

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DA CAIXA DE PRESSÃO NEGATIVA DE MEMBROS INFERIORES

R. R. Cambraia*, R. R. Baptista* e T. Russomano*

*Centro de Microgravidade/PUCRS, Porto Alegre, Brasil
e-mail: rodrigo.cambraia@acad.pucrs.br

Resumo: O uso do equipamento “*lower body negative pressure Box*” (LBNP- caixa de pressão negativa para membros inferiores) é de grande importância para a comunidade científica das ciências da saúde. Inicialmente utilizado para simulação de estresse ortostático e sequestro de sangue e fluidos em estudos sobre o comportamento fisiológico pelas agências espaciais[1][2], hoje já tem uma gama de aplicações para estudo[3]. Em meados de 2002 uma LBNP foi desenvolvida no Laboratório do Centro de Microgravidade. O presente estudo foi realizado para modernizar os sistemas pneumático e eletrônico assim como o aplicativo de interface da LBNP, que ficou desatualizada e inoperante. A atualização foi feita através do uso de um controlador universal de processos com controle do tipo PID utilizando técnica de controle clássico de sintonia proposto no primeiro método de Ziegler e Nichols documentado em seu famoso artigo de 1942[9]. Com os novos componentes e partes eletrônicas, o equipamento ficou em condições para o uso em pesquisas na área de Medicina Aeroespacial sobre intolerância ortostática do sistema cardiovascular. A técnica de calibração antes da configuração do sistema de controle permitiu que ele fosse tratado como um sistema linear para a sintonia.

Palavras-chave: LBNP; orthostatic intolerance; Space countermeasure; Ziegler Nichols.

Abstract: *The use of equipment "lower body negative pressure box" is of great importance to the scientific community health sciences. Initially used to simulate orthostatic stress in studies on the physiological performance of space agencies, today we have a range of applications for study. In mid-2002, a LBNP has been developed at the Center for Microgravity Laboratory. The present study was undertaken to modernize pneumatic, electrical, electronic systems and the application interface of LBNP, which was outdated and ineffective. The update has been made by the use of a universal process controller with PID control technique using classical tuning control proposed in the first method of Ziegler and Nichols. With the new components and electronic parts, equipment became in condition for use in research in the area of Aerospace Medicine on orthostatic intolerance of the cardiovascular system. The calibration technique before the control system configuration allowed it to be parameterized as a linear system.*

Keywords: *LBNP, orthostatic intolerance, PID control, Ziegler and Nichols.*

Introdução

Quando exposto à microgravidade, o corpo humano inicia o processo de adequação ao novo ambiente, e por não haver a força gravitacional sobre o corpo humano, o organismo em poucas horas inicia o processo de adaptação causando redução de cálcio nos ossos e atrofia muscular tanto esquelética quanto do sistema cardiovascular [1].

Um dos maiores desafios da exposição à microgravidade é o atrofiamento cardiovascular [2], o qual pode resultar, entre outros sintomas, em síncope do indivíduo quando exposto a gravidade G novamente. Chama-se de intolerância ortostática essa incapacidade de tolerar a postura ereta no retorno à Terra após uma missão espacial.

O principal equipamento para estudos da hemodinâmica humana através da simulação das condições extremas como as que ocorrem em consequência de viagens espaciais tripuladas é a LBNP Box. Dezenas de mudanças fisiológicas podem ser induzidas por esta máquina [3] permitindo, com este equipamento, um estudo muito completo através das simulações de gravidade sobre o corpo humano.

Este trabalho teve como objetivo automatizar e controlar os níveis de pressão dentro da câmara onde estarão os membros inferiores do indivíduo. É apresentado ao longo do trabalho uma técnica de controle clássico já muito conhecida aplicada aos equipamentos, peças e instrumentos utilizados atualmente. E principalmente, o artigo demonstra como aplicar a teoria de controle clássico para sistemas lineares em um equipamento de pressão com uma câmara com propriedade não-linear: a pressão não diminui linearmente de acordo com a abertura da válvula linear devido às propriedades elásticas do seu revestimento transparente e retrátil composto de material composto por vinil. Ziegler e Nichols publicaram dois métodos de controle em 1942[5], o com laço fechado foi utilizado realizado no primeiro projeto da construção da primeira versão da LBNP.[4] Este projeto utilizou o laço aberto, ou também conhecido como curva de reação.

Materiais e métodos

Os principais materiais utilizados na LBNP Box foram: válvula pneumática com trava e manômetro analógico (1), gerador de vácuo (2), válvula eletrônica (3), controlador da válvula (4), Controlador PID (5), transdutor de pressão (6), Câmara de revestimento vinílico (7), exaustor (8). Na Figura 1 é ilustrado a disposição dos componentes.

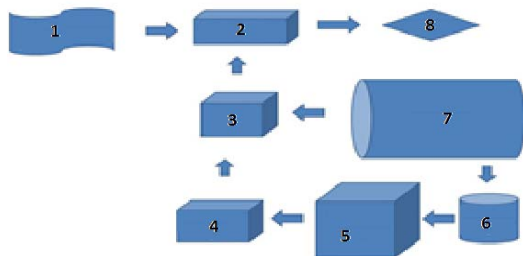


Figura 1: Diagrama de bloco dos principais componentes da LBNP Box.

A pressão de entrada fixa alimentou o gerador de vácuo para uma pressão negativa através da sucção do ar de dentro para fora da câmara. A pressão negativa interna da câmara foi regulada por uma válvula eletrônica nesta mesma saída de ar. A válvula eletrônica foi acoplada em controle eletrônico que fez sua abertura de forma linear em uma proporção de zero à cem por cento.

O equipamento foi mantido por quarenta minutos ligado em sala com temperatura controlada com uma pressão negativa de trinta e cinco milímetros de mercúrio. Desta forma, os componentes eletrônicos e partes móveis como o motor da válvula, por exemplo, estabilizaram sua temperatura de funcionamento garantindo o mesmo atrito, ou muito próximo, ao longo do experimento. O revestimento de vinil transparente mostrado na Figura 1 também atingiu uma deformação. Com isso, os resultados obtiveram boa replicabilidade após o mesmo procedimento de estabilização antes de sua operação. Os valores dos parâmetros do controlador foram tirados após esta estabilização e o equipamento teve a mesma equação de reta sendo y a pressão em mmHg na câmara e x a proporção de abertura da válvula ($R^2 = 0,9899$).

$$y(x) = -2,34x - 3.9815 \quad (1)$$

As conexões de sinal e comunicação receberam cabos blindados com revestimento metálico aterrado ao sistema elétrico.

Devido aos ruídos do sistema causados, principalmente, pelos vazamentos de ar na cintura no indivíduo, fez-se necessário um sistema de controle automático com realimentação de informação. Desta forma, ficou garantida a exata pressão e mudança de estágios do protocolo adotado. Um controlador com sistema de controle PID foi utilizado para fazer esse controle. Um transdutor de alta

precisão foi utilizado para realimentar a informação da pressão do sistema.

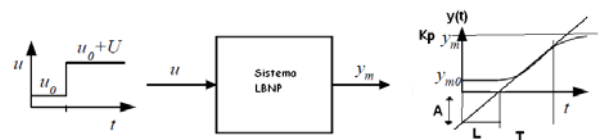
É importante perceber que a pressão negativa da câmara é definida pela diferença de pressão entre a saída de ar e a entrada de ar na câmara. Portanto, o fluxo de ar de saída é o objeto de controle através da manipulação da variável da válvula controlada.

Os parâmetros de controle PID foram obtidos a partir da curva de reação em resposta ao degrau em malha aberta em pontos de interesse de estudos do protocolo adotado.

Tabela 1: Tabela Z-N (1ª método) para obter os parâmetros PID.

Controle	Kp	Ti(min)	Td(s)
PID	$\frac{1,2}{\frac{LR}{U}}$	2L	0,5L

KP, ganho proporcional; Ti, tempo integrativo; Td, tempo derivativo; L, atraso de transporte; U, porcentagem de degrau de impulso; R, a inclinação da reta tangente a curva.

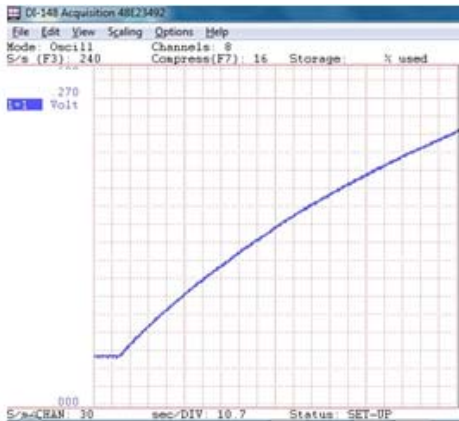


O gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada**. mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta. Pra a obtenção da curva foi dado o degrau variando U manualmente.

O gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada**. mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta O gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada**. mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta com ponto de interesse de -10 mmHg.. Pra a obtenção da curva foi dado o degrau variando U manualmente. A escala máxima, ou seja, cem por cento, foi escolhido um valor um pouco maior que o mais alto utilizado atualmente pelos protocolos de uso da LBNP Box em nossas pesquisas. Uma válvula de sangria (BV, do inglês bleed valve) foi encarregada de proporcionar um vazamento limitante da escala máxima.

$$U_0 = 6\% \cdot U_\Delta = 10\% \quad SP_0 = -1,5\text{mmHg} \text{ e } SP = -10\text{mmHg}$$

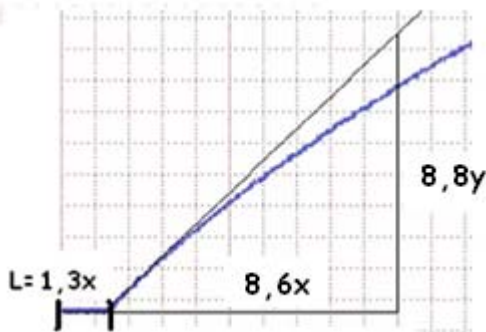
Figura 1: Ponto de interesse: -10 mmHg



Fonte: Autor

Abaixo na Figura 2 é apresentado em detalhe os parâmetros obtidos na curva de reação

Figura 2: Detalhe do gráfico



Fonte: Autor

Os seguintes dados podem ser obtidos do gráfico:

$$y = \frac{600\text{mV}}{34 \text{ divisões}} = 17,64 \frac{\text{mV}}{\text{div.}}$$

$$x = \frac{10,7 \frac{\text{seg}}{\text{div}}}{60} = 0,1783 \frac{\text{min}}{\text{div}}$$

$$CO = 8,8y = 8,8 \text{ div} \times \frac{17,64\text{mV}}{\text{div}} = 154,35\text{mV}$$

Logo tem-se:

$$CO_{\%} = 0,0518 \times CO = 10\%$$

O cateto adjacente (CA) pode ser encontrado na fórmula:

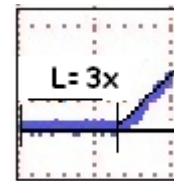
$$CA = 8,6x = 8,6\text{div} \times \frac{0,1783\text{min}}{\text{div}} = 1,53\text{min}$$

Para o cálculo do gradiente temos:

$$\begin{aligned} \text{Gradiente} = R = \tan \theta &= \frac{CO_{\%}}{CA} = \frac{10\%}{1,53\text{min}} \\ &= 0,065 \frac{\%}{\text{min}} \end{aligned}$$

Do detalhe ampliado ilustrado na Figura 3 podemos obter o atraso de transporte (L).

Figura 3: Detalhe do atraso de transporte



Fonte: Autor

O valor aproximado de L em minutos é:
 $L = 1,3 \times 0,1783 = 0,231\text{min}$
 Inserindo os valores no quadro 6, tem-se:

Quadro 1: Valores calculados

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	800	0,46	7

A resposta ao degrau do PID com os parâmetros calculados acima está demonstrada na figura 56.

Figura 4: Resposta ao degrau sintonizada



Fonte: Autor

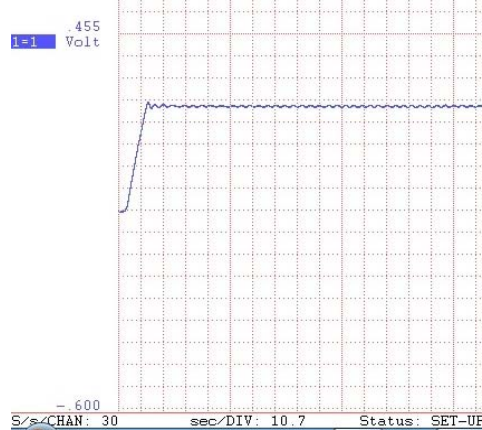
Inserindo os parâmetros no controlador e sintonizando manualmente obtemos os seguintes valores:

Quadro 2: Valores obtidos por sintonia

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	0,8	24	0

A resposta ao degrau do PID com os parâmetros ajustados no controlador conforme quadro acima está demonstrada na figura 57.

Figura 5: Resposta ao degrau sintonizada



Fonte: Autor

Tabela 4: Pontos de interesse

SP(mmHg)	SP ₀ (mmHg)	U ₀	U _Δ (%)
-2	0	0	6
-10	-1,5	6	10
-18	-6	10	10
-27	-14	16	10
-50	-28	26	10

Tabela 5: Valores calculados

SP(mmHg)	K _p	T _i (min)	T _d (s)
-2	29,5	0,43	6
-10	800	0,46	7
-18	423	0,46	7
-27	423	0,53	8
-50	448	0,43	6

Tabela 6: Valores após sintonia

SP(mmHg)	K _p	T _i (min)	T _d (s)
-2	0,8	24	0
-10	0,8	24	0
-18	0,8	24	0
-27	0,9	24	0
-50	1,1	24	0

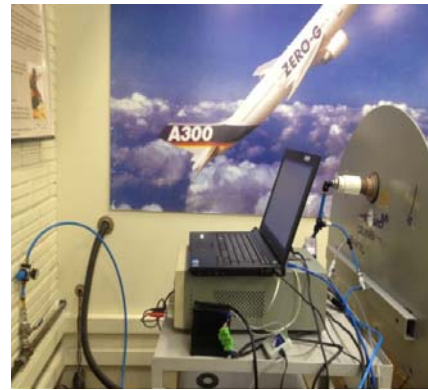


Figura 5: Controlador PID dedicado

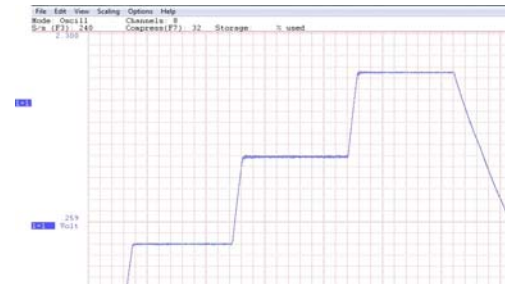


Figura 6: Sistema após sintonia

Discussão

Acreditava-se que a estrutura dinâmica era não linear durante as variações de pressão tornando a modelagem inviável por apresentar esse comportamento [4]. Por este motivo, a estratégia de controle foi baseada em aproximações empíricas [5].

Entretanto, com a obtenção da curva da resposta ao degrau foi possível encontrar os parâmetros necessários para a modelagem do sistema.

Outra observação final foi a de que o sistema se mostrou, aproximadamente, linear. A única diferença de valores ocorreram no parâmetro de controle PID K_p, o qual variou entre 0,8 e 1,1 enquanto o valor de I_r se manteve constante para todas as faixas. O controle D_t foi zerado na sintonia final. Com isso o controle utilizado foi um PI.

Contudo, o controle PI com K_p=0,9 pode ser uma alternativa satisfatória para o controle da LBNP utilizando o controlador industrial nacional.

Porém para que se coloque o equipamento em seu estado da arte, e para que possa ser atualizado facilmente no futuro, é necessária a troca do controlador universal de processos por um controlador lógico programável (CLP).

Quando levamos em consideração usar a comunicação RS485, um software é necessário para criar uma interface amigável. Esta interface é a que será usada por pessoal técnico treinado sem a necessidade de conhecimentos de engenharia. Para que melhorias no aplicativo sejam feitas, uma mão de obra técnica relativamente específica será necessária. Isso deve ser considerado como uma desvantagem estratégica para futuras atualizações da LBNP Box.

Além disso, ainda se faz necessário um computador com tela sensível ao toque e sistema operacional o que aumenta o custo do equipamento.

Com referência ao controle PID, o controlador industrial utilizado não permite a criação de um programa interno mais avançado com a capacidade de utilizar diferentes parâmetros de sintonia de PID para diferentes faixas de SP. Afortunadamente, o sistema pode ser controlado com um controle PI para todas as faixas de SP necessárias.

O novo controlador tipo CLP proposto possui comunicação com uma interface sensível ao toque de custo reduzido com comunicação tipo ethernet. Ele permitiria que a programação Ladder fosse utilizada para programar o controle da LBNP enquanto que utilizaria um compilador orientado a objeto para criar as telas de operação no monitor dedicado. Este CLP novo utiliza a mesma marca, tecnologia e linguagem dos controladores novos que estão sendo adquirido em 2013/2014 para o laboratório de instrumentação do prédio da engenharia na PUCRS. Isso deve ser levado como ponto positivo, pois em teoria todos os estudantes de engenharia e automação estarão qualificados para atualizar o equipamento com facilidade.

Conclusão

A utilização de um procedimento de estabilização da temperatura e dilatação da lona vinílica permitiu, ao contrário do que se acreditava [4], simplificar o modelo matemático de forma linear para obter os parâmetros de controle PID. A nova versão da LBNP Box apresentada neste estudo melhorou a interface com o operador e, também, contornou problemas de comunicação por RS485, pois o modelo escolhido utilizou uma porta ethernet para comunicação e configuração. As melhorias envolveram sistema pneumático e instrumentação e cálculos de sintonia. Todo o presente trabalho foi agregado ao antigo equipamento. O resultado do equipamento que será utilizado para estudos da fisiologia humana foi um sistema robusto de instrumentação utilizando uma metodologia de controle clássico aplicada em tecnologia atual e exemplificada neste trabalho.

Referências

- [10] NASA, Headline News - Gravity Hurts (So Good)[internet]. 2001 Aug [cited 2014 June 02]; Available from: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast02aug_1/
- [11] CHARLES, J. B. Studies of Orthostatic Intolerance with the Use of LBNP. Mir 18 Final Science Report. Houston TX: National Aeronautics and Space.
- [3] GOSWAMI, N.; LOEPPKY, J. A.; HINGHOFER-SZALKAY, H. LBNP: Past Protocols and Technical Considerations for Experimental Design. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. v. 79, p.459-471, 2008
- [4] RUSSOMANO, T.; ALLAN, J.; BECK, L.; PETRAT, G.; MAY, F.; THOMPSON, S.; FALCÃO, F.; DALMARCO, G.; GUREL, J.; PICCOLI, L.; AZEVEDO, D.F.G. Development of a Lower Body Negative Pressure Box With an Environmental Control System for Physiological Studies *Advances in Space Research*. v. 38, n. 6, p.1233-1239. 2006
- [5] Ogata, K. *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, Prentice-Hall, NJ, 5 ed. 1997.
- [6] Ziegler J.G., Nichols, N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers, *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.*, 64, 759-768, 1942.
- [7] *Acta Astronautica* Vol. 33, pp. 89-96, 1994
Pergamon Elsevier Science Ltd. Printed in Great Britain
0094-5765(94)00097-2 EXE ISE AGAINST LOWER BODY NEGATIVE PRESSURE AS A COUNTERMEASURE FOR CARDIOVASCULAR AND MUSCULOSKELETAL DECONDITIONING G. MURTHY, D.E. WATENPAUGH, R.E. BALLARD, AND A.R. HARGENS. NASA Ames Research Center Moffett Field, CA 94403
- [8] Astronauts exposed to long duration spaceflight experience muscle atrophy [8]
CONVERTINO, V.A. Physiological adaptations to weightlessness: Effects on exercise and work performance. In: *Exerc. Sport Sci. Rev.*, edited by K.B. Pandolf. Baltimore: Williams & Wilkins, 1990, pp.119-163.
- [9] Optimum Settings for Automatic Controllers By J.G. ZIEGLER and N. B. NICHOLS • ROCHESTER, N. Y. 1942
- [1] ARATOW, M., S.M. FORTNEY, D.E. WATENPAUGH, A.G. CRENSHAW, AND A.R. HARGENS. Transcapillary fluid responses to lower body negative pressure. *J. Appl. Physiol.* 74:2763-2770, 1993.
- [2] COLES, D.R., B.S.L. KIDD, AND W. MOFFAT. Distensibility of blood vessels of the human calf determined by local application of subatmospheric pressures. *J. Appl. Physiol.* 10:461-468, 1957.