ms.
 - 3- A seqüência de estados lógicos realizados pelo protocolo varia conforme a existência ou não de dados a serem transmitido do mestre ao escravo ou vice-versa (Vide descrição dos estados lógicos 6 e 12).
 - 4- Os estados lógicos 1, 2, 3 e 4 existem pelo fato do protocolo ter sido desenvolvido para uso em rede. Na ligação ponto a ponto a utilidade deste estados é praticamente nula, mas devem ser realizados.
 - 5- Em cada transação podem ser transmitidos até 128 bytes (64 em cada sentido), conforme o valor transmitido/recebido nos estados 5 e 11.
 - 6- Os bytes recebidos e transmitidos pelo escravo são colocados e retirados respectivamente de duas áreas fixas de memória, configuráveis pelo usuário quando da programação do CLP.
 - 7- No CLP é necessário que uma pequena rotina escrita em STEP5 fique monitorando e atualizando os flags do protocolo em intervalos regulares de tempo, com periodicidade dependente dos requisitos da aplicação principal. Para a confecção desta rotina, deve-se consultar o manual do CLP usado, na parte referente à ligação em SINEC L1.
-

8- O tempo máximo entre a transmissão de um caracter e outro não deve ser superior a 20ms, e caso aconteça, deve ser interpretado que houve falha na comunicação. Portanto, nos estados em que é esperado um caracter o tempo deve ser monitorado até que alcance 20ms, quando estão está caracterizado um erro. Neste caso, deve-se aguardar no mínimo 100ms para recomeçar uma nova comunicação.

11) Referências Bibliográficas

BABB, M. PC-Based Soft Logic Gains Momentum in Detroit, Control Engineering, p.50-56, junho, 1995a.

BABB, M. MicroPLC's: A Most Favored Species, Control Engineering, p.85-88, abril, 1995b.

BABINGTON, P. PLC Push Process Control, Intech, p.28-29, março, 1990.

BERGER, H. Automating with the SIMATIC S5 115U, Berlin, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin e Munique, 1989.

BLASS, A. Processamento de Polímeros, Florianópolis, Ed. da UFSC, 1988.

CLEVELAND, P. PLCs: Small, Powerful, and Open are in, I&CS, p.27-37, abril, 1995.

FURNESS, H. DCS: The Sum Is Greater Than Its Separate Parts, Control Engineering, p36-37, outubro, 1992.

FURUKAWA, C. M., Marchesi, M. e Miyagi, P. E. Métodos e Técnicas para Programação Eficiente de CLP's em Aplicações Complexas, Anais do 8º CBA, Sociedade Brasileira de Automática, Belém, PA, v1, p.585-590, 1990.

GEROLD, J. S. Standard Architectures Put Industrial Computers in Control, Control Engineering, p.74-76, junho, 1992.

GEROLD, J. S. PC Control Software Combines Ladder Logic, HMI, and I/O, Control Engineering, p.56-57, maio, 1995.

GRUENWALD, P. E. Thermoforming, A Plastic Processing Guide, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania, 1987.

JOURDAIN, R. L. Programmer's problems solver for the IBM PC XT and AT, Prentice Hall Press, New York, New York, 1986.

KREITH, F. Princípios da Transmissão de Calor, Editora Edgard Blücher, São Paulo, São Paulo, 1969.

MERCHANT, J. Infrared Temperature Measurement Theory and Application, Omega Engineering, Inc. on the World Wide Web, <http://www2.omega.com/Omega/temper-8.html>, 1996.

MIYAGI, P. E. Controle Programável, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, São Paulo, 1996.

MORANO Jr, V. e Cruz, L. O. L. Controladores Lógico Programáveis, uma aplicação em posicionamento. Anais do Seminário Sobre automatização Industrial Para a Região Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 16 e 17 de abril, 1986.

MARKUS, M. e Pires, P. (org) Manufatura Integrada por Computador, Contexto, Tendências e Técnicas, Fundação CEFETMINAS, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1995.

PETZOLD, C. Programando para Windows 3.1, McGraw-Hill, São Paulo, São Paulo, 1993.

PROVENZA, F. Moldes Para Plásticos, PRO-TEC Centro Escolar e Editorial Ltda, São Paulo, São Paulo.

UITENHAM L. and Munjal R. Choose the Right Control Scheme form Pilot Plants, Chemical Engineering Progress, p.35-38, janeiro, 1991.

VORA D. D. and Hopking M. B. Can PLC's Overcome Control Constraints?, Intech, p.20-23, março, 1992.

WELCH, T. Scanning IR Sensors In Plastics Thermoforming, Sensors, p.28-31, agosto, 1993.
