



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ DE OLIVEIRA BRITO NETO

CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE TEMPERATURA E UMIDADE
APLICADO EM INCUBADORAS NEONATAIS

FORTALEZA
AGOSTO 2010

José de Oliveira Brito Neto

**CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE TEMPERATURA E UMIDADE
APLICADO EM INCUBADORAS NEONATAIS**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrônica de Potência e Acionamentos

Orientador: Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida

**FORTALEZA
AGOSTO 2010**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Pedro e Eliana pelo apoio, carinho e incentivo.

Aos meus avôs, Brito (in memorian) e Alberto (in memorian), e avós, Neuza e Creuza.

Aos meus irmãos, Mikaella, Miro, Pedro e Fábio.

Aos meus sobrinhos Mateus, Mirinho e Ninoca.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela fé em acreditar que algo especial espera por mim num futuro próximo.

Aos meus pais, Pedro Brito e Eliana Brito, meus irmãos, Mika, Miro, Pedro e Fábio, minhas avós, Creuza e Neuza, meus sobrinhos, Mateus, Miro e Nina, e aos restantes dos meus familiares pela sua confiança, amor, compreensão, apoio, auxílio, e enfim, por tudo, meu muito obrigado.

Ao Professor Otacílio Mota Almeida, pela orientação, ensinamentos, estímulo e amizade a mim dedicados ao longo destes dois anos, também foi o responsável pela minha participação neste programa de Mestrado;

À FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) que contribuiu com o apoio financeiro necessário à realização desse trabalho e desenvolvimento científico;

Aos professores Arthur Plínio, Bismark Torrico e Mardson Amorim pela ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores José Carlos, Luiz Henrique e aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, responsáveis diretamente ou indiretamente pela minha formação no programa de Mestrado;

Aos companheiros de desenvolvimento do trabalho Aurélio Adão, Guilherme Barçante, Nádia Mendes, Marcos Uchoa, Francisco Lincoln, Ícaro Brito, aos quais merecem também mérito pelo progresso da pesquisa;

Aos amigos Gleidson Mota e Sérgio Lima pela constante ajuda no desenvolvimento do protótipo funcional da incubadora neonatal;

Aos amigos que fiz no programa de pós-graduação Toin, Davi Nunes, Romulo, Wilklei, Aldinei, Venicio, Fábio Rocha, Eudes, Rafael, Eduardo, Dirceu, Eber, Rodrigo, Hermínio, Thiago Menezes, Maykel, Kleymilson, Thiago Nogueira e tantos outros que torceram pelo sucesso deste trabalho;

Aos funcionários Mário Sérgio, Rafel Gomes, Geraldin, Socorro (vulgo HELP) e Vasconcelos (Vasco da Xerox).

Aos meus amigos Andrei, Severo, Pádua, Evandro, Leopoldo, Tico, que desde o início sabem da minha batalha diária para concluir este mestrado.

A todas as pessoas que por motivo de esquecimento não foram citadas anteriormente, vou deixando nesse espaço minhas sinceras desculpas.

RESUMO

Brito Neto, J. O. **Controle Multivariável de Temperatura e Umidade Aplicado em Incubadoras Neonatais**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

Um protótipo funcional para reproduzir o micro-clima encontrado em incubadoras neonatais, assim como o controle dos circuitos de temperatura e umidade relativa do ar foram projetados e implementados neste trabalho. O protótipo é composto por sensores (temperatura e umidade relativa do ar), atuadores (resistor de aquecimento e umidificador), elementos para regulação acessíveis ao usuário e circuitos eletrônicos para controle e processamento dos sinais coletados no protótipo. Os circuitos de controle têm a função de receber os sinais dos sensores e acionar os atuadores visando manter as grandezas em patamares compatíveis com a norma NBR IEC-60.601-2-19/1999. A incubadora possui ainda um sistema de circulação de ar, formado por um ventilador, com finalidade de tornar homogênea a temperatura e umidade no interior da mesma, além de proporcionar a renovação do ar. As características multivariáveis deste tipo de sistema o tornam interessante do ponto de vista de aplicação de técnicas de controle. Logo, foram estudadas técnicas de controle clássico, como o Controlador Proporcional-Integral (PI), sendo os parâmetros deste controlador ajustados pelo método modificado de *Ziegler-Nichols* e pelo método BLT (*Biggest Log-Module Tuning*) e em seguida foram comparados os resultados obtidos nestes dois métodos. No geral, o método BLT se mostrou mais eficiente que o método modificado de *Ziegler-Nichols*, pois permite flexibilidade na especificação do desempenho do sistema.

Palavras-chave – NBR IEC-60.601-2-19/1999; Incubadora Neonatal; Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do Ar; Controlador Multivariável; Controlador PI; Método Modificado de *Ziegler-Nichols*; Método BLT.

ABSTRACT

Brito Neto, J. O. **Temperature and Humidity Multivariable Control Applied in Neonate Incubators**. 2010. 103 f. Dissertation (Master in Electrical Engineering)-Technological Center, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

A functional prototype to reproduce the micro-climate found in neonate incubators, as well as control circuits of temperature and relative humidity were designed and implemented in this work. The prototype is composite for sensors (temperature and relative humidity), actuators (heating resistor and humidificator), elements for accessible adjustment to the user and electronic circuits for signals control and processing collected in the prototype. The control circuits have the function of receiving the sensors signals and to activate actuators aiming keep the greatnesses in compatible landings with the norm NBR IEC-60.601-2-19/1999. The incubator also has an air circulation system, formed by a fan, with the purpose of making homogeneous the temperature and humidity inside the same, besides providing for the renewal of the air. The characteristic multivariable of this type of system makes it interesting from the standpoint of application of control techniques. Therefore, we studied techniques of classical control, as the PI Controller, and the parameters set by the controller of this modified method of Ziegler-Nichols and BLT method and then compared the results obtained by these methods. Overall, the BLT method was more efficient than the modified method Ziegler-Nichols, since it allows flexibility in the specification of system performance.

Keywords - NBR IEC-60.601-2-19/1999; Neonate Incubators; Relative Humidity and Temperature Sensors; Multivariable Controller; PI Controller; Modified Ziegler-Nichols Method; BLT Method.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 METABOLISMOS DOS RECÉM-NASCIDOS	16
2.1.1 TERMORREGULAÇÃO DOS RECÉM-NASCIDOS.....	17
2.2 PERDAS TÉRMICAS DOS RECÉM-NASCIDOS PARA O MEIO-AMBIENTE.....	19
2.2.1 PERDAS DE CALOR POR EVAPORAÇÃO.....	19
2.2.2 PERDAS DE CALOR POR CONVECÇÃO	20
2.2.3 PERDAS DE CALOR POR CONDUÇÃO	21
2.2.4 PERDAS DE CALOR POR RADIAÇÃO	22
2.3 CARACTERÍSTICAS DO INTERIOR DE UMA INCUBADORA NEONATAL	22
2.4 A NORMA NBR IEC 601-2-19	26
2.5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	31
CAPÍTULO 3 – PROTÓTIPO DESENVOLVIDO E SEU FUNCIONAMENTO	32
3.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE INCUBADORA NEONATAL	32
3.1.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SUPORTE METÁLICO	33
3.1.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO CAPACETE	33
3.1.3 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA PLATAFORMA DO COLCHÃO.....	34
3.1.4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO RESERVATÓRIO	35
3.1.5 SISTEMA DE ENTRADA E SAÍDA DE AR. AQUISIÇÃO E ADAPTAÇÃO DE UM VENTILADOR	35
3.1.6 SISTEMA DE REGULAÇÃO TÉRMICA. ESCOLHA DE UM ELEMENTO DE AQUECIMENTO	36
3.1.7 SISTEMA DE UMIDIFICAÇÃO. ESCOLHA DE UM UMIDIFICADOR.....	36
3.2 FUNCIONAMENTO DA INCUBADORANEONATAL.....	38
3.2.1 CIRCUITO DE CONTROLE DA TEMPERATURA	38
3.2.2 CIRCUITO DE CONTROLE DA UMIDADE RELATIVA DO AR.....	41
3.2.3 CIRCUITO DE CONTROLE DA CIRCULAÇÃO DO AR.....	43
3.3 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA	44
3.3.1 SENSOR DE TEMPERATURA.....	44
3.3.2 SENSOR DE UMIDADE RELATIVA DO AR E TEMPERATURA.....	45
3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	48
3.5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	49

CAPÍTULO 4 – PROJETO DE CONTROLADORES PI MULTIVARIÁVEIS	50
4.1 SISTEMAS DE CONTROLE MULTIVARIÁVEL (MIMO).....	51
4.2 IDENTIFICAÇÃO SEQUENCIAL A PARTIR DO MÉTODO DE RESPOSTA AO DEGRAU PARA UM SISTEMA TITO.....	54
4.3 EXEMPLO DE SIMULAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO	62
4.4 MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS.....	67
4.5 SINTONIA DE CONTROLADORES PI DESCENTRALIZADOS ATRAVÉS DO MÉTODO BLT	70
4.6 EXEMPLO DE SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES	72
4.7 COMENTÁRIOS FINAIS.....	75
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1 APLICAÇÃO EM UMA INCUBADORA NEONATAL	77
5.2 ANÁLISE DE ROBUSTEZ DOS CONTROLADORES	80
5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONTROLADORES PARA UMA TEMPERATURA CONSTANTE	84
5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONTROLADORES PARA UMA UMIDADE RELATIVA DO AR CONSTANTE.....	90
5.5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	95
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – EXEMPLO DA QUEDA DA TEMPERATURA CORPORAL DO BEBÊ IMEDIATAMENTE APÓS O NASCIMENTO E VARIABILIDADE DA TEMPERATURA CORPORAL DURANTE OS PRIMEIROS DIAS DE VIDA (GUYTON & HALL, 1998).....	17
FIGURA 2.2 – LOCALIZAÇÃO DO HIPOTÁLAMO NO CÉREBRO HUMANO (OLIVEIRA, 2007).....	18
FIGURA 2.3 – PERDAS DE CALOR POR EVAPORAÇÃO (RIBEIRO, 2005).....	20
FIGURA 2.4 – PERDAS DE CALOR POR CONVECÇÃO (RIBEIRO, 2005)	21
FIGURA 2.5 – PERDAS DE CALOR POR CONDUÇÃO (RIBEIRO, 2005)	21
FIGURA 2.6 – PERDAS DE CALOR POR RADIAÇÃO (RIBEIRO, 2005).....	22
FIGURA 2.7 – LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA (NBR IEC 601-2-19, 1997)..	30
FIGURA 2.8 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA NAS INCUBADORAS (NBR IEC 601-2-19, 1997)	30
FIGURA 3.1 – PROJETO DO SUPORTE METÁLICO.....	33
FIGURA 3.2 – CAPACETE DESENVOLVIDO.....	34
FIGURA 3.3 – RESERVATÓRIO PROJETADO.....	35
FIGURA 3.4 – PLATAFORMA DO COLCHÃO COM OS ORIFÍCIOS DE ENTRADA E SAÍDA DE AR.....	36
FIGURA 3.5 – UMIDIFICADOR	37
FIGURA 3.6 – INCUBADORA PROJETADA	37
FIGURA 3.7 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE CONTROLE DA TEMPERATURA	38
FIGURA 3.8 – CIRCUITO DETECTOR DE SINCRONISMO.....	39
FIGURA 3.9 – PIC12F675	39
FIGURA 3.10 – CIRCUITO DE ACIONAMENTO DE CARGA CA UTILIZANDO MOC3021 E TIRISTOR	40
FIGURA 3.11 – CIRCUITO DE FONTE UTILIZADO PARA ALIMENTAR O CIRCUITO DE CONTROLE DA TEMPERATURA...	41
FIGURA 3.12 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE CONTROLE DA UMIDADE RELATIVA DO AR.....	41
FIGURA 3.13 – PIC16F877A E O CIRCUITO DE CONTROLE DA UMIDADE RELATIVA DO AR	42
FIGURA 3.14 – CIRCUITO DE FONTE UTILIZADO PARA ALIMENTAR O VENTILADOR.....	43
FIGURA 3.15 – (A) ENCAPSULAMENTO E (B) CIRCUITO DO LM35	44
FIGURA 3.16 – CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAL DO LM35	45
FIGURA 3.17 – PLACA NI USB-6009.....	48
FIGURA 4.1 – SISTEMA MULTIVARIÁVEL 2x2	53
FIGURA 4.2 – SISTEMA DE CONTROLE TITO EM MALHA FECHADA.....	55
FIGURA 4.3 – SINAIS DE EXCITAÇÃO DO SISTEMA TITO	56
FIGURA 4.4 – RESPOSTA AO DEGRAU DO SISTEMA SEM RUÍDO	63
FIGURA 4.5 – SINAIS EQUIVALENTES PARA O MODELO DE WOOD & BARRY.....	63
FIGURA 4.6 – DIAGRAMAS DE NYQUIST	64
FIGURA 4.7 – RESPOSTA AO DEGRAU DO SISTEMA EM MALHA ABERTA	65
FIGURA 4.8 – ERRO PARA CADA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	66
FIGURA 4.9 – AÇÕES DO CONTROLADOR PID (ASTRÖM & HAGGLUND, 1995)	67
FIGURA 4.10 – O PONTO A É MOVIDO PARA O PONTO B PELA AÇÃO DO CONTROLADOR	68
FIGURA 4.11 – CONTROLE DA CONCENTRAÇÃO NO TOPO PELO MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS.....	72
FIGURA 4.12 – CONTROLE DA CONCENTRAÇÃO NA BASE PELO MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS	73
FIGURA 4.13 – CONTROLE DA CONCENTRAÇÃO NO TOPO PELO MÉTODO BLT	73
FIGURA 4.14 – CONTROLE DA CONCENTRAÇÃO NA BASE PELO MÉTODO BLT	74
FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA INCUBADORA PARA FINS DE IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO.....	77
FIGURA 5.2 – TESTE DE RESPOSTA AO DEGRAU DO SISTEMA	78
FIGURA 5.3 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA INCUBADORA	79
FIGURA 5.4 – $w(JW)$ PARA O MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS	81
FIGURA 5.5 – $L(JW)$ PARA O MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS	81
FIGURA 5.6 – $w(JW)$ PARA O MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=3$	82
FIGURA 5.7 – $L(JW)$ PARA O MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=3$	82
FIGURA 5.8 – $w(JW)$ PARA O MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=5$	83
FIGURA 5.9 – $L(JW)$ PARA O MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=5$	83
FIGURA 5.10 – CONTROLE DA TEMPERATURA PELO MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS.....	84
FIGURA 5.11 – CONTROLE DA UMIDADE PELO MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS	85
FIGURA 5.12 – CONTROLE DA TEMPERATURA PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=3$	86
FIGURA 5.13 – CONTROLE DA UMIDADE PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=3$	86
FIGURA 5.14 – CONTROLE DA TEMPERATURA PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=5$	87
FIGURA 5.15 – CONTROLE DA UMIDADE PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=5$	87
FIGURA 5.16 – CONTROLE DA TEMPERATURA PELO MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS.....	91

FIGURA 5.17 – CONTROLE DA UMIDADE PELO MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS	91
FIGURA 5.18 – CONTROLE DA TEMPERATURA PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=3$	92
FIGURA 5.19 – CONTROLE DA UMIDADE PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=3$	92
FIGURA 5.20 – CONTROLE DA TEMPERATURA PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=5$	93
FIGURA 5.21 – CONTROLE DA UMIDADE PELO MÉTODO BLT COM UM FATOR DE RELAXAMENTO $F=5$	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – TEMPERATURA APROXIMADA DO AR NO INTERIOR DA INCUBADORA (SEGRE, 2002)	23
TABELA 2.2 – PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA (SEARS ET AL., 1997)	25
TABELA 3.1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SHT75	46
TABELA 3.2 – NOME DOS PINOS DO SHT75 E SUAS RESPECTIVAS FUNÇÕES	46
TABELA 4.1 – ERRO PERCENTUAL DO DIAGRAMA DE NYQUIST PARA CADA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	64
TABELA 4.2 – ERRO PERCENTUAL DO GANHO E DA CONSTANTE DE TEMPO PARA CADA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	66
TABELA 4.3 – COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA A CONCENTRAÇÃO NO TOPO	74
TABELA 4.4 – COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA A CONCENTRAÇÃO NA BASE	75
TABELA 5.1 – COMPARAÇÃO DAS VARIÂNCIAS PARA O CASO DA TEMPERATURA CONSTANTE	89
TABELA 5.2 – COMPARAÇÃO DAS VARIÂNCIAS PARA O CASO DA UMIDADE CONSTANTE.....	94

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Segundo dados do Ministério da Saúde, no ano de 2007, em nosso país, mais de 65% dos óbitos infantis registrados na faixa de 0 a 1 ano ocorrem nos primeiros 27 dias de vida (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2009). De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) e Segre (2002) é considerado prematura, ou pré-termo a criança com idade gestacional menor que 37 semanas (SEGRE, 2002). Long e Lucey (1980) classificaram os recém-nascidos (RNs) segundo o peso e a idade gestacional colocando este limite em 38 semanas (LONG, LUCEY & PHILIP, 1980; RIBEIRO, 2005).

Bebês RNs prematuros, ou que nascem com algum tipo de enfermidade, freqüentemente necessitam ser mantidos num ambiente fechado em que a temperatura seja elevada em relação ao meio ambiente e controlada (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002). Para aumentar a taxa de sobrevivência dos RNs prematuros, colocam-se os mesmos em câmaras fechadas, com a temperatura mantida em uma faixa específica, o que diminui os requisitos de consumo de oxigênio e os mantém aquecidos (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002). Estas câmaras fechadas são as incubadoras neonatais (INs). Sua principal função é sustentar um ambiente termicamente adequado ao RN, mantendo a vida de bebês prematuros, ou seja, que não promova a perda de calor do mesmo e seja favorável ao seu crescimento, ao seu desenvolvimento e finalmente à sua sobrevivência (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002).

Tais equipamentos devem produzir um ambiente higro-térmico confortável e saudável para os RNs (FARIA, 2001). O objetivo das incubadoras é reduzir a perda de água dos neonatos, que ocorre através da pele e da respiração, e aumentar o armazenamento de calor do mesmo controlando a temperatura interna, a umidade relativa do ar e, por conseqüência, a pressão de vapor no micro-clima criado dentro da cúpula (FARIA, 2001). Para tal finalidade, as incubadoras possuem um sistema de controle e monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar deste ambiente em níveis aceitáveis às condições que o RN necessita para a sua sobrevivência.

No desenvolvimento desta dissertação foram implementados algoritmos de controle responsáveis por manter a temperatura e a umidade relativa do ar em níveis pré-estabelecidos. Para isto foi construído um protótipo funcional de incubadora composta das seguintes partes:

capacete (coberta da incubadora), plataforma para colchão, suporte para a estrutura, sistema de entrada de ar, sistema de regulação térmica, sistema de extração de ar, umidificador, sensores de temperatura e umidade relativa do ar.

Para implementação deste controle foram desenvolvidos hardware e software próprios, que estão interligados e constituem um dos pontos deste trabalho. Outro ponto foi a construção do protótipo, que considerou as recomendações contidas em norma técnica específica, no caso a NBR IEC 601-2-19 (Equipamento Eletromédico – Parte 2: Prescrições particulares para segurança de incubadoras para recém-nascidos), e a praticidade para os testes de controle na incubadora.

O controlador utilizado neste trabalho foi um controlador proporcional-integral (PI) do tipo TITO (Duas Entradas e Duas Saídas). A ação proporcional (P) ajusta a saída do controlador de acordo com a magnitude do sinal de erro, ou seja, quanto maior o erro, maior será a atuação do controlador. A ação integral (I) tem a capacidade de eliminar o erro estacionário para entradas do tipo degrau, ou seja, ela muda de forma proporcional o sinal de erro. A combinação dos modos proporcional e integral é vantajosa porque combina a rapidez da resposta do modo proporcional e a capacidade de eliminar o erro em regime permanente do modo integral (OGATA, 2003; ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995).

Para o cálculo dos parâmetros do controlador foi utilizado o método modificado de *Ziegler-Nichols*, que tem muitas vantagens se comparado a outros métodos de ajuste de parâmetros, tendo se tornado no decorrer dos anos um padrão industrial (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995). Outro método usado foi o BLT (*Biggest Log-Module Tuning*) que satisfaz o objetivo de chegar aos resultados pretendidos com apenas uma pequena quantidade de esforço computacional. Uma das vantagens é que o método é fácil de usar, é facilmente compreensível pelos engenheiros de controle, e leva a resultados que comparam muito favoravelmente com os resultados empíricos encontrados por exaustivos métodos de ajustes de tentativa e erro usados por vários autores (LUYBEN, 1986).

Este trabalho de dissertação também tem como objetivo o projeto de controladores PI multivariáveis (MIMO) para controlar um protótipo funcional de uma incubadora neonatal. Dois métodos de controladores PI-MIMO descentralizados foram utilizados no sistema da incubadora: o método modificado de *Ziegler-Nichols* e o método BLT. Em seguida, índices de desempenho foram empregados para fazer uma análise comparativa entre os dois métodos.

O Capítulo 2 faz uma fundamentação teórica do metabolismo dos RNs e os diferentes processos de perdas térmicas dos mesmos para o meio externo. Apresenta também, as principais definições, terminologias, requisitos, diretrizes gerais e justificativas da norma NBR IEC 601-2-19 para o desenvolvimento de um protótipo de incubadora neonatal. No Capítulo 3 apresenta-se o protótipo de incubadora desenvolvido neste trabalho e o seu funcionamento através dos circuitos eletrônicos de controle da temperatura, de controle da umidade relativa do ar, de controle da circulação do ar, dos sensores de temperatura e de umidade relativa, e do sistema de aquisição de dados. O Capítulo 4 tem como finalidade mostrar os controladores PI MIMO projetados, através do método modificado de *Ziegler-Nichols* e do método BLT, para o controle da temperatura e umidade relativa do ar na IN. No Capítulo 5 as duas técnicas desenvolvidas são aplicadas à incubadora a fim de se avaliar as vantagens e desvantagens de cada uma. Em seguida, é feito um estudo comparativo dos resultados obtidos. Para finalizar, o Capítulo 6 traz as conclusões sobre o trabalho.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Logo após o nascimento, o RN é imediatamente exposto ao ambiente frio do mundo externo. Se não houver interferência, ele apresentará uma queda de temperatura de 0,2 a 1°C/minuto, como decorrência da perda de calor. Como os RNs, principalmente os prematuros, apresentam dificuldades para regular a sua própria temperatura corporal, pois possuem uma produção de calor muito limitada e perdas térmicas maiores quando comparadas com as de um adulto, eles devem ser imediatamente submetidos a um procedimento de secagem e serem colocados em campos previamente aquecidos e que interrompam esse processo. Estas perdas se devem a uma razão desfavorável entre a área da superfície e a massa corporal, pela fina camada de tecido celular subcutâneo e à grande permeabilidade da pele à água (KENNER, 2001; SEGRE, 2002).

2.1 METABOLISMOS DOS RECÉM-NASCIDOS

O nascimento de uma criança prematura representa uma urgência nutricional por apresentar reservas nutricionais para poucos dias e quanto menor o peso ao nascer, menor é sua reserva nutricional (MARTINEZ & CAMELO, 2001). O RN de termo perde uma média de 10% do seu peso de nascimento nos primeiros dias de vida, enquanto o neonato prematuro chega a perder até 20% de sua massa corporal na primeira semana de vida e esgotar rapidamente seus limitados estoques nutritivos (KREBS, FALCÃO & OKAY, 2003).

O esfriamento do RN põe o organismo em intenso esforço energético para elevar a temperatura corpórea e o gasto de glicogênio hepático leva à queima dos tecidos gordurosos (SCHIMITZ, 1995). Esses fatores agravam a situação metabólica e nutricional da criança, muitas vezes incapaz de se alimentar de forma satisfatória (SCHIMITZ, 1995).

A conservação de energia através do suprimento de suporte térmico é crítica para os neonatos, pois o cansaço por frio pode causar (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002): falta de oxigênio; hipoglicemia (nível baixo de açúcar no sangue); acidose metabólica (diminuição do pH do sangue); e queda nos níveis de glicogênio (polissacarídeo de reserva).

Em relação ao peso corporal, o metabolismo normal do RN é aproximadamente o dobro do metabolismo do adulto (GUYTON & HALL, 1998), o que também explica o fato do

débito cardíaco e o volume-minuto respiratório serem duas vezes maiores no recém-nascido (GUYTON & HALL, 1998). Entretanto, como a área da superfície corporal é muito grande em relação à massa corporal, o corpo facilmente perde calor (GUYTON & HALL, 1998). Como consequência, a temperatura corporal dos recém-nascidos, em especial a dos prematuros, cai com facilidade (GUYTON & HALL, 1998). Frente a uma temperatura ambiente baixa, a temperatura corporal até mesmo de bebês normais cai vários graus durante as primeiras horas após o nascimento, retornando ao normal entre sete e oito horas (GUYTON & HALL, 1998). Ainda assim, os mecanismos reguladores da temperatura corporal permanecem precários durante os primeiros dias de vida, possibilitando de início acentuadas variações de temperatura, como mostrado na figura 2.1 (GUYTON & HALL, 1998).

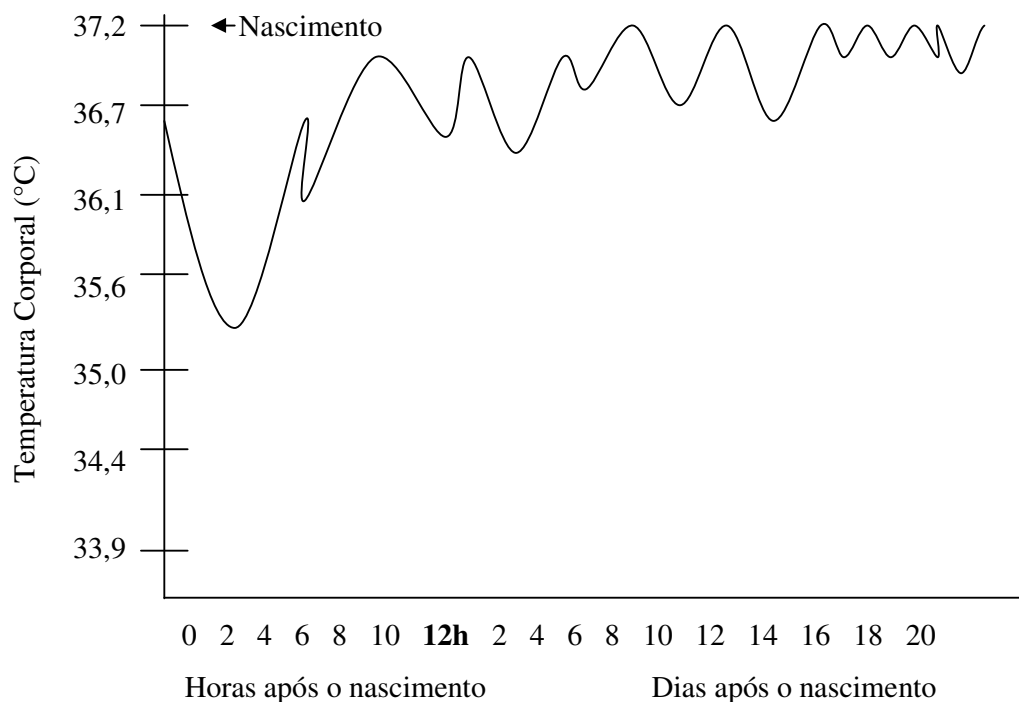


Figura 2.1 – Exemplo de queda da temperatura corporal do bebê imediatamente após o nascimento e variabilidade da temperatura corporal durante os primeiros dias de vida (GUYTON & HALL, 1998).

2.1.1 TERMORREGULAÇÃO DOS RECÉM-NASCIDOS

A temperatura do corpo é regulada quase totalmente por mecanismos de controle nervoso por *feedback*, com quase todos eles operando através de um centro termorregulador localizado no hipotálamo (GUYTON & HALL, 1998). Porém, para que estes mecanismos de

feedback possam atuar, é também necessária presença de detectores de temperatura para determinar quando a temperatura corporal se torna excessivamente quente ou fria (GUYTON & HALL, 1998). O hipotálamo pode ser visto na figura 2.2.

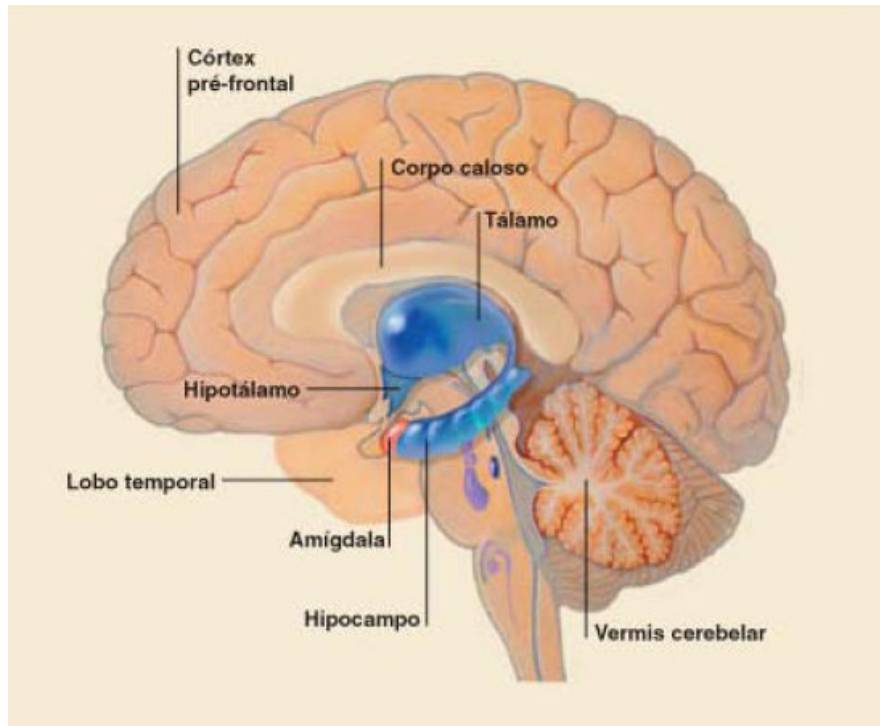


Figura 2.2 – Localização do hipotálamo no cérebro humano (OLIVEIRA, 2007).

Em geral, o hipotálamo pode ser dividido em duas regiões de controle de calor. A parte anterior formada, em sua maior parte, por centros nervosos de função parassimpática, que provoca a redução da temperatura corporal quando estimulada. A parte posterior atua por meio do sistema nervoso simpático e quando estimulado, aumenta a temperatura corporal (GUYTON & HALL, 1998).

A hipotermia ocorre quando a temperatura do corpo for inferior a 36°C (SEGRE, 2002). Ou seja, o ser humano passa a perder calor. Quando a hipotermia começa, a temperatura da pele diminui primeiro. Caso não haja intervenção, a temperatura corpórea cai, o que pode resultar em hipotermia irreversível, levando o RN ao óbito (KENNER, 2001).

Durante a hipotermia, o corpo tenta compensar aumentando a taxa de metabolismo basal (KENNER, 2001). Se esta taxa aumenta acima do nível basal normal, os suprimentos de energia podem se esgotar, levando a acidose (KENNER, 2001). Isso, por sua vez, causa alterações no tecido subcutâneo, diminuindo a perfusão periférica podendo levar a uma lesão

tissular e necrose nas faces e nas nádegas, cessação da motilidade gastrointestinal e hemorragia interna (KENNER, 2001). Pode ocorrer também hipoglicemia à medida que a glicose é metabolizada em um esforço de atender às demandas celulares de energia (KENNER, 2001). Menos comumente a hipotermia causa alterações de coagulação (KENNER, 2001).

Já a hipertermia ocorre quando a temperatura axilar for superior a 37,4°C (SEGRE, 2002). Ou seja, o ser humano passa a produzir calor. Esse é um fenômeno que ocorre mais rapidamente em RN que em adultos (SEGRE, 2002). Se o neonato ficar exposto a fontes externas excessivas de calor, ele pode ter uma hipertermia e os seus principais efeitos são: aumento da temperatura corpórea, apnéia, taquipnéia, taquicardia, irritabilidade, perda de apetite, desidratação, acidose metabólica, entre outras complicações (SEGRE, 2002).

O desafio do neonato em controlar a temperatura inicia-se ao nascer, por estar habituado à temperatura do útero materno. A variação da temperatura no meio externo dificulta a sua termorregulação (SEGRE, 2002). No neonato prematuro, o risco de termorregulação ineficaz é grande devido ele possuir um centro termorregulador imaturo, índice de massa corporal/ superfície reduzido, gordura subcutânea reduzida, incapacidade de tremer ou suar e reservas metabólicas inadequadas (KENNER, 2001).

2.2 PERDAS TÉRMICAS DOS RECÉM-NASCIDOS PARA O MEIO AMBIENTE

O RN possui todas as propriedades de um animal homeotérmico, ou seja, mantém sua própria temperatura corpórea, apesar das variações térmicas do meio ambiente. No entanto, a faixa de variação de temperatura que ele suporta é bem pequena em relação à do adulto (SEGRE, 2002). As perdas térmicas dos RNs para o meio ambiente é um fenômeno puramente físico, ou seja, o calor transfere-se do neonato para o ambiente através dos mesmos princípios físicos descritos pela termodinâmica e termometria (OLIVEIRA, 2007): evaporação, convecção, condução e radiação.

2.2.1 PERDAS DE CALOR POR EVAPORAÇÃO

Os fatores que afetam as perdas por evaporação são: área superficial, pressão de vapor e velocidade do ar (KAREN, 1994).

Quanto maior a área superficial disponível para a evaporação, maior será a perda de calor (OLIVEIRA, 2007). A pressão de vapor influencia diretamente na perda de calor, sendo que quanto maior a pressão de vapor do ar ambiente, menor é a perda por evaporação

(OLIVEIRA, 2007). Devido a evaporação e a temperatura estarem diretamente relacionados, aumentos na temperatura diminuem a pressão de vapor e aumentam a evaporação (OLIVEIRA, 2007). A perda de calor por evaporação acentua-se com o aumento da velocidade do ar e do turbilhonamento do fluxo de ar (OLIVEIRA, 2007).

A perda de calor por evaporação não está unicamente relacionada com a diferença de temperatura na interface entre o corpo do bebê e o meio ambiente (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002). Ela está relacionada à diferença entre os níveis de pressão parcial exercida pela água em cada uma das estruturas da interface pele/ambiente (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002). Imediatamente após o parto, enquanto o RN encontra-se envolto com o líquido amniótico, acredita-se que a perda de calor do RN ocorra principalmente por evaporação (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002). A pressão parcial de água no líquido amniótico sobre a pele do RN é maior que a pressão parcial da água no ar ambiente (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002).

A perda por evaporação depende da umidade do ambiente, portanto para reduzir esta perda deve-se aumentar a umidade do ar no ambiente em que o RN se encontra (SEGRE, 2002). A figura 2.3 ilustra a perda de calor por evaporação.



Figura 2.3 – Perdas de calor por evaporação (RIBEIRO, 2005).

2.2.2 PERDAS DE CALOR POR CONVECÇÃO

A perda de calor por convecção ocorre através da transferência do calor da superfície corpórea para o ar ambiente (SEGRE, 2002). A perda por convecção depende da diferença de temperatura e do fator “vento gelado”, que é introduzido pela velocidade com que o ar está fluindo ao redor do RN (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002).

A convecção ocorre devido ao aquecimento do ar adjacente à superfície da pele, por condução. Ao adquirir a temperatura cutânea, superior a do ar circulante, o ar aquecido eleva-

se (correntes de convecção), dando lugar ao ar com temperatura mais baixa. Assim, o ar entra continuamente em contato com a pele, absorvendo calor (IAIONE, 1999). À medida que se acelera a velocidade do ar ambiente aumentam-se as perdas por convecção (SEGRE, 2002). Esta perda pode ser reduzida através do aumento da temperatura do ar do ambiente em que o corpo se encontra (IAIONE, 1999). A figura 2.4 ilustra a perda de calor por convecção.



Figura 2.4 – Perdas de calor por convecção (RIBEIRO, 2005).

2.2.3 PERDAS DE CALOR POR CONDUÇÃO

Ocorre no contato entre corpos com temperaturas diferentes. O corpo mais quente perde calor para o corpo mais frio, até que ambos atinjam o equilíbrio térmico, isto é, quando as temperaturas dos corpos tornam-se iguais (AGOSTINI, 2003). Geralmente, os objetos que estão em contato com o RN são as roupas, o colchão e a coberta.

Esta perda de calor pode ser reduzida, introduzindo-se entre a pele e o objeto, um material que seja isolante térmico (baixa condutividade térmica) ou aumentando-se a temperatura do objeto em contato (SEGRE, 2002; IAIONE, 1999). A figura 2.5 ilustra a perda de calor por condução.

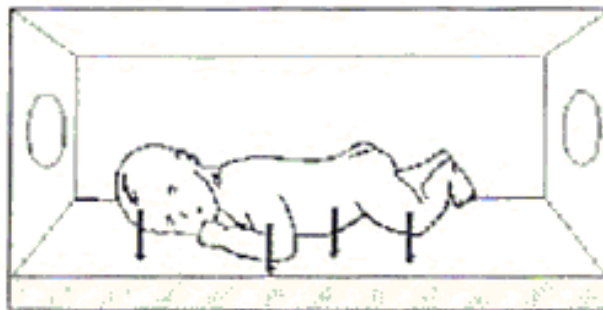


Figura 2.5 – Perdas de calor por condução (RIBEIRO, 2005).

2.2.4 PERDAS DE CALOR POR RADIAÇÃO

Todo corpo dotado de temperatura diferente do zero absoluto perde calor por emissão de radiação eletromagnética de espectro predominantemente infravermelho (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2002). A perda de calor por radiação ocorre a partir da superfície cutânea para superfícies sólidas mais frias e que não estejam em contato com o corpo do RN (SEGRE, 2002).

Dependendo da temperatura do invólucro, a taxa de emissão de calor através da pele de um RN é relativamente constante (KAREN, 1994). A temperatura da pele do RN é tipicamente aquecida em relação às superfícies vizinhas. Assim, o sentido de transferência de calor radiante é da superfície do RN para as superfícies próximas (KAREN, 1994). Esta perda pode ser reduzida através do aumento da temperatura das superfícies presentes no ambiente em que o corpo se encontra (IAIONE, 1999). A figura 2.6 ilustra a perda de calor por radiação.

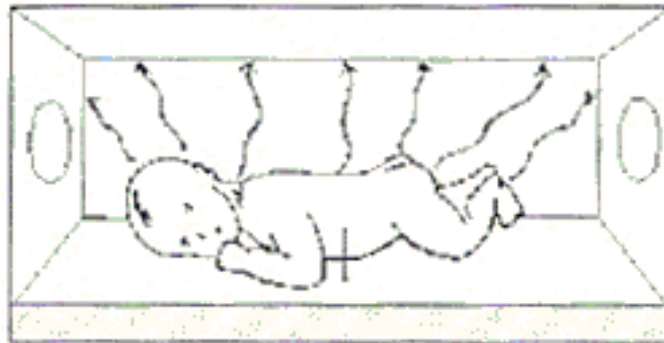


Figura 2.6 – Perdas de calor por radiação (RIBEIRO, 2005).

2.3 CARACTERÍSTICAS DO INTERIOR DE UMA INCUBADORA NEONATAL

Dado o exposto, o cuidado com o recém-nascido, principalmente o prematuro, requer um ambiente termoneutro, ou seja, um ambiente com temperatura e umidade relativa do ar adequadas. Ambiente termoneutro é aquele no qual o RN, com temperatura corporal normal, tem uma taxa metabólica mínima necessária para o seu bom desenvolvimento físico e neurológico (SEGRE, 2002). A faixa de temperatura neutra representa a faixa de mínimo gasto calórico para o neonato e a temperatura normal da pele é de 36-36,5°C (SEGRE, 2002).

Dentro de certos limites, é a menor temperatura para a qual há uma resposta metabólica adequada para repor as perdas de calor. Acima desses limites, verifica-se um

aumento na temperatura corpórea e, também, na taxa metabólica (SEGRE, 2002). Portanto, a faixa termoneutra representa uma faixa térmica de estresse mínimo, a qual é muito estreita em RNs despídos (SEGRE, 2002).

A temperatura ideal para o corpo do recém-nascido tem sido alvo de muitas pesquisas (SEGRE, 2002). No entanto não há um consenso a respeito de qual deveria ser. A tabela 2.1 apresenta recomendações sobre a temperatura aproximada do ar no interior das incubadoras com uma umidade relativa de 30%, baseadas na idade gestacional (SEGRE, 2002).

Tabela 2.1 – Temperatura aproximada do ar no interior da incubadora (SEGRE, 2002).

Idade gestacional (Semanas)	Idade pós-natal (Semanas) – Temperatura em °C						
	1	2	3	4	5	6	7
25	38,0	37,7	37,5	37,2	36,9	36,6	36,3
26	37,7	37,4	37,1	36,8	36,6	36,3	36,0
27	37,3	37,1	36,8	36,5	36,2	35,9	35,7
28	37,0	36,7	36,4	36,2	35,9	35,6	35,3
29	36,7	36,4	36,1	35,8	35,5	35,3	35,0
30	36,3	36,0	35,8	35,5	35,2	34,9	34,6
31	36,0	35,7	35,4	35,1	34,9	34,6	34,3
32	35,6	35,4	35,1	34,8	34,5	34,2	34,0
33	35,3	35,0	34,7	34,5	34,2	33,9	33,6
34	35,0	34,7	34,4	34,1	33,8	33,6	33,3
35	34,6	34,3	34,1	33,8	33,5	33,2	32,9
36	34,3	34,0	33,7	33,4	33,2	32,9	32,6

Segundo a tabela 2.1, a temperatura do ar adequada ao RN depende da sua idade gestacional e da sua idade pós-natal, variando de 32,6°C a 38°C. Os bebês com idade menores requerem temperaturas mais elevadas para se manterem aquecidas e aqueles com idade maiores requerem temperaturas menores. Portanto, a temperatura deve ser controlada para assegurar o conforto térmico do neonato.

A perda de calor por evaporação tem uma relação inversa com a umidade relativa do ar: quanto menor a umidade relativa, maior é a perda por evaporação. Para os recém-nascidos, especialmente para os prematuros, a evaporação, à temperatura de 36°C, é a maior fonte individual de perda de calor para o ambiente (AGOSTINI, 2003). Por esta razão, a umidade relativa do ar no interior das incubadoras deve ser controlada.

O ar atmosférico é uma mistura de gases (nitrogênio, oxigênio, gás carbônico, vapor de água e outros em menor percentagem). A massa de vapor de água por unidade de volume existente no ar atmosférico é chamada de umidade absoluta. Assim, a equação 2.1 define a umidade absoluta (SEARS *et al*, 1997):

$$UA = \frac{MVA}{MA} \quad (2.1)$$

em que UA é a umidade absoluta, MVA é a massa do vapor de água e MA é a massa do ar.

A pressão total exercida pela atmosfera é a soma das pressões parciais exercidas por cada um de seus componentes em separado. A pressão de cada um dos componentes é chamada de pressão parcial. Do exposto acima, obtém-se a equação 2.2 (SEARS *et al*, 1997):

$$PA = \sum PPCC \quad (2.2)$$

onde PA é a pressão atmosférica e PPCC é a pressão parcial de cada componente.

Denomina-se “pressão de vapor de água saturado”, à pressão exercida quando o vapor de água e o líquido existem em equilíbrio dinâmico; isto é, o número de moléculas do vapor que se condensam é igual ao número de moléculas que evaporam. A pressão de vapor de água saturado depende da temperatura. A temperatura na qual o vapor de água de uma amostra se torna saturado é chamado de “ponto de orvalho”. A tabela 2.2 apresenta a pressão parcial exercida pelo vapor de água saturado em função da temperatura (SEARS *et al*, 1997).

Tabela 2.2 – Pressão parcial do vapor de água (SEARS *et al*, 1997).

Temperatura Ambiente (°C)	Pressão do vapor de água saturado (mmHg)
-20	0,8
-10	1,9
0	4,6
10	9,2
20	17,5
30	31,8
40	55,4
50	92,6
60	149,5
70	233,8
80	355,3
90	525,9
100	760,0

Assim, a umidade relativa do ar (equação 2.3) a uma determinada temperatura, é dada pela razão entre a pressão parcial de vapor de água presente no ar e aquela que existiria, caso o ar estivesse saturado de vapor nesta temperatura (SEARS *et al*, 1997):

$$UR\% = \frac{PPVA}{PVAS} \times 100 \quad (2.3)$$

em que UR% é a umidade relativa em percentagem, PPVA é a pressão parcial do vapor de água e PVAS é a pressão do vapor de água saturado.

É importante notar que a umidade relativa depende da quantidade de água presente no ar e da temperatura do ar, tendo em vista que a pressão de vapor de água saturado depende apenas desta última. Assim, se a temperatura do ar aumenta, a pressão do vapor de água saturado é maior, provocando uma redução na umidade relativa (SEARS *et al*, 1997).

A Academia Americana de Pediatria recomenda manter a umidificação em torno de 40% a 50% (SEGRE, 2002).

Além das características de temperatura e umidade relativa do ar no interior de uma IN, existe o sistema de circulação de ar, responsável por aspirar o ar do ambiente externo e tornar homogênea a distribuição de temperatura e umidade e garantir a renovação do oxigênio no ambiente interno (SCHIMITZ, 1995).

2.4 A NORMA NBR IEC 601-2-19

A norma NBR IEC 601-2-19 (Equipamento eletromédico. Parte 2: Prescrições particulares para segurança de incubadoras para recém-nascidos) diz respeito à segurança de incubadoras para RN e modifica e suplementa a NBR IEC 60601-1 (Equipamento eletromédico. Parte 1: Prescrições gerais para segurança). O principal objetivo desta norma é estabelecer os requisitos para incubadoras que minimizem os riscos ao paciente e ao usuário, e especificar os ensaios que possam verificar a conformidade com estes requisitos. A seguir são apresentados os textos das subcláusulas mais importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1.101 – INCUBADORA: EQUIPAMENTO contendo um COMPARTIMENTO DO RN que é provido com meios de controlar o ambiente do RN, principalmente por ar aquecido dentro do COMPARTIMENTO DO RN.

2.1.102 – COMPARTIMENTO DO RN: Gabinete ambientalmente controlado, destinado a conter um RN e com seção (ões) transparente (s) que permita (m) visualizar o RN.

2.1.103 – INCUBADORA COM TEMPERATURA DO AR CONTROLADA (ATC): INCUBADORA na qual a temperatura do ar é controlada automaticamente por um sensor de temperatura do ar a um valor estabelecido pelo usuário.

2.9.103 – TEMPERATURA MÉDIA: A média das leituras de temperatura tomadas em intervalos regulares em qualquer ponto especificado no COMPARTIMENTO DO RN, obtidas durante a CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE.

2.9.104 – TEMPERATURA DE CONTROLE: Temperatura selecionada no controle de temperatura.

2.9.105 – TEMPERATURA DA INCUBADORA: Temperatura do ar em um ponto 10 cm acima do centro geométrico da superfície do colchão, no COMPARTIMENTO DO RN (ver figura 2.7, ponto A).

2.9.106 – TEMPERATURA MÉDIA DA INCUBADORA: A média das leituras da TEMPERATURA DA INCUBADORA tomadas em intervalos regulares, obtidas durante a CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE (ver figura 2.8).

2.10.101 – CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE: Condição alcançada quando a TEMPERATURA DA INCUBADORA não variar em mais de 1°C em um período de 1 h (ver figura 2.8).

4.5 – Temperatura ambiente, umidade e pressão atmosférica: Se não for especificado de outra forma nesta Norma Particular, todos os ensaios devem ser executados a uma temperatura ambiente dentro da faixa de 21°C a 26°C. Requisitos relativamente precisos sobre a exatidão e constância de INCUBADORAS para RN são de grande importância para um tratamento satisfatório do PACIENTE. Considera-se que estes requisitos devam ser tão restritivos quanto o que for em geral tecnicamente possível dentro da faixa de temperatura ambiente que seja normal para INCUBADORAS infantis no alcance desta Norma. De acordo com a Norma a faixa de temperatura ambiente de ensaio é limitada em 21°C a 26°C.

4.6 – Outras condições: Se não for especificado de outra forma, a TEMPERATURA DE CONTROLE deve ser de 34°C ± 1°C, devendo sempre exceder a temperatura ambiente em pelo menos 3°C.

10.2.1 – Condições ambientais: Uma temperatura ambiente entre +20°C e +30°C. Uma velocidade do ar ambiente menor que 0,3 m/s.

50.101 – Durante a CONDIÇÃO DE TEMPERATURA ESTABILIZADA, a TEMPERATURA DA INCUBADORA não deve ficar diferente da TEMPERATURA MÉDIA DA INCUBADORA em mais de 0,5°C. A conformidade deve ser verificada pela medição em TEMPERATURAS DE CONTROLE de 32°C e 36°C em um período de pelo menos 1 h. É reconhecido que a apnéia pode resultar de variações na TEMPRATURA DA INCUBADORA. Embora não existam evidências clínicas que mostrem que as variações de temperatura normalmente encontradas nas INCUBADORAS resultem em apnéia, um valor conservador foi escolhido.

50.102 – Com a INCUBADORA operando como uma INCUBADORA COM TEMPERATURA DO AR CONTROLADA e com a TEMPERATURA DE CONTROLE ajustada para qualquer temperatura dentro de sua faixa, a TEMPERATURA MÉDIA em cada um dos pontos A, B, C, D e E, conforme especificado na instrução de ensaio, não deve diferir da TEMPERATURA MÉDIA DA INCUBADORA em mais de 0,8°C na UTILIZAÇÃO NORMAL. A conformidade deve ser verificada pelo seguinte ensaio: Sensores de temperatura calibrados devem ser colocados em cinco pontos em um plano paralelo à superfície do colchão e a 10 cm acima dela. O ponto A deve ser um ponto 10 cm acima do centro do colchão. Os outros pontos devem ser o centro das quatro áreas formadas pelas linhas, as quais dividem tanto a largura quanto o comprimento em duas partes. A TEMPERATURA MÉDIA em cada um destes cinco pontos deve ser medida em TEMPERATURAS DE CONTROLE de 32°C e 36°C. As diferenças entre os cinco valores medidos e a TEMPERATURA MÉDIA DA INCUBADORA medida devem ser comparadas conforme especificado (ver figura 2.7, pontos A a E).

50.107 – Com uma incubadora operando como uma INCUBADORA COM TEMPERATURA DO AR CONTROLADA, a TEMPERATURA MÉDIA DA INCUBADORA não deve diferir da TEMPERATURA DE CONTROLE por mais que $\pm 1,5^\circ\text{C}$. A conformidade deve ser verificada pela medição da TEMPERATURA MÉDIA DA INCUBADORA a uma TEMPERATURA DE CONTROLE de 36°C e em CONDIÇÃO DE TEMPERATURA ESTABILIZADA. Este requisito assegura que a INCUBADORA opere a uma temperatura tão próxima quanto possível daquela estabelecida pelo USUÁRIO e que, simultaneamente, a temperatura ambiente para as diferentes partes da INCUBADORA é a mais constante possível (ver figura 2.8).

50.108 – O tempo para o aquecimento do EQUIPAMENTO não deve ser diferente em mais de 20% do tempo de aquecimento especificado nas instruções para utilização. A conformidade deve ser verificada pelo seguinte ensaio: Com a TEMPERATURA DE CONTROLE ajustada para 12°C acima da temperatura ambiente, com a tensão de alimentação igual à tensão nominal, e com o EQUIPAMENTO operando como uma INCUBADORA COM TEMPERATURA DO AR CONTROLADA, a INCUBADORA é ligada, iniciando na CONDIÇÃO A FRIO. O tempo para a TEMPERATURA DA INCUBADORA elevar em 11°C, é medido (ver figura 2.8). O controle de umidade se estiver ajustado, deve ser estabelecido para seu valor máximo, valor este não especificado pela norma

e que se subentende que este valor máximo é o valor apontado pela incubadora. O nível de água de um recipiente umidificador deve ser o normal. A água neste recipiente deve estar na temperatura ambiente. É necessário conhecer o tempo de aquecimento para que se prepare a INCUBADORA para sua função.

50.109 – Após o ajuste da TEMPERATURA DE CONTROLE na forma descrita no ensaio a seguir, o excesso da TEMPERATURA DA INCUBADORA não deve ser maior que 2°C e a CONDIÇÃO DE TEMPERATURA ESTABILIZADA deve ser restaurada em 15 minutos. A conformidade deve ser verificada pelo seguinte ensaio: A INCUBADORA é operada como uma INCUBADORA COM TEMPERATURA DO AR CONTROLADA em uma TEMPERATURA DE CONTROLE de 32°C até que a CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE seja alcançada. O controle de temperatura é então ajustado para uma TEMPERATURA DE CONTROLE de 36°C. A sobrelevação da TEMPERATURA DA INCUBADORA e o tempo para alcançar a nova CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE a partir da primeira passagem de 36°C devem ser medidos. Se a CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE é estabelecida sem sobrelevação de temperatura (isto é, não exceder 36°C), o EQUIPAMENTO é julgado capaz de satisfazer as prescrições desta subcláusula.

50.110 – Qualquer valor indicado de umidade relativa deve possuir uma exatidão de $\pm 10\%$ do valor real medido. A conformidade deve ser verificada pela medição da umidade relativa com um dispositivo de medição de umidade no centro do COMPARTIMENTO DO RN (ver figura 2.7, ponto A). A TEMPERATURA DE CONTROLE deve ser ajustada para um valor entre 32°C e 36°C. O conhecimento do nível de umidade relativa é importante para o cuidado respiratório do recém-nascido e para a avaliação dos requisitos de temperatura. A perda de calor pelo recém-nascido é reduzida à medida que a umidade relativa for aumentada, enquanto se mantém a temperatura do ar constante.

103.1 – Unidade de umedecimento: Se um reservatório de água fizer parte integrante da INCUBADORA, ele deve possuir um indicador do nível de água com marcações de “máx.” e “mín.”, se o nível da água no tanque não puder ser visto. O tanque deve ser projetado para poder ser drenado sem inclinar a INCUBADORA. A conformidade deve ser verificada por inspeção. A indicação “mín.” é necessária em virtude da falta de umidade poder ser perigosa para o PACIENTE. A indicação “máx.” é necessária para evitar transbordamento ou derramamento.

104.1 – Velocidade máxima do ar no COMPARTIMENTO DO RN: Na UTILIZAÇÃO NORMAL, a velocidade do ar sobre o colchão não deve exceder 0,35 m/s. A conformidade deve ser verificada pela medição nos quatro pontos especificados na prescrição de ensaio na subcláusula 50.102. Os requisitos para a distribuição de temperatura não devem ser satisfeitos às custas de altas velocidades do ar, que podem aumentar a perda de água por evaporação do PACIENTE. O limite de 0,35 m/s deriva das medições em unidades consideradas como aceitáveis a este respeito.

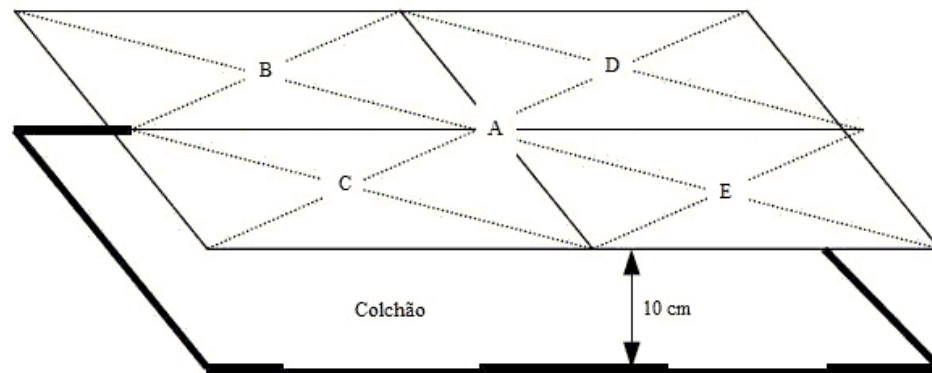


Figura 2.7 – Localização dos sensores de temperatura e umidade relativa (NBR IEC 601-2-19, 1997).

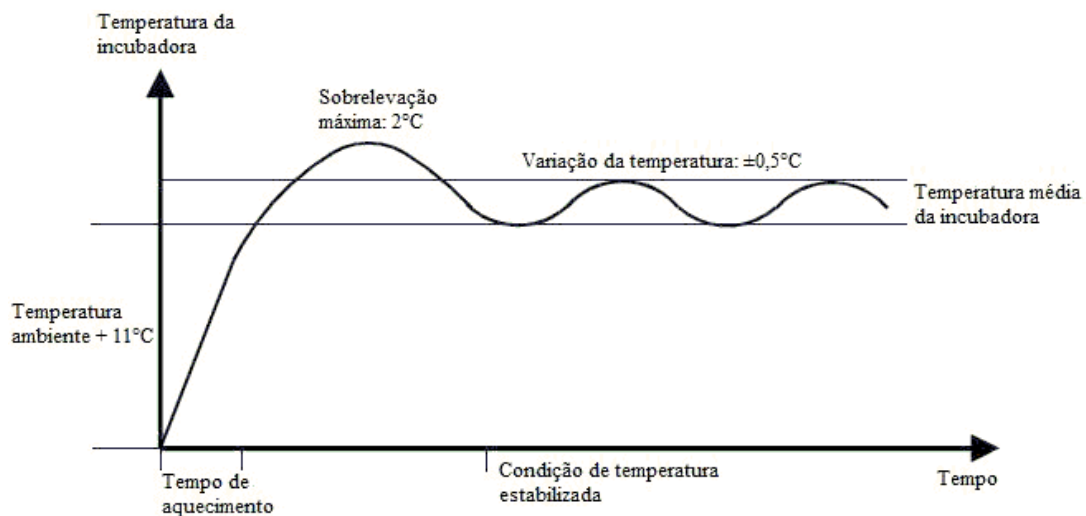


Figura 2.8 – Comportamento da temperatura média nas incubadoras (NBR IEC 601-2-19, 1997).

A certificação de um modelo de incubadora é realizada por uma instituição certificadora que, após verificar a conformidade com a norma, concede ao solicitante

(fabricante), um Certificado de Conformidade de Produto. Assim, o fabricante tem a licença para usar no produto, a Marca de Conformidade de propriedade do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). Essa licença tem validade de cinco anos (IAIONE, 1999).

2.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo foi direcionado para o estudo dos mecanismos fisiológicos, metabolismo e termorregulação dos RNs e das suas formas de perdas térmicas para o ambiente: evaporação, convecção, condução e radiação.

Com base nestas informações foi descrito as principais características do interior de uma IN com relação à temperatura, umidade relativa do ar e ventilação para que o neonato prematuro encontre um ambiente termoneutro e tenha plenas condições de sobrevivência e desenvolvimento físico e neurológico.

Finalmente, foi explanado sobre a norma NBR IEC 601-2-19 que especifica os requisitos de segurança para incubadoras e estabelece as exigências para que as incubadoras minimizem os riscos ao paciente e ao usuário.

CAPÍTULO 3

PROTÓTIPO DESENVOLVIDO E SEU FUNCIONAMENTO

Uma incubadora proporciona um microambiente favorável aos neonatos que necessitam de cuidados especiais. Para tal, propusemos a tarefa de projetar um protótipo de incubadora que cubra as exigências mínimas para a implementação da área de berçário dos hospitais em geral. Para atingir este objetivo, foi realizada uma revisão nos requisitos estabelecidos na Norma Técnica Brasileira NBR IEC 601-2-19, já explanados no capítulo anterior.

3.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE INCUBADORA NEONATAL

Atualmente o avanço da tecnologia médica desenvolveu-se consideravelmente. Um exemplo destas novas aplicações é o desenvolvimento de unidades de suporte de vida neonatal (incubadoras). As incubadoras são projetadas para produzir as condições ambientais adequadas, específicas para cada paciente e utilizadas no tratamento de RNs de alto risco (WEBSTER, 1988, 1998). Quando o bebê está sujeito a condições ambientais não controladas, a temperatura do corpo tende a cair por causa da imaturidade de seu sistema nervoso termorregulatório (WEBSTER, 1988, 1998).

A metodologia para o projeto e construção física e mecânica do protótipo é baseada nos seguintes pontos:

- i.* Projeto e construção do suporte metálico;
- ii.* Projeto e construção do capacete;
- iii.* Projeto e construção da plataforma do colchão;
- iv.* Projeto e construção do reservatório;
- v.* Sistema de entrada e saída de ar. Aquisição e adaptação de um ventilador;
- vi.* Sistema de regulação térmica. Escolha de um resistor de aquecimento;
- vii.* Sistema de umidificação. Escolha de um umidificador.

3.1.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SUPORTE METÁLICO

Feito de alumínio, utilizando perfil do tipo “L” com abas iguais de 2,6 cm de comprimento e 0,3 cm de espessura. Suas dimensões são: 93,5 cm de comprimento; 43,0 cm de profundidade; e 85,0 cm de altura; próprias para alojar um neonato de tamanho médio, ilustrada na figura 3.1. A plataforma “A” está a 80,0 cm de altura do piso e tem a função de sustentar a plataforma do colchão, o colchão e o capacete; a plataforma “B” está a 60,0 cm de altura do piso e tem o objetivo de suportar o reservatório e os circuitos eletrônicos da incubadora; e a plataforma “C” está a 19,0 cm de altura do piso com o propósito de apoiar o umidificador.



Figura 3.1 – Projeto do suporte metálico.

3.1.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO CAPACETE

Em relação ao capacete ou cobertura da incubadora, atualmente os materiais usados nas partes de plástico de uma incubadora são principalmente as resinas, que são fabricadas principalmente por um processo de colagem (ZARAGOZA *et al*, 2001).

Construído de acrílico formando um prisma retangular com dimensões de: 90,0 cm de comprimento; 41,5 cm de profundidade; e 40,5 cm de altura. Sua espessura é de 0,4 cm. Ele é

colocado sobre a plataforma “A” do suporte metálico e tem o objetivo de proteger o RN do ar que circula no meio-ambiente e realizar a isolamento térmica entre o ambiente interno e o meio-ambiente. É construído de um material transparente que permite observar o RN fora da tampa, sem dificuldade. A IN dispõe de 4 portinholas, sendo 3 circulares de 13,5 cm de diâmetro, com 2 localizadas na frente e 1 na lateral; e 1 portinhola retangular de 30,0 cm X 31,5 cm localizada na outra lateral, para permitir o acesso manual ao neonato, evitando a abertura do capacete a fim de reduzir o estresse ambiental. A figura 3.2 ilustra o capacete desenvolvido.



Figura 3.2 – Capacete desenvolvido.

3.1.3 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA PLATAFORMA DO COLCHÃO

A plataforma tem dimensões de: 92,0 cm de comprimento; 42,0 cm de profundidade; e 2,6 cm de altura. Ela é colocada sobre o reservatório e embaixo do capacete. É construída de duas camadas de cortiça, material com ótimas capacidades de isolamento térmica e acústica, leve, resistente ao uso e longevidade, impermeável aos líquidos e gases, quimicamente inerte. Outra função da cortiça na incubadora é fornecer uma superfície sólida para a cama do neonato.

Ela possui ainda 3 orifícios de grande importância para o funcionamento do sistema da incubadora. Um é retangular de dimensões 16,5 cm X 6,5 cm onde ocorrerá a entrada do ar quente que flui do reservatório até o espaço onde se encontra o RN; o outro é circular de 3,3 cm de diâmetro onde ocorrerá a entrada do ar umidificado que flui do umidificador até o espaço onde está o RN; e o último orifício também circular de 3,9 cm de diâmetro onde ocorrerá a saída de excesso de ar do ambiente interno.

3.1.4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO RESERVATÓRIO

O reservatório tem dimensões de: 59,4 cm de comprimento; 23,0 cm de profundidade; e 16,5 cm de altura. Construído de acrílico com 0,4 cm de espessura, ele tem por objetivo abrigar o ventilador e o resistor de aquecimento. O ventilador age sobre o resistor de aquecimento transferindo o fluxo de ar quente do reservatório para o ambiente interno da incubadora, ou seja, o reservatório foi projetado para que assegurasse a eficiência necessária no controle térmico da incubadora. Ele localiza-se embaixo da plataforma do colchão. A figura 3.3 ilustra o reservatório projetado.

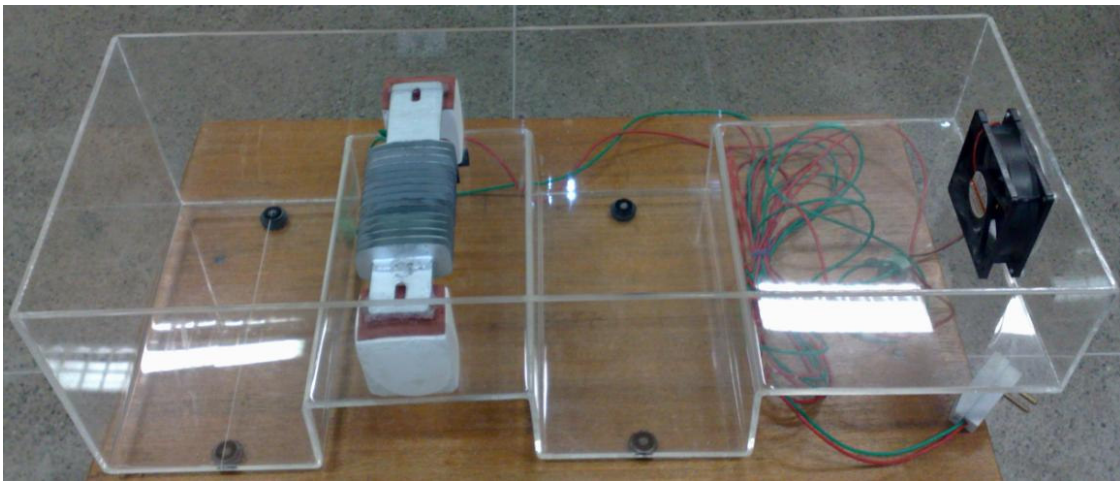


Figura 3.3 – Reservatório projetado.

3.1.5 SISTEMA DE ENTRADA E SAÍDA DE AR. AQUISIÇÃO E ADAPTAÇÃO DE UM VENTILADOR

O sistema de circulação de ar é realizado por um ventilador de 7,4 cm de diâmetro, alimentado com uma tensão contínua de 12 V e com uma potência de 2,76 W, mostrado na figura 3.3. Ele é responsável por mover o fluxo de ar do meio-ambiente através de uma resistência elétrica aquecida, e em seguida, é conduzido através do orifício retangular existente na plataforma do colchão para o interior do capacete. Para a saída de ar existe um orifício circular na outra extremidade da plataforma do colchão responsável de eliminar o acúmulo de Gás Carbônico expirado pelo neonato dentro do capacete. Este ar que sai da IN se mistura com o ar do ambiente externo e entra pelo ventilador, renovando o oxigênio no interior do reservatório, e conseqüentemente, no interior da incubadora. A figura 3.4 mostra a plataforma do colchão com os orifícios de entrada e saída de ar.

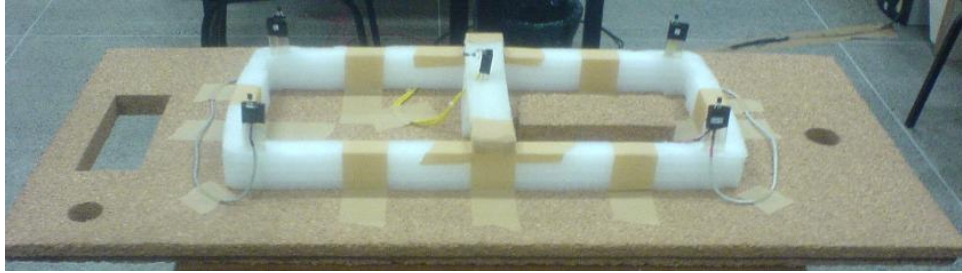


Figura 3.4 – Plataforma do colchão com os orifícios de entrada e saída de ar.

3.1.6 SISTEMA DE REGULAÇÃO TÉRMICA. ESCOLHA DE UM ELEMENTO DE AQUECIMENTO

O sistema de aquecimento é uma resistência elétrica do tipo bainha aletada, com capa e aletas em aço galvanizado e comprimento total de 20,0 cm, como já foi visto na figura 3.3. A principal característica deste tipo de resistência é que ela ajuda na dissipação de calor para o ambiente a ser aquecido. Sua potência elétrica é de 260 W.

3.1.7 SISTEMA DE UMIDIFICAÇÃO. ESCOLHA DE UM UMIDIFICADOR

O sistema de umidificação é um umidificador ultra-sônico e ionizador de ambientes. A tecnologia do ultra-som proporciona uma umidificação mais eficiente em relação ao sistema que é feito através do reservatório interno para água. O umidificador ultra-sônico utiliza um oscilador de alta frequência para quebrar a água em minúsculas partículas. O sistema de ventilação lança essas partículas no ambiente, onde evapora para oferecer a umidade necessária. A ionização do ambiente é feita por um dispositivo interno que ioniza o ar que está saindo pelo aparelho, auxiliando na purificação e descontaminação do ar. Suas principais características técnicas são: frequência do cristal piezoelétrico de 1,7 MHz, potência elétrica de 45 W, alimentação de 220 V de tensão alternada e volume do reservatório de água de 3 L. A figura 3.5 ilustra o umidificador utilizado.

O ar umidificado é conduzido para o capacete através do orifício circular existente na plataforma do colchão, localizado ao lado do orifício retangular, como mostra a figura 3.4. Para isso, foram feitas algumas modificações estruturais no umidificador para atender a necessidade desta aplicação, como uma tubulação de eletroduto de PVC flexível corrugado com 2,0 cm de diâmetro interligando a saída do ar do umidificador com a entrada circular da plataforma do colchão. A figura 3.6 mostra o protótipo de incubadora desenvolvido neste trabalho.



Figura 3.5 – Umidificador.



Figura 3.6 – Incubadora projetada.

3.2 FUNCIONAMENTO DA INCUBADORA NEONATAL

Para o funcionamento do protótipo foram desenvolvidos alguns circuitos eletrônicos encarregados pela operacionalização da incubadora neonatal. Com isso, foram criados circuitos para o controle da temperatura, da umidade relativa do ar e da circulação do ar.

3.2.1 CIRCUITO DE CONTROLE DA TEMPERATURA

O sistema desenvolvido tem a função de acionar o resistor de aquecimento, controlando, assim, a potência entregue à resistência elétrica, e conseqüentemente, fazendo o controle da temperatura desejada ao ambiente da incubadora. A figura 3.7 ilustra o diagrama de blocos do circuito de controle da temperatura.

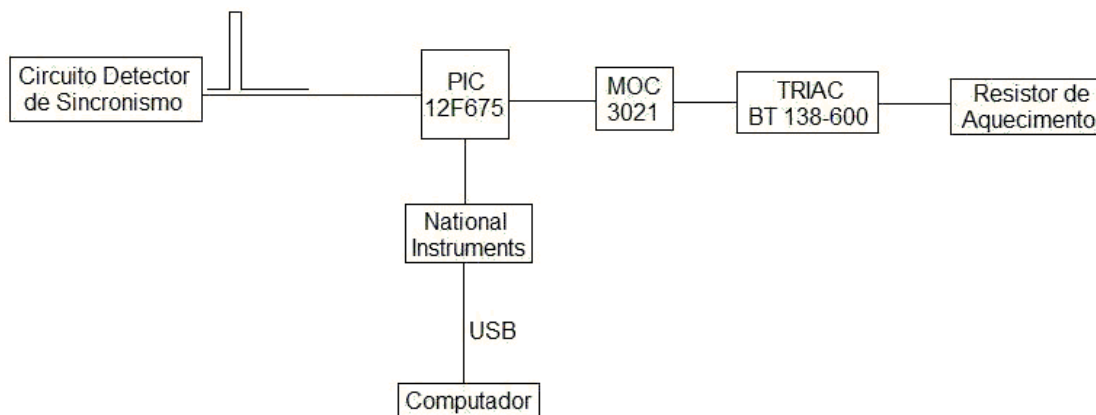


Figura 3.7 – Diagrama de blocos do circuito de controle da temperatura.

Para isso, foi implementado um circuito detector de sincronismo da rede elétrica, como mostra a figura 3.8, responsável por fornecer a tensão que será transformada em sinal de pulso, uma interrupção externa em forma de sinal de PWM com pico máximo de 5V, ao microcontrolador. O fotoacoplador 6N137 é usado como proteção para o microcontrolador utilizado, ou seja, o circuito do microcontrolador não possui contato elétrico com o circuito de potência.

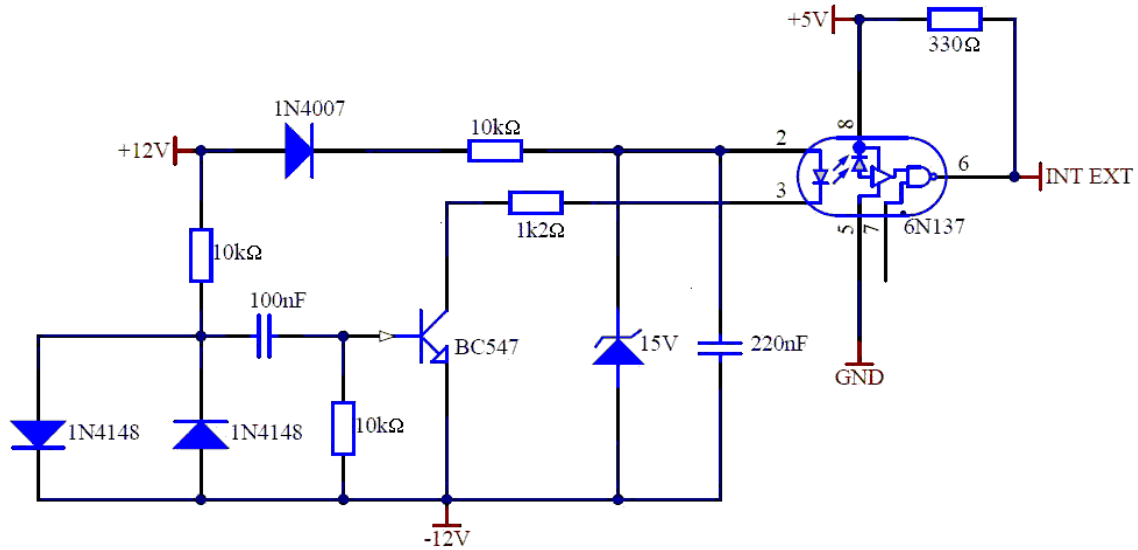


Figura 3.8 – Circuito detector de sincronismo.

O microcontrolador utilizado no circuito de controle da temperatura foi o PIC12F675 fabricado pela Microchip. Este PIC possui como principais características: 2048 bytes de memória de programa FLASH, 64 bytes de memória de dados volátil RAM, 128 bytes de memória de dados não volátil EEPROM, 6 pinos de entrada e/ou saída, 4 canais de entradas de conversores analógico-digitais de resolução de 10 bits, 1 módulo comparador, 1 timer de 8/16 bits. A figura 3.9 mostra o PIC12F675 com suas interligações no circuito de controle da temperatura.

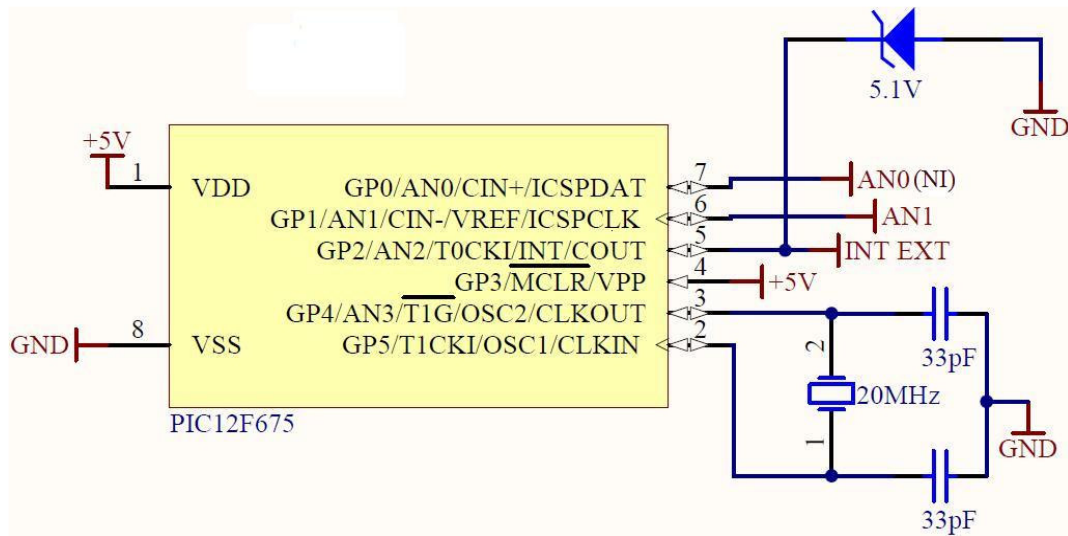


Figura 3.9 – PIC12F675.

A linguagem de programação utilizada no PIC12F675 foi a Assembly. O microcontrolador recebe o sinal de interrupção externa do circuito detector de sincronismo e juntamente com o sistema de aquisição de dados, que será detalhado posteriormente, faz a variação da largura de pulso do sinal de PWM para enviá-lo ao circuito de acionamento de carga CA utilizando MOC3021 e tiristor como mostra a figura 3.10.

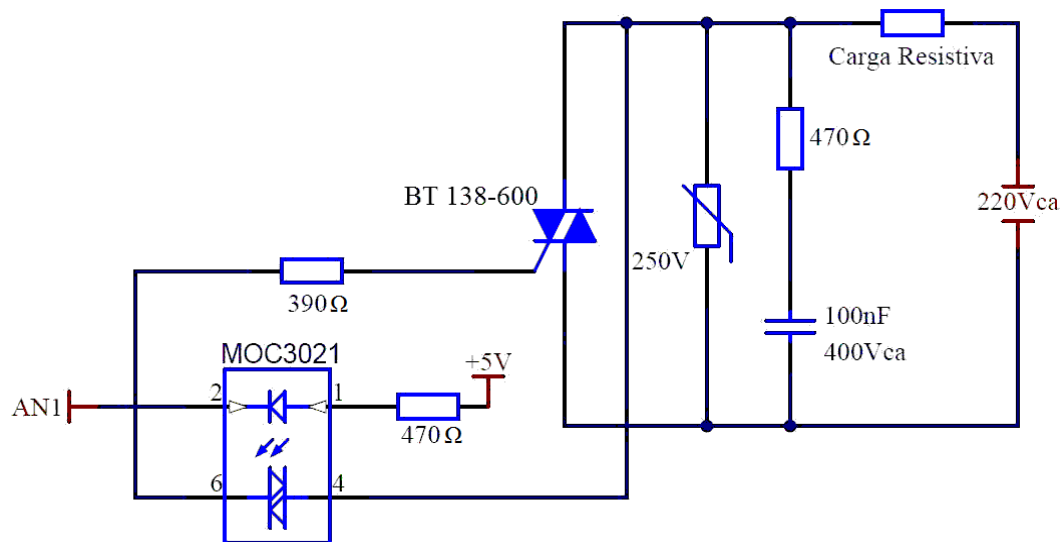


Figura 3.10 – Circuito de acionamento de carga CA utilizando MOC3021 e tiristor.

O sinal enviado pelo PIC aciona o MOC3021, um modelo de fotoacoplador que protege o circuito do PIC do circuito de potência, e que é responsável pelo gatilhamento do TRIAC BT 138-600. Este tiristor controla a corrente alternada da rede elétrica ligada à carga resistiva e, conseqüentemente, controla a potência entregue à carga resistiva em função de um determinado valor do ângulo de disparo do TRIAC.

Para a alimentação do circuito detector de sincronismo utilizou-se um transformador de 220V/24V. Já o fotoacoplador 6N137, o microcontrolador PIC12F675 e o fotoacoplador MOC3021 são alimentados por este mesmo transformador que passa por um retificador de onda completa em ponte e 2 capacitores de 1mF usados como filtros para manter o nível de tensão constante. O último diodo garante o sentido positivo da corrente nos componentes e o regulador de tensão 7805 entrega apenas os 5V de tensão contínua necessários para alimentar estes componentes. Os 2 capacitores de 10nF são usados como filtros para diminuir o ruído na entrada e saída do regulador de tensão e o capacitor de 220μF é usado como filtro para diminuir o ruído na saída do circuito de fonte. A figura 3.11 ilustra o circuito de fonte utilizado para alimentar o circuito de controle da temperatura.

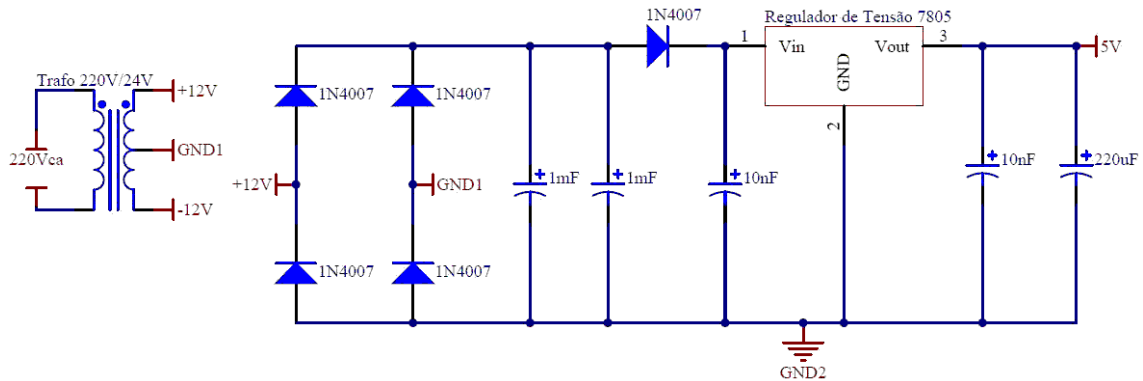


Figura 3.11 – Circuito de fonte utilizado para alimentar o circuito de controle da temperatura.

3.2.2 CIRCUITO DE CONTROLE DA UMIDADE RELATIVA DO AR

O sistema projetado permite a comunicação com o sensor de temperatura e umidade SHT75, sensor este que será detalhado posteriormente, e a respectiva visualização dos seus valores medidos. Esse sistema também tem a função de ajustar a posição do servo-motor, alterando, assim, o ângulo do potenciômetro do umidificador, e conseqüentemente, fazendo o controle da umidade relativa desejada ao ambiente da incubadora. A figura 3.12 ilustra o diagrama de blocos do circuito de controle da umidade relativa do ar.

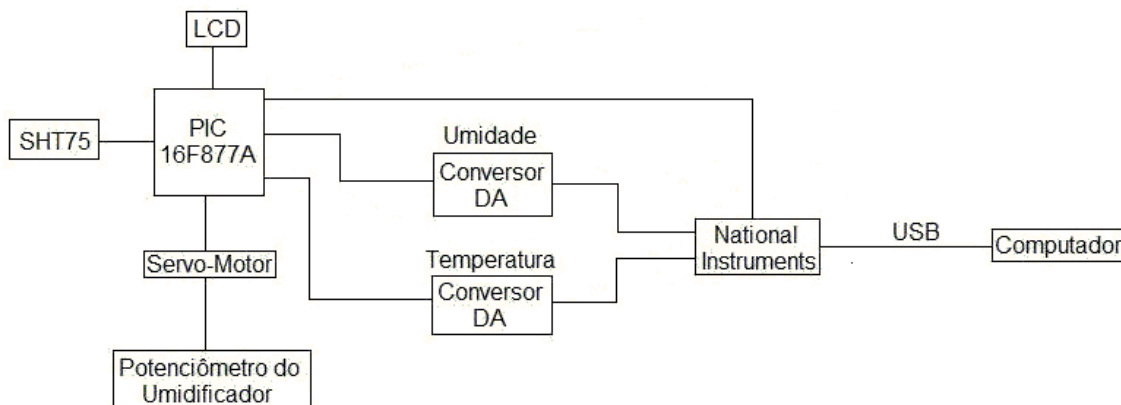


Figura 3.12 – Diagrama de blocos do circuito de controle da umidade relativa do ar.

O microcontrolador utilizado no circuito de controle da umidade foi o PIC16F877A fabricado pela Microchip. Este PIC possui como principais características: 8192 bytes de memória de programa FLASH, 368 bytes de memória de dados volátil RAM, 256 bytes de memória de dados não volátil EEPROM, 33 pinos de entrada e/ou saída, 15 interrupções, 8 canais de entradas de conversores analógico-digitais de resolução de 10 bits, 2 módulos CCP

(Captura, Comparador e PWM), 3 timers (2 de 8 bits e 1 de 16 bits), 2 módulos comparadores analógicos, comunicações serial e paralela. A figura 3.13 mostra o PIC16F877A com o circuito de controle da umidade relativa implementada.

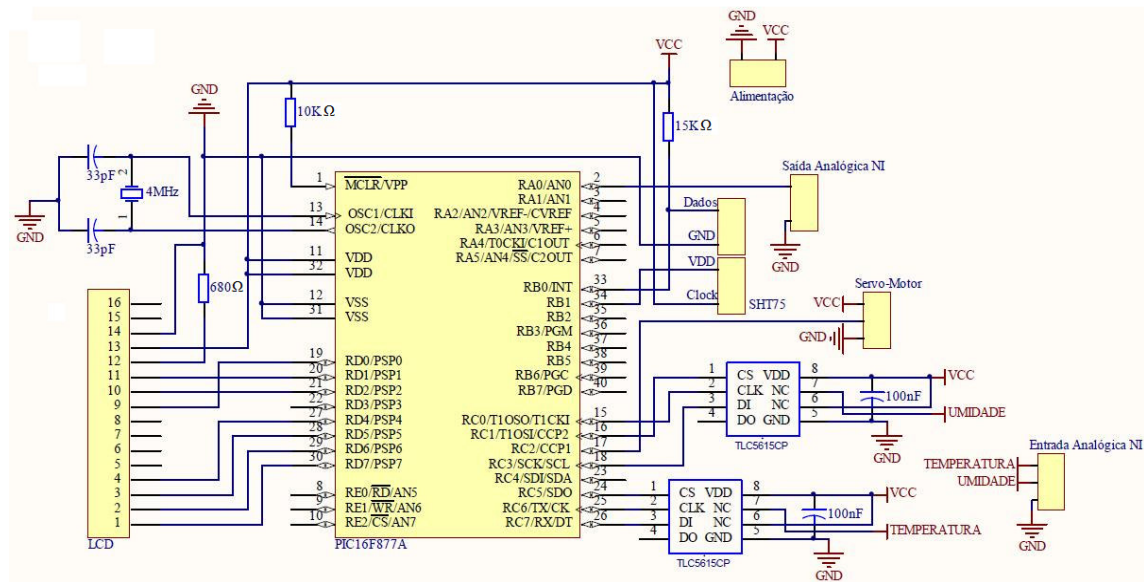


Figura 3.13 – PIC16F877A e o circuito de controle da umidade relativa do ar.

A linguagem de programação utilizada no PIC16F877A foi a C. Inicialmente o microcontrolador coleta os valores de umidade relativa e temperatura do sensor SHT75 e visualiza os mesmos em um LCD alfanumérico padrão de 16 colunas por 2 linhas. A comunicação com o LCD é somente de leitura. Além disso, o PIC envia estes valores aos conversores digital-analógicos TLC5615CP responsáveis pela comunicação dos valores coletados com o sistema de aquisição de dados. O sensor SHT75 tem resolução de saída de 14 bits de dados para temperatura e 12 bits para umidade. Os dados coletados do sensor são convertidos pelo microcontrolador para uma resolução adequada à faixa de trabalho dos conversores digital-analógicos que é de 10 bits.

Em paralelo a essa programação e sem nenhuma interferência neste processo, o microcontrolador configura um sinal de pulso do tipo PWM para enviá-lo ao servo-motor. O PIC recebe um sinal analógico do sistema de aquisição de dados e o converte para um valor decimal de 8 bits, o qual corresponde aos parâmetros para determinar a largura de pulso do sinal de PWM e fazer com que o eixo do servo gire para uma determinada posição.

O servo-motor está acoplado ao potenciômetro do umidificador e o seu eixo possui a liberdade de apenas 180°. Apesar do servo não dar sequer uma volta completa no seu eixo, suas características permitem controlar com precisão o ângulo de posicionamento dentro da faixa. Da sua carcaça saem três fios: tensão de alimentação, referência terra e sinal de controle pelo qual chegam às informações do ângulo em que o servo deve se posicionar.

Assim, o servo-motor posiciona o potenciômetro do umidificador no ângulo desejado pelo sinal de controle e determina o nível de umidificação na incubadora. Quanto maior for a largura de pulso do sinal de PWM maior é a rotação do eixo do servo.

A alimentação do circuito de controle da umidade é feita pelo mesmo circuito de fonte utilizado para alimentar do circuito de controle da temperatura, mostrado na figura 3.11. Ou seja, o microcontrolador PIC16F877A, o sensor SHT75, o LCD, o servo-motor e os conversores digital-analógicos são alimentados pelos 5V de tensão contínua gerados por esta fonte de alimentação.

3.2.3 CIRCUITO DE CONTROLE DA CIRCULAÇÃO DO AR

O sistema construído é composto por um transformador, uma fonte de alimentação e um ventilador. A única função deste circuito de controle é alimentar o ventilador mostrado na figura 3.3. Para isso utilizou-se um transformador de 220V/24V que passa por um retificador de meia onda e 1 capacitor de 1000 μ F para manter a tensão contínua. Em seguida, o regulador de tensão 7812 entrega os 12V de tensão contínua necessários para alimentar o ventilador. O capacitor de 22 μ F é usado como filtro para diminuir o ruído na saída do circuito de fonte. A figura 3.14 ilustra o circuito de fonte utilizado para alimentar o ventilador.

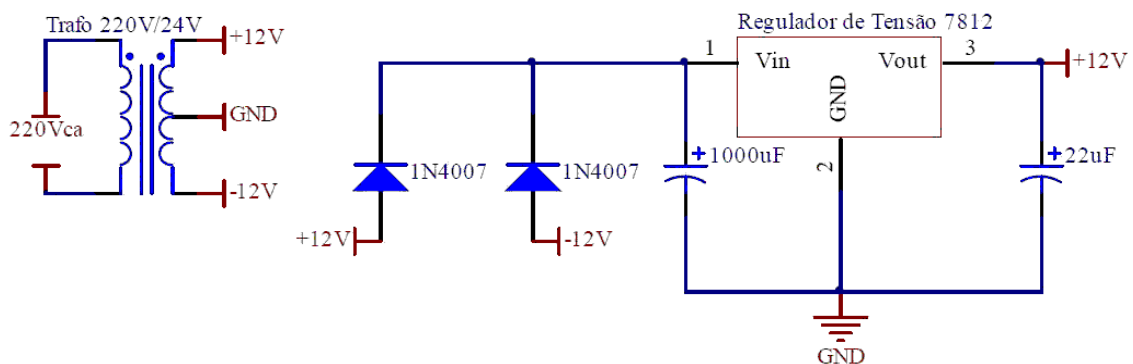


Figura 3.14 – Circuito de fonte utilizado para alimentar o ventilador.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

O monitoramento da temperatura e umidade relativa da incubadora neonatal possibilita o controle do sistema, de forma a adequar o ambiente da IN às normas estabelecidas pela NBR IEC 601-2-19. Para isso, posicionaram-se sensores de temperatura e umidade na incubadora conforme mostrado na Figura 2.7. Medidas de temperatura são realizadas nas 5 localidades (A, B, C, D e E), e medidas de umidade são obtidas no ponto A.

3.3.1 SENSOR DE TEMPERATURA

Medidas de temperatura com boa exatidão são requeridas em muitos sistemas de instrumentação e controle de processos. Na maioria dos casos, devido às respostas não lineares e a baixa amplitude na saída dos sensores, torna-se necessário condicionar o sinal, amplificando-o e compensando as não linearidades, antes de qualquer outro processamento adicional (OLIVEIRA, 2007).

Para as medições de temperatura da incubadora nos pontos B, C, D e E, foram usados sensores de temperatura LM35, produzidos pela *National Semiconductor*®, devido à sua linearidade, sensibilidade, exatidão, baixo custo e sua facilidade de interfaceamento. Sua tensão de saída é linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius com precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$. Este sensor possui 3 terminais: alimentação, referência terra e saída. Quando alimentado com uma tensão entre 4 e 20V, gera em sua saída uma tensão linear de 0 a 1000mV a uma razão de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. O sinal de saída linear e de baixa impedância facilita seu condicionamento. Com o consumo de apenas $60\mu\text{A}$, seu auto-aquecimento é menor que $0,1^{\circ}\text{C}$ no ar parado. A figura 3.15 ilustra o encapsulamento e o circuito do LM35, com a descrição de seus pinos (LM35, 2000).

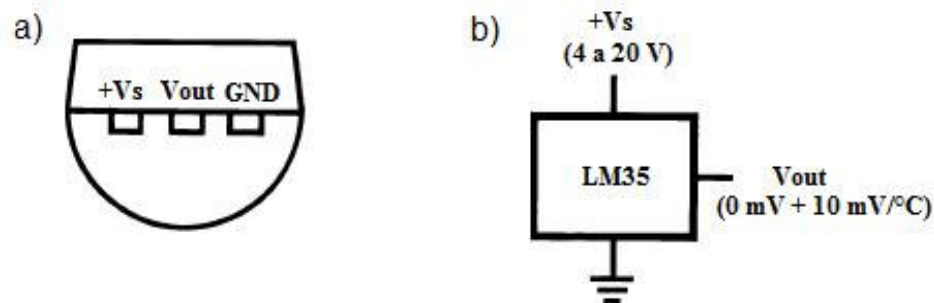


Figura 3.15 – (a) Encapsulamento e (b) Circuito do LM35.

Com o objetivo de melhorar a precisão de leitura do LM35 foi utilizado um amplificador de sinal, de forma que o fundo de escala da medição gere uma tensão de 5V. Como o processo não apresenta temperaturas superiores a 40°C nos pontos onde se pretende medir temperatura, a tensão máxima a ser gerada pelo sensor é de 400mV. Aplicando um ganho de 12,5 em tal sinal de tensão, condiciona-se o sinal de saída do sensor de temperatura para a faixa de 0 a 5V, ideal para a leitura destes valores pelo sistema de aquisição de dados. A figura 3.16 mostra o circuito desenvolvido para condicionar o sinal do sensor de temperatura (GUIMARÃES & OLIVEIRA, 1998).

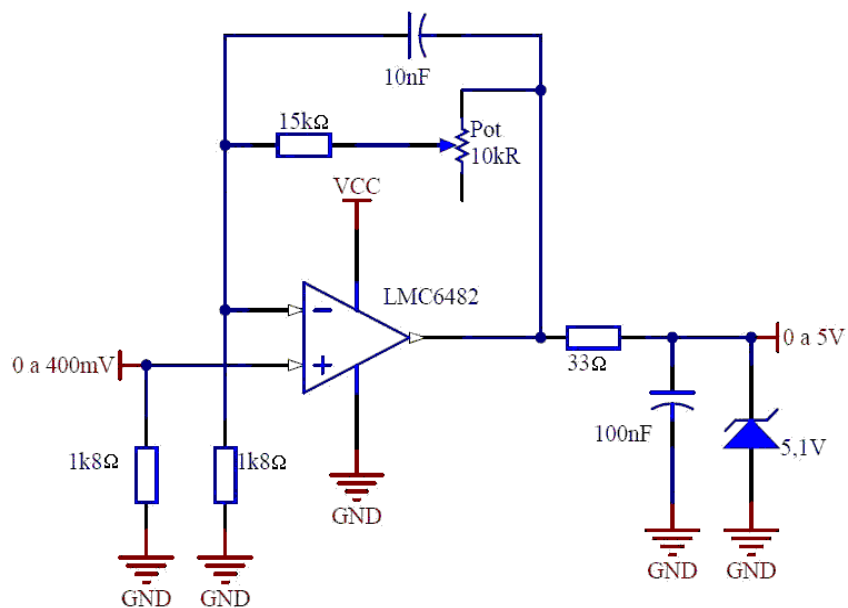


Figura 3.16 – Circuito condicionador de sinal do LM35.

3.3.2 SENSOR DE UMIDADE RELATIVA DO AR E TEMPERATURA

Para efetuar as medidas de umidade relativa e temperatura no ponto A da incubadora foi utilizado o sensor SHT75 da *Sensirion*. A opção por este sensor se deve ao fato do mesmo conter sensores de umidade e temperatura no mesmo encapsulamento, saída digital, baixo consumo de energia, excelente confiabilidade e estabilidade a longo prazo, boa exatidão e resolução (SENSIRION, 2009). As suas principais características aparecem na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais características do SHT75.

Características	Valores
Tensão de alimentação	2,4 a 5,5V
Comunicação	Interface digital <i>wire-2</i>
Potência consumida	8mA a 5V
Faixa de operação (Umidade)	0 a 100%
Exatidão típica (Umidade)	± 1,8%
Resolução típica (Umidade)	0,05%
Faixa de operação (Temperatura)	- 40 a 123,8°C
Exatidão típica (Temperatura)	± 0,3°C
Resolução típica (Temperatura)	0,01°C

A atribuição dos pinos do SHT75 e suas respectivas funções são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Nome dos pinos do SHT75 e suas respectivas funções.

Pino	Nome	Função
1	SCK	Entrada do serial <i>clock</i>
2	VDD	Alimentação de 2,4 a 5,5V
3	GND	Referência terra
4	DATA	Barramento serial bidirecional

O pino de *clock* (SCK) é usado para sincronizar a comunicação entre o microcontrolador e o SHT75. O pino de dados (DATA) é usado para transferir dados de entrada e saída do sensor. Devido ao pino DATA ser *tristate*, deve-se usar um resistor de *pull-up* para manter o barramento em nível lógico alto (SENSIRION, 2009).

A medida de umidade é realizada através de um sensor capacitivo, enquanto a temperatura é medida por um sensor *band-gap*. O SHT75 já vem totalmente calibrado pelo seu fabricante, conforme consta na ficha de dados do sensor. Os coeficientes de ajuste obtidos

pelo fabricante durante a fabricação são armazenados em uma memória interna do sensor, sendo estes empregados para reduzir os erros de medição do mesmo (SENSIRION, 2009).

Como o valor de saída do SHT75 varia de forma não linear com a umidade relativa, o fabricante recomenda o uso da equação 3.1 para compensar esta não linearidade, obtendo-se uma maior exatidão na leitura de umidade (SENSIRION, 2009).

$$UR = -4 + (0,0405 \cdot U_{out}) - (2,8 \cdot 10^{-6} \cdot U_{out}^2) \quad (3.1)$$

em que UR é a umidade relativa em percentagem e U_{out} é a umidade de saída do sensor.

Para temperaturas significativamente diferentes de 25°C, o sinal de umidade tem uma mudança considerável e dessa forma exige uma compensação da temperatura. Por exemplo, à temperatura de 50°C e umidade de 80%, um acréscimo de 1°C produz uma redução de 4% na umidade (SENSIRION, 2005). Para esses tipos de situações o coeficiente de temperatura do sensor passa a ser considerado e a equação 3.2, fornecida pelo fabricante, objetiva corrigir o valor de umidade para alterações da temperatura em graus Celsius, sendo a UR determinada a partir da equação 3.1 (SENSIRION, 2009).

$$UR_{corrigido} = (T - 25) \cdot (0,01 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot U_{out}) + UR \quad (3.2)$$

Como o sensor de temperatura é muito linear para projeto, o fabricante do SHT75 recomenda usar a fórmula apresentada na equação 3.3 para converter a leitura do sensor em temperatura (SENSIRION, 2009).

$$T = -40 + (0,01 \cdot T_{out}) \quad (3.3)$$

onde T é a temperatura em graus Celsius e T_{out} é a temperatura de saída do sensor.

3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho é feito através da placa de aquisição de dados NI USB-6009 fabricada pela National Instruments. As suas principais características são: 8 canais de entradas analógicas de 14 bits e com a velocidade de 48KS/s, 2 canais de saídas analógicas de 12 bits e com a velocidade de 150S/s, 12 linhas TTL digitais de entradas/saídas, 1 contador de 5MHz e 32 bits de resolução, trigger digital e interface via USB com o computador (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008). Na figura 3.17 está representada a placa NI USB-6009.



Figura 3.17 – Placa NI USB-6009.

O sistema de aquisição de dados tem diversas funções no projeto desenvolvido. No circuito de controle da temperatura, a placa NI USB-6009 tem os objetivos de enviar ao microcontrolador PIC12F675 os valores que alteram a largura de pulso do sinal de PWM que aciona a resistência elétrica. Já no circuito de controle da umidade relativa do ar, a placa tem os objetivos de coletar os valores do sensor SHT75 convertidos em sinais analógicos pelos conversores digital-analógicos. Além disso, ela envia ao microcontrolador PIC16F877A os valores que alteram a largura de pulso do sinal de PWM que aciona o servo-motor e adquire os valores fornecidos pelos sensores de temperatura LM35.

A comunicação do sistema de aquisição de dados com o computador acontece via USB. No computador utilizou-se o programa MATLAB para fazer a interface com a placa NI USB-6009. A placa recebe os sinais de tensão dos sensores LM35 e SHT75 na sua entrada analógica e através do MATLAB é feita a transformação destes sinais para graus Celsius na medida de temperatura e percentagem na medida de umidade relativa. Por outro lado, a placa

recebe do MATLAB valores que alteram a largura de pulso do sinal de PWM e através da sua saída analógica se comunicam com os PIC12F675 e PIC16F877A, responsáveis pelo acionamento da resistência elétrica e do servo-motor, respectivamente.

3.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo abordou o protótipo de incubadora neonatal desenvolvido neste projeto e o seu funcionamento através dos circuitos de controle da temperatura, umidade relativa do ar e circulação de ar. O circuito de controle da temperatura tem a função de aquecer o ambiente da IN utilizando uma resistência elétrica. Já o circuito de controle da umidade tem o objetivo de umidificar o ambiente através de um umidificador. O circuito de controle da circulação de ar tem a finalidade de tornar homogênea a temperatura e umidade no interior da incubadora, além de proporcionar a renovação do ar usando para isso um ventilador.

Em seguida mostrou-se a instrumentação eletrônica da IN composta por sensores de temperatura LM35 e sensor de umidade relativa do ar e temperatura SHT75. Como o próprio nome já o diz, eles são utilizados para o monitoramento da temperatura e umidade no interior da incubadora. E por último, descreveu-se o sistema de aquisição de dados usado no protótipo e sua interface.

CAPÍTULO 4

PROJETO DE CONTROLADORES PI MULTIVARIÁVEIS

Atualmente métodos de identificação descentralizados que utilizam a resposta ao degrau e resultam em uma matriz completa de função de transferência têm sido propostos (LI *et al*, 2005; MEI *et al*, 2005). A grande vantagem destes métodos é que são capazes de representar o sistema em todo o intervalo de frequência de trabalho com simplicidade e pouco conhecimento à priori além de favorecer a utilização de técnicas de projeto de controladores bem estabelecidas (LI *et al*, 2005).

Para proporcionar um ambiente térmico menos agressivo, os recém-nascidos prematuros são mantidos em incubadoras. Os elementos deste ambiente que podem ser controlados incluem: temperatura, umidade relativa do ar, circulação de ar, oxigênio, luz e nível sonoro. Neste trabalho foi proposto o controle da temperatura e umidade de uma incubadora, que são dois dos principais fatores que mais influem no bem estar e no completo desenvolvimento de um recém-nascido prematuro.

Como neste sistema se tem mais de uma variável a ser controlada, ele é dito multivariável (MIMO – Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas). Grande parte dos processos industriais é de natureza multivariável e eles estão presentes no nosso cotidiano. Uma das características mais importante a ser considerada no projeto de sistemas MIMO é a interação entre as malhas, ou seja, uma variável de entrada pode afetar uma ou mais variáveis de saída (SKOGESTAD & POSTLETHWAITE, 2005). O conhecimento desta interferência evita que o projetista de sistemas de controle defina os controladores de forma independente, e, agindo desta forma, leve o sistema à instabilidade (SKOGESTAD & POSTLETHWAITE, 2005).

Pensando nisso, foram propostos neste capítulo dois métodos de controladores proporcional-integral (PI) para controlar a temperatura e a umidade de uma incubadora. O controlador PI é de fácil manejo e já se encontra bem difundido na teoria de controle moderno (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995). Os métodos propostos foram o método modificado de *Ziegler-Nichols* e o método BLT (*Biggest Log-Module Tuning*) (LUYBEN, 1986; MONICA *et al*, 1988; ALMEIDA, 2003; XIONG *et al*, 2006).

4.1 SISTEMAS DE CONTROLE MULTIVARIÁVEL (MIMO)

O objetivo de um sistema de controle é forçar um dado grupo de variáveis do processo a se comportar do modo planejado e prescrito por meio da satisfação de determinados requisitos no domínio do tempo ou da frequência ou sempre buscando o melhor desempenho através de índices de otimização (ZHU, 2001). Os engenheiros de controle de processos modelam os problemas de acordo com o seu conhecimento no assunto e assumindo certas condições de operação (ZHU, 2001).

Do ponto de vista do controle, diferentes tipos de variáveis interagem em um processo de modo a produzirem variáveis observáveis, também chamadas saídas ou *outputs*. O processo é também afetado por variáveis externas a ele. Variáveis externas que podem ser manipuladas são chamadas de entradas do processo ou *inputs*. Outro tipo de variáveis externas são os chamados distúrbios, que constituem perturbações ao funcionamento normal do sistema. Um sistema, por sua vez, é dito dinâmico quando o valor instantâneo da saída depende não somente do valor atual desta, mas também dos valores passados da mesma (ZHU, 2001).

Para a aplicação da teoria do controle moderno é necessário utilizar, no caso contínuo, modelos matemáticos que descrevam a relação entrada-saída dos sistemas por meio de equações diferenciais (OGATA, 2003). Um sistema de controle MIMO é aquele caracterizado por possuir várias entradas e várias saídas, conseqüentemente várias malhas de controle que interagem entre si. Neste caso estamos habituados a trabalhar com matriz de transferência (OGATA, 2003).

Considera-se então, um sistema multivariável com j entradas u_1, u_2, \dots, u_j e i saídas y_1, y_2, \dots, y_i . Neste caso, tem-se que os vetores y de saída e u de entrada são dados por (OGATA, 2003; FRANKLIN, POWELL & EMAMI-NAEINI, 2006; SKOGESTAD & POSTLETHWAITE, 2005):

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix} \text{ e } u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_j \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Considerando um sistema linear, controlável e observável a representação na forma de matriz de transferência é dado por:

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1j}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2j}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{i1}(s) & G_{j2}(s) & \cdots & G_{ij}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_j(s) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A equação 4.3 fornece como resultado uma matriz de transferência $G(s)$ de ordem ixj e, cada elemento individual $G_{ij}(s)$ de $G(s)$ representa a função de transferência da respectiva malha de controle $y_i - u_j$ que, por sua vez, relaciona a variável manipulada u_j à variável controlada y_i (OGATA, 2003; FRANKLIN, POWELL & EMAMI-NAEINI, 2006; SKOGESTAD & POSTLETHWAITE, 2005).

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (4.3)$$

A figura 4.1 a seguir mostra um exemplo de sistema multivariável de ordem dois (TITO – Duas Entradas e Duas Saídas). As referências r_1 e r_2 são as variáveis de entrada do sistema, enquanto que as variáveis controladas y_1 e y_2 são as variáveis de saída. As variáveis manipuladas u_1 e u_2 são os sinais de comando provenientes dos controladores descentralizados G_{C1} e G_{C2} respectivamente. É possível observar que as malhas interagem entre si e que o sistema é mais complexo se comparado ao caso dos sistemas monovariáveis (SISO – Uma Entrada e Uma Saída) (SKOGESTAD & POSTLETHWAITE, 2005).

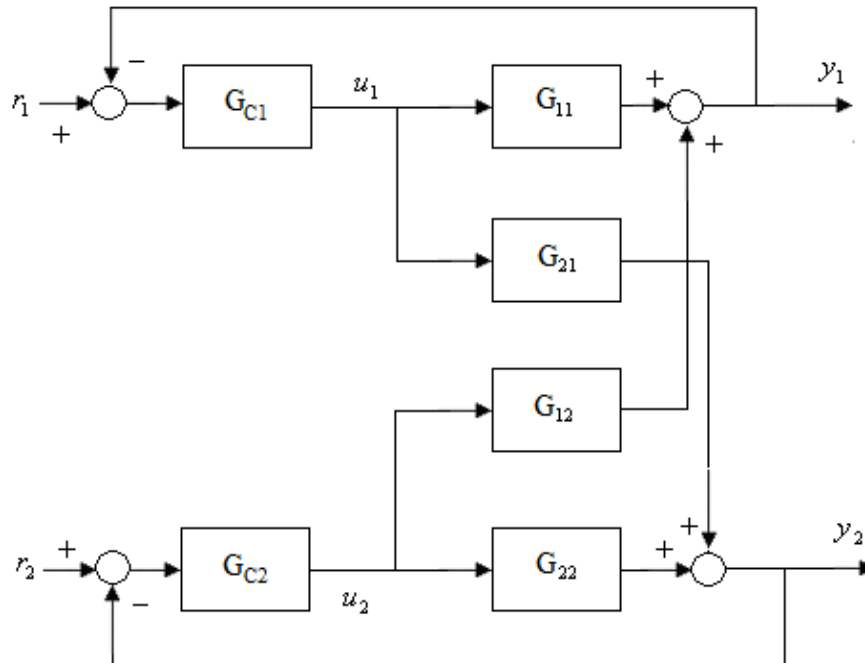


Figura 4.1 – Sistema multivariável 2x2.

Dos métodos de projeto de sistemas de controle multivariáveis descentralizados, o projeto seqüencial corresponde a um dos procedimentos mais utilizados na prática (O'REILLY & LEITHEAD, 1991; CHIU & ARKUN, 1992; LOH, HANG, QUEK & VASNANI, 1993; SHEN & YU, 1994; HOVD & SKOGESTAD, 1994; SHIU & HWANG, 1998). No algoritmo seqüencial, o projeto MIMO é decomposto em uma seqüência de projetos monovariáveis de forma que apenas uma malha de controle SISO é sintonizada por vez. As vantagens desta forma de projeto são (ALMEIDA, ALBUQUERQUE & COELHO, 2003):

i. a dinâmica real das malhas do processo é identificada levando em conta as interações entre malhas;

ii. cada passo do projeto envolve a síntese de apenas um controlador SISO;

iii. se a estabilidade é garantida durante o projeto seqüencial das malhas de controle, o sistema se mantém estável mesmo com a perda de serviço de malhas de controle;

iv. durante a partida do sistema a estabilidade é garantida se as malhas de controle são postas em operação na ordem em que foram projetadas.

Algumas desvantagens podem ser citadas (ALMEIDA, ALBUQUERQUE & COELHO, 2003):

- i.* o controlador final pode depender da ordem em que as malhas foram projetadas;
- ii.* desde que o projeto de uma malha subsequente pode influenciar no projeto da malha já projetada, é necessário o reprojeto das malhas até a convergência ser atingida;
- iii.* a função de transferência entre entrada e saída em um passo sequencial pode conter zeros instáveis que não correspondem aos zeros de transmissão da função de transferência do processo.

Uma forma de minimizar as deficiências (*i*) e (*ii*) é projetar malhas mais rápidas, desde que são menos sensíveis aos efeitos das malhas mais lentas. O problema (*iii*) pode afetar a ordem de projeto das malhas para garantir a estabilidade do sistema. Este problema também é minimizado se malhas mais rápidas são projetadas e postas em operação. O sucesso do projeto sequencial depende de como os problemas citados são tratados (CHIU & ARKUN, 1992; SHEN & YU, 1994; HOVD & SKOGESTAD, 1994; SHIU & HWANG, 1998; SEMINO & SCALI, 1998).

4.2 IDENTIFICAÇÃO SEQUENCIAL A PARTIR DO MÉTODO DE RESPOSTA AO DEGRAU PARA UM SISTEMA TITO

A identificação de um processo multivariável para o propósito de controle pode ser realizada em malha aberta ou fechada. Em ambos os casos é necessário a excitação do processo de forma que seja possível a extração de informações úteis sobre sua dinâmica (COELHO, 2004). Na identificação em malha aberta sinais impulsivos ou degraus são geralmente utilizados como excitação (CHOI *et al*, 2000). Na identificação em malha fechada a maioria das técnicas existentes é no domínio da frequência cujo intervalo de interesse se estende de zero à frequência crítica (WANG & CAI, 2003). Desde que a identificação em malha fechada provoca menos perturbação no processo, geralmente esta forma de identificação é preferida (LI *et al*, 2005). Nesta dissertação o método de identificação sequencial a partir da resposta ao degrau em malha fechada é utilizado na fase de identificação (LI *et al*, 2005).

Considerando o sistema TITO da figura 4.2, na qual R_i , E_i , U_i e Y_i , $i, j=1,2$, são respectivamente os sinais de referências, erros, controles e saídas do processo em termos da Transformada de Laplace.

$$\begin{aligned}
 Y_1(s) &= G_{11}(s)G_{C1}(s)E_1(s) + G_{12}(s)G_{C2}(s)E_2(s), \\
 Y_2(s) &= G_{21}(s)G_{C1}(s)E_1(s) + G_{22}(s)G_{C2}(s)E_2(s), \\
 E_1(s) &= R_1(s) - Y_1(s), \\
 E_2(s) &= R_2(s) - Y_2(s).
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

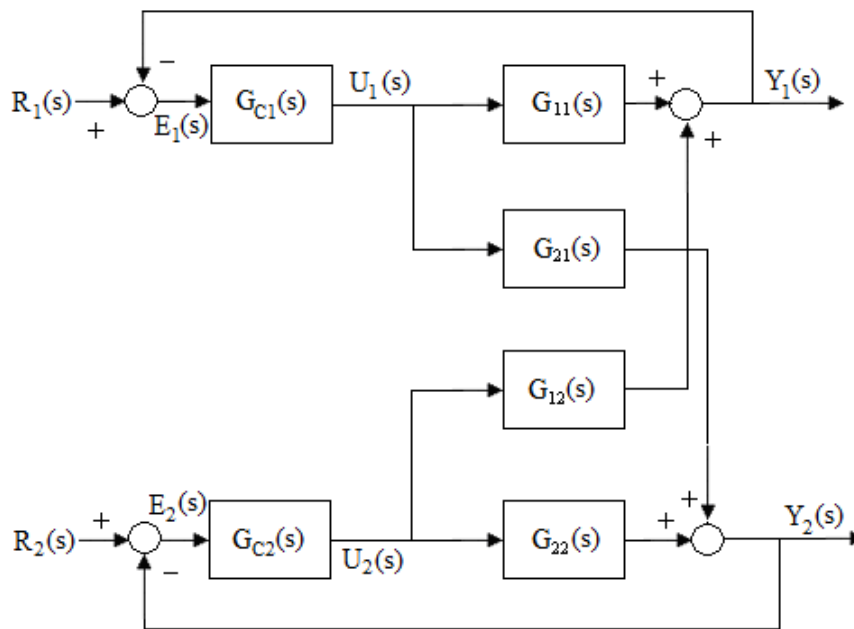


Figura 4.2 – Sistema de controle TITO em malha fechada.

As condições iniciais para o sistema quando $t=0$, são de forma ilustrativa representadas na figura 4.3, sendo

$$\begin{aligned}
 r_1(0) &= r_1^0, \\
 r_2(0) &= r_2^0, \\
 y_1(0) &= y_1^0, \\
 y_2(0) &= y_2^0, \\
 e_1(0) &= e_1^0, \\
 e_2(0) &= e_2^0.
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

O procedimento de identificação é composto de dois passos:

i. provoca-se uma variação da referência na malha 1 de r_1^0 para $r_1^1(t)$ mantendo-se r_2 constante, espera-se o sistema atingir o regime e armazena-se os sinais de erros para as duas malhas. A figura 4.3 apresenta como este procedimento é feito. As equações incrementais a partir do estado inicial para o primeiro estado são dadas após a figura 4.3;

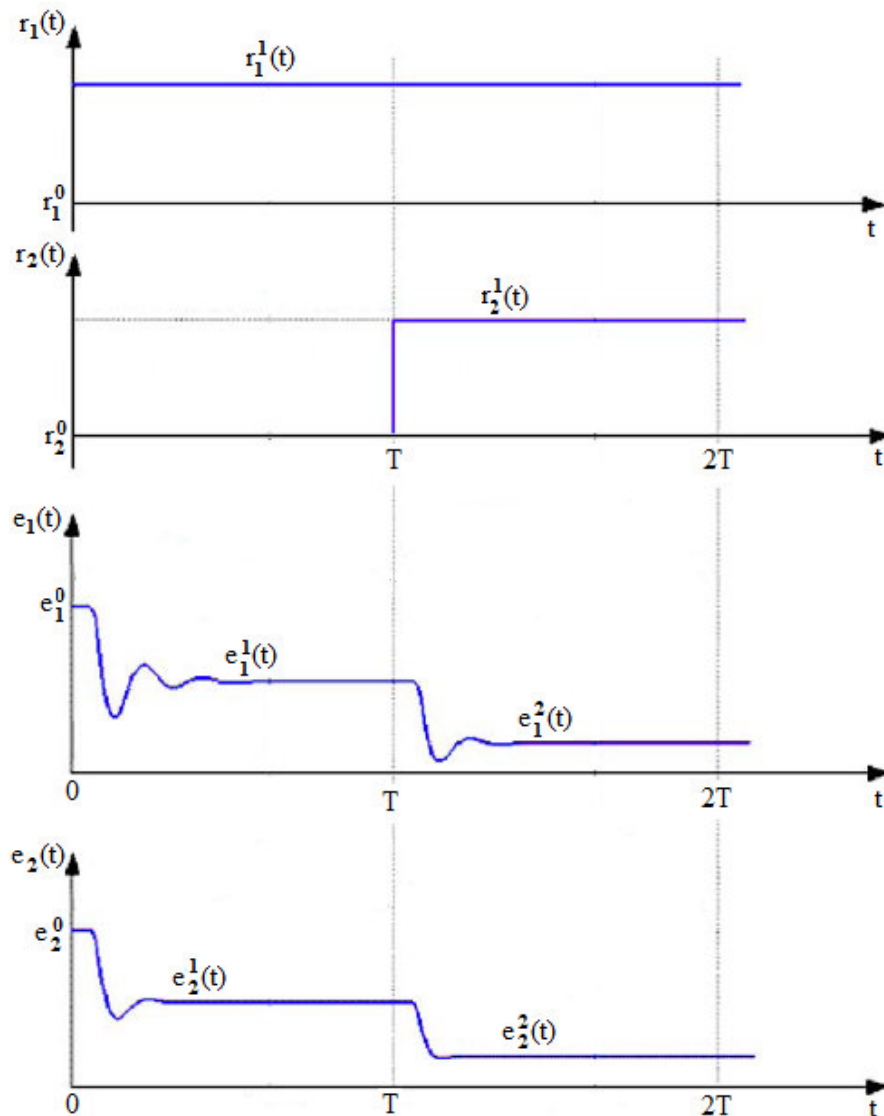


Figura 4.3 – Sinais de excitação do sistema TITO.

Do teste de resposta ao degrau, figura 4.3, as variações no domínio do tempo para os sinais do erro de realimentação, da referência e da variável de saída no intervalo $t < T$ podem ser representadas para a malha 1 por:

$$\Delta e_1^1(t) = \Delta r_1^1(t) - \Delta y_1^1(t), \quad (4.6a)$$

sendo

$$\Delta r_1^1(t) = r_1^1(t) - r_1^0, \quad (4.6b)$$

$$\Delta y_1^1(t) = y_1^1(t) - y_1^1. \quad (4.6c)$$

Considerando agora o intervalo de tempo $t > T$:

$$\Delta e_1^2(t) = \Delta r_1^2(t) - \Delta y_1^2(t), \quad (4.7a)$$

sendo

$$\Delta r_1^2(t) = r_1^2(t) - r_1^1(T), \quad (4.7b)$$

$$\Delta y_1^2(t) = y_1^2(t) - y_1^1(T). \quad (4.7c)$$

As variações podem ser representadas na forma da Transformada de Laplace como:

$$\Delta Y_1^1(s) = G_{11}(s)G_{C1}(s)\Delta E_1^1(s) + G_{12}(s)G_{C2}(s)\Delta E_2^1(s), \quad (4.8a)$$

$$\Delta Y_2^1(s) = G_{21}(s)G_{C1}(s)\Delta E_1^1(s) + G_{22}(s)G_{C2}(s)\Delta E_2^1(s), \quad (4.8b)$$

sendo

$$\Delta E_1^1(s) = (R_1^1(s) - R_1^0(s)) - (Y_1^1(s) - Y_1^0(s)) = \Delta R_1(s) - \Delta Y_1^1(s), \quad (4.8c)$$

$$\Delta E_2^1(s) = -(Y_2^1(s) - Y_2^0(s)) = -\Delta Y_2^1(s). \quad (4.8d)$$

ii. o procedimento realizado para a malha 1 é então repetido para a malha 2 e as equações incrementais a partir do primeiro estado para o segundo estado podem ser escritas na forma da Transformada de Laplace como:

$$\Delta Y_1^2(s) = G_{11}(s)G_{C1}(s)\Delta E_1^2(s) + G_{12}(s)G_{C2}(s)\Delta E_2^2(s), \quad (4.9a)$$

$$\Delta Y_2^2(s) = G_{21}(s)G_{C1}(s)\Delta E_1^2(s) + G_{22}(s)G_{C2}(s)\Delta E_2^2(s), \quad (4.9b)$$

sendo

$$\Delta E_1^2(s) = -(Y_1^2(s) - Y_1^1(s)) = -\Delta Y_1^2(s), \quad (4.9c)$$

$$\Delta E_2^2(s) = (R_2^2(s) - R_2^0(s)) - (Y_2^2(s) - Y_2^1(s)) = \Delta R_2(s) - \Delta Y_2^2(s). \quad (4.9d)$$

Combinando-se as equações 4.8a, 4.8b, 4.9a e 4.9b na forma matricial resulta:

$$Y = AX, \quad (4.10a)$$

sendo

$$Y \triangleq \begin{bmatrix} \Delta Y_1^1(s) \\ \Delta Y_2^1(s) \\ \Delta Y_1^2(s) \\ \Delta Y_2^2(s) \end{bmatrix}; \quad X \triangleq \begin{bmatrix} G_{11}(s) \\ G_{12}(s) \\ G_{21}(s) \\ G_{22}(s) \end{bmatrix}; \quad (4.10b)$$

$$A \triangleq \begin{bmatrix} G_{C1}(s)\Delta E_1^1(s) & G_{C2}(s)\Delta E_2^1(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{C1}(s)\Delta E_1^1(s) & G_{C2}(s)\Delta E_2^1(s) \\ G_{C1}(s)\Delta E_1^2(s) & G_{C2}(s)\Delta E_2^2(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{C1}(s)\Delta E_1^2(s) & G_{C2}(s)\Delta E_2^2(s) \end{bmatrix}.$$

Sendo A não singular para um sistema TITO, X pode ser determinado por:

$$X = A^{-1}Y \quad (4.11)$$

Substituindo as equações 4.8c, 4.8d, 4.9c, 4.9d e 4.10b em 4.11 com $\Delta U_i^j(s) = G_{Ci}(s)\Delta E_i^j(s)$, $i, j=1,2$ desacopla-se o sistema TITO em quatro subsistemas SISO dados pela equação 4.12:

$$\begin{aligned} G_{11}(s) &= \frac{\Delta Y_1^1(s) \cdot \Delta U_2^2(s) - \Delta Y_1^2(s) \cdot \Delta U_2^1(s)}{\Delta U_1^1(s)\Delta U_2^2(s) - \Delta U_1^2(s)\Delta U_2^1(s)} \triangleq \frac{Y_{11}(s)}{U(s)}, \\ G_{12}(s) &= \frac{\Delta Y_1^2(s) \cdot \Delta U_1^1(s) - \Delta Y_1^1(s) \cdot \Delta U_1^2(s)}{\Delta U_1^1(s)\Delta U_2^2(s) - \Delta U_1^2(s)\Delta U_2^1(s)} \triangleq \frac{Y_{21}(s)}{U(s)}, \\ G_{21}(s) &= \frac{\Delta Y_2^1(s) \cdot \Delta U_2^2(s) - \Delta Y_2^2(s) \cdot \Delta U_2^1(s)}{\Delta U_1^1(s)\Delta U_2^2(s) - \Delta U_1^2(s)\Delta U_2^1(s)} \triangleq \frac{Y_{12}(s)}{U(s)}, \\ G_{22}(s) &= \frac{\Delta Y_2^2(s) \cdot \Delta U_1^1(s) - \Delta Y_2^1(s) \cdot \Delta U_1^2(s)}{\Delta U_1^1(s)\Delta U_2^2(s) - \Delta U_1^2(s)\Delta U_2^1(s)} \triangleq \frac{Y_{22}(s)}{U(s)}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

sendo

$$U(s) = \Delta U_1^1(s)\Delta U_2^2(s) - \Delta U_1^2(s)\Delta U_2^1(s) \quad (4.13)$$

Desta forma o problema de identificação do sistema TITO pode ser resolvido a partir de identificação SISO. As relações de entradas e saídas entre o sistema original descentralizado resultante são dadas por:

i. para a entrada U no domínio s , equação 4.14, a sua representação no domínio do tempo é obtida através da equação 4.15,

$$U(s) = \Delta U_1^1(s)\Delta U_2^2(s) - \Delta U_1^2(s)\Delta U_2^1(s) \quad (4.14)$$

$$u(t) = \Delta u_1^1(t) * \Delta u_2^2(t) - \Delta u_1^2(t) * \Delta u_2^1(t) \quad (4.15)$$

O operador $*$ representa a operação de convolução.

ii. para as saídas Y_{11} , Y_{21} , Y_{12} e Y_{22} do sistema são dadas por:

$$\begin{aligned} Y_{11}(s) &= \Delta Y_1^1(s) \cdot \Delta U_2^2(s) - \Delta Y_1^2(s) \cdot \Delta U_2^1(s), \\ y_{11}(t) &= L^{-1} \left[\Delta Y_1^1(s) \cdot \Delta U_2^2(s) - \Delta Y_1^2(s) \cdot \Delta U_2^1(s) \right] \\ &= \Delta y_1^1(t) * \Delta u_2^2(t) - \Delta y_1^2(t) * \Delta u_2^1(t). \end{aligned} \quad (4.16a)$$

$$\begin{aligned} Y_{21}(s) &= \Delta Y_2^1(s) \cdot \Delta U_2^2(s) - \Delta Y_2^2(s) \cdot \Delta U_2^1(s), \\ y_{21}(t) &= L^{-1} \left[\Delta Y_2^1(s) \cdot \Delta U_2^2(s) - \Delta Y_2^2(s) \cdot \Delta U_2^1(s) \right] \\ &= \Delta y_2^1(t) * \Delta u_2^2(t) - \Delta y_2^2(t) * \Delta u_2^1(t). \end{aligned} \quad (4.16b)$$

$$\begin{aligned} Y_{12}(s) &= \Delta Y_1^2(s) \cdot \Delta U_1^1(s) - \Delta Y_1^1(s) \cdot \Delta U_1^2(s), \\ y_{12}(t) &= L^{-1} \left[\Delta Y_1^2(s) \cdot \Delta U_1^1(s) - \Delta Y_1^1(s) \cdot \Delta U_1^2(s) \right] \\ &= \Delta y_1^2(t) * \Delta u_1^1(t) - \Delta y_1^1(t) * \Delta u_1^2(t). \end{aligned} \quad (4.16c)$$

$$\begin{aligned} Y_{22}(s) &= \Delta Y_2^2(s) \cdot \Delta U_1^1(s) - \Delta Y_2^1(s) \cdot \Delta U_1^2(s), \\ y_{22}(t) &= L^{-1} \left[\Delta Y_2^2(s) \cdot \Delta U_1^1(s) - \Delta Y_2^1(s) \cdot \Delta U_1^2(s) \right] \\ &= \Delta y_2^2(t) * \Delta u_1^1(t) - \Delta y_2^1(t) * \Delta u_1^2(t). \end{aligned} \quad (4.16d)$$

A identificação final de $G_{ij}(s)$ pode ser realizada através do método de estimação dos mínimos quadrados.

Considerando cada malha do sistema representada pelas equações de primeira ordem com atraso de transporte dado pela equação 4.17:

$$G_{ij}(s) = \frac{b_{ij}}{s + a_{ij}} e^{-L_{ij}s}, \quad i, j = 1, 2 \quad (4.17)$$

onde L_{ij} é o atraso de transporte do sistema.

Uma equação equivalente no domínio do tempo e na forma diferencial pode ser escrita como:

$$\frac{d}{dt} y_{ij} + a_{ij} y_{ij} = b_{ij} u(t - L_{ij}) \quad (4.18)$$

Utilizando a definição de integral e uma aproximação de primeira ordem para série de *Taylor* do atraso de transporte $e^{-L_{ij}s} = 1 - L_{ij}s$, a equação 4.18 torna-se:

$$y_{ij}(t) = -a_{ij} \int_0^t y_{ij}(\tau) d\tau - L_{ij} b_{ij} \int_0^t u(\tau) d\tau + b_{ij} u(t) \quad (4.19)$$

A equação 4.19 pode ser escrita em uma forma compacta como:

$$y_{ij}(t) = \phi_{ij}(t) \cdot \theta_{ij} \quad (4.20)$$

sendo

$$\phi_{ij}(t) = \left[-\int_0^t y_{ij}(\tau) d\tau \quad -\int_0^t u(\tau) d\tau \quad u(t) \right] \quad (4.21)$$

$$\theta_{ij} = \begin{bmatrix} a_{ij} \\ L_{ij} b_{ij} \\ b_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

A equação 4.19 pode ser resolvida através do estimador dos mínimos quadrados. Considerando

$$\begin{aligned}
\Gamma_{ij} &= \Psi_{ij} \Theta_{ij} \\
\Gamma_{ij} &= \left[y_{ij}(t_1) \quad y_{ij}(t_2) \quad \cdots \quad y_{ij}(t_N) \right]^T \\
\Psi_{ij} &= \left[\phi_{ij}(t_1) \quad \phi_{ij}(t_2) \quad \cdots \quad \phi_{ij}(t_N) \right]^T
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Θ_{ij} é estimado a partir do método dos mínimos quadrados como

$$\Theta_{ij} = (\Psi_{ij}^T \Psi_{ij})^{-1} \Psi_{ij}^T \Gamma_{ij} \tag{4.24}$$

Uma vez que Θ_{ij} é estimado a partir da equação 4.24, os parâmetros a_{ij} , b_{ij} e L_{ij} podem ser obtidos por:

$$\left[a_{ij} \quad b_{ij} \quad L_{ij} \right]^T = \left[\theta_{ij1} \quad \theta_{ij3} \quad \theta_{ij2} / \theta_{ij3} \right]^T \tag{4.25}$$

4.3 EXEMPLO DE SIMULAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO

A planta da coluna de destilação binária de *Wood & Berry* (WANG, GUO & ZHANG, 2001) é um processo TITO típico com forte interação entre as malhas e atrasos de transportes significativos, onde a matriz função de transferência é dada por:

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{pmatrix} \tag{4.26}$$

Para um sistema em malha fechada descentralizado com $K_{p1} = 0,5271$, $K_{i1} = 0,0763$, $K_{D1} = 0,45$, e $K_{p2} = -0,1064$, $K_{i2} = -0,018$, $K_{D2} = 0,02$, a resposta ao degrau dos sinais de erros sem ruído e as derivadas dos sinais equivalentes u e y_{ij} ($i, j = 1, 2$) são mostrados nas figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

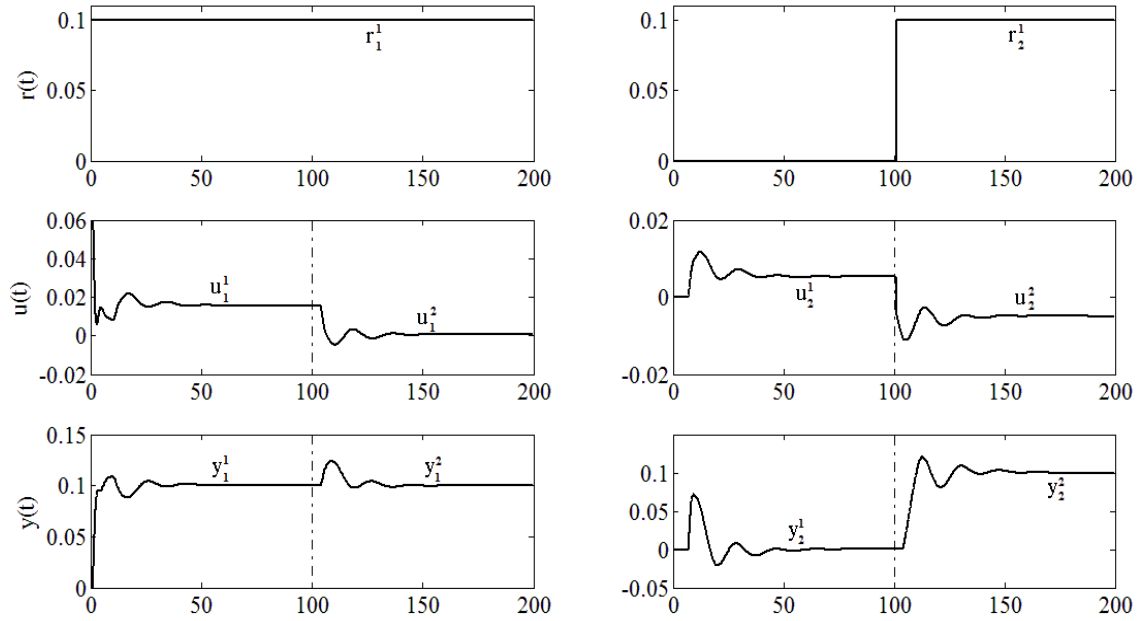


Figura 4.4 – Resposta ao degrau do sistema sem ruído.

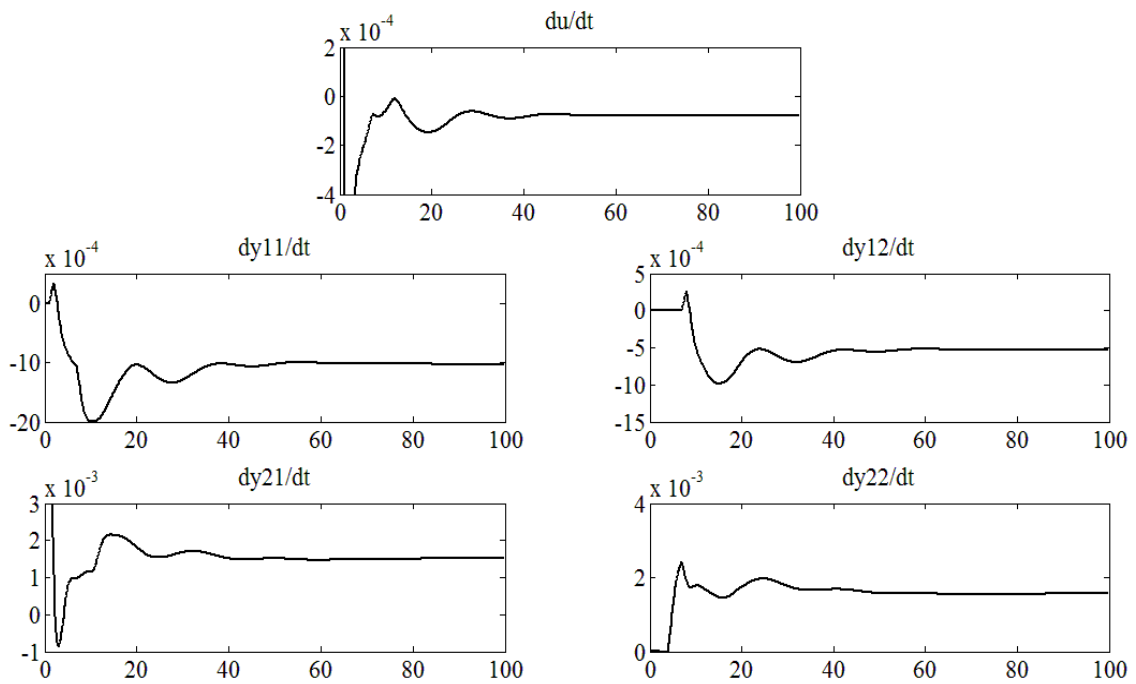


Figura 4.5 – Sinais equivalentes para o modelo de Wood & Berry.

A figura 4.6 mostra os diagramas de *Nyquist* dos modelos de identificação real e estimado para a coluna de *Wood & Berry*.

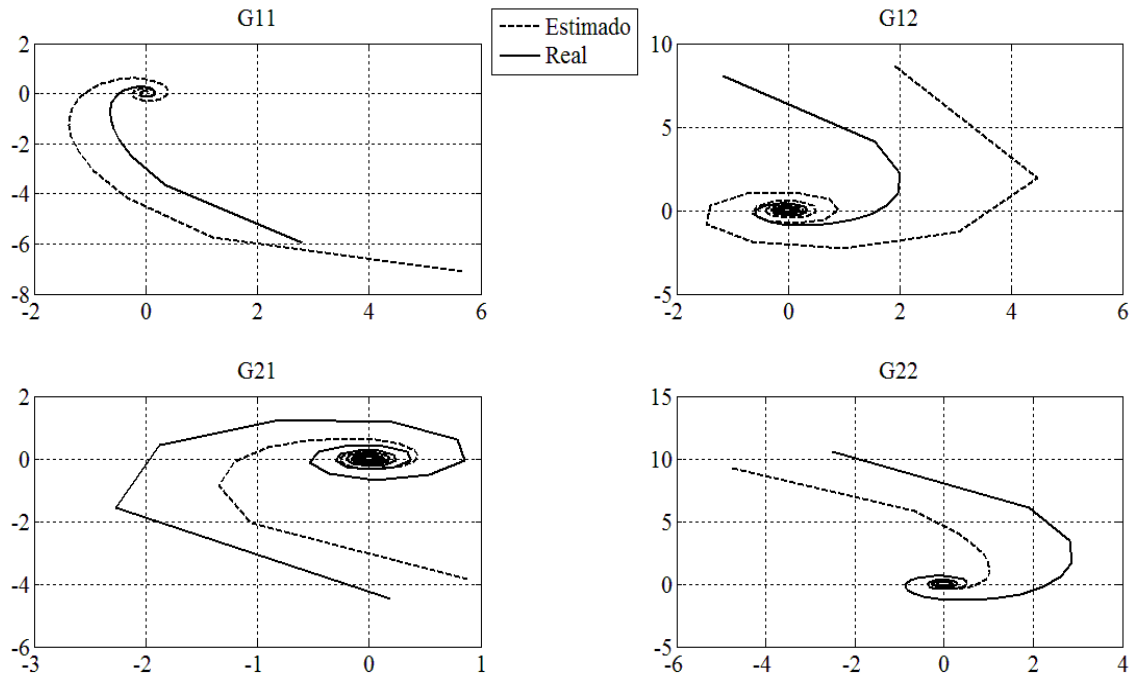


Figura 4.6 – Diagramas de Nyquist.

De acordo com a figura 4.6 pode-se observar o erro de modelagem, proveniente do método de identificação em frequência das funções de transferências individuais. A tabela 4.1 apresenta o erro percentual relativo para cada função de transferência entre a função estimada e a função real, calculado a partir da equação 4.27. $\hat{G}(j\omega)$ é a curva de Nyquist da função de transferência estimada e $G(j\omega)$ é a curva de Nyquist da função de transferência real.

$$Erro \hat{G}(j\omega)\% = \left| \frac{\hat{G}(j\omega) - G(j\omega)}{G(j\omega)} \right| \% \quad (4.27)$$

Tabela 4.1 – Erro percentual do diagrama de Nyquist para cada função de transferência.

Função de Transferência	Erro Percentual (%)
G11	0,4412
G12	0,5975
G21	0,5076
G22	0,4404

Como o método de estimação da função de transferência apresenta o erro de modelagem na frequência crítica de trabalho, o controlador deverá ser projetado de forma a superar estas deficiências do método. A figura 4.7 apresenta as respostas em malha aberta para as funções de transferências estimadas e reais.

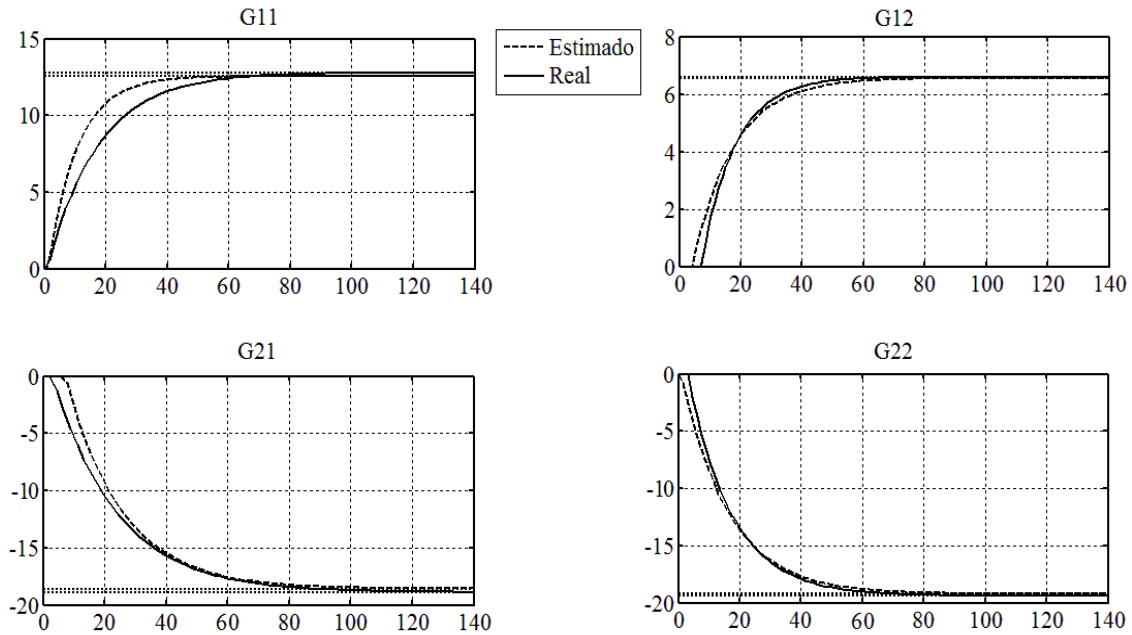


Figura 4.7 – Resposta ao degrau do sistema em malha aberta.

Observa-se um pequeno erro de modelagem quanto ao ganho e a constante de tempo. A tabela 4.2 apresenta a quantificação dos erros percentuais do ganho e da constante de tempo para cada função de transferência entre a função estimada e a função real quando submetidos à resposta ao degrau em malha aberta, calculado a partir das equações 4.28 e 4.29, respectivamente. $\hat{K}(j\omega)$ é o ganho da função de transferência estimada e $K(j\omega)$ é o ganho da função de transferência real. $\hat{\tau}(j\omega)$ é a constante de tempo da função de transferência estimada e $\tau(j\omega)$ é a constante de tempo da função de transferência real. O erro do ganho é calculado quando a resposta ao degrau da função de transferência atinge o regime e o erro da constante de tempo é calculado quando a resposta ao degrau da função de transferência atinge 63,2% do valor de regime.

$$\text{Erro } \hat{K}(j\omega)\% = \left| \frac{\hat{K}(j\omega) - K(j\omega)}{K(j\omega)} \right| \% \quad (4.28)$$

$$\text{Erro } \hat{\tau}(j\omega)\% = \left| \frac{\hat{\tau}(j\omega) - \tau(j\omega)}{\tau(j\omega)} \right| \% \quad (4.29)$$

Tabela 4.2 – Erro percentual do ganho e da constante de tempo para cada função de transferência.

Função de Transferência	Erro Percentual do Ganho (%)	Erro Percentual da Constante de Tempo(%)
G11	$15,62 \times 10^{-3}$	$16,07 \times 10^{-3}$
G12	$6,06 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-3}$
G21	$15,87 \times 10^{-3}$	$15,1 \times 10^{-3}$
G22	$10,31 \times 10^{-3}$	$10,6 \times 10^{-3}$

Em seguida, obtivemos o gráfico do erro para cada função de transferência entre a função estimada e a função real quando submetidos à resposta ao degrau em malha aberta. Percebeu-se que no início ocorre um erro maior em relação ao sistema quando este atinge o regime. A figura 4.8 mostra o erro para cada função de transferência.

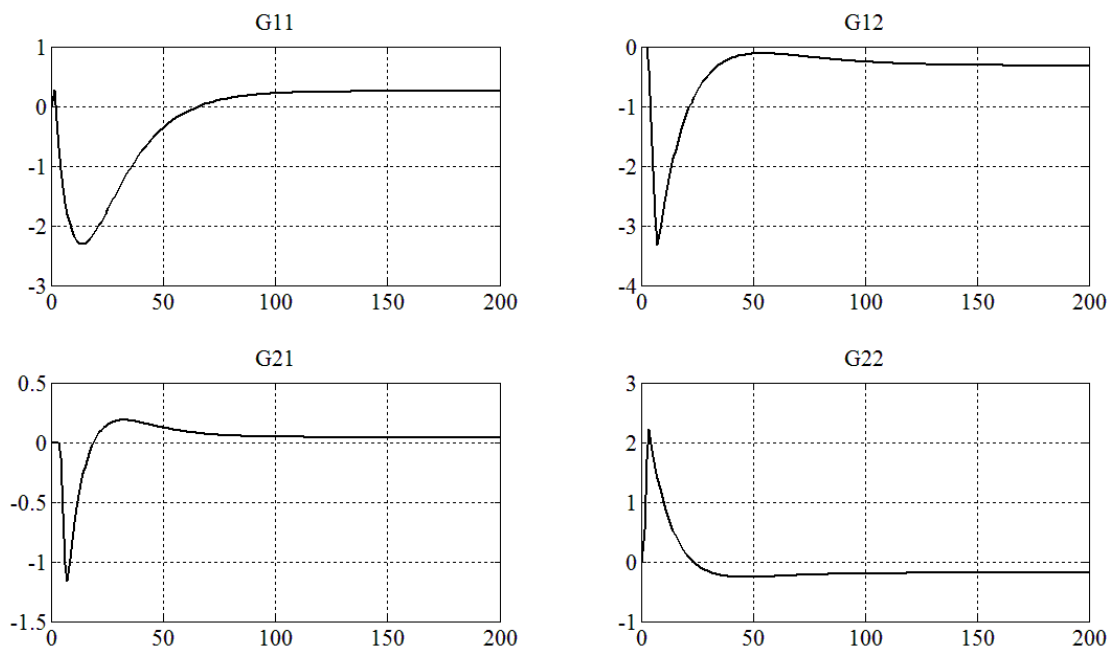


Figura 4.8 – Erro para cada função de transferência.

4.4 MÉTODO MODIFICADO DE ZIEGLER-NICHOLS

O método modificado de *Ziegler-Nichols* e proposto por *Aström & Hängglund* em 1984 tem a função de determinar os parâmetros do controlador a partir de um projeto no domínio da frequência representado pelo diagrama de *Nyquist* do processo (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995). Com a resposta em frequência do processo representado pelo diagrama de *Nyquist*, a especificação consiste em se determinar um ponto em torno da frequência dos pólos dominantes do processo em malha fechada antes da compensação e garantir as condições de frequência para o sistema após a compensação, mantendo as frequências de interesse no terceiro quadrante do diagrama de *Nyquist*. Neste quadrante estão situadas as frequências que, em geral, são de interesse para análise e projeto de sistemas de controle (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995). A figura 4.9 mostra as ações proporcional, integral e derivativa do controlador PID, em termos de diagrama de *Nyquist* (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995).

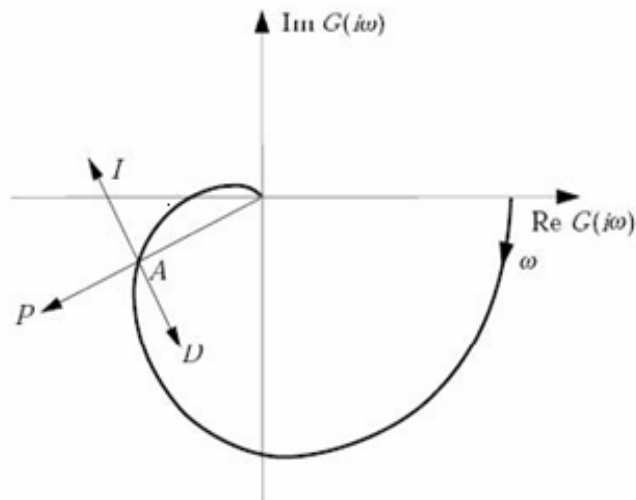


Figura 4.9 – Ações do controlador PID (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995).

O método propõe que se escolha um ponto A no diagrama de *Nyquist*, como mostrado na figura 4.9, obedecendo às seguintes coordenadas polares:

$$A = G_p(i\omega_0) = r_a e^{i(\pi + \phi_a)} \quad (4.30)$$

onde r_a é a parte real do ponto escolhido, e ϕ_a é o ângulo formado entre o eixo real ($R_e G(i\omega)$) e o ponto A.

O controlador é determinado deslocando-se o ponto A para um ponto B dentro do 3º quadrante do diagrama de Nyquist:

$$B = G_l(i\omega_0) = r_b e^{i(\pi+\phi_b)} \quad (4.31)$$

A figura 4.10 ilustra a situação em que um ponto A é movido para um ponto B através da ação de controlador PI ou PID.

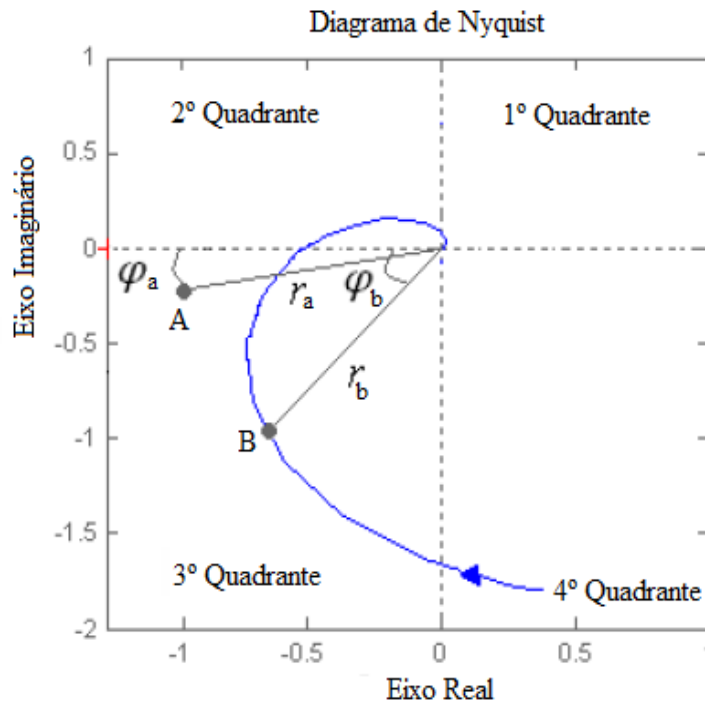


Figura 4.10 – O ponto A é movido para o ponto B pela ação do controlador.

Escrevendo a resposta em frequência do controlador como $G_c(i\omega_0) = r_c e^{i\phi_c}$ e utilizando as equações 4.30 e 4.31, obtemos:

$$r_b e^{i(\pi+\phi_b)} = r_a r_c e^{i(\pi+\phi_a+\phi_c)} \quad (4.32)$$

Portanto, o controlador deve ser escolhido de modo que:

$$r_c = \frac{r_b}{r_a} \quad (4.33)$$

$$\phi_c = \phi_b - \phi_a \quad (4.34)$$

Para um controlador PI tem-se que (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995):

$$K_p = \frac{r_b \cos(\phi_b - \phi_a)}{r_a} \quad (4.35)$$

$$T_i = \frac{1}{\omega_0 \tan(\phi_a - \phi_b)} \quad (4.36)$$

com $\phi_a > \phi_b$ para que T_i seja positivo.

Caso seja um controlador PID, o termo proporcional K_p se mantém o mesmo da equação 4.35, entretanto o termo integrador T_i sofre uma modificação em sua equação e o termo derivativo T_d é acrescentado:

$$\omega_0 T_d - \frac{1}{\omega_0 T_i} = \tan(\phi_b - \phi_a) \quad (4.37)$$

Há, no entanto, apenas uma equação para determinar os parâmetros de T_i e T_d . Assim, uma condição adicional é introduzida para determinar esses parâmetros. Um método comum é determinar que a relação desses parâmetros seja constante, ou seja, $T_d = \alpha T_i$. Segundo as regras de *Ziegler-Nichols* α é uma constante e é definida com $\alpha = 0,25$. Então, para um controlador PID, as constantes do sistema são calculadas por (ASTRÖM & HÄGGLUND, 1995):

$$K_p = \frac{r_b \cos(\phi_b - \phi_a)}{r_a} \quad (4.38)$$

$$T_i = \frac{1}{2\alpha\omega_0} \left(\tan(\phi_b - \phi_a) + \sqrt{4\alpha + \tan^2(\phi_b - \phi_a)} \right) \quad (4.39)$$

$$T_d = 0,25T_i \quad (4.40)$$

4.5 SINTONIA DE CONTROLADORES PI DESCENTRALIZADOS ATRAVÉS DO MÉTODO BLT

O método de sintonia de controladores PI denominado BLT foi proposto por Luyben (LUYBEN, 1986) e modificado por Monica (MONICA, YU & LUYBEN, 1988).

O método BLT constitui um método iterativo para sintonia de controladores PI TITO descentralizados. Neste método, as regras de sintonia de *Ziegler-Nichols* são aplicadas aos elementos das diagonais da matriz função de transferência do processo MIMO a partir do conhecimento do ganho crítico e frequência crítica destes elementos. Em seguida os parâmetros PI são relaxados por um fator F entre 2 e 5 cuja seleção depende de testes de estabilidade e robustez baseado na função (ALMEIDA, ALBUQUERQUE & COELHO, 2003):

$$W(s) = -1 + \det \left[I + G_p(s)G_K(s) \right] \quad (4.41)$$

O objetivo do fator F é considerar as interações entre malhas. Uma deficiência do método BLT na sua forma original é que apenas um fator de relaxamento F é usado para sintonizar todas as malhas do processo. Procurando superar este problema (MONICA, YU & LUYBEN, 1988) desenvolveu uma modificação no método BLT na qual, baseando-se no índice ITE, as interações entre malhas são consideradas diferentes e, portanto, um valor diferente de F é determinado para cada malha. Considerando a função $W(s)$ o projeto pode ser acompanhado de uma avaliação de robustez no projeto do controlador multivariável (ALMEIDA, ALBUQUERQUE & COELHO, 2003).

O procedimento para projetar controladores PI utilizando o método BLT para um processo TITO segue quatro passos básicos que utilizam a matriz função de transferência do processo (HAWKINS, 1972; FORD & DALY, 1979):

i. determinar se o processo é diagonalmente dominante, se não, utilizar um pré-compensador;

ii. calcular o ganho e frequência crítica (K_{ci} e ω_{ci} , $i = 1, 2$) da diagonal principal da matriz função de transferência;

iii. calcular os ganhos iniciais dos controladores PI conforme $K_i = \frac{0,45K_{ci}}{F}$ e $T_{ii} = \frac{2\pi}{1,2\omega_{ci}} F$ com $i = 1, 2$;

iv. modificar o fator de ajuste F (valores típicos de F situa-se entre 2 e 5) a partir da aplicação da função $W(s)$ à matriz função de transferência do processo. Os controladores PI que conferirem melhores propriedades de robustez às malhas de controle são utilizados.

As funções $W(j\omega)$ e $L(j\omega)$ segundo (LUYBEN, 1990):

$$W(j\omega) = -1 + \det \left[I + G_p(j\omega)G_K(j\omega) \right] \quad (4.42)$$

$$L(j\omega) = 20 \log \left| \frac{W(j\omega)}{1+W(j\omega)} \right| \quad (4.43)$$

foram utilizadas para medir característica de robustez do sistema MIMO. A função $W(j\omega)$ traça o diagrama de *Nyquist* da matriz de transferência de um sistema multivariável e quanto mais se aproxima do ponto $(-1, 0)$, pior a robustez e estabilidade relativa do sistema. A função $L(j\omega)$ é uma medida para sistemas multivariáveis que pode ser interpretada no domínio da frequência de forma similar à curva logarítmica do módulo pela frequência em sistema SISO, ou seja, ela mostra o ganho desse sistema. Quanto menor o pico de $L(j\omega)$ mais robusto é o sistema MIMO.

4.6 EXEMPLO DE SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES

Para efeito de comparação, simulou-se uma aplicação dos 2 métodos de controle citados anteriormente na coluna de destilação de *Wood & Berry*. A matriz função de transferência foi dada na equação 4.26. Os ganhos dos controladores PI para o método modificado de *Ziegler-Nichols* são: $K_p = 0,945$ e $T_i = 3,2603$ para a concentração no topo da coluna de destilação e $K_p = -0,1802$ e $T_i = 9,003$ para a concentração na base da coluna. Já no método BLT utilizou um fator de relaxamento $F = 3$ e os ganhos dos controladores PI resultaram nos seguintes valores: $K_p = 0,315$ e $T_i = 9,7809$ para a concentração no topo e $K_p = -0,0601$ e $T_i = 27,009$ para a concentração na base. As figuras 4.11 a 4.14 apresentam os sinais de saída, as variáveis de controle e as referências das concentrações no topo e na base sob o controle dos métodos de *Ziegler-Nichols* e BLT.

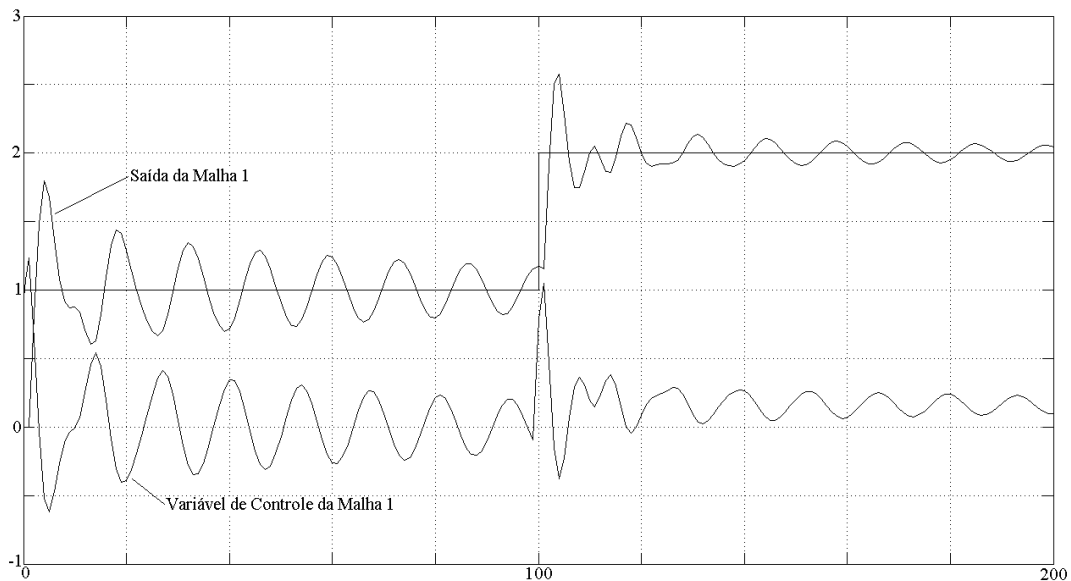


Figura 4.11 – Controle da concentração no topo pelo método modificado de *Ziegler-Nichols*.

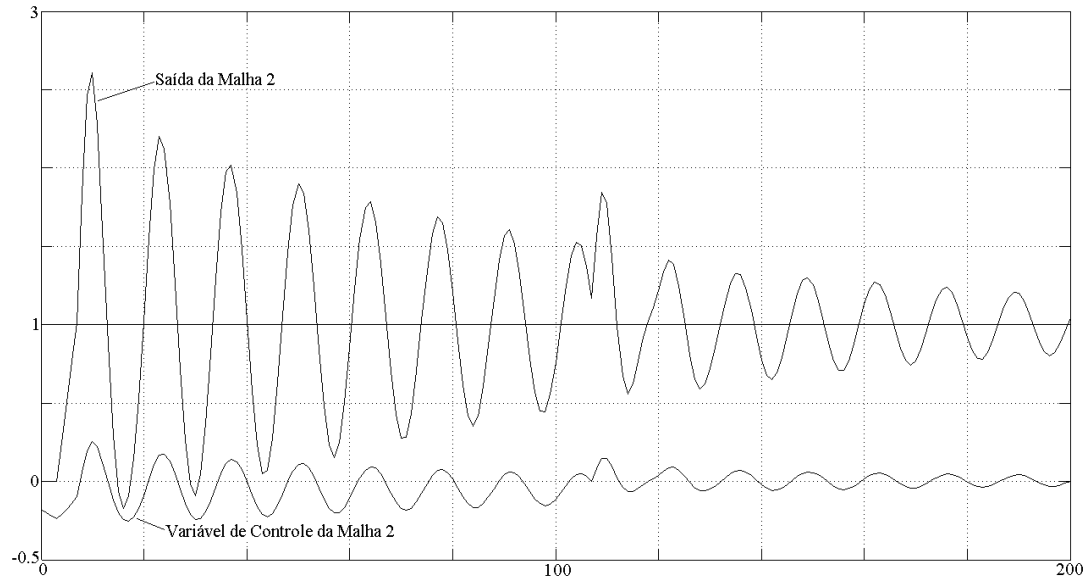


Figura 4.12 – Controle da concentração na base pelo método modificado de Ziegler-Nichols.

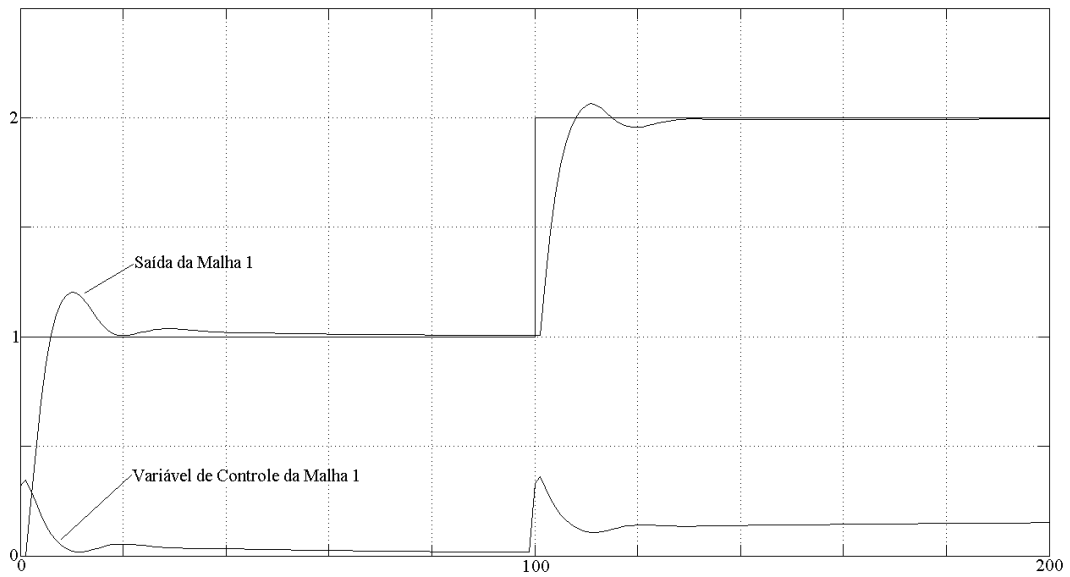


Figura 4.13 – Controle da concentração no topo pelo método BLT.

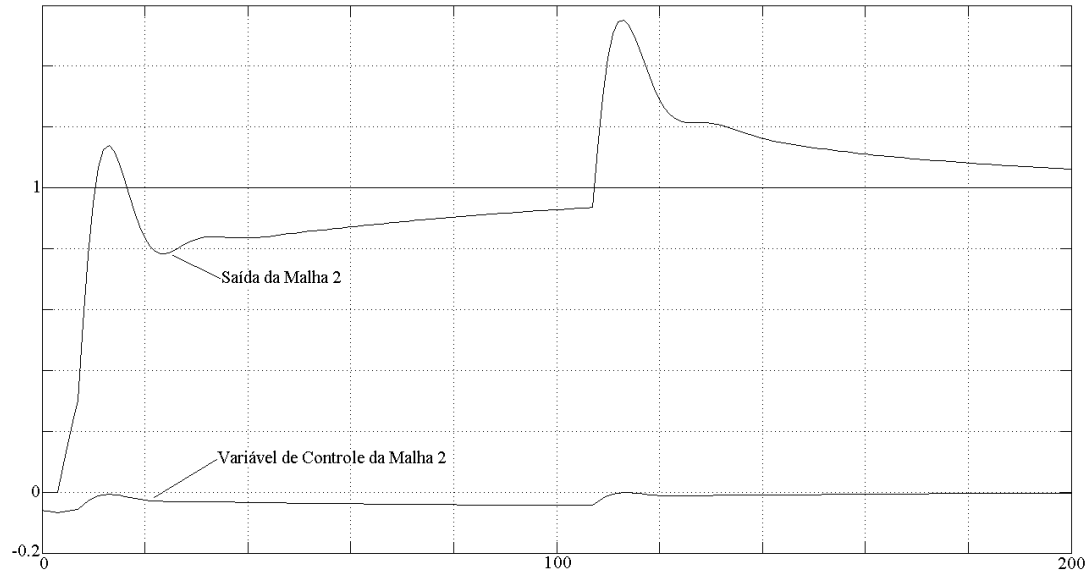


Figura 4.14 – Controle da concentração na base pelo método BLT.

As tabelas 4.3 e 4.4 comparam, respectivamente, os índices de desempenho dos controladores das figuras 4.10 a 4.13 para as concentrações no topo e na base da coluna de destilação. Os índices de desempenho levados em consideração foram: valor de sobressinal, tempo de resposta e tempo de acomodação. Nas tabelas 4.3 e 4.4, o primeiro intervalo de tempo corresponde de 0 – 100 segundos e o segundo intervalo de tempo é de 100 – 200 segundos. É importante notar que nos controles da concentração na base não existe o índice do tempo de resposta para o segundo intervalo de tempo, pois não há mudança de referência da concentração na base. Em alguns índices do tempo de acomodação foi especificado que o controlador não se acomodou e isso se deve ao fato de que o controlador precisaria de mais tempo de simulação para se acomodar em torno da referência.

Tabela 4.3 – Comparação dos índices de desempenho para a concentração no topo.

Controlador	1º Intervalo de Tempo			2º Intervalo de Tempo		
	Valor de Sobressinal	Tempo de Resposta	Tempo de Acomodação	Valor de Sobressinal	Tempo de Resposta	Tempo de Acomodação
Ziegler-Nichols	80%	2,28 s	Não se Acomoda	57,9%	2,14 s	45 s
BLT	20,3%	5,9 s	16,1 s	6,5%	8 s	6,3 s

Tabela 4.4 – Comparação dos índices de desempenho para a concentração na base.

Controlador	1º Intervalo de Tempo			2º Intervalo de Tempo		
	Valor de Sobressinal	Tempo de Resposta	Tempo de Acomodação	Valor de Sobressinal	Tempo de Resposta	Tempo de Acomodação
Ziegler-Nichols	161%	6,94 s	Não se Acomoda	84,3%	Não Possui	Não se Acomoda
BLT	13,8%	10,4 s	Não se Acomoda	55,2%	Não Possui	Não se Acomoda

Através das figuras 4.10 a 4.13 e das tabelas 4.3 e 4.4, percebeu-se que o método BLT apresenta valor de sobressinal e tempo de acomodação menor que o método modificado de *Ziegler-Nichols* nos controles das concentrações no topo e na base da coluna de destilação. Em contrapartida, o método modificado de *Ziegler-Nichols* possui um tempo de resposta mais rápido que o método BLT. Nos controles da concentração na base não foi possível medir o tempo de acomodação, mas pelas figuras percebe-se que o método BLT se acomodaria mais rapidamente que o método modificado de *Ziegler-Nichols*.

No geral, os resultados de simulação indicam que o método BLT apresenta melhor desempenho que o método modificado de *Ziegler-Nichols*.

4.6 COMENTÁRIOS FINAIS

Inicialmente mostrou-se o método utilizado para a identificação da matriz função de transferência. Ela foi identificada a partir do método seqüencial de resposta ao degrau que desacopla o sistema TITO em quatro malhas independentes com mesmo sinal de entrada. Modelos de três parâmetros foram selecionados para as malhas do sistema devido à simplicidade de controle o que facilita a aplicação de projetos bem estabelecidos de controladores PI para este tipo de malha.

Como este trabalho aborda o controle de duas variáveis, temperatura e umidade relativa do ar, aplicados a uma incubadora neonatal, este capítulo também tratou de esclarecer o que é um sistema multivariável.

Em seguida mostraram-se as estratégias de sintonia de controladores PI MIMO utilizadas: método modificado de *Ziegler-Nichols* e método BLT revisado com considerações

de robustez e estabilidade. Os métodos sintetizam projetos de controladores PI MIMO simples e eficiente que apresentam vantagens tais como:

i. é conceitualmente simples e mantém a estrutura descentralizada com o projeto SISO das malhas de controle;

ii. estabilidade e robustez é garantida a cada passo do projeto;

iii. o processo é conhecido à priori a partir da identificação de sua matriz de transferência;

iv. aspectos de robustez e estabilidade podem ser investigados.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta dissertação o projeto proposto combina a técnica de identificação seqüencial baseada em resposta ao degrau em malha fechada, descrita na seção 4.1 do capítulo anterior, com estratégias de sintonia PI MIMO. A primeira estratégia estudada considera as especificações de fase e de ganho em malha fechada na frequência de trabalho (método modificado de *Ziegler-Nichols*), a segunda estratégia apresentada corresponde ao método BLT revisado com considerações de robustez e estabilidade. Estas duas estratégias foram discutidas no capítulo anterior. A aplicação das técnicas é avaliada para o sistema de controle de uma incubadora neonatal composta de malhas de temperatura e umidade relativa do ar e que apresentam acoplamentos.

5.1 APLICAÇÃO EM UMA INCUBADORA NEONATAL

Na incubadora neonatal, objeto de estudo deste trabalho, utilizou-se para o sistema em malha fechada descentralizado um ganho proporcional de $K=1$ para o circuito de temperatura e um ganho proporcional de $K=0,1$ para o circuito de umidade na etapa de identificação do sistema. A figura 5.1 mostra o diagrama de blocos da incubadora para fins de identificação do processo. Os índices t e u representam temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente.

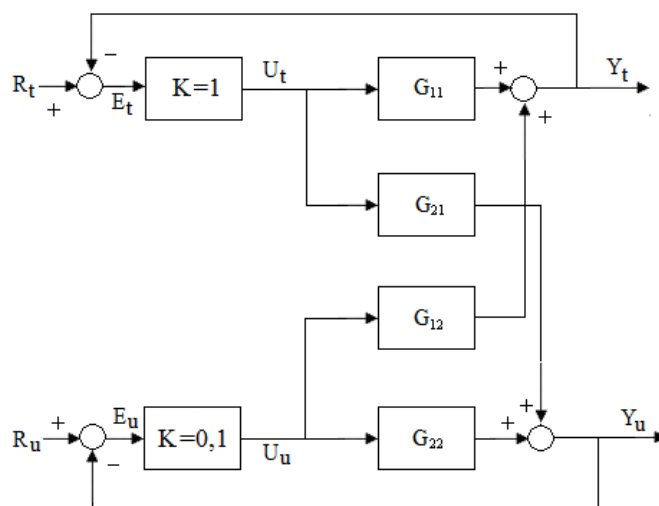


Figura 5.1 – Diagrama de blocos da incubadora para fins de identificação do processo.

O teste de resposta ao degrau para os sinais de erro é apresentado na figura 5.2.

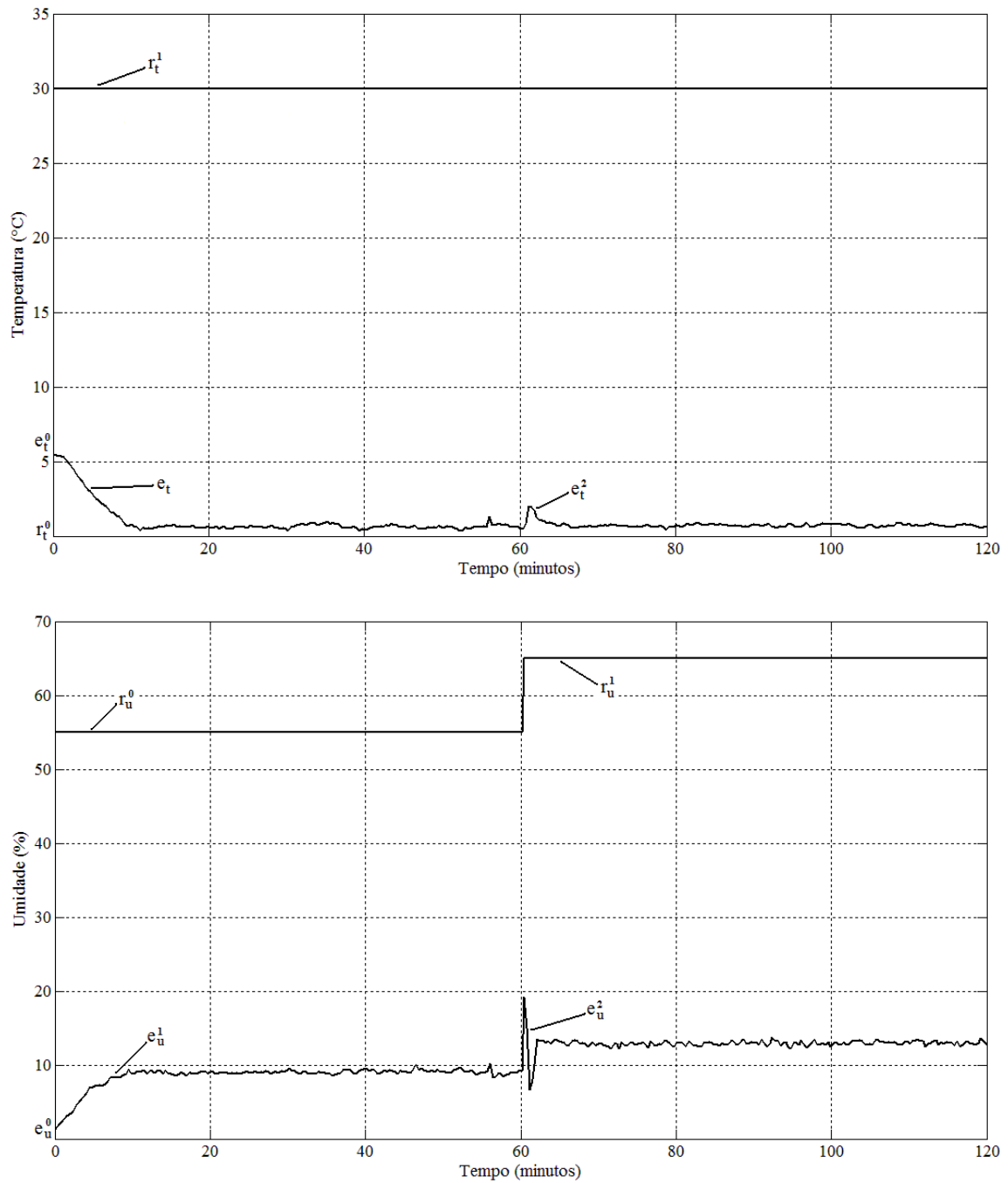


Figura 5.2 – Teste de resposta ao degrau do sistema.

A incubadora neonatal constitui um processo TITO cuja matriz função de transferência determinada a partir do teste de resposta ao degrau do sistema mostrado na

figura 5.2 e do método sequencial de resposta ao degrau tal qual discutido na seção 4.1 do capítulo anterior resultou na seguinte matriz:

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{2.89e^{-55s}}{550s+1} & \frac{-3.1e^{-51s}}{260s+1} \\ \frac{-4.22e^{-91s}}{546s+1} & \frac{22.22e^{-16s}}{180s+1} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Reorganizando a equação 5.1 na forma de diagrama de blocos, obtém-se a figura 5.3.

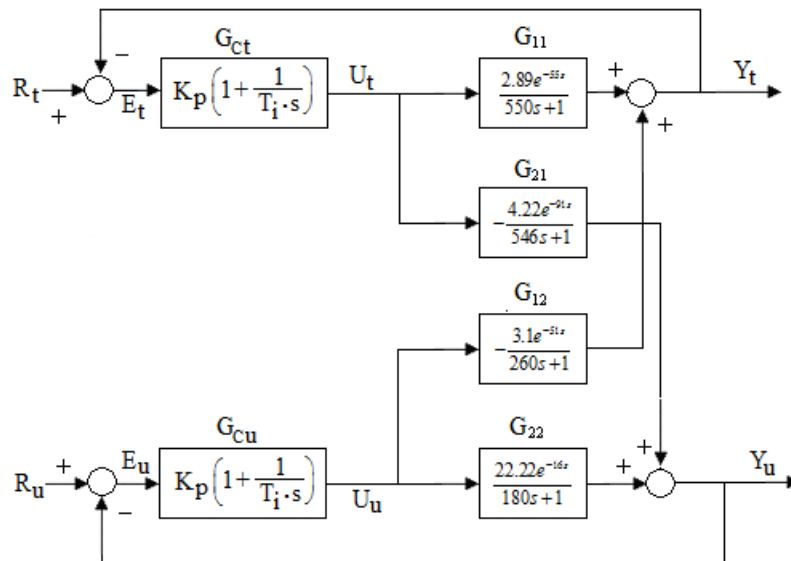


Figura 5.3 – Diagrama de blocos da incubadora.

As variáveis controladas Y_t e Y_u são as variáveis de saída do sistema e representam a temperatura e a umidade relativa do ar no interior da incubadora, respectivamente. As variáveis manipuladas U_t e U_u são os sinais de comando provenientes dos controladores descentralizados G_{Ct} e G_{Cu} , respectivamente. O objetivo do sistema de controle PI TITO implementado é manter a temperatura e a umidade relativa do ar nas referências R_t e R_u desejadas mantendo os requisitos de estabilidade e robustez do sistema definidos pelas equações 4.42 e 4.43 na seção 4.5 do capítulo anterior.

5.2 ANÁLISE DE ROBUSTEZ DOS CONTROLADORES

Os controladores PI descentralizados projetados através do método modificado de *Ziegler-Nichols* com especificação de fase $\phi_b = 45^\circ$ e ganho $r_b = 3r_a$ para a malha de temperatura e com especificação de fase $\phi_b = 45^\circ$ e ganho $r_b = \frac{1}{10}r_a$ para a malha de umidade relativa considerando as funções de transferências do sistema desacoplado resultaram nos seguintes ganhos do controlador: $K_p = 2,59$ e $T_i = 138,3226$ para a malha de temperatura e $K_p = 0,0858$ e $T_i = 40,631$ para a malha de umidade.

No método BLT utilizou-se dois fatores de relaxamento F diferentes, no caso 3 e 5. A escolha destes fatores se deve às simulações levando em consideração a estabilidade e a robustez do sistema. Outro motivo para a escolha destes fatores se deve ao interesse de analisar o desempenho de controlador ajustado através do método BLT com fatores de relaxamentos distintos, ou seja, um valor no limite superior, no caso 5 e outro valor considerado intermediário, no caso 3. Os controladores PI projetados pelo método BLT com um fator de relaxamento $F = 3$ resultaram nos seguintes ganhos do controlador: $K_p = 0,8633$ e $T_i = 414,9678$ para a malha de temperatura e $K_p = 0,0286$ e $T_i = 121,893$ para a malha de umidade. Quando os controladores PI foram projetados pelo método BLT com um fator de relaxamento $F = 5$ resultaram nos seguintes ganhos do controlador: $K_p = 0,518$ e $T_i = 691,613$ para a malha de temperatura e $K_p = 0,0172$ e $T_i = 203,155$ para a malha de umidade.

Uma vez fornecidos os parâmetros dos controladores descentralizados, é possível realizar simulações comparativas a fim de avaliar as vantagens e desvantagens de cada técnica de projeto. Na seção 4.5 do capítulo 4 foram definidas as funções $W(j\omega)$ e $L(j\omega)$, que representam respectivamente, o diagrama de Nyquist da matriz de transferência de um sistema multivariável e o ganho desse sistema. As funções foram utilizadas para medir a característica de estabilidade relativa e robustez do sistema MIMO. As figuras 5.4 e 5.5 apresentam as funções $W(j\omega)$ e $L(j\omega)$ para os circuitos de controle da incubadora neonatal com o controlador PI ajustado pelo método modificado de *Ziegler-Nichols*.

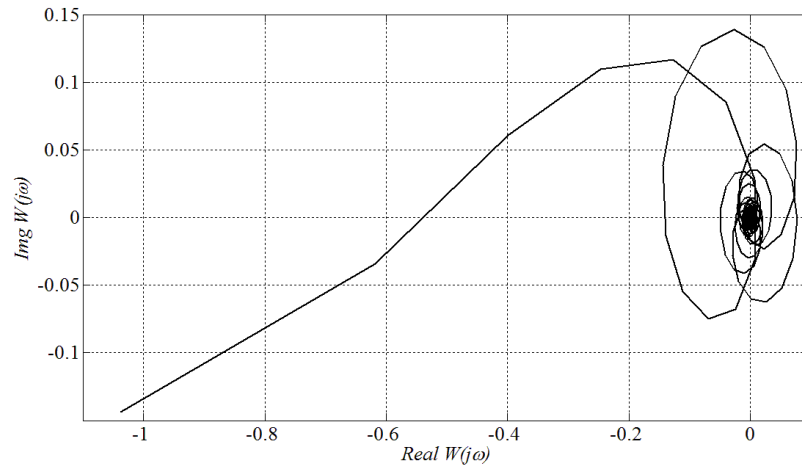


Figura 5.4 – $W(j\omega)$ para o método modificado de Ziegler-Nichols.

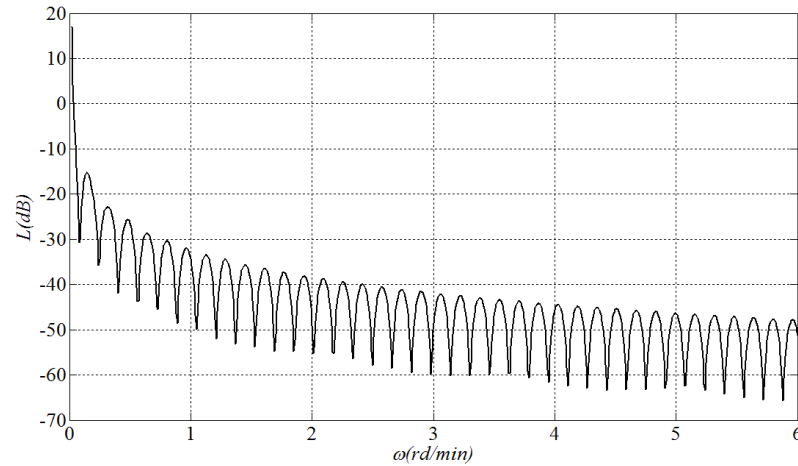


Figura 5.5 – $L(j\omega)$ para o método modificado de Ziegler-Nichols.

No método modificado de *Ziegler-Nichols*, a função $W(j\omega)$ está muito próxima do ponto $(-1,0)$ e a função $L(j\omega)$ possui um pico de $16,96\text{ dB}$ sendo por isso considerado o menos estável e robusto dos controladores utilizados. As figuras 5.6 e 5.7 apresentam as funções $W(j\omega)$ e $L(j\omega)$ para os circuitos de controle da incubadora neonatal com o controlador PI ajustado pelo método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 3$ com o intuito de comparar os resultados com o método modificado de *Ziegler-Nichols*.

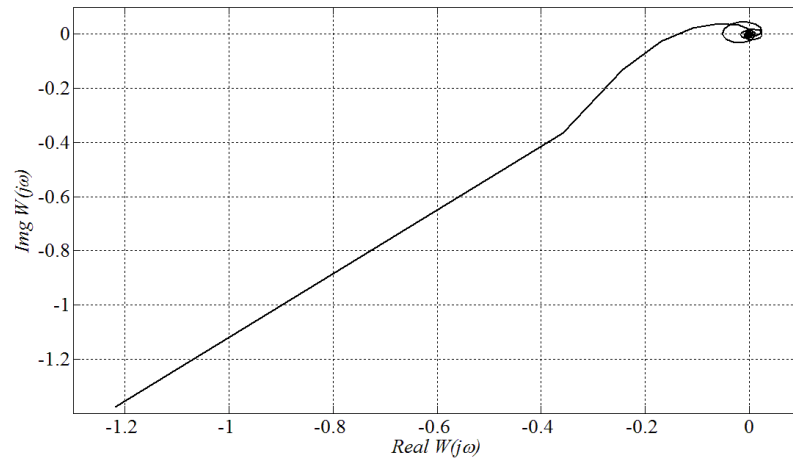


Figura 5.6 – $W(j\omega)$ para o método BLT com um fator de relaxamento $F=3$.

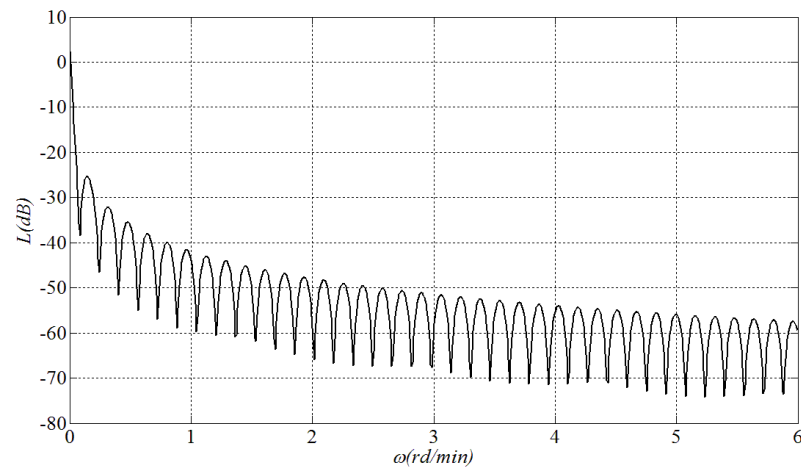


Figura 5.7 – $L(j\omega)$ para o método BLT com um fator de relaxamento $F=3$.

No método BLT com $F = 3$, a função $W(j\omega)$ se distancia mais do ponto $(-1,0)$ em relação ao método modificado de *Ziegler-Nichols* e a função $L(j\omega)$ possui um pico de $2,4 \text{ dB}$ menor que o pico do método modificado de *Ziegler-Nichols*. Com isso, percebe-se que o controlador PI ajustado pelo método BLT é mais robusto e estável em relação ao controlador PI ajustado pelo método modificado de *Ziegler-Nichols*. As figuras 5.8 e 5.9 apresentam as funções $W(j\omega)$ e $L(j\omega)$ para os circuitos de controle da incubadora neonatal com o controlador PI ajustado pelo método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 5$ com a finalidade de comparar os resultados com o método BLT que utiliza um fator de relaxamento $F = 3$.

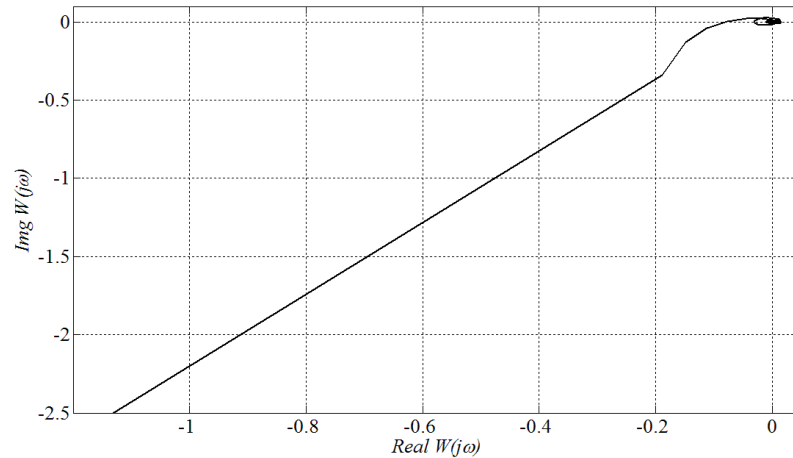


Figura 5.8 – $W(j\omega)$ para o método BLT com um fator de relaxamento $F=5$.

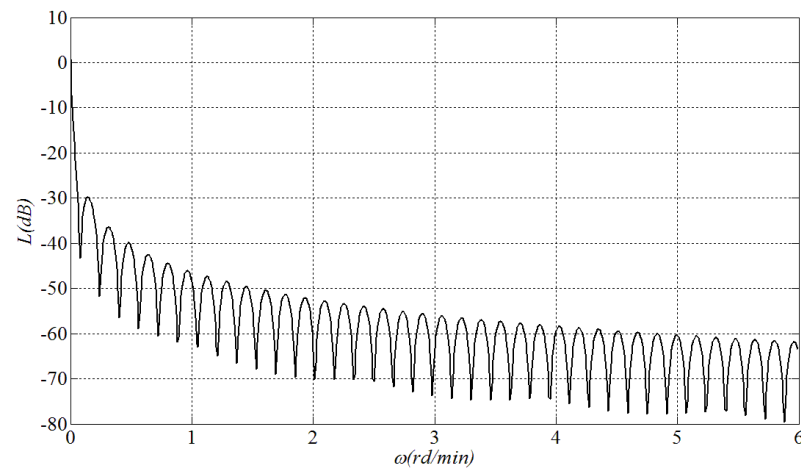


Figura 5.9 – $L(j\omega)$ para o método BLT com um fator de relaxamento $F=5$.

No método BLT com $F = 5$, a função $W(j\omega)$ se distancia mais do ponto $(-1,0)$ em relação ao método BLT com $F = 3$ e a função $L(j\omega)$ possui um pico de $0,8 \text{ dB}$ menor que o pico do método BLT com $F = 3$. Com isso, observa-se que o controlador PI ajustado pelo método BLT com $F = 5$ é mais robusto e estável que o controlador PI ajustado pelo método BLT com $F = 3$. Por isso o controlador PI ajustado através do método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 5$ é considerado o mais estável e robusto dos controladores utilizados.

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONTROLADORES PARA UMA TEMPERATURA CONSTANTE

Depois de realizado a identificação da matriz de transferência da incubadora neonatal e feito uma análise de estabilidade relativa e de robustez dos controladores passou-se para as etapas de ensaios práticos.

Nesta seção foi realizado o primeiro ensaio prático para avaliar o desempenho das estratégias do controlador PI ajustados pelo método modificado de *Ziegler-Nichols* e pelo método BLT, sendo que os fatores de relaxamento F utilizados foram 3 e 5. Para isso, considerou-se a referência da temperatura do ar constante em 30°C e a referência da umidade relativa do ar variável. Realizaram-se testes com durações de 2 horas, sendo que a cada 40 minutos mudava-se a referência da umidade. No primeiro ciclo, a umidade foi de 50%, no segundo de 45% e no terceiro de 55%.

As figuras 5.10 e 5.11 mostram os comportamentos dos sinais de saída (temperatura e umidade relativa do ar), do controle dos atuadores (resistor de aquecimento e umidificador) e das referências estabelecidas para o ensaio prático quando o controlador PI foi ajustado pelo método modificado de *Ziegler-Nichols*.

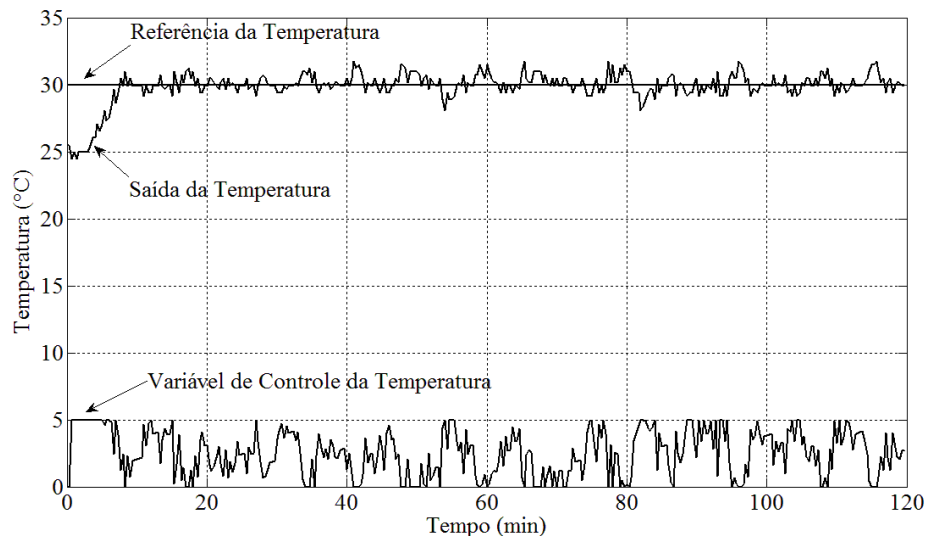


Figura 5.10 – Controle da temperatura pelo método modificado de *Ziegler-Nichols*.

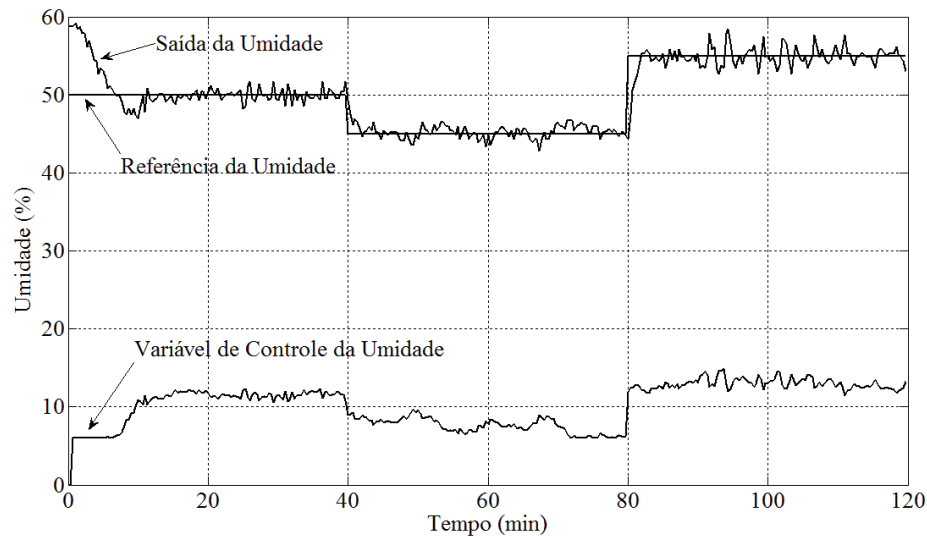


Figura 5.11 – Controle da umidade pelo método modificado de Ziegler-Nichols.

No método modificado de *Ziegler-Nichols*, o controle da saída da temperatura possui um tempo de resposta de 7,5 minutos, tempo de acomodação de 8 minutos e valor de sobressinal ao redor da referência especificada. Já no controle da saída da umidade o tempo de resposta foi de 6,67 minutos e o tempo de acomodação de 11,33 minutos para a referência inicial de 50% de umidade relativa. Quando a umidade mudou para 45%, os tempos de resposta e de acomodação foram de 2 minutos e na última mudança de referência, no caso 55%, os tempos de resposta e de acomodação também foram de 2 minutos. No controle da saída da umidade, os valores de sobressinais sempre tiveram um comportamento ao redor da referência especificada. Percebeu-se também que ao mudar a referência da umidade, o controle da temperatura manteve a saída da mesma em torno da referência.

As figuras 5.12 e 5.13 mostram os comportamentos dos sinais de saída, do controle dos atuadores e das referências estabelecidas para o ensaio prático quando o controlador PI foi ajustado pelo método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 3$.

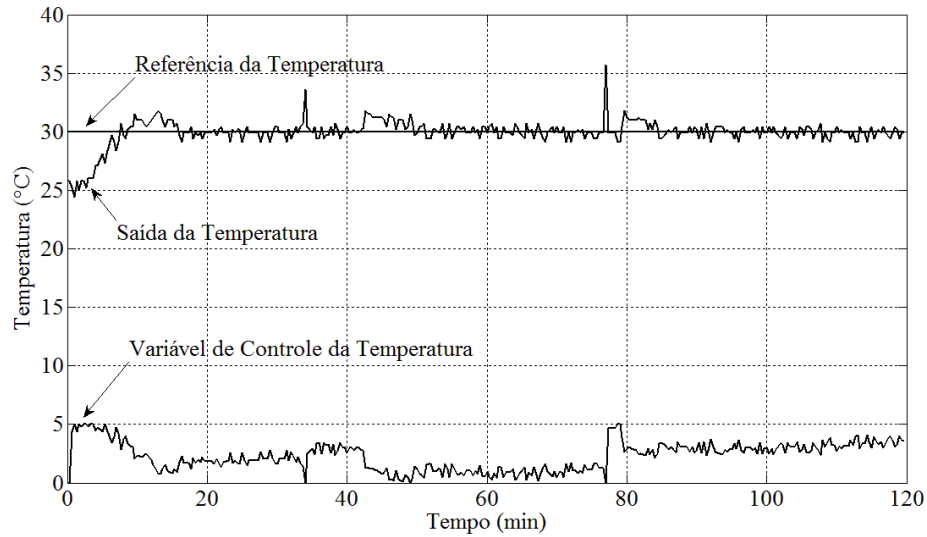


Figura 5.12 – Controle da temperatura pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=3$.

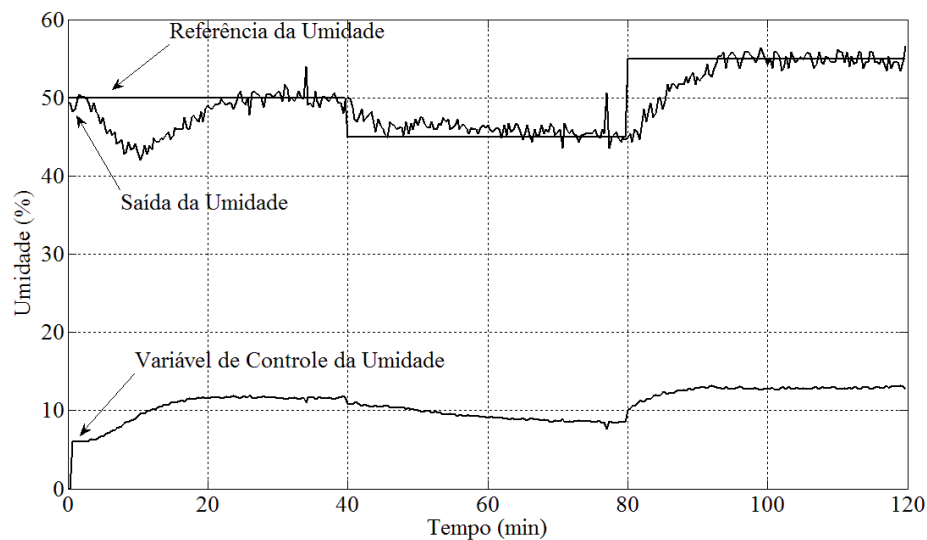


Figura 5.13 – Controle da umidade pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=3$.

No método BLT com um fator de relaxamento $F=3$, o controle da saída da temperatura possui um tempo de resposta de 7,67 minutos, tempo de acomodação de 16 minutos e valor de sobressinal girando em torno da referência especificada. Já no controle da saída da umidade os tempos de resposta e de acomodação foram de 24,33 minutos para a referência inicial de 50% de umidade relativa. Ao mudar a umidade para 45%, o tempo de resposta foi de 5,67 minutos e o tempo de acomodação foi de 22 minutos e na última mudança de referência, no caso 55%, os tempos de resposta e de acomodação foram de 13 minutos. No controle da umidade, os valores de sobressinais só tiveram um comportamento ao redor da referência especificada quando o valor da saída da umidade chegou ao regime. Percebeu-se

também que ao mudar a referência da umidade, o controle da temperatura manteve a saída da mesma em torno da referência.

As figuras 5.14 e 5.15 mostram os comportamentos dos sinais de saída, do controle dos atuadores e das referências estabelecidas para o ensaio prático quando o controlador PI foi ajustado pelo método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 5$.

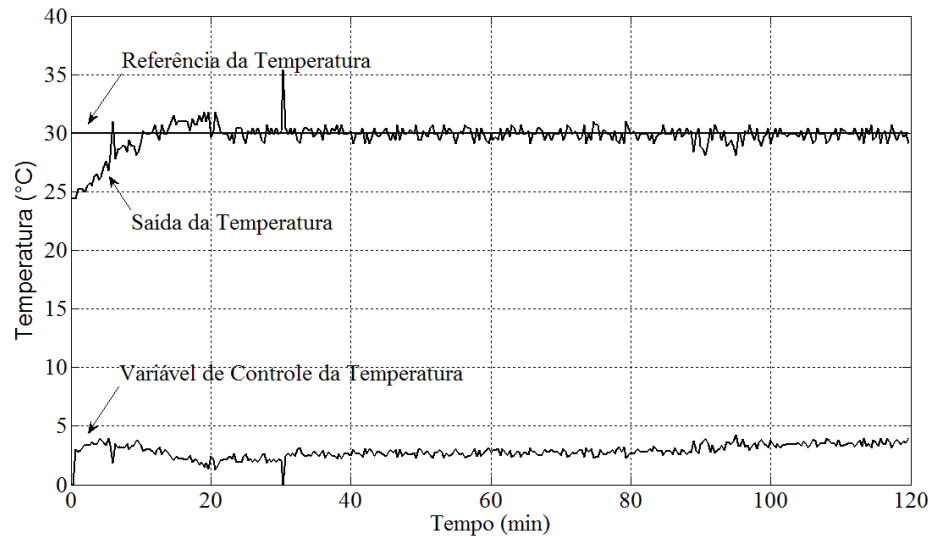


Figura 5.14 – Controle da temperatura pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=5$.

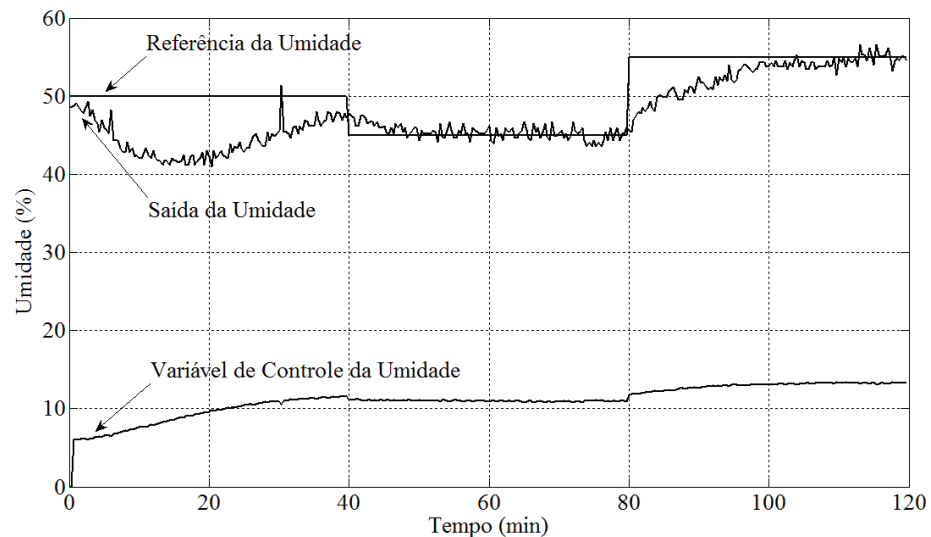


Figura 5.15 – Controle da umidade pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=5$.

No método BLT com um fator de relaxamento $F = 5$, o controle da saída da temperatura possui um tempo de resposta de 10,33 minutos, tempo de acomodação de 20

minutos e valor de sobressinal ao redor da referência especificada. Já no controle da saída da umidade os tempos de resposta e de acomodação não alcançaram a referência inicial de 50% de umidade relativa. Quando a umidade mudou para 45%, os tempos de resposta e de acomodação foram de 8,33 minutos e na última mudança de referência, no caso 55%, os tempos de resposta e de acomodação foram de 24 minutos. No controle da umidade, os valores de sobressinais só tiveram um comportamento em torno da referência especificada quando o valor da saída da umidade chegou ao regime. Percebeu-se também que ao mudar a referência da umidade, o controle da temperatura manteve a saída da mesma em torno da referência.

Após analisar cada controlador individualmente, comparou-se a variância entre a variável de saída da temperatura e da umidade, a variância da variável de controle da temperatura e da umidade e os valores médios da saída da temperatura e umidade nos últimos 20 minutos de cada ensaio prático para cada método utilizado. Neste intervalo de tempo, as variáveis de saída da temperatura e da umidade estão em regime, logo foi possível fazer algumas comparações em relação a isso. A tabela 5.1 mostra a comparação feita e as equações 5.20, 5.21 e 5.22 indicam a forma como foram feitas as medidas dos valores da variância da variável de saída, da variância da variável de controle e dos valores médios, respectivamente.

$$Var(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - r)^2 \quad (5.20)$$

$$Var(u) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 \quad (5.21)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (5.22)$$

sendo r a referência estabelecida para o sistema e \bar{u} a média dos valores da variável

de controle e definido como $\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$.

Tabela 5.1 – Comparação das variâncias e da média para o caso da temperatura constante.

Variável	Operador Estatístico	Método Modificado de Ziegler-Nichols	Método BLT com F = 3	Método BLT com F = 5
Saída da temperatura	Variância	0,329	0,1655	0,182
	Média	30,1405	29,9013	29,8882
Saída da umidade	Variância	1,0791	0,6087	0,6491
	Média	55,0274	54,8447	54,4534
Controle da temperatura	Variância	2,2447	0,1816	0,0534
Controle da umidade	Variância	168×10^{-4}	$6,5296 \times 10^{-4}$	$2,9854 \times 10^{-4}$

Conforme pode-se observar da tabela 5.1 tanto no circuito de controle da temperatura quanto no circuito de controle da umidade, o método BLT possui uma variância na variável de saída menor que o método modificado de *Ziegler-Nichols*, o que quer dizer que neste método a saída oscila menos em torno da referência e conseqüentemente tem um melhor rendimento do processo. Além disso, o método BLT apresenta uma variância menos excessiva na variável de controle que o método modificado de *Ziegler-Nichols*, o que resulta em um esforço de controle mais adequado para os atuadores. Quanto à comparação do método BLT com fatores de relaxamento diferentes, tanto no circuito de controle da temperatura quanto no circuito de controle da umidade, percebeu-se que o método BLT com $F = 3$ tem uma variância da variável de saída melhor que o método BLT com $F = 5$, mas em compensação a variância da variável de controle se comportou melhor no método BLT com $F = 5$. Quanto à média dos valores das variáveis de saída da temperatura e da umidade, verificou-se que eles estão bem próximos à referência considerada.

Como este trabalho trata-se do controle de uma incubadora neonatal, é importante comparar nestes resultados qual o método mais apropriado para o controle do ambiente de uma incubadora, ou seja, qual o método de controle que irá fornecer o melhor ambiente termoneuro a um recém-nascido prematuro ou com algum tipo de enfermidade. Com isso, três condições da norma NBR IEC 601-2-19 (Equipamento eletromédico. Parte 2: Prescrições particulares para segurança de incubadoras para recém-nascidos) citada na seção 2.4 do capítulo 2 foram levadas em consideração para esta comparação:

i. a temperatura média da incubadora não deve diferir da temperatura de controle por mais que $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ com uma incubadora operando como uma incubadora com temperatura do ar controlada;

ii. a condição de temperatura estabilizada da incubadora deve ser restaurada em no máximo 15 minutos;

iii. e qualquer valor indicado de umidade relativa deve possuir uma exatidão de $\pm 10\%$ do valor real medido.

Pela análise feita das figuras 5.10 a 5.15 e da tabela 5.1, o método modificado de *Ziegler-Nichols* segue essas três condições estabelecidas pela norma. O método BLT com fatores de relaxamento $F = 3$ e $F = 5$ obedecem à primeira e à terceira condições impostas, mas em relação à segunda condição, os seus tempos de acomodações para a temperatura foram superiores a 15 minutos.

Dado o exposto e considerando o sistema de controle de uma incubadora neonatal para uma temperatura do ar constante, concluiu-se que o método modificado de *Ziegler-Nichols* foi o que apresentou o melhor desempenho para se obter um ambiente termoneuro para um recém-nascido prematuro.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CONTROLADORES PARA UMA UMIDADE RELATIVA DO AR CONSTANTE

Feito a análise comparativa dos controladores mantendo a referência da temperatura do ar constante, realizou-se o último ensaio prático para avaliar o desempenho das estratégias do controlador PI ajustados pelo método modificado de *Ziegler-Nichols* e pelo método BLT, sendo que os fatores de relaxamento F utilizados foram 3 e 5. A diferença para o ensaio anterior é que neste caso considerou-se a referência da umidade relativa do ar constante em 45% e a referência da temperatura do ar variável. Também foram realizados testes com durações de 2 horas, sendo que a cada 40 minutos mudava-se a referência da temperatura. No primeiro ciclo, a temperatura foi de 30°C , no segundo de 28°C e no terceiro de 33°C .

As figuras 5.16 e 5.17 mostram os comportamentos dos sinais de saída, do controle dos atuadores e das referências estabelecidas para o ensaio prático quando o controlador PI foi ajustado pelo método modificado de *Ziegler-Nichols*.

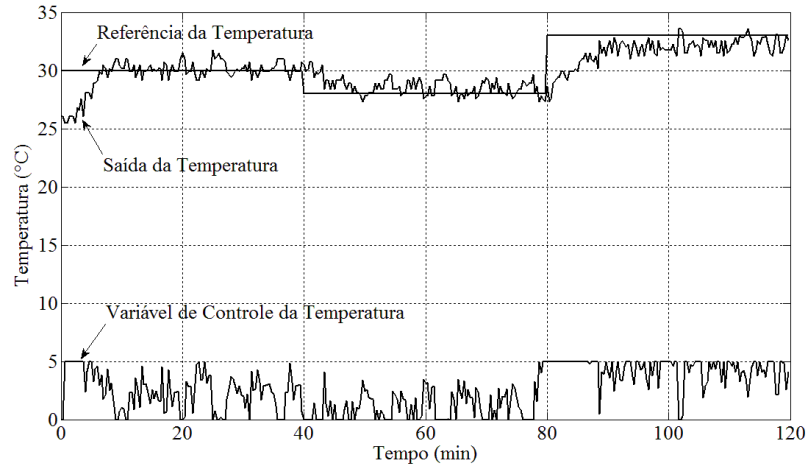


Figura 5.16 – Controle da temperatura pelo método modificado de Ziegler-Nichols.

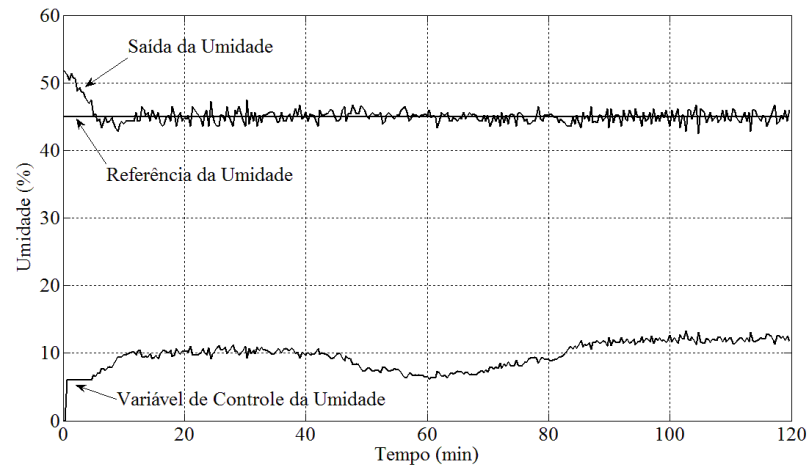


Figura 5.17 – Controle da umidade pelo método modificado de Ziegler-Nichols.

No método modificado de *Ziegler-Nichols*, o controle da saída da temperatura possui tempos de resposta e de acomodação de 7 minutos para a referência inicial de 30°C. Quando a temperatura alterou para 28°C os tempos de resposta e de acomodação foram de 9,33 minutos e na última mudança de referência, no caso 33°C, o tempo de resposta foi de 21,7 minutos, mas a temperatura não chegou a se acomodar em torno da temperatura de referência especificada. No controle da temperatura, os valores de sobressinais sempre tiveram um comportamento próximos da referência especificada. Já o controle da saída da umidade possui um tempo de resposta de 5 minutos, tempo de acomodação de 12 minutos e valor de sobressinal ao redor da referência especificada.

As figuras 5.18 e 5.19 mostram os comportamentos dos sinais de saída, do controle dos atuadores e das referências estabelecidas para o ensaio prático quando o controlador PI foi ajustado pelo método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 3$.

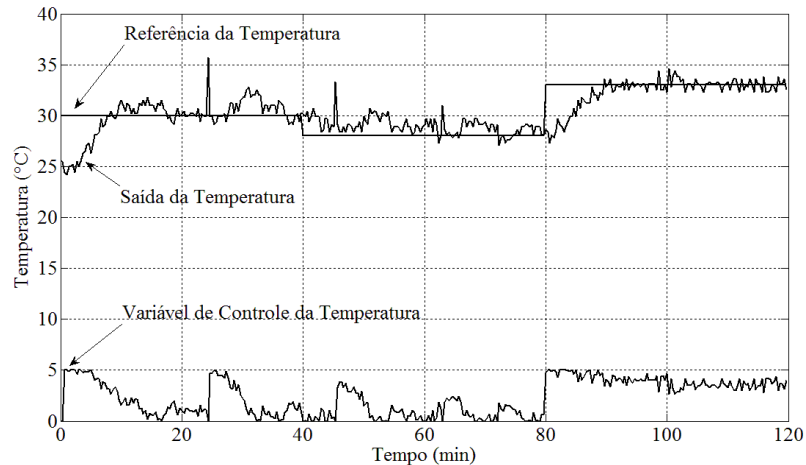


Figura 5.18 – Controle da temperatura pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=3$.

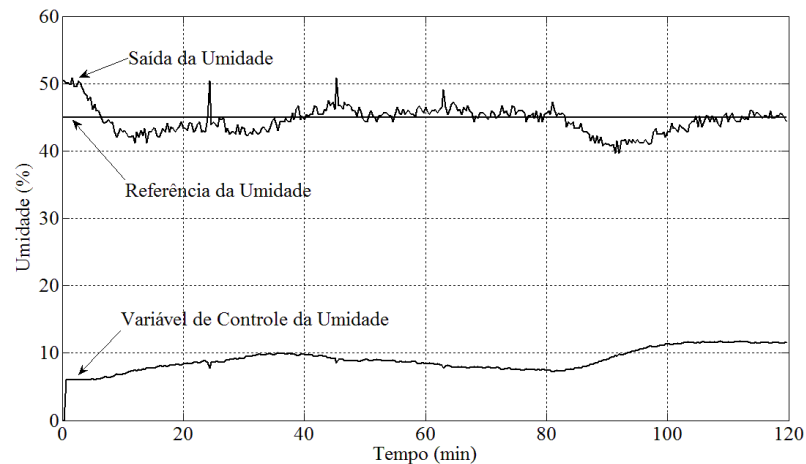


Figura 5.19 – Controle da umidade pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=3$.

No método BLT com um fator de relaxamento $F = 3$, o controle da saída da temperatura possui um tempo de resposta de 8 minutos e tempo de acomodação de 17,33 minutos para a referência inicial de 30°C. Quando a temperatura alterou para 28°C os tempos de resposta e de acomodação foram de 22 minutos e na última mudança de referência, no caso 33°C, os tempos de resposta e de acomodação foram de 9,67 minutos. No controle da temperatura, os valores de sobressinais sempre tiveram um comportamento ao redor da referência especificada. Já o controle da saída da umidade possui um tempo de resposta de 6,33 minutos e tempo de acomodação instável. Isso ocorreu porque a atuação do controlador

da umidade mostrou ser lento para as mudanças que ocorriam na referência da temperatura. Com isso, o valor de sobressinal no controle da umidade ficou mais distante da referência especificada, mas quando o sinal de saída entra em regime, o valor de sobressinal se comporta ao redor da referência.

As figuras 5.20 e 5.21 mostram os comportamentos dos sinais de saída, do controle dos atuadores e das referências estabelecidas para o ensaio prático quando o controlador PI foi ajustado pelo método BLT utilizando um fator de relaxamento $F = 5$.

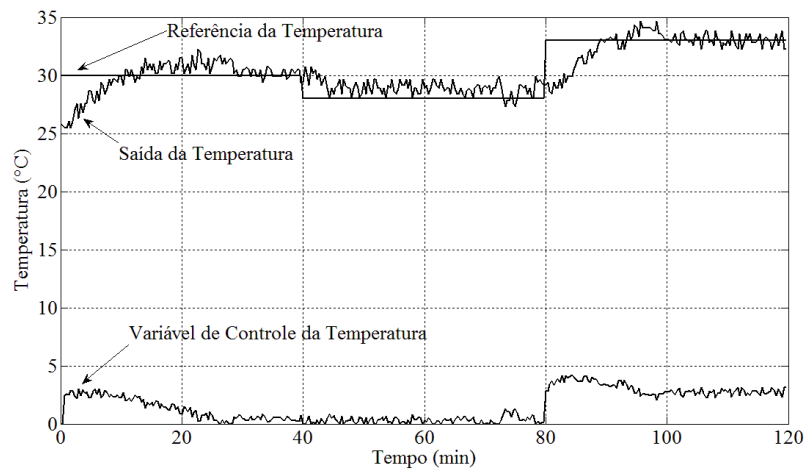


Figura 5.20 – Controle da temperatura pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=5$.

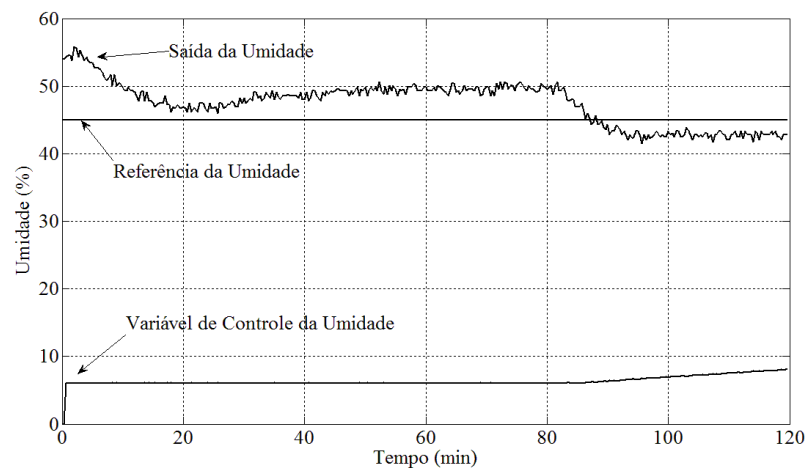


Figura 5.21 – Controle da umidade pelo método BLT com um fator de relaxamento $F=5$.

No método BLT com um fator de relaxamento $F = 5$, o controle da saída da temperatura possui um tempo de resposta de 10,67 minutos e tempo de acomodação de 29,33 minutos para a referência inicial de 30°C. Quando a temperatura alterou para 28°C o tempo de

resposta foi de 4,33 minutos e o tempo de acomodação foi de 33 minutos e na última mudança de referência, no caso 33°C, os tempos de resposta e de acomodação foram de 9 minutos. No controle da temperatura, os valores de sobressinais sempre tiveram um comportamento próximo da referência especificada. Já o controle da saída da umidade não teve tempos de resposta e de acomodação. Isso aconteceu porque a atuação do controlador da umidade mostrou ser lento para mudanças na referência da temperatura. Com isso, o valor de sobressinal no controle da umidade ficou mais distante da referência especificada. Para este caso, seria necessário um ensaio prático mais longo, o que para um sistema de uma incubadora neonatal não é viável.

Após analisar cada controlador individualmente, comparou-se a variância entre a variável de saída da temperatura e da umidade, a variância da variável de controle da temperatura e da umidade e os valores médios da saída da temperatura e umidade nos últimos 20 minutos de cada ensaio prático para cada método utilizado. A tabela 5.2 mostra a comparação feita e as equações 5.20, 5.21 e 5.22 descritas na seção 5.3 deste capítulo mostram a forma como foram feitas as medidas dos valores da variância da variável de saída, da variância da variável de controle e dos valores médios, respectivamente.

Tabela 5.2 – Comparação das variâncias e da média para o caso da umidade constante.

Variável	Operador Estatístico	Método Modificado de Ziegler-Nichols	Método BLT com F = 3	Método BLT com F = 5
Saída da temperatura	Variância	0,4259	0,2978	0,2281
	Média	32,2804	33,0589	33,0067
Saída da umidade	Variância	0,9232	0,7318	0,1914
	Média	44,9785	44,5741	42,7826
Controle da temperatura	Variância	1,6961	0,2122	0,0618
Controle da umidade	Variância	81×10^{-4}	$5,3027 \times 10^{-4}$	45×10^{-4}

Conforme pode-se observar da tabela 5.2 tanto no circuito de controle da temperatura quanto no circuito de controle da umidade, o método BLT possui uma variância na variável de saída menor que o método modificado de *Ziegler-Nichols*, o que quer dizer que neste método a saída oscila menos em torno da referência e conseqüentemente tem um melhor

rendimento do processo. Apesar da variância da variável de saída da umidade controlada através do método BLT com $F = 5$ ser menor que os outros, ela não foi levada em consideração para esta comparação, pois neste método a variável de saída não se acomodou em torno da referência. Além disso, o método BLT apresenta uma variância menos excessiva na variável de controle que o método modificado de *Ziegler-Nichols*, o que resulta em um esforço de controle mais adequado para os atuadores. Quanto à comparação do método BLT com fatores de relaxamento diferentes, percebeu-se que no circuito de controle da temperatura o método BLT com $F = 5$ tem uma variância da variável de saída e da variável de controle melhor que o método BLT com $F = 3$. Quanto à média dos valores das variáveis de saída da temperatura e da umidade, verificou-se que eles estão bem próximos à referência considerada, com exceção da média da variável de saída da umidade controlada através do método BLT com $F = 5$.

Nesta seção repetiu-se a mesma análise feita na seção anterior para saber qual o melhor método de controle a ser aplicado em uma incubadora neonatal levando em consideração também, as três condições estabelecidas através da norma NBR IEC 601-2-19 da seção anterior. Pela análise feita das figuras 5.16 a 5.21 e da tabela 5.2, o método modificado de *Ziegler-Nichols* só não se ajusta a uma condição dessas três impostas, no caso aos tempos de resposta e de acomodação na mudança da última referência da temperatura, de 28°C para 33°C. O método BLT com fatores de relaxamento $F = 3$ e $F = 5$ obedece à primeira e à terceira condições impostas, mas em relação à segunda condição, em diversas ocasiões os seus tempos de resposta e de acomodação para a temperatura são superiores a 15 minutos.

Dado o exposto e considerando o sistema de controle de uma incubadora neonatal para uma umidade relativa do ar constante, concluiu-se que o método modificado de *Ziegler-Nichols* foi o que apresentou o melhor desempenho para se obter um ambiente termoneuro para um recém-nascido prematuro.

5.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo foi direcionado para os resultados e discussões das simulações e dos ensaios práticos realizados neste trabalho. Para isso, mostrou-se inicialmente como a matriz função de transferência foi identificada. Logo depois foram apresentados os resultados de simulações da análise de robustez e estabilidade dos controladores utilizados, e por último,

foram feitos ensaios práticos para fazer uma análise comparativa dos controladores em duas situações diferentes: primeiro, mantendo uma temperatura do ar constante com uma umidade relativa do ar variável e em seguida, mantendo uma umidade relativa do ar constante com uma temperatura do ar variável.

Assim, a partir dos ensaios práticos, sugere-se que para simular a utilização clínica da incubadora neonatal o método modificado de *Ziegler-Nichols* foi o mais adequado por possuir tempos de resposta e de acomodação mais rápidos quando comparados aos outros métodos. Apesar de suas variâncias das variáveis de saídas da temperatura e da umidade serem maiores que os outros métodos, esses valores são mínimos e estão dentro das condições exigidas pela norma técnica.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Extensivas simulações e ensaios práticos foram realizados e os resultados são apresentados nesta dissertação. As implementações práticas sugerem que o controlador PI ajustado através do método modificado de *Ziegler-Nichols* apresenta os melhores resultados de desempenho para esta aplicação. Isto quer dizer que para se obter um ambiente termoneutro propício à sobrevivência de um neonato prematuro este método mostrou ser melhor quando comparado com o método BLT com fatores de relaxamento 3 e 5. O método modificado de *Ziegler-Nichols* foi o método de controle que apresentou na maioria das situações os menores tempos de resposta e de acomodação das variáveis de saída da temperatura e da umidade. Em muitos casos, a condição de temperatura estabilizada aconteceu com um tempo bem inferior ao que a norma pede.

Além disso, os valores médios das variáveis de saídas em regime estão dentro das condições estabelecidas pela norma e em alguns casos até com uma diferença considerável ao que diz as normas. Mostrou-se que é possível seguir a norma utilizando-se um simples controlador PI, que tem grande aplicação industrial e possui pouca base de hardware.

A norma técnica NBR IEC 601-2-19 que estabelece as condições de segurança para incubadoras neonatais destinadas a recém-nascidos mostrou-se muito limitada quanto ao controle da umidade relativa do ar no interior da incubadora. Isto se deve porque a norma não menciona qual o intervalo de umidade considerado ideal para o conforto térmico do neonato e por considerar normal uma incubadora que possua uma margem de erro de até $\pm 10\%$ do valor especificado para o controle de umidade. Sabe-se que uma mudança de 4% na umidade relativa do ar de um ambiente é o suficiente para alterar a temperatura do mesmo em até 1°C, e isso é o suficiente para que a incubadora deixe de ter um conforto térmico necessário à sobrevivência do neonato.

O protótipo desenvolvido e o seu sistema de funcionamento descrito neste trabalho encontram-se em funcionamento no Laboratório de Pesquisa em Automação e Robótica (GPAR) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Existe o interesse de juntamente com o Departamento de Medicina da Universidade aperfeiçoar o protótipo desenvolvido de acordo com as necessidades que os neonatos

necessitam, com o intuito de melhorar cada vez mais o seu ambiente térmico. Devido às limitações técnicas do resistor de aquecimento adquirido, não foi possível fazer o controle da temperatura do ar dentro dos padrões especificados pela norma descrita no capítulo 2.

Recomenda-se como desenvolvimento futuro deste trabalho:

i. Substituição do resistor de aquecimento por um de maior potência para que se chegue a temperaturas mais elevadas no interior da incubadora;

ii. Ensaios práticos em que as referências de temperatura e de umidade sejam alteradas simultaneamente;

iii. Ensaios práticos utilizando-se outros fatores de relaxamento ou fatores de relaxamentos diferentes para cada circuito de controle;

iv. Estudar métodos de controle mais avançados como Lógica Fuzzy, Controle Preditivo, Redes Neurais Artificiais;

v. Criar um sistema embarcado que englobe as malhas de temperatura e umidade relativa do ar, capaz de fazer todo o controle do sistema;

vi. Criar um sistema de aquisição de dados sem fio (wireless).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, O. M.; ALBUQUERQUE, D. Q. & COELHO, A. A. R. Auto-Sintonia de Controladores PID Monovariável e Multivariáveis. In: 3º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, São Paulo, vol. 1, pp. 1 – 5, 2003.

ASTRÖM, K. & HÄGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, 2ª Edition, cap. 4, pp. 120 – 199, 1995.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Equipamentos Médico-Hospitalares e o Gerenciamento da Manutenção: Capacitação a Distância. 1ª Ed., Brasília: Editora Ministério da Saúde, caps. 5 e 11, pp. 225 – 246 e 399 – 430, 2002.

CHIU, M. S. & ARKUN, Y. A Methodology for Sequential Design of Robust Decentralized Control Systems. Automatica, vol. 28, pp. 997 – 1001, 1992.

CHOI, J. Y.; LEE, J.; JUNG, J. H.; LEE, M. & HAN, C. Sequential Loop Closing Identification of Multivariable Process Models. Computers and Chemical Engineering, vol. 24, pp. 809 – 814, 2000.

COELHO, A. A. R. & COELHO, L. S. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Florianópolis: Editora da UFSC, cap. 4, pp. 63 – 98, 2004.

FARIA, R. A. Projeto de uma Incubadora Neonatal Microprocessada, de acordo com a Norma Técnica NBR-IEC-601-2-19. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2001.

FORD, M. P. & DALY, K. C. Dominance Improvement by Pseudodecoupling. Proc. IEE, vol. 126, pp. 1316 – 1320, 1979.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D. & EMAMI-NAEINI, A. Feedback Control of Dynamic Systems. 5ª Ed. Addison-Wesley, Massachusetts: Prentice Hall, 2006.

GUIMARÃES, A. G. & OLIVEIRA, L. A. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 6ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, cap. 14, pp. 428 – 454, 1998.

GUYTON, A. C. & HALL, J. E. Fisiologia Humana e Mecanismos das Doenças. 6ª Ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara/Koogan, caps. 47 e 56, pp. 511 – 520 e 597 – 609, 1998.

HAWKINS, D. J. Pseudodiagonalisation and the Inverse Nyquist Array Method. Proc. IEE, vol. 119, pp. 337 – 342, 1972.

HOVD, M. & SKOGESTAD, S. Sequential Design of Decentralized Controllers. Automatica, vol. 30, pp. 1601 – 1607, 1994.

IAIONE, F. Desenvolvimento de um Equipamento Eletrônico para o Ensaio de Incubadoras Infantís. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

KAREN, T. Thermoregulation in Neonates. Neonatal Network. vol. 13, n. 2, pp. 15 – 21, 1994.

KENNER, C. Enfermagem Neonatal. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Reichmann, cap. 5, pp. 158 – 258, 2001.

KREBS, V. L. J.; FALCÃO, M. C. & OKAY, Y. Distúrbios do Metabolismo de Água e Eletrólitos. In: MARCONDES, E. Pediatria Básica: Tomo I – Pediatria Geral e Neonatal. 9ª Ed., São Paulo: Editora Sarvier, Seção VII, cap. 1, pp. 444 – 446, 2003.

LI, S.-Y.; CAI, W.-J.; MEI, H. & XIONG, Q. Robust Decentralized Parameter Identification for Two-Input Two-Output Process from Closed-Loop Step Responses. Control Engineering Practice, vol. 13, pp. 519 – 531, 2005.

LOH, A. P.; HANG, C. C.; QUEK, C. K. & VASNANI, V. U. Autotuning of Multiloop Proportional-Integral Controllers Using Relay Feedback. Ind. Eng. Chem. Res., vol. 32, pp. 1102 – 1107, 1993.

LONG, J. C.; LUCEY, J. F. & PHILIP, A. G. S. Noise and Hypoxemia in the Intensive Care Nursey. Pediatrics, Evanston, vol. 65, pp. 143 – 144, Janeiro de 1980.

LUYBEN, W. L. Simple Method for Tuning SISO Controllers in Multivariable Systems. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., vol. 25, pp. 654 – 660, 1986.

LUYBEN, W. L. Process Modeling Simulation, and Control for Chemical Engineers. McGraw-Hill, Inc., 1990.

MARTINEZ, F. E. & CAMELO JR., J. S. Alimentação do Recém-Nascido Pré-Termo. *Jornal de Pediatria*, vol. 77, supl. 1, s. 32 – 40, Rio de Janeiro, 2001.

MEI, H.; Li, S.-Y.; CAI, W.-J. & XIONG, Q. Decentralized Closed-Loop Parameter Identification for Multivariable Processes from Step Responses. *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 68, pp. 171 – 192, 2005.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, DATASUS. Tecnologia da Informação a Serviço do SUS, em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?sim/cnv/infuf.def>. Acessado em: 07 de setembro de 2009.

MONICA, T. J.; YU, C. C.; LUYBEN, W. L. Improved Multiloop Single-Input/Single-Output (SISO) Controllers for Multivariable Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 27, pp. 969 – 973, 1988.

NATIONAL INSTRUMENTS. NI USB-6009. Datasheet, 2008.

NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Datasheet, 2000.

NBR IEC 601-2-19. Equipamento Eletromédico – Parte 2: Prescrições Particulares para Segurança de Incubadoras para Recém-Nascidos (RN). ABNT, 1997.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, cap. 5 e 11, pp. 177 – 261 e 576 – 641, 2000.

OLIVEIRA, M. A. Sistema de Ensaio de Desempenho de Incubadora Neonatal. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

O'REILLY, J. & LEITHEAD, W. E. Multivariable Control by Individual Channel Design. *Int. J. Control*, vol. 54, pp. 1 – 46, 1991.

RIBEIRO, M. A. C. Aspectos que Influenciam a Termorregulação: Assistência de Enfermagem ao Recém-Nascido Pré-Termo. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade Integrada JK, Taguatinga-DF, 2005.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W. & YOUNG, H. D. Física 2, 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, cap. 15, 16 e 17, pp. 346 – 390, 1997.

SEGRE, C. A. M. Perinatologia: Fundamentos e Prática. 1ª Ed. São Paulo: Sarvier, cap. 3 e 14, pp. 23 – 304 e 369 – 373, 2002.

SEMINO, D. & SCALI, C. Improved Identification and Autotuning of PI Controllers for MIMO Processes by Relay Techniques. *Journal of Process Control*, vol. 8, pp. 219 – 227, 1998.

SENSIRION THE SENSOR COMPANY. Application Note Introduction to Relative Humidity. 2005.

SENSIRION THE SENSOR COMPANY. SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor. Datasheet, 2009.

SHEN, S.-H. & YU, C.-C. Use of Relay-Feedback Test for Automatic Tuning of Multivariable Systems. *AIChE Journal*, vol. 40, pp. 627 – 646, 1994.

SHIU, S.-J. & HWANG, S.-H. Sequential Design Method for Multivariable Decoupling and Multiloop PID Controllers. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, vol. 37, pp. 107 – 119, 1998.

SKOGESTAD, S. & POSTLETHWAITE, I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. 2º Ed. John Wiley & Sons, New York, cap. 3 e 4, pp. 69 – 168, 2005.

WANG, Q. G.; GUO, X. & ZHANG, Y. Direct Identification of Continuous Time Delay Systems from Step Responses. *Journal of Process Control*, vol. 11, pp. 531 – 542, 2001.

WANG, Y. G. & CAI, W. J. Decentralized Relay-Based Multivariable Process Identification in Frequency Domain. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, pp. 873 – 878, 2003.

WEBSTER, J. G. *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*. Ed. John Wiley & Sons Inc., pp. 1643 – 1656, 1988.

WEBSTER, J. G. *Medical Instrumentation: Application and Design*. Ed. John Wiley & Sons Inc., pp. 607 – 609, 1998.

XIONG, Q.; CAI, W.-J.; HE, M.-J. & HE, M. Decentralized Control System Design for Multivariable Processes – A Novel Method Based on Effective Relative Gain Array. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, pp. 2769 – 2776, 2006.

ZARAGOZA, I.; GÓMEZ, Y.; CABRERA, A.; TRUJANO, G. et al. Diseño y Construcción de un Prototipo de Incubadora Controlado por Lógica Difusa. In: *Memorias II Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica*, maio 23 – 25, La Habana, Cuba, Artigo 00281, 2001.

ZHU, Y. *Multivariable System Identification for Process Control*. Eindhoven: Elsevier Science & Technology Books, cap. 1, pp. 1 – 14, 2001.