

PID ADAPTATIVO MULTIVARIÁVEL APLICADO A UMA INCUBADORA NEONATAL

JOÃO G. R. MOTA¹, RENÉ D. O. PEREIRA¹, BISMARCK C. TORRICO¹.

1. *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará
Caixa postal 6001 – Campus do Pici, CEP:60455-760, Fortaleza- CE*

*E-mails: jgleidson@dee.ufc.br, reneolimpio@yahoo.com.br,
bismark@dee.ufc.br*

Abstract— This work aims to present a technique for tuning an Adaptive Multivariable PID controller applied in a neonatal incubator to maintain levels at levels compatible with NBR IEC-60.601-2-19/1999. The mathematical model of the process is the type MIMO with transport delay. Simulation results are shown to prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords— Adaptive Multivariable PID, MIMO Processes with Delay Transport, Neonatal Intensive Care Incubator, Infant Mortality.

Resumo— Este trabalho tem por objetivo apresentar uma técnica de ajuste de um controlador PID Adaptativo Multivariável aplicado em uma incubadora neonatal visando manter as grandezas em patamares estabelecidos pela norma NBR IEC-60.601-2-19/1999. O modelo matemático do processo é do tipo MIMO com atraso de transporte. Resultados de simulação serão exibidos para comprovar a eficácia do algoritmo proposto.

Palavras-chave— PID Adaptativo Multivariável, Processos MIMO com Atraso de Transporte, Incubadora Neonatal, Mortalidade Infantil.

1 Introdução

Os indicadores de saúde de um país são utilizados pela Saúde Pública para avaliar as condições de vida de uma população. Dentre todos os indicadores, será destacada neste trabalho a mortalidade infantil, que é um assunto amplamente discutido no mundo inteiro, especialmente nos países em desenvolvimento. O Brasil tem melhorado seus índices no que diz respeito à mortalidade infantil passando de 120,7 mortos a cada 1000 nascimentos em 1970 para 16 em 2011, mas ainda possui altos índices quando comparados a países como a Islândia cujo índice não ultrapassa 2,6 (Jornal Estado de São Paulo, 2013).

Com base em informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a taxa de mortalidade infantil no Brasil tem um perfil decrescente desde 1970 com uma redução de aproximadamente 86% nesse período. Contudo, a participação da mortalidade neonatal (referente aos primeiros 27 dias de vida) aumentou, ou seja, a redução da mortalidade neonatal não acompanhou a redução da mortalidade pós-neonatal (a partir do 28º dia de vida até o primeiro ano de vida) IBGE(2013), fato que requer uma maior atenção às crianças nesta faixa etária.

A Organização das Nações Unidas – ONU, por meio da UNICEF, estabeleceu no ano de 2000 os oito objetivos do milênio (IPEA, 2013), onde há, dentre outras questões, um incentivo aos países para reduzirem em dois terços suas taxas de mortalidade infantil até o ano de 2015. O Ministério da Saúde lançou então, em 2004, o Pacto Nacional pela Redução da Mortalidade Materna e Neonatal, pois ainda citando o relatório da UNICEF, 14% desta mortalidade são devidas a complicações neonatais (Ministério

da Saúde, 2013). O pacto citado proporcionou um maior investimento na saúde do neonato, incluindo melhorias das UTIs especializadas e, conseqüentemente, cobrança de uma maior qualidade nas incubadoras neonatais.

A incubadora neonatal é um aparelho eletro-médico cuja função é contribuir na regulação da temperatura do neonato (norma de segurança, NBR IEC 60601-2-19), ajudando a reduzir a perda de água e auxiliando no desenvolvimento mais rápido do bebê e com menor incidência de doenças. O recém-nascido prematuro tem a pele mais fina, não possuindo quase nenhuma gordura subcutânea, apresentando uma razão elevada de superfície e volume corporal, fazendo com que os vasos superficiais de sangue percam facilmente calor por convecção para o ambiente que o envolve, ou seja, o neonato possui capacidade limitada de produzir quantidade de calor suficiente para manter sua temperatura adequada ao metabolismo. (Iaione, 2002)

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma nova técnica de sintonia automática para controladores PID Multiloop (MPID) proposta por Veronesi(2011), aplicada a uma incubadora neonatal caracterizada como um processo MIMO. Os parâmetros do processo são calculados, empregando simples experimentos em malha fechada (onde controladores PID inicialmente sintonizados estão atuando), ou seja, avaliando a resposta do sistema a uma sequência de sinais (set-points), um para cada entrada de referência. Uma vez que a função de transferência do processo é obtida, regras de ajustes são aplicadas adequadamente para recalcular os controladores PID.

Resultados de simulação são apresentados para ilustrar a metodologia e para verificar a sua eficácia.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 será descrita a formulação matemática da incubadora neonatal, na Seção 3 será apresentado o algoritmo do MPID, na Seção 4 serão mostrados os ajustes de sintonia feitos ao algoritmo, bem como resultados de simulação, e por fim, na Seção 5 são exibidas as conclusões do trabalho.

2 Formulação do Problema – Identificação da Incubadora Neonatal

Nesta seção será feita a caracterização da incubadora neonatal que é utilizada como objeto deste estudo. Primeiramente, serão abordados os aspectos gerais da planta, seguidos pelas descrições dos seus principais sistemas e por fim, será feita sua modelagem.

2.1 Aspectos Gerais

O esquema geral de funcionamento da incubadora utilizada é mostrado na Figura 1, enquanto que a Figura 2 exibe o protótipo real empregado neste trabalho.

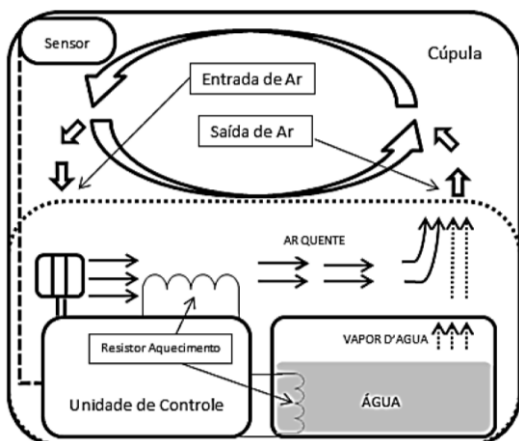


Figura 1: Esquema de Funcionamento da Incubadora (Fonte: próprio autor)



Figura 2: Incubadora (Fonte: próprio autor)

O bebê recebe na cúpula, por convecção, o ar aquecido e adicionado ao vapor de água. Cinco sensores distribuídos pelo suporte de acomodação do recém-nascido além do sensor principal no alto da cúpula, monitoram os níveis de umidade e temperatura (Brito, 2010).

2.2 Sistema de Aquecimento e Umidificação

O controle da temperatura do ar e da produção de vapor d'água é realizado aumentando ou diminuindo a potência entregue aos resistores de aquecimento (Cavalcante, 2010). A forma adotada para regular esta potência foi através da modulação da tensão eficaz a qual o resistor está submetido, em um circuito conhecido na literatura como gradador. (RASHID, 1999).

O ciclo de trabalho da modulação (PWM) citada anteriormente deve ser enviado pelo controlador via um sistema de malha fechada que monitora o erro entre o sinal de referência e o valor da saída.

2.3 Identificação da Planta

A planta a ser controlada possui duas entradas de referência associadas a duas saídas (temperatura e umidade), assim sendo, o sistema pode ser considerado multivariável como do tipo TITO (Åstrom, 1993).

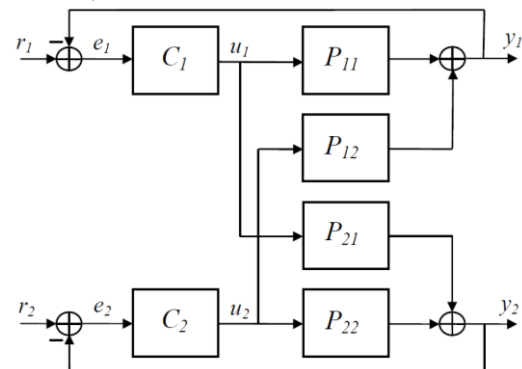


Figura 3: Esquema da Planta TITO

A identificação da planta foi baseada em uma técnica computacional de minimização do erro quadrático entre o modelo aplicado e a planta, já amplamente divulgado na literatura (Ljung, 1999) e pode ser representada por uma matriz de funções de transferências dada por:

$$P_{11} = \frac{0,1525}{46,34s^2 + 1,361s + 1}; \quad P_{12} = \frac{-0,2558}{363,7s^2 + 38,23s + 1};$$

$$P_{21} = \frac{0,2573}{4634s^2 + 134,2s + 1}; \quad P_{22} = \frac{0,1668}{420,5s^2 + 45,62s + 1};$$

Cada malha da planta possui um atraso de transporte associado, representado a seguir:

$$\theta_{11} = -2\text{min}; \quad \theta_{12} = 10^{-4}\text{min}; \quad \theta_{21} = -2\text{min}; \quad \theta_{22} = 1,69\text{min}.$$

3 O algoritmo MPID

O trabalho que será aqui apresentado foi baseado no algoritmo proposto por Veronesi et. al (2011) cuja ideia principal é a estimação do processo por simples experimentos em malha fechada, avaliando a resposta do sistema a uma sequência de set points (um em cada entrada). Com base na função de transferência do processo e fundamentado no *Internal Model Con-*

trol (IMC) o ajuste do PID é feito de acordo com regras já conhecidas na literatura. O algoritmo foi desenvolvido para ser aplicado em processos MIMO. Conforme citado anteriormente a incubadora é um processo TITO que pode ser descrito como:

$$\mathbf{P}(s)=[P_{ij}(s)] \quad i,j = 1, 2 \quad (1)$$

cada malha $P_{ij}(s)$ pode ser considerada:

$$P_{ij} = \frac{\mu_{ij}e^{-s\theta_{ij}}}{q_{ij}(s)} \quad (2)$$

onde $q_{ij}(s)$ é dado por $q_{ij}(s) = \prod_{k=1}^{n_{ij}}(1 + s\tau_{ij,k})$

A soma do atraso de transporte e a constante de tempo de cada processo P_{ij} , será definida como T_{ij} , e será adotada a lei de controle descentralizada com controlador PID ideal:

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde cada $C_j(s)$ pode ser escrito como:

$$C_j(s) = K_{pj}(1 + \frac{1}{T_{ij}s} + T_{dj}s) \quad j = 1, 2 \quad (4)$$

3.1 Estimação dos Parâmetros do Processo

A estimação dos parâmetros iniciais do processo pode ser obtida pela avaliação da resposta do sistema à sequência de sinais do tipo degrau, aplicados em cada um dos loops. Isto significa dizer que a resposta transitória causada por um set point deve ser terminada antes de aplicar o próximo e o sistema não pode ter perturbações externas.

Os sinais de controle $U_1(s)$ e $U_2(s)$ que serão aplicados nos processos, durante o primeiro degrau ($R_1 \neq 0$ e $R_2=0$) podem ser representados por:

$$\begin{aligned} U_1(s) &= C_1(s).(R_1(s)-(P_{11}(s)U_1(s) + P_{12}(s)U_2(s))) \\ &\quad \text{e} \\ U_2(s) &= C_2(s).(-(P_{22}(s)U_2(s) + P_{21}(s)U_1(s))) \end{aligned} \quad (5)$$

E os dois erros de controle são:

$$\begin{aligned} E_{1,1}(s) &= R_1(s) - P_{11}(s)U_1(s) - P_{12}(s)U_2(s) \\ E_{2,1}(s) &= -P_{21}(s)U_1(s) - P_{22}(s)U_2(s) \end{aligned} \quad (6)$$

Note que $E_{1,1}(s)$ indica o erro da variável do loop1 após a mudança de set point neste loop, enquanto $E_{2,1}(s)$ representa o erro da variável do loop 2 após a mudança de set point no loop 1.

Aplicando o teorema do valor final, obtêm-se as seguintes expressões para as integrais dos erros em regime estacionário:

$$IE_{1,1} = \int e_{1,1}(t)dt = \frac{\mu_{22}T_{i1}}{K_{p1}(\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21})} A_{s1}$$

$$IE_{2,1} = \int e_{2,1}(t)dt = -\frac{\mu_{21}T_{i2}}{K_{p2}(\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21})} A_{s1} \quad (7)$$

onde A_{s1} representa a amplitude do degrau aplicado ao primeiro loop.

Serão definidas duas novas variáveis:

$$\begin{aligned} v(t) &= \mu_{11}u_1(t) + \mu_{12}u_2(t) - y_1(t) \\ \omega(t) &= \mu_{21}u_1(t) + \mu_{22}u_2(t) - y_2(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Pode-se então encontrar as integrais IV e IW destas variáveis:

$$\begin{aligned} IV_1 &= \int v(t)dt = \left(\frac{\mu_{11}\mu_{22}T_{11}}{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}} - \frac{\mu_{12}\mu_{21}T_{12}}{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}} \right) A_{s1} \\ IW_1 &= \int \omega(t)dt = \left(\frac{\mu_{21}\mu_{22}T_{21}}{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}} - \frac{\mu_{21}\mu_{22}T_{22}}{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}} \right) A_{s1} \end{aligned} \quad (9)$$

De forma análoga encontram-se as equações quando o set point for aplicado ao segundo loop ($R_1 \neq 0$ e $R_2 = 0$):

$$\begin{aligned} E_{2,2}(s) &= R_2(s) - P_{21}(s)U_1(s) - P_{22}(s)U_2(s) \\ E_{1,2}(s) &= -P_{11}(s)U_1(s) - P_{12}(s)U_2(s) \end{aligned} \quad (10)$$

$$IE_{1,2} = \int e_{1,2}(t)dt = \frac{\mu_{11}T_{i2}}{K_{p2}(\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21})} A_{s2}$$

$$IE_{2,2} = \int e_{2,2}(t)dt = -\frac{\mu_{12}T_{i1}}{K_{p1}(\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21})} A_{s2} \quad (11)$$

e

$$IV_2 = \int v(t)dt = \left(\frac{\mu_{12}\mu_{11}(T_{12} - T_{11})}{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}} \right) A_{s2}$$

$$IW_2 = \int \omega(t)dt = \left(\frac{\mu_{21}\mu_{22}T_{22} - \mu_{12}\mu_{21}T_{21}}{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}} \right) A_{s2} \quad (12)$$

onde A_{s2} , representa a amplitude do degrau aplicado ao segundo loop.

4 Ajustes e Resultados de Simulação

Ao fim da resposta ao segundo degrau, são calculados os ganhos estáticos do modelo (μ_{ij}) e a soma das constantes de tempo e do atraso de transporte (T_{ij}):

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= \frac{T_{i1}IE_{2,2}}{K_{p1}(IE_{1,1}IE_{2,2} - IE_{2,1}IE_{1,2})} A_{s1} \\ \mu_{12} &= \frac{T_{i2}IE_{1,2}}{K_{p2}(IE_{1,2}IE_{2,1} - IE_{1,1}IE_{2,2})} A_{s1} \\ \mu_{21} &= \frac{T_{i1}IE_{2,1}}{K_{p1}(IE_{1,2}IE_{2,1} - IE_{1,1}IE_{2,2})} A_{s2} \\ \mu_{22} &= \frac{T_{i2}IE_{1,1}}{K_{p2}(IE_{1,1}IE_{2,2} - IE_{2,1}IE_{1,2})} A_{s2} \end{aligned} \quad (13)$$

e

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{\mu_{21}IV_2}{\mu_{11}A_{s2}} + \frac{IV_1}{A_{s1}} \\ T_{12} &= \frac{\mu_{22}IV_2}{\mu_{12}A_{s2}} + \frac{IV_1}{A_{s1}} \\ T_{21} &= \frac{\mu_{11}IW_1}{\mu_{21}A_{s1}} + \frac{IW_2}{A_{s2}} \\ T_{22} &= \frac{\mu_{12}IW_1}{\mu_{22}A_{s1}} + \frac{IW_2}{A_{s2}} \end{aligned} \quad (14)$$

O processo de identificação consiste, de forma resumida, na avaliação de $IE_{1,1}$, $IE_{2,1}$ (Eq.(6), $IE_{1,2}$, $IE_{2,2}$ Eq.(11), IV_1 , IW_1 Eq.(9), IV_2 , IW_2 Eq.(12) e os cálculos de μ_{ij} Eq.(13) e T_{ij} Eq.(14).

Os parâmetros ajustados do PID podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} K_{pj} &= \frac{1}{8\mu_{jj}} \frac{4\tilde{\tau}_{jj} + \tilde{\theta}_{jj}}{\tilde{\theta}_{jj}} \\ T_{dj} &= \frac{1}{12} \frac{(12\tilde{\tau}_{jj} - \tilde{\theta}_{jj})\tilde{\theta}_{jj}}{4\tilde{\tau}_{jj} + \tilde{\theta}_{jj}} \\ T_{ij} &= \frac{4\tilde{\tau}_{jj} + \tilde{\theta}_{jj}}{4} \frac{\mu_{11}\mu_{22} - \mu_{12}\mu_{21}}{\mu_{11}\mu_{22}} \end{aligned} \quad (15)$$

onde:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \tau_{ij,1} + \frac{\tau_{ij,2}}{2} \quad \text{e} \quad \tilde{\theta}_{ij} = \theta_{ij} + \frac{\tau_{ij,2}}{2} + \sum_{k=3}^{n_{ij}} \tau_{ij,k}$$

$T_{ij} = \tilde{\tau}_{ij} + \tilde{\theta}_{ij}$ e $\tilde{\theta}_{ij}$ pode ser considerado o intervalo de tempo entre a aplicação do degrau (R_j) até o instante em que a saída (y_i) alcança 2% do valor de regime permanente.

4.1 Resultados de simulação

Tomando como referência a identificação proposta no início deste artigo, e entradas de degraus unitários, os parâmetros de um controlador PID obtido a partir do método de Ziegler-Nichols:

$K_{p1} = 25,208$; $t_{i1} = 7,834$ e $t_{d1} = 1,000$ e $k_{p2} = 42,216$; $t_{i2} = 14,286$ e $t_{d2} = 1,000$, formam ainda inseridos filtros nas malhas 1 e 2 de constante de tempo igual 0,1. Vale salientar que os valores podem ser desprezados nos cálculos em virtude de não serem significativos perante a constante de tempo do processo. Aplicando o algoritmo proposto por Veronesi(2011), obtém-se os seguintes valores para os parâmetros do processo:

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= 0,153; & \mu_{12} &= -0,255; & \mu_{21} &= 0,254; \\ \mu_{22} &= 0,165; & \tau_{11} &= 15,646; & \tau_{22} &= 40,783; \\ T_{11} &= 17,856; & T_{12} &= 37,401; & T_{21} &= 130,586; \\ T_{22} &= 42,893; & \theta_{11} &= 2,210; & \theta_{12} &= 0,280; \\ \theta_{21} &= 5,770; & \theta_{22} &= 2,110. \end{aligned}$$

De acordo com a Eq.(15), os valores recalculados para os dois controladores PID são:

$$\begin{aligned} K_{p1} &= 23,906; & T_{i1} &= 57,659; & T_{d1} &= 0,527; \\ K_{p2} &= 59,312; & T_{i2} &= 147,046; & T_{d2} &= 0,519. \end{aligned}$$

A resposta ao degrau para ambas as plantas (umidade e temperatura) são mostradas nas figuras 4 e 5,

onde se percebe a eficiência da metodologia aplicada.

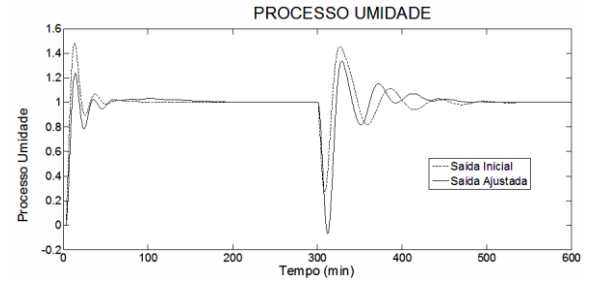


Figura 4: Saída do Processo Umidade

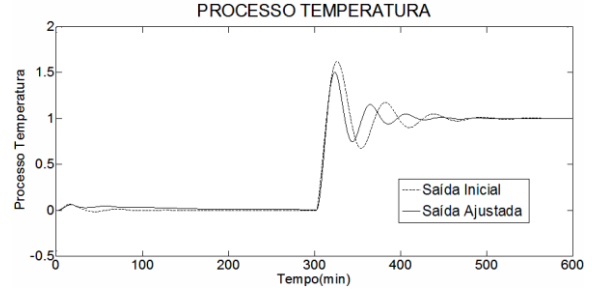


Figura 5: Saída do processo temperatura

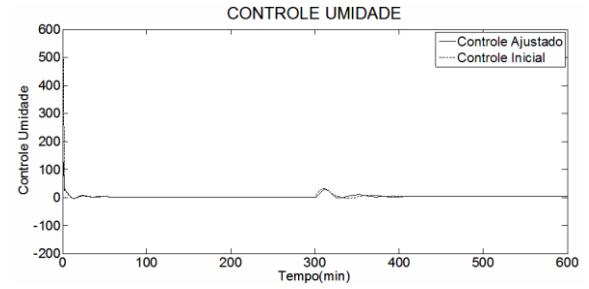


Figura 6: Sinais de Controle da Umidade

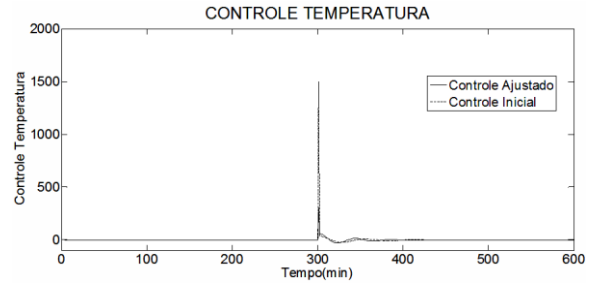


Figura 7: Sinais de Controle da Temperatura

Considerando um sistema sem limitações de saturação, percebe-se pela Fig. 6 que o sinal de controle inicial tem seu primeiro valor próximo a 500, enquanto no sinal do controle ajustado este valor não supera 130. Este efeito é notado, de forma análoga, com a temperatura no momento em que ocorre a mudança de degrau como pode ser observado na Fig.7, onde o valor do controle inicial é próximo de 1500, enquanto no controle ajustado, este valor gira em torno de 300.

A tabela 1 mostra a comparação entre os tempos de assentamento usando o critério de 5% ($T_{5\%}$) e sobressinal(O.S.%) para as plantas de umidade e temperatura para os controladores PID Inicial e PID Ajustado.

Tabela 1: Comparação entre os controladores

		Umidade		Temperatura	
		R_1	R_2	R_1	R_2
PID Inicial	$T_{5\%}$ (minutos)	37,9	118,6	20,5	118,8
	O.S.%	48,07	-72,93	6,37	62,4
PID Ajustado	$T_{5\%}$ (minutos)	46,3	120,2	20,5	88,1
	O.S.%	23,61	-106,39	5,87	50,44

Como pode ser visto pela Tabela1, para o primeiro degrau na malha de umidade houve uma melhora no valor do sobressinal, mas um maior comprometimento no tempo de assentamento, quanto à malha de temperatura percebe-se também uma diminuição no sobressinal sem comprometer o tempo de assentamento. Analisando agora o segundo degrau, quanto à malha de umidade, foram obtidos valores superiores no PID ajustado quando comparado ao PID inicial, no entanto, na malha de temperatura, percebe-se valores menores tanto para o sobressinal quanto para o tempo de assentamento.

5 Conclusão

Neste artigo foi aplicada uma metodologia de auto-ajuste para controladores PID multivariável, proposta por Veronesi (2011), em um modelo matemático que representa uma incubadora neonatal. O procedimento de identificação em malha fechada baseia-se na avaliação de uma sequência de respostas degrau (multi-loop) e em seguida parâmetros são calculados para reajustar os controladores e melhorar o seus desempenhos. Os resultados de simulações mostraram a eficácia do método em um processo multivariável de segunda ordem, com melhorias significativas dos sinais de controle, tempo de assentamento e sobressinais.

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará - DEE_UFC e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP, pelas contribuições de infraestrutura e financeiras.

Referências Bibliográficas

- Åstrom, K.J., Hägglund, T., Hang, C.C., and Ho, W.K. (1993). Automatic tuning and adaptation for PID controllers - a survey. *Control Engineering Practice*, 1, 699–714.
- Brito Neto, J. O., Controle Multivariável de Temperatura e Umidade Aplicado em Incubadoras Neonatais. Fortaleza, Agosto de 2010.
- Cavalcante, M. U., Torrico, B. C., Brito Neto, J. O., Da Costa Filho, F. L. M., Camurça, L.J., Almeida, O. M., Adão, A. A., Controle de umidade e temperatura numa incubadora neonatal

usando controle preditivo. Congresso Brasileiro de Automática, 2010.

Estado de São Paulo. Mortalidade infantil no mundo cai mais depressa do que previa a ONU. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/noticias/vidae,mortalidade-infantil-no-mundo-cai-mais-depressa-do-que-previa-a-onu,555951.0.htm>. Acessado em: 12 de junho de 2013.

Iaione, F., Moraes, R. Equipamento para Avaliação de funcionalidade de incubadoras para recém-nascidos. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, 2010. UNICAMP.

IBGE. Banco de Dados Agregados. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 22 de maio de 2013.

IPEA, Presidência da República do Brasil, Relatório Nacional de Acompanhamento, Objetivos de desenvolvimento do milênio. Ipea. Disponível em: http://www.pnud.org.br/Docs/4_RelatorioNacionalAcompanhamentoODM.pdf. Acessado em 03 de Junho de 2013.

Ljung, L. System Identification: Theory for the use, 1999. Upper Sanddle River.

Ministério da Saúde. Evolução da Mortalidade Infantil no Brasil. Disponível em: <http://portalsaude.saude.gov.br/portalsaude/noticia/11141/162/brasil-reduz-taxa-de-mortalidade-infantil.html>. Acessado em 03 de Junho de 2013.

NBR IEC 60.601-2-19. Equipamento Eletromédico – Parte 2: Prescrições Particulares para Segurança de Incubadoras para Recém-Nascidos. ABNT, 1999.

RASHID, M. H. Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações. 1ª edição. ed. São Paulo: Editora Makron Books, 1999. ISBN 85-346-0598-X.

Smith, O. J. M. (1957). Closed control of loops with dead-time, *Chem. Eng. Progress* 53: 217–219.

Veronesi, M. and Visioli, A. An Automatic Tuning Method for Multiloop PID Controllers. 2011.