

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SINAIS, SISTEMAS E TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO
LINHA DE PESQUISA: ENGENHARIA BIOMÉDICA

RODRIGO RECKZIEGEL CAMBRAIA

**AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA CAIXA DE PRESSÃO NEGATIVA
DE MEMBROS INFERIORES**

Porto Alegre
2014

RODRIGO RECKZIEGEL CAMBRAIA

AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA CAIXA DE PRESSÃO NEGATIVA DE MEMBROS INFERIORES

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Linha de pesquisa: Engenharia Biomédica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Thais Russomano

Porto Alegre
2014



AUTOMAÇÃO E CONTROLE DA CAIXA DE PRESSÃO NEGATIVA DE MEMBROS INFERIORES

CANDIDATO: RODRIGO RECKZIEGEL CAMBRAIA

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DRA. THAIS RUSSOMANO - ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA

DR. AURELIO TERGOLINA SALTON - PPGE - FENG - PUCRS

DR. RAFAEL REIMANN BAPTISTA - FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA - FEFID - PUCRS

AGRADECIMENTOS

A minha noiva, Amanda Assunção Vieira, pelo incentivo, companheirismo, paciência e apoio durante todo este desafio.

A Dra. Thais Russomano, que sempre acreditou em meu trabalho e me ajudou a resolver todos os problemas ao longo do percurso, sempre com muita calma e sabedoria.

Aos colegas de trabalho John Campbell e Franco Paolucci pelas peças fornecidas.

Aos colegas de mestrado Leandro Disiuta e Endrigo Carvalho pela amizade, disponibilidade e companheirismo.

Ao colega de pesquisa Martin Bittencourt por desenvolver em paralelo uma aplicação para seu TCC que enriqueceu o projeto final e facilitou o uso do equipamento.

A equipe do Centro de Microgravidade.

Ao Dr. Aurélio Salton, ao Dr. Rogério Tergolinae ao Dr. Júlio Cesar Marques de Lima pelas suas sugestões e conselhos que contribuíram neste trabalho.

Ao técnico Mozart Macagnan pela ajuda e disponibilidade.

Por fim, a Deus por me dar saúde e a oportunidade de traçar este caminho.

RESUMO

O uso do equipamento “lowerbody negative pressureBox” (LBNP- caixa de pressão negativa) é de grande importância para a comunidade científica das ciências da saúde. Inicialmente utilizado para simulação de estresse ortostático em estudos sobre o comportamento fisiológico pelas agências espaciais, hoje já tem sua gama de aplicações para estudo.

Em meados de 2002 uma LBNP foi desenvolvida no Laboratório do Centro de Microgravidade, porém ela ficou desatualizada e inoperante.

O presente foi realizado para modernizar os sistemas pneumático, elétrico, eletrônico assim como o aplicativo de interface. O “retrofit” realizado deixou o equipamento em condições para o uso em pesquisas na área de Medicina Aeroespacial sobre intolerância ortostática do sistema cardiovascular.

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.

Palavras-chave: LBNP; intolerância ortostática, microgravidade, controle PID, Ziegler-Nichols,

ABSTRACT

The use of equipment "lower body negative pressure box" (LBNP) is a instrument of great importance to the scientific community health sciences. Initially used for simulation of orthostatic stress in space agencies studies on the physiological performance, today it has a range of applications to be study.

In mid-2002, a LBNP Box was developed at the Center for Microgravity Laboratory, but it became outdate and out of use. This work was done to modernize pneumatic, electrical, electronic systems and the application interface. The realized retrofit enables the equipment for research use in the area of Aerospace Medicine on orthostatic intolerance of the cardiovascular system.

A universal process controller with PID control technique was used with a classical tuning control proposed in the first method of Ziegler and Nichols.

Keywords: LBNP; intolerância ortostática, microgravidade, controle PID, Ziegler-Nichols;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FISILOGIA HUMANA EM MICROGRAVIDADE	14
FIGURA 2: DISTRIBUIÇÃO DO VOLUME SANGUÍNEO	16
FIGURA 3: EXERCÍCIO NA LBNP DO MICROG DA PUCRS	17
FIGURA 4: EXERCÍCIO EM UMA ESTEIRA DURANTE EXPOSIÇÃO À LBNP BOX.....	18
FIGURA 5: LBNP BOX USADA PARA SIMULAR SEVERA HIPOTENSÃO.....	20
FIGURA 6: A) SISTEMA DE CONTROLE DA LBNP BOX DO CENTRO DE MICROGRAVIDADE EM 2005. B) CONECTORES DA LBNP BOX COM TUBULAÇÃO HIDRÁULICA.....	21
FIGURA 7: TIPOS DE RUÍDOS.....	23
FIGURA 8: DIAGRAMA DE BLOCOS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DA LBNP BOX	23
FIGURA 9: VÁLVULA DE PRECISÃO.....	24
FIGURA 10: MANÔMETRO DA VÁLVULA DE ENTRADA.....	24
FIGURA 11: CARACTERÍSTICAS DE EXAUSTÃO E CONSUMO DE AR COMPRIMIDO	25
FIGURA 12: DETALHE DE SISTEMA DE TRAVAMENTO DA VÁLVULA DE ENTRADA.....	25
FIGURA 13: VÁLVULA PROPORCIONAL.....	26
FIGURA 14: VÁLVULA PROPORCIONAL SEM CONTROLADOR EM VISTA ISOMÉTRICA	26
FIGURA 15: ESQUEMÁTICO DO CABEÇOTE DE CONTROLE COM DETALHE DA CONFIGURAÇÃO INTERNA.....	27
FIGURA 16: CABEÇOTE DE CONTROLE ASCO	28
FIGURA 17: ESQUEMÁTICA COM CONEXÕES DO CONTROLADOR DA VÁLVULA.....	29
FIGURA 18: CABO DE COMUNICAÇÃO ENTRE CLP E ATUADOR	30
FIGURA 19: CARACTERÍSTICAS DE FLUXO DO GERADOR VENTURI	31
FIGURA 20: GERADOR DE VÁCUO	32
FIGURA 21: INTERCONEXÕES COM A TUBULAÇÃO PNEUMÁTICA.....	32
FIGURA 22: CONECTORES.....	33
FIGURA 23: BLEED VALVE	33
FIGURA 24: CONSUMO DE CORRENTE DA VÁLVULA PROPORCIONAL.....	34
FIGURA 25: DIAGRAMA DE TENSÃO E MODULAÇÃO DE CORRENTE DA VÁLVULA	35
FIGURA 26: TRANSDUTORES MKS.....	35
FIGURA 27: CONEXÃO DEDICADA PARA SENSOR	36
FIGURA 28: A) CONTROLADOR NS2000 E B) ESQUEMÁTICO ELÉTRICO TRASEIRO	36
FIGURA 29. TESTE DAS CONFIGURAÇÕES.....	37
FIGURA 30: AJUSTE INTERNO DO CONTROLADOR DA VÁLVULA	38
FIGURA 31. FLUXOGRAMA PNEUMÁTICO	38
FIGURA 32: ILUSTRAÇÃO DO COMPUTADOR.....	39
FIGURA 33: VISTA TRASEIRA DO COMPUTADOR	39
FIGURA 34: APLICATIVO DESENVOLVIDO POR BITTENCOURT, 2014.	40
FIGURA 35: CONVERSOR USB/RS485 NOVUS.....	40
FIGURA 36: ILUSTRAÇÃO NO SIMULINK® DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA ABERTA.....	41
FIGURA 37: RESPOSTA NO TEMPO DA LBNP.....	43
FIGURA 38: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE A MALHA FECHADA DA LBNP BOX.	44
FIGURA 39: MODELAGEM DO RUÍDO BRANCO NO SIMULINK®.....	44
FIGURA 40: SIMULAÇÃO DO CONTROLE DA LBNP BOX FEITO NO MATLAB/SIMULINK®	45
FIGURA 41: MODELAGEM DO SISTEMA COM INTEGRADOR ANTI-WINDUP, CÁLCULO REVERSO E BUSCA.....	47
FIGURA 42: TROCA DA LONA DE VINIL	51
FIGURA 43: U VS TENSÃO.....	52
FIGURA 44: U VS PRESSAO	52
FIGURA 45: RELAÇÃO ENTRE SP E PRESSÃO.....	53
FIGURA 46: RELAÇÃO MV VS TENSÃO.....	53
FIGURA 47: PERFIL DE ESTÁGIOS DE PRESSÃO FORNECIDO PELA DLR.....	54
FIGURA 48: PONTO DE INTERESSE: -2MMHG	55
FIGURA 49: DETALHE DO GRÁFICO.....	55

FIGURA 50: DETALHE DO ATRASO DE TRANSPORTE	56
FIGURA 51: RESPOSTA AO DEGRAU COM RESPOSTA MUITO LENTA.....	57
FIGURA 52: RESPOSTA AO DEGRAU SINTONIZADA	58
FIGURA 53: PONTO DE INTERESSE: -10 MMHG	59
FIGURA 54: DETALHE DO GRÁFICO.....	59
FIGURA 55: DETALHE DO ATRASO DE TRANSPORTE	60
FIGURA 56: RESPOSTA AO DEGRAU SINTONIZADA	61
FIGURA 57: RESPOSTA AO DEGRAU SINTONIZADA	62
FIGURA 58: PONTO DE INTERESSE: - 15 MMHG	62
FIGURA 59: DETALHE DO GRÁFICO.....	63
FIGURA 60: DETALHE DO ATRASO DE TRANSPORTE	64
FIGURA 61: RESPOSTA SINTONIZADA.....	64
FIGURA 62: PONTO DE INTERESSE: -30 MMHG.....	65
FIGURA 63: DETALHE DO GRÁFICO.....	65
FIGURA 64: DETALHE DO ATRASO DE TRANSPORTE	66
FIGURA 65: APÓS SINTONIA.....	67
FIGURA 66: PONTO DE INTERESSE: - 45 MMHG	68
FIGURA 67: DETALHE DO GRÁFICO.....	68
FIGURA 68: DETALHE DO ATRASO DE TRANSPORTE	69
FIGURA 69: PONTO DE INTERESSE: -45 MMHG SEM SINTONIA	70
FIGURA 70: PONTO DE INTERESSE: -45 MMHG COM SINTONIA.....	70
FIGURA 71: CURVA OBTIDA COM O CONTROLE PI UTILIZADO.	71
FIGURA 72: INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE FINALIZADO	72
FIGURA 73: IMAGEM DOS TESTES REALIZADOS EM DIVERSOS CLPs DA ROCKWELL® PARA A ESCOLHA DO NOVO CLP COM INTERFACE HMI NAS DEPENDÊNCIAS DO FORNECEDOR.....	74
FIGURA 74: CABOS DESENVOLVIDOS PARA TESTE.....	75
FIGURA 75: CABO BLINDADO ADQUIRIDO	75
FIGURA 76: TESTE DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO	75
FIGURA 77: TRANSDUTOR EM FUNCIONAMENTO FINAL	75
FIGURA 78: TESTE DA VÁLVULA COM FONTE DE TENSÃO EXTERNA CONTROLÁVEL	76
FIGURA 79: CALIBRAÇÃO DOS VALORES DE PRESSÃO COM UM MANÔMETRO DIGITAL CERTIFICADO	76
FIGURA 80: TESTE EM PROTOBOARD DA FONTE SIMÉTRICA	76
FIGURA 81: DESIGN FINAL DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....	76
FIGURA 82: CONEXÕES ELÉTRICAS.....	77
FIGURA 83: CONEXÕES ELÉTRICAS PADRONIZADAS	77
FIGURA 84: UTILIZAÇÃO DE FONTE SIMÉTRICA PARA TRANSDUTOR	77
FIGURA 85: DESIGN DE FONTE SIMÉTRICA DESENVOLVIDO	77
FIGURA 86: CANOS HIDRÁULICOS PARA CONTROLE DE AR.....	78
FIGURA 87: DUTOS PNEUMÁTICOS E ENGATES APROPRIADOS	78
FIGURA 88: VÁLVULA GAVETA HIDRÁULICA ACOPLADA À ENGENHARIA CASEIRA PARA REGULAR FLUXO	78
FIGURA 89: VÁLVULA PROPORCIONAL ELETRONICAMENTE CONTROLADA	78
FIGURA 90: BOTÃO DE EMERGÊNCIA.....	79
FIGURA 91: BOTÃO DE EMERGÊNCIA.....	79
FIGURA 92: CONTROLADOR RODANDO EM COMPUTADOR REMOTO	79
FIGURA 93: CONTROLADOR PID DEDICADO.....	79
FIGURA 94: VÁLVULA DE SEGURANÇA CASEIRA	80
FIGURA 95: VÁLVULA DE SEGURANÇA.....	80
FIGURA 96: DIVERSOS FUROS NO PAINEL DE NYLON CAUSANDO VAZAMENTO	80
FIGURA 97: REDUÇÃO DE ENTRADAS E VEDAÇÃO COM CHAPA DE POLIETILENO.....	80
FIGURA 98: PROJETO DA FONTE SIMÉTRICA NO SOFTWARE ALTIUM DESIGN®	81
FIGURA 99: ESQUEMÁTICO ELÉTRICO EM ORCAD® DA FONTE DE 24VDC	82

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: CONEXÕES ENTRE CLP E VÁLVULA PROPORCIONAL.....	30
QUADRO 2: VALORES PARA CALIBRAÇÃO	51
QUADRO 3: TABELA Z-N PRIMEIRO MÉTODO PARA OBTER OS PARÂMETROS PID	56
QUADRO 4: VALORES CALCULADOS	57
QUADRO 5: VALORES OBTIDOS POR SINTONIA.....	58
QUADRO 6: VALORES CALCULADOS	61
QUADRO 7: VALORES OBTIDOS POR SINTONIA.....	61
QUADRO 8: VALORES CALCULADOS	64
QUADRO 9: VALORES OBTIDOS POR SINTONIA.....	64
QUADRO 10: VALORES CALCULADOS	67
QUADRO 11: VALORES OBTIDOS POR SINTONIA.....	67
QUADRO 12: VALORES CALCULADOS	69
QUADRO 13: VALORES OBTIDOS POR SINTONIA.....	70
QUADRO 14: COMPARAÇÃO ENTRE A FASE DE TESTES E FASE FINAL DO PROJETO.....	75

LISTA DE SIGLAS

LBNP – LOWERBODY NEGATIVE PRESSURE – CAIXA DE PRESSÃO NEGATIVA PARA MEMBROS INFERIORES

PUCRS – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

DLR – DEUTSCHESZENTRUMFÜR LUFT- UNDRAUMFAHRT

MICROG –CENTRO DE MICROGRAVIDADE

PID –PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO

PA – PRESSÃO ARTERIAL

DC – DÉBITO CARDÍACO

RVP – RESISTÊNCIA VASCULAR PERIFÉRICA

SP – SET POINT

PV – POINT VALUE

CLP – CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

MV – MANIPULATEDVARIABLE

VDC – VOLTAGEM DE CORRENTE CONTÍNUA

TO – TOLERÂNCIA ORTOSTÁTICA

SUMÁRIO

1.	<u>INTRODUÇÃO</u>	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
2.	<u>OBJETIVOS</u>	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	14
3.1	FISIOLOGIA HUMANA EM MICROGRAVIDADE	14
3.2	INTOLERÂNCIA ORTOSTÁTICA	15
3.2.1	CAUSAS	15
3.2.2	CONSEQUÊNCIAS	15
3.2.3	SINTOMAS	16
3.2.4	CONTRAMEDIDAS	17
3.3	A LBNP E SUAS APLICAÇÕES	19
3.4	PRIMEIRA VERSÃO DA LBNP BOX NO CENTRO DE MICROGRAVIDADE	21
3.5	PERTURBAÇÕES DE UM SISTEMA	22
3.5.1	TIPOS DE PERTURBAÇÕES	22
3.5.1.1	PERTURBAÇÃO GAUSSIANA	22
3.5.1.2	PERTURBAÇÃO DE DESVIO	22
3.5.1.3	PERTURBAÇÃO DE IMPULSO	22
4.	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	23
4.1	SISTEMA PNEUMÁTICO	23
4.1.1	SUPRIMENTO DE AR COMPRIMIDO	24
4.2	VÁLVULA PROPORCIONAL	26
4.2.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA VÁLVULA PROPORCIONAL	26
4.3	CONTROLE ELETRÔNICO PROPORCIONAL	27
4.3.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	28
4.3.2	CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES	29
4.3.3	DIAGRAMA DE INTERCONEXÕES DO ATUADOR	30
4.3	GERADOR DE VÁCUO	31
4.4	CONECTORES DIVERSOS	33
4.5	VÁLVULA DE SANGRIA (BLEED VALVE)	33
4.5.3	COMPONENTES ELETRÔNICOS	34
4.5.3.1	CIRCUITO DA FONTE PARA A VÁLVULA PROPORCIONAL	34
4.6	SENSORES	35
4.7.1	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	35
4.8	SISTEMA DE CONTROLE PID	36
4.9	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	39
4.9.1	APLICATIVO DE INTERFACE	40
4.10	SISTEMA DE CONTROLE	41

	11
4.10.1 SISTEMA LINEAR	42
4.11 CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DE CONTROLE	42
4.11.1 SISTEMAS A MALHA ABERTA	42
4.11.2 SISTEMAS A MALHA FECHADA (CONTROLE COM RETROAÇÃO)	43
4.12 MODELAGEM DO SISTEMA	43
4.12.1 MODELAGEM NO SISTEMA DE CONTROLE	44
4.13 CONTROLE PID	45
4.14 SUGESTÃO FUTURA PARA INTEGRADOR WINDUP	46
<u>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>48</u>
5.1 OBJETIVOS ATINGIDOS	48
5.1.1 DESENVOLVER O CIRCUITO PNEUMÁTICO COM VÁLVULA INDUSTRIAL ELETRONICAMENTE CONTROLADA	48
5.1.2 USAR GERADOR DE VÁCUO CONECTADO AO ABASTECIMENTO DE AR COMPRIMIDO PARA GERAR A PRESSÃO NEGATIVA	48
5.1.3 PROGRAMAR E CONFIGURAR UM CONTROLADOR UNIVERSAL DE PROCESSOS AO SISTEMA	49
5.1.4 INTEGRAR SENSORES E VÁLVULAS COM O CONTROLADOR UNIVERSAL DE PROCESSOS	50
5.1.5 ADICIONAR UM CONTROLE PID AUTÔNOMO E INDEPENDENTE	50
5.1.6 TROCA DA CAPA DA ESTRUTURA	50
5.1.6.1 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	51
5.1.7 SINTONIZAR O CONTROLE PID DOCUMENTANDO AS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA SER UTILIZADO PELO APLICATIVO DE INTERFACE	54
5.1.8 PERMITIR UMA INTERFACE HOMEM-MÁQUINA AMIGÁVEL	71
5.1.9 SUBSTITUIR TUBULAÇÃO EXTERNA POR MATERIAL ESPECÍFICO PARA SISTEMAS PNEUMÁTICOS;	72
5.1.10 SUBSTITUIR ANTIGAS CHAPAS DE VEDAÇÃO FEITAS DE NYLON POR NOVAS DE POLIETILENO ELIMINANDO OS ORIFÍCIOS EM DESUSO	72
5.2 DISCUSSÃO	73
<u>APÊNDICE</u>	<u>81</u>
<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>83</u>

1. INTRODUÇÃO

Quando exposto à microgravidade, o corpo humano inicia o processo de adequação ao novo ambiente. Por não haver a força gravitacional sobre o corpo humano, o organismo em poucas horas inicia o processo de adaptação causando atrofia muscular esquelética, redução de cálcio nos ossos e atrofia muscular do sistema cardiovascular (NASA, 2012).

Um dos maiores desafios da exposição à microgravidade é o atrofiamento cardiovascular (CHARLES, 2013), 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 caixa de pressão negativa para membros inferiores, chamada LBNP (*lowerbody negative pressure*) Box. Dezenas de mudanças fisiológicas podem ser induzidas pela LBNP Box (GOSWAMI; LOEPPKY; HINGHOFER-SZALKAY, 2008) 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 técnicas de controle clássico pelo método de malha aberta ou método de curva de reação.

Exemplos de aplicação desse método para sistemas de pressão com controle de vazão são pouco comuns de serem encontrados. Por isso, o presente trabalho poderá servir de modelo para trabalhos similares, pois ele apresenta um passo a passo das técnicas e de como se configurar um controlador industrial após se obter os parâmetros de PID.

1.1 Justificativa

Considerando a importância de estudos relacionados ao atrofiamento físico muscular e as consequências do aumento da intolerância ortostática durante voos espaciais, o equipamento LBNP Box é de suma importância para o Centro de Microgravidade da PUCRS. Sua total atualização é imprescindível para futuros estudos na linha de pesquisa de condicionamento físico do sistema cardiovascular humano na área de medicina aeroespacial. O equipamento estava inoperante e não apresentava segurança adequada. Um sistema de controle independente foi adicionado como sugerido por Piccoli, 2002.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo geral atualizar os sistemas de controle de pressão, pneumático, mecânico e computacional da LBNP Box. Esses sistemas estavam dez anos desatualizados. Projetar um controle de pressão do tipo PID pelo primeiro método de Ziegler-Nichols que satisfaça as exigências de protocolo pré-estabelecido em relação às curvas do gráfico modelo no espaço tempo também faz parte deste objetivo geral.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver o circuito pneumático com válvula industrial eletronicamente controlada;
- Usar gerador de vácuo conectado ao abastecimento de ar comprimido para gerar a pressão negativa;
- Programar e configurar um controlador universal de processos ao sistema;
- Integrar sensores e válvulas com o controlador universal;
- Adicionar um controle PID autônomo e independente;
- Calcular as variáveis de controle K_p, T_i, T_d , pela curva de reação;
- Testar e sintonizar o controle PID documentando as variáveis de controle para ser utilizado pelo aplicativo de interface;
- Propiciar condição para uma interface homem-máquina amigável;

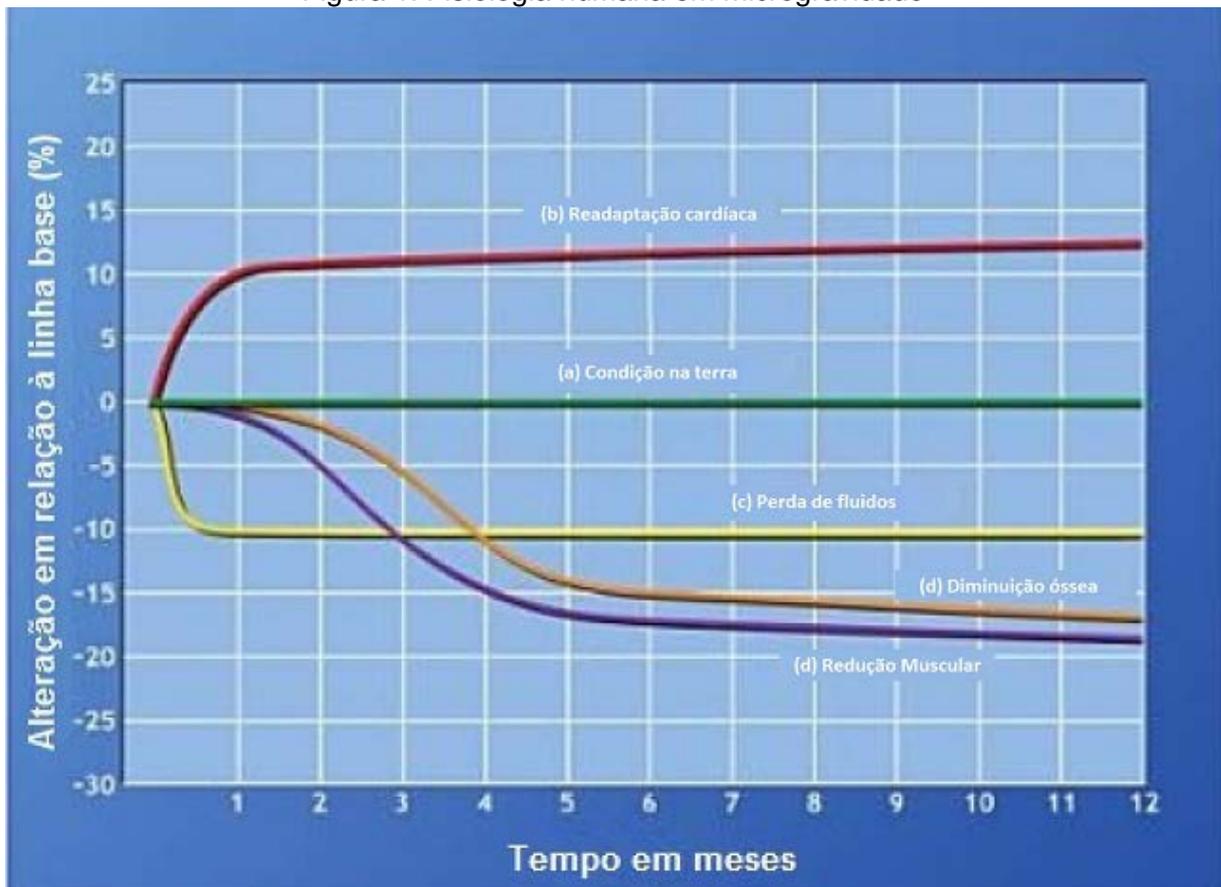
- Substituir tubulação externa por material específico para sistemas pneumáticos;
- Substituir antigas chapas de vedação feitas de nylon por novas de polietileno eliminando os orifícios em desuso;
- Trocar o revestimento de vinil e eliminar vazamentos.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Fisiologia humana em microgravidade

Com o crescente aumento no tempo de duração de viagens espaciais torna-se indispensável estudo de contramedida para estes efeitos. É possível observar na Figura 1 o período de alteração de quatro principais funções fisiológicas de um ano em microgravidade.

Figura 1: Fisiologia humana em microgravidade



Fonte: McARDLE, KATCH, KATCH, 2010.

3.2 Intolerância ortostática

Chama-se de intolerância ortostática os sintomas causados pela influência da força gravitacional nos fluidos do corpo. Logo após a reentrada da espaçonave na Terra, o sistema cardiovascular requer uma rápida e efetiva resposta de compensação do sistema circulatório e neurológico para estabilizar a pressão sanguínea (STEWART, 2011).

Em contrapartida, tolerância ortostática (TO) refere-se à capacidade de manter a estabilidade cardiovascular quando na posição vertical, contra os efeitos hidrostáticos da gravidade, e, portanto, para manter a perfusão cerebral e evitar a síncope (desmaio). Várias técnicas estão disponíveis para avaliar TO e os efeitos do estresse gravitacional sobre a circulação. Geralmente, esses testes reproduzem um evento de pré-síncope (quase um episódio de desmaio) em um ambiente de laboratório controlado. O tempo ou o grau de tensão necessária para provocar esta resposta, fornece a medida da TO. Qualquer técnica usada para determinar TO deve: permitir distinção entre pacientes com intolerância ortostática (de várias causas) e indivíduos controles assintomáticos; ser altamente reprodutível, permitindo a avaliação de intervenções terapêuticas; evitar procedimentos invasivos, que são conhecidos por prejudicar a TO (PROTHEROE et. al., 2013).

3.2.1 Causas

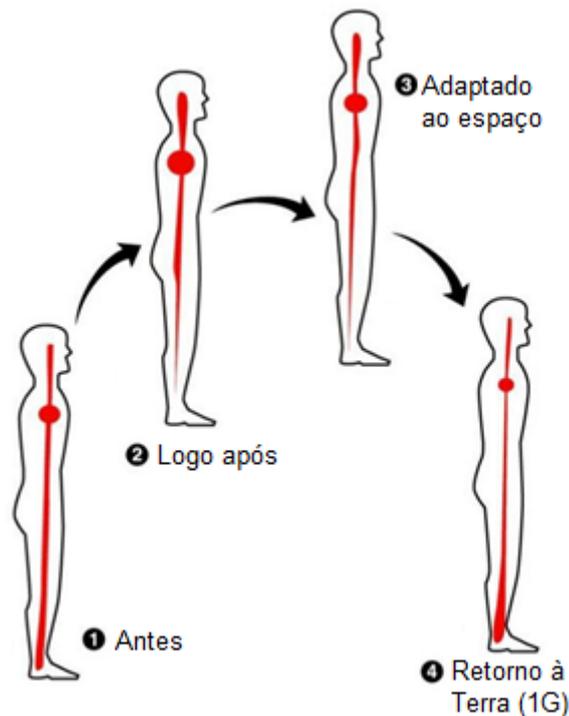
O conceito predominante na pesquisa espacial cardiovascular tem sido que: a microgravidade induz a hipovolemia, aumenta a pressão nas pernas, atenua barorreceptor carótido de batimento cardíaco e altera o controle cardiovascular. Essas alterações são importantes responsáveis pela TO após o voo (ZHANG, 2001).

3.2.2 Consequências

Em microgravidade, onde a gravidade é mínima, os gradientes de pressão hidrodinâmica do pé à cabeça desaparecem. A pressão sanguínea fica homogênea em todo o corpo (cerca de -100mmHg). Após dois a três dias, astronautas podem perder cerca de 22% (vinte e dois por cento) do volume

sanguíneo. Consequentemente, esta perda altera o funcionamento do sistema cardiovascular (CONVERTINO et al, 1993). Isso pode resultar em síncope do indivíduo quando exposto a gravidade G novamente. Essa síndrome clínica não só pode ser a consequência de mecanismos reflexos, mas também uma manifestação clínica de ampla variedade de condições clínicas distintas (NETO, 2006). A figura 2 demonstra o que ocorre com a distribuição do volume sanguíneo em nosso sistema circulatório durante os estágios antes (1), imediatamente após inserção à microgravidade (2), durante adaptação ao espaço (3), e no retorno à gravidade (4).

Figura 2: Distribuição do volume sanguíneo



Fonte: BUCKEY, 2006

3.2.3 Sintomas

Pacientes com intolerância ortostática possuem dificuldade de levantar da posição supina e, mesmo pessoas saudáveis, apresentam náusea, mal-estar ou dores de cabeça após períodos prolongados acamados (HACHIYA, 2006). Se ajustes compensatórios não ocorrem prontamente após a mudança de gravidade, a pressão arterial cai. Com isso, o indivíduo pode apresentar desde sintomas mais

brandos relacionados à intolerância ortostática, até a perda súbita da consciência (NETO, 2006).

3.2.4 Contramedidas

Quando astronautas retornam de viagens longas, algumas vezes, precisam ser carregados em macas para fora da aeronave. Isso acontece devido à fragilidade na qual se encontra o seu organismo, o qual não está mais adaptado aos efeitos da força gravitacional terrestre (NASA, 2012).

A LBNP Box propicia uma contramedida à intolerância ortostática através da estimulação de respostas fisiológicas durante missões espaciais. Essa contramedida desencadeia a redistribuição dos fluidos do corpo e estimulam o sistema cardiovascular (STEWART, 2013). A LBNP também induz hipovolemia central progressiva (LIGTENBERG, BLANKESTIJN, KOOMANS, 1998) e é uma técnica amplamente utilizada para estudar as respostas cardiovasculares ao estresse ortostático simulado (BROWN et al, 2003).

Diferentes contramedidas têm sido propostas para minimizar os efeitos da microgravidade sobre o sistema cardiovascular e reduzir o seu impacto no condicionamento após o voo espacial. Por exemplo, menor pressão negativa dos membros inferiores com o uso da LBNP e estimulação com exercício estático ou dinâmico. O exercício é utilizado, principalmente, para manter a circulação e a capacidade funcional do músculo, e para evitar grande redução da massa muscular bem como a desmineralização óssea do sujeito.

Figura 3: Exercício na LBNP do microG da PUCRS



Fonte: Russomano, 2013

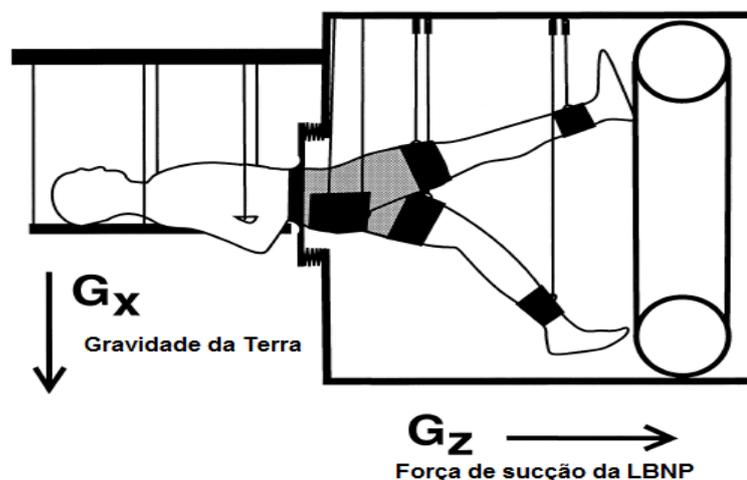
A LBNP induz uma mudança de fluido da parte cefálica do corpo em direção aos membros inferiores. Ela é usada para simular parcialmente os efeitos da postura ereta durante testes do tipo *head-downbedrest* (HDBR) e voos espaciais. Quando usada como uma medida preventiva, a LBNP box em associação com o exercício é utilizada para restaurar o volume de plasma e reduzir a falta de condicionamento vascular periférico, bem como a intolerância ortostática subsequente durante HDBR. A LBNP Box é amplamente utilizada no final de voos espaciais de longo prazo com o objetivo de preparação do astronauta para o retorno à gravidade da Terra. Contramedidas paralelas como, por exemplo, nutrição (suplementação de aminoácidos por dia), projetado para proteger os músculos e ossos contra os efeitos do recondicionamento causado por testes HDBR, também pode atuar no sistema cardiovascular (ARBEILLE et al, 2008).

Além dessa contramedida outras técnicas também podem ser utilizadas em conjunto, tais como: ingestão de solução salina, uso de agentes farmacológicos e trajes anti-G (JOHNSTON, 1977).

Ainda, a LBNP permite exercícios como, por exemplo, a corrida ao mesmo tempo em que simula a pressão arterial em ambiente gravitacional simulado, conforme

Figura 4.

Figura 4: Exercício em uma esteira durante exposição à LBNP box



Fonte: BODA ET AL, 2000

Uma força G_z é produzida pela força de sucção da LBNP. Uma força de reação do solo (do inglês *groundreaction force* - GRF) é exercida pelo chão durante

exercício na esteira dentro da LBNP durante a posição supinada. Na microgravidade esta força é igual ao produto do corpo através da área transversal do corpo (A_{xy}) e a pressão diferencial (dP) através da câmara da LBNP com a força de inércia adicional se igualando à massa do corpo (M) multiplicado pela aceleração em direção aos pés (a_z) ao centro de massa do corpo (cm).

$$GRF = A_{xy}\delta P + Ma_{z,cm} \quad (1)$$

Nesse teste, o sujeito é suspenso pelos tornozelos e amarrado por um sistema de roldanas, e as mãos estão segurando a suspensão dos cabos na altura da cintura (BODA et al, 2000).

Watenpaugh et.al., 2007, sugere que o exercício na LBNP box consistia em trinta minutos por dia de intervalos de exercícios na esteira com posição supinada. A intensidade deve ser de até noventa por cento da frequência cardíaca máxima. Seguido, então, de cinco minutos de descanso ainda dentro da LBNP box.

A LBNP box atrelada a uma esteira de exercícios oferece um grau de proteção contra o aumento de risco de pedra no rim durante microgravidade simulada (MONGA, 2006). Também previne perda de massa magra da perna e, parcialmente, age contra o decréscimo na força do extensor do joelho e extensor do tornozelo (AMORIM, HARGENS et. al., 2006).

3.3A LBNP e suas aplicações

O método com uso da LBNP foi introduzido na pesquisa médica por Stevens e Lamb em 1965 e provou ser uma ferramenta útil para induzir estresse ortostático, para estudar as respostas cardiovasculares à hemorragia e para prevenir o condicionamento cardiovascular. Revelou-se também valiosa no estudo da regulação da pressão arterial, as respostas de reflexo vasoconstritor e o papel de estabilizador de barorreceptores na resistência vascular (GOSWAMI, LOEPPKY, HINGHOFER-SZALKAY, 2008).

A LBNP pode ser empregada para discriminar os reflexos decorrentes das regiões que detectam alterações de pressão arterial. É empregada com sucesso para avaliar os efeitos das intervenções fisiológicas e farmacológicas sobre reflexos cardiovasculares. Em pacientes com insuficiência cardíaca congestiva, é utilizada

para simular adaptações renais e viscerais e caracterizar função cardiopulmonar reduzida (GOSWAMI, LOEPPKY, HINGHOFER-SZALKAY, 2008). Ela pode ser usada sozinha ou em combinação com outros fatores de estresse cardiovascular. Inclinação da posição corporal pode ser usada juntamente com LBNP para reduzir a necessidade de elevados níveis de LBNP (que pode causar ansiedade ou desconforto) e criar um desafio gravitacional mais "natural".

Por outro lado, a LBNP também tem sido usada com o participante sentado numa posição vertical para examinar efeitos gravitacionais de posturas específicas, por exemplo, para pilotos de aeronaves (ESCH, SCOTT, WARBURTON, 2007).

A LBNP apresenta vantagens por ser um procedimento não invasivo, facilmente reversível e, geralmente, aplicado na posição supina. Mudanças de posição do corpo (que podem influenciar a distribuição de líquidos durante linha de base e estimulam o sistema neuro-sensorial) são desnecessárias. Eliminam-se, assim, artefatos de movimento a partir de gravações de hemodinâmica.

A LBNP induz taquicardia e hipotensão (Figura 5), semelhante à causada pela centrifugação humana. Ela pode ser utilizada como um substituto financeiramente mais acessível para estudar os efeitos de cargas G, pois o uso da LBNP sentado à -40mmHg induz alterações hemodinâmicas semelhantes às aquelas durante 12G (GOSWAMI, LOEPPKY, HINGHOFER-SZALKAY, 2008).

Figura 5: LBNP Box usada para simular severa hipotensão



Fonte: IAIZZO, 2009

3.4 Primeira versão da LBNP Box no Centro de Microgravidade

No Centro de Microgravidade da PUCRS (MicroG), foi construída uma LBNP Box em parceria com a agência espacial alemã (DLR). Estudos foram feitos com o equipamento desde meados de 2002 quando esse foi construído. Porém, o sistema de controle do equipamento encontrava-se inoperante antes desta atualização.

A LBNP Box desenvolvida previamente em 2002 pelo MicroG consiste de estrutura cilíndrica de cinco anéis de aço envolta por uma capa material de vinil transparente (0,6 mm de espessura), capaz de resistir a altas pressões (RUSSOMANO et al, 2006). Um sistema de maca com rodas sobre trilhos foi projetado para facilitar a acoplagem do indivíduo ao equipamento (RUSSOMANO et al, 2005). Um saíote foi elaborado para ser colocado sobre a cintura do voluntário ajustado por uma cinta. A estrutura traseira do equipamento suportava um solenoide controlador das válvulas de entrada e saída de ar (Figura 6).

Figura 6: a) Sistema de controle da LBNP Box do Centro de Microgravidade em 2005. b) Conectores da LBNP Box com tubulação hidráulica



Fonte: PICOLLI, 2001

O fluxo de ar para dentro do cilindro é distribuído por um par de canos perfurados. Sensores mediam a pressão, o fluxo de ar, umidade e temperatura e o sistema de controle com controle de vazão para manter o equipamento com uma pressão negativa no alcance selecionado de zero a -45 mmHg (milímetros de mercúrio negativos) (RUSSOMANO et al., 2006).

A última atualização do sistema de controle do equipamento foi anterior ao ano de 2005. O sistema de controle ficou obsoleto, pois não era compatível com os sistemas operacionais modernos.

3.5 Perturbações de um sistema

O intuito de um sistema de controle com retroalimentação é compensar o controle das perturbações causadas nesse sistema (ZIEMER, 1997; NISE, 2002). As perturbações de sistema podem ser de várias naturezas. Ruídos elétricos de transmissão de sinal do controlador (N2000) para o atuador (válvula proporcional); vazamentos de ar do sistema, variações de pressão na linha alimentação de ar, condições ambientais (variação de temperatura, pressão e umidade dentro e fora da LBNP Box, que afetarão as propriedades do ar), etc. (DÁZZO, HOUPIS, 1960).

3.5.1 Tipos de perturbações

3.5.1.1 Perturbação gaussiana

São ruídos com variações simétricas e aleatórias sem correlação com o tempo (WOOLF, 2006). O ruído branco é considerado do tipo gaussiano. Um exemplo de ruído branco no sistema da LBNP Box é a interferência eletromagnética no sensor ou em seu cabo condutor de sinal.

3.5.1.2 Perturbação de desvio

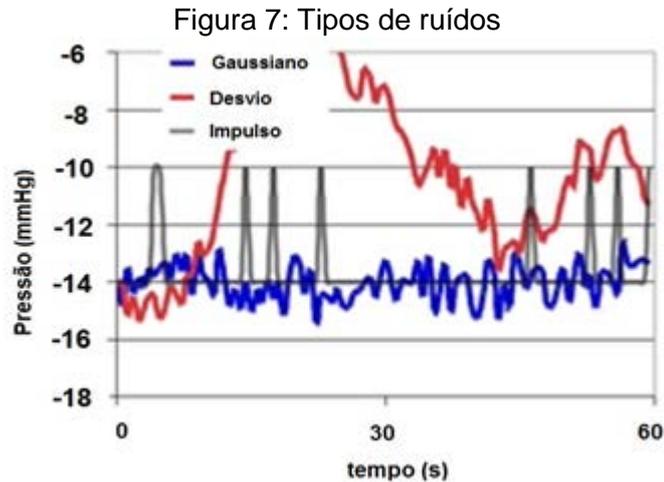
São desvios aleatórios correlacionados com o tempo (WOOLF, 2006). Por exemplo, uma mudança lenta na mudança de temperatura da sala durante um dia de coleta de dados na LBNP Box.

3.5.1.3 Perturbação de impulso

São oscilações bruscas que ocorrem no sistema geralmente com uma intensidade um pouco maior e por um período de tempo curto (PAPOULIS, 1998). Por exemplo, um aumento na pressão interna da câmara da LBNP devido a um vazamento de ar ocorrido entre o saiote de vedação e o corpo do candidato devido a algum movimento que ele possa ter feito. Outro exemplo poderia ser um mau contato

entre as conexões dos fios do sensor ou da válvula de atuação, ou até mesmo a abertura brusca da porta da sala do experimento durante o ensaio gerando uma diferença de pressão externa momentânea.

Estes três tipos de ruído citados podem ser observados na Figura 7.



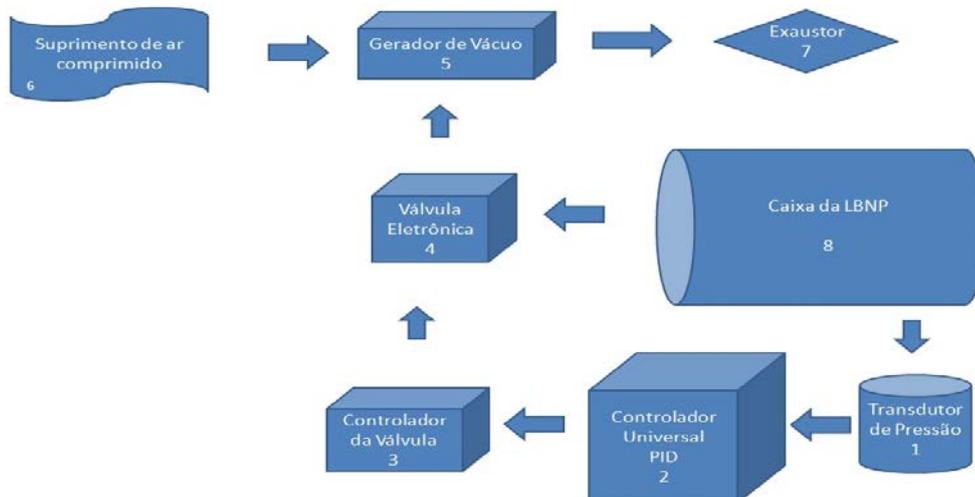
Fonte: Modificado de WOOLF, 2006.

4. Materiais e Métodos

4.1 Sistema Pneumático

Na Figura 8, é apresentado o diagrama de bloco dos principais componentes da LBNP Box desenvolvida nesse trabalho.

Figura 8: Diagrama de blocos dos principais componentes da LBNP Box

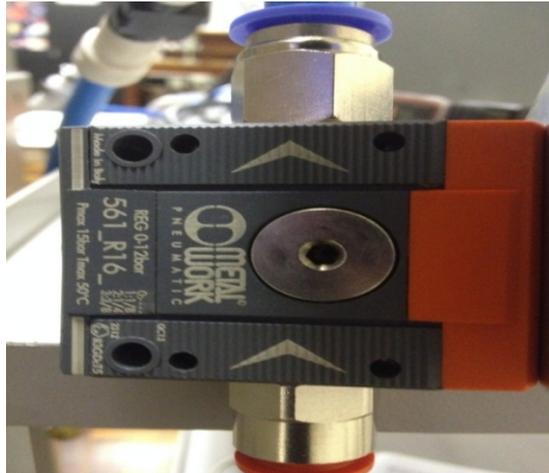


Fonte: Autor

4.1.1 Suprimento de ar comprimido

O fluxo de entrada de ar é diretamente proporcional ao fluxo de ar que sairá da câmara através do gerador de vácuo. No item seis da Figura 8, foi adicionada uma válvula de precisão, Figura 9, para regular o fluxo de ar que alimenta o Gerador Venturi.

Figura 9: Válvula de precisão



Fonte: Autor

Uma vez calibrado o instrumento, a pressão de entrada deve ser exatamente a mesma para futuras pesquisas, pois uma alteração na pressão irá alterar o processo calibrado para o controle de PID. Por este motivo, foi acoplado um manômetro analógico nessa válvula para que a pressão seja observada (Figura 10).

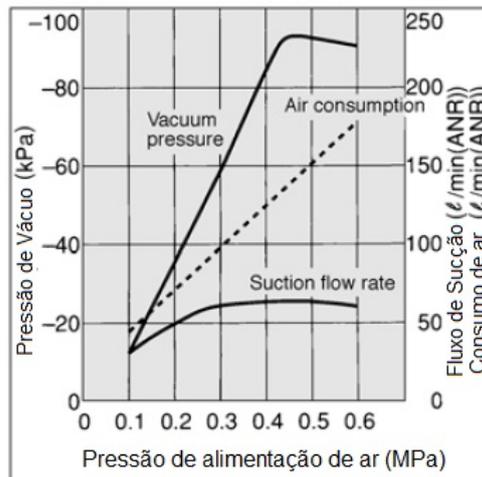
Figura 10: Manômetro da válvula de entrada



Fonte: Autor

De acordo com a Figura 11, a pressão ideal de funcionamento é de 0,4 MPa, ou seja, 4,5 bar. Através do gráfico, podemos constatar que o consumo de ar do sistema será de, aproximadamente, 140 l/min (ARN).

Figura 11: Características de Exaustão e Consumo de ar comprimido



Fonte: ZH18D Datasheet

Para garantir a mesma pressão de entrada e evitar que seja desregulada por pessoal não qualificado a operar o instrumento, foi comprado uma válvula com sistema de travamento (Figura 12). Este sistema de travamento consiste na possibilidade de se travar o regulador com um pequeno cadeado. A chave para abrir o cadeado só será fornecida à equipe de engenharia do Centro de Microgravidade para ajustes de engenharia. Para entrada de ar no sistema o operador do equipamento irá apenas ligar a alavanca de entrada de ar oriunda do compressor.

Figura 12: Detalhe de sistema de travamento da válvula de entrada



Fonte: Autor

4.2 Válvula proporcional

A válvula proporcional é responsável por regular a saída de ar do equipamento. O modelo utilizado é o SCG202A006V 24DC Joucomatic ASCO (Figura 13). Note que este modelo é específico para sistemas a vácuo e não funcionará para sistemas com pressão positiva. Um erro comum de projetistas é acreditar que válvulas, sejam proporcionais ou simplesmente válvulas reguladoras de pressão, podem funcionar tanto para vácuo quanto para pressão bastando apenas inverter o sentido do fluxo no engate pneumático. Porém, na maioria das vezes, as válvulas são projetadas para cada um dos tipos de sistema, vácuo ou pressão e, portanto, não funcionarão apenas invertendo-se o sentido do fluxo.

Figura 13: Válvula proporcional



Fonte: Autor

4.2.1 Características técnicas da válvula proporcional

Figura 14: Válvula proporcional sem controlador em vista isométrica



Fonte: Manual Válvula Asco SCG202

- Fluxo variável, proporcional ao sinal de controle aplicado;

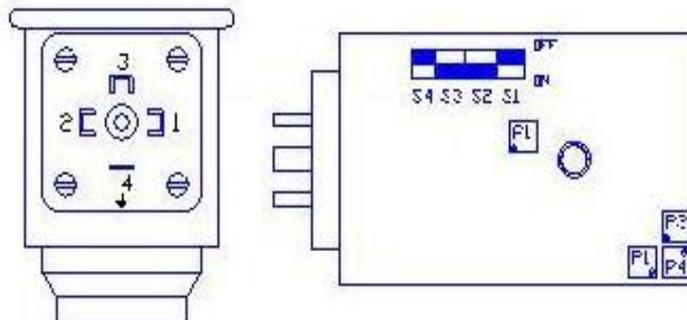
- A válvula não requer uma pressão mínima de operação;
- O solenoide da válvula está de acordo com as principais diretivas EECertificação EC 335 / ISO 4400;
- Nível de proteção IP65 que garante a funcionalidade do equipamento livre de poeira, e proteção contra jatos de água;
- Isolamento da bobina classe F;
- Especificações do conector adequado (ISO 4400, form A);
- Segurança elétrica IEC 335.
- Corrente necessária 1100 mA

4.3 Controle Eletrônico Proporcional

O controlador da válvula permite a modulação da tensão de alimentação da válvula proporcional. O modelo utilizado é o E908A001 24VDC da ASCO®. O principal motivo de escolha deste controlador foi para garantir a compatibilidade entre a válvula proporcional, também da ASCO® e por permitir a configuração do sinal de entrada através das chaves ilustradas na imagem da direita da figura 15.

Configurou-se o sinal de entrada para 4 – 20 mA, conforme a saída do controlador. No canto inferior direito da mesma imagem, podem ser ajustados alguns parâmetros de comportamento da válvula, como por exemplo, através do potenciômetro um (P1) pode ser ajustado o valor mínimo de fechamento da válvula. O potenciômetro dois define a curva de resposta ao sinal de entrada, podendo ser considerada um ganho externo ao que será dado no controle PID.

Figura 15: Esquemático do cabeçote de controle com detalhe da configuração interna



Fonte: Manual Controle Asco E908A001

Internamente a válvula possui um sistema de ajuste de entrada de controle, o qual irá receber do CLP o sinal de variável manipulada (MV). Ele pode ser configurado em sinal de 0 a 10 V, 0 a 20 mV ou, como foi configurado, de 4 a 20 mV. Na Figura 16 é ilustrado como devem ficar as chaves internas para que o controlador possa se comunicar com este atuador. Na Figura 16 é mostrada uma foto do controlador para que o leitor possa identificá-la no equipamento.

Figura 16: Cabeçote de controle ASCO



Fonte: Autor

4.3.1 Características técnicas

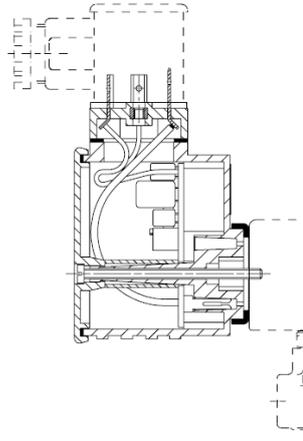
A unidade de controle possui as seguintes características técnicas que precisaram ser respeitadas para o desenvolvimento do projeto:

- Converte o sinal analógico de controle em uma corrente de bobina de um solenoide proporcional;
- Válvula atua com a modulação de pulsos (PWM);
- Desligamento para controles de sinal menores que dois por cento do sinal de controle máximo;
- Rampa de controle ajustável;
- Saída da corrente de bobina independente da resistência da bobina e oscilações da fonte de alimentação de energia;
- Saída mínima e máxima com ajustável corrente de bobina para a entrada de sinal de controle requerida;
- Conector do engate de acordo com a ISO 4400/EN 175301-803;
- Voltagem máxima 24Vdc+/-10%;

- Corrente máxima 1100mA;
- Segurança elétrica padrão IEC 335;
- Proteção de revestimento IP65 (EN 60529).

Na Figura 17 pode ser observada a correta forma de encaixe do controlador com a válvula proporcional.

Figura 17: Esquemática com conexões do controlador da válvula



Fonte: Manual do Controle Asco E908A001

4.3.2 Características dos Componentes

As características dos componentes ilustrados na Figura 17 são:

- 1) Alimentação, quatro terminais, ISO 4400/EN 175301-803.
- 2) Três terminais ISO 4400/EN 175301-803.
- 3) Três terminais DIM 43650 de 9,4 mm padrão industrial B.

4.3.3 Diagrama de interconexões do atuador

No Quadro 1 temos as conexões necessárias para comunicação de sinal entre o controlador e o atuador.

Quadro 1: Conexões entre CLP e Válvula Proporcional

Pino no conector da válvula	Pino no conector db9 válvula	Pino no conector db9 controlador	Controlador	Descrição
2	1	1	18-13	0 Vdc
1	2	2	2	+24 Vdc
GND	Revestimento	Revestimento	18-13	0 Vdc
3	8	8	14	Sinal de controle (MV)

É importante salientar que é nesta transmissão de sinal que temos a maior perturbação de ruído branco. Por este motivo o cabo utilizado é blindado com uma malha de aço externa a qual é conectada ao circuito terra da comunicação (Figura 18).

Figura 18: Cabo de comunicação entre CLP e atuador



Fonte: Autor

Esta técnica garante um sinal livre, ou muito reduzido, de interferências eletromagnéticas.

4.3 Gerador de Vácuo

Para a obtenção de pressão negativa, existem duas formas mais utilizadas: bomba de vácuo, e gerador de vácuo por princípio de Venturi. Optou-se por modificar o projeto inicial do equipamento, que utilizava um aspirador de pó como bomba de vácuo, colocando um Gerador Venturi.

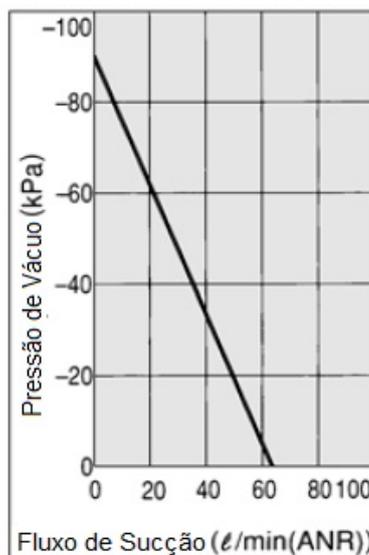
Os principais motivos para esta substituição foram: sistema mais compacto, simples, sem manutenção, menor custo que um sistema de bomba de vácuo adequado, fácil de montar, sem partes móveis, maior durabilidade e menor ruído.

Para garantir a portabilidade do equipamento em demonstrações em campo, as conexões com o aspirador de pó foram mantidas. Portanto, se no local de apresentação não houver ar comprimido, o equipamento ainda poderá ser utilizado.

O gerador de vácuo utilizado será o modelo ZH18D da SMC com capacidade máxima de fluxo de sucção de 110 l/min (cento e dez litros por minuto a zero grau centígrado) e pressão máxima de vácuo de 400 mmHg (quatrocentos milímetros de coluna de mercúrio negativos) com um consumo de ar máximo de 130 l/min (cento e trinta litros por minuto a zero grau centígrado). Diâmetro de 1.8 mm (

Figura 20 e Figura 21). O limite máximo de pressão negativa é de -88 kPa, ou seja, -660mmHg(Figura 19).

Figura 19: Características de fluxo do Gerador Venturi



Fonte: Datasheet ZH18D

Figura 20: Gerador de vácuo



Fonte: Autor

Figura 21: Interconexões com a tubulação pneumática



Fonte: Autor

Utilizando o Princípio de Venturi, este gerador permite a obtenção de pressão negativa com uma alimentação positiva de fluxo de ar. Uma redução muito significativa na durabilidade do equipamento, pois, dessa forma, obtemos o vácuo sem um equipamento com partes móveis que desgastam com o tempo. O ruído foi outro fator que incentivou o uso dessa técnica, pois reduziu significativamente com o uso de um silenciador pneumático na saída do gerador.

Apesar da capacidade máxima do Gerador de Venturi ser de até -660mmHg, espera-se que a pressão máxima utilizada para ensaios não ultrapasse -66mmHg. O revestimento de vinil recebeu teste de resistência de -100mmHg por 30 minutos. O transdutor é capaz de suportar pressões de até -110mmHg. O manômetro digital externo tem um alcance máximo de -100mmHg. A válvula de segurança foi configurada para -66mmHg, abrindo quando a pressão interna cair além deste valor.

4.4 Conectores diversos

Os conectores abaixo foram utilizados para a adequada conexão entre a tubulação e a malha pneumática entre válvulas e sensores (Figura 22).

Figura 22: Conectores



Fonte: Autor

4.5 Válvula de sangria (Bleed Valve)

O ajuste de fluxo de saída de ar do sistema, como foi visto anteriormente, é controlado pela válvula proporcional. Para que o interior da câmara hipobárica seja refrigerada durante sua operação, ou durante ensaios com exercícios dentro da LBNP Box, a válvula de sangria poderá contribuir para manter a temperatura e umidade equivalente ao exterior da câmara. O ajuste de pressão será compensado pelo controle PID. A válvula de sangria é apresentada na Figura 23.

Figura 23: Bleed Valve



Fonte: Autor

4.5.3 Componentes eletrônicos

4.5.3.1 Circuito da Fonte para a Válvula Proporcional

Com referência à corrente necessária, em prática, a válvula proporcional demonstrou a necessidade de consumo maior que 1100 mA para algumas sintonias de PID testadas. A fonte de 24Vdc fornecida pelo controlador N2000 não foi suficiente para manter o correto funcionamento do sistema pois sua capacidade máxima é de 25mA. Uma fonte de energia de 24Vdc com 2A (dois ampéres) de capacidade de corrente deve ser desenvolvida para alimentar a válvula. Sugestão de projeto de fonte 24VDC encontra-se no apêndice.

De acordo com o ganho ajustado na unidade de controle pelo potenciômetro P1, testes realizado no laboratório do Centro de Microgravidade mostraram que a válvula pode consumir acima de 1100 mA (Figura24). Esse consumo em excesso induz o atuador ao superaquecimento podendo, de acordo com o tempo de exposição, causar dano permanente à válvula proporcional.

Figura 24: Consumo de corrente da válvula proporcional

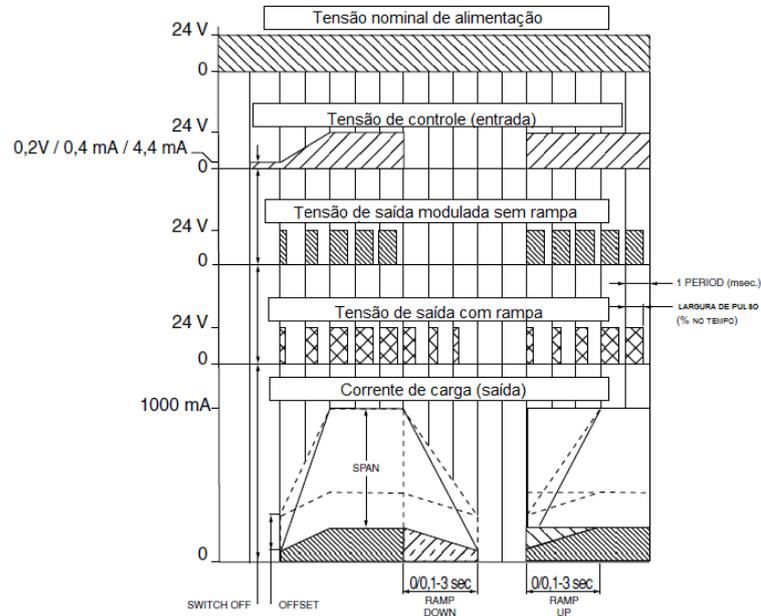


Fonte: Autor

Através da Figura 25 é possível visualizar a modulação da tensão de 24 Vdc para o controle de abertura e fechamento da válvula. O sistema de rampa na parte inferior do gráfico deve ser selecionado através da chave interna da válvula de número dois.

Ajusta-se no potenciômetro P1 o “span” indicado na Figura 15 para que o controle não exceda a corrente máxima indicada pelo fabricante.

Figura 25: Diagrama de Tensão e Modulação de Corrente da Válvula



Fonte: Manual Controle Asco E908A001

4.6 Sensores

4.7.1 Transdutor de pressão

O modelo de transdutor a ser utilizado será o da *MKS Instruments* modelo 223B-22406 com uma abrangência de 1500 mmHg, entrada de +/- 15 Vdc e saída de zero a cinco Vdc (Figura 26).

Figura 26: Transdutores MKS

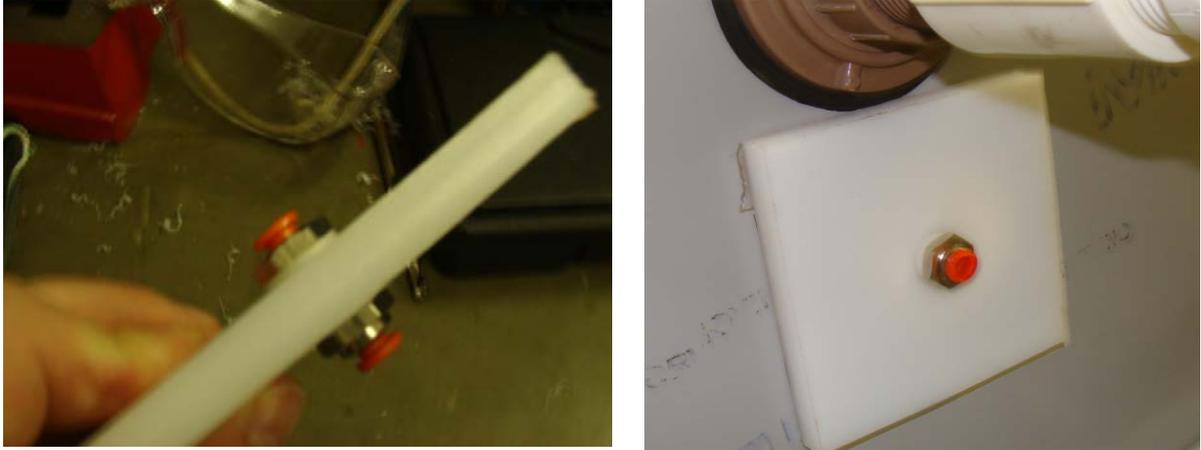


Fonte: Autor

O correto posicionamento do transdutor de pressão deve ser no conector inferior mostrado nas (Figura 27), pois se ele for conectado na saída de ar junto ao

gerador de vácuo o controle do sistema irá responder de forma divergente ao real modelo do sistema.

Figura 27: Conexão dedicada para sensor

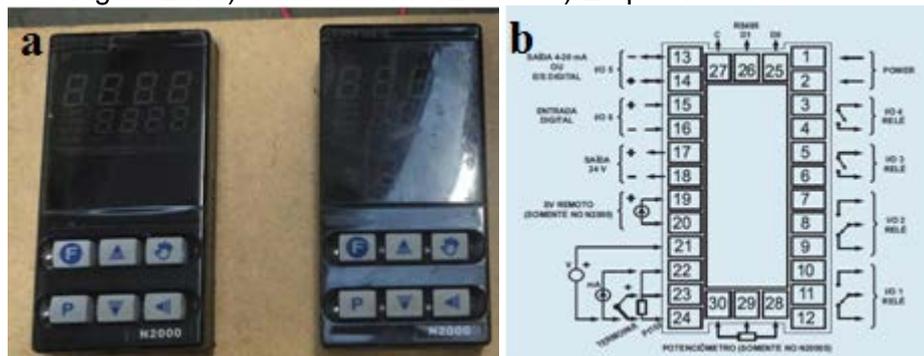


Fonte: Autor

4.8 Sistema de Controle PID

Foi utilizado o Controlador Universal de Processos da Novus modelo N2000 para realizar o controle PID da válvula proporcional eletrônica (Figura 28).

Figura 28: a) Controlador NS2000 e b) Esquemático elétrico traseiro



Fonte: Autor e Manual técnico Novus N2000

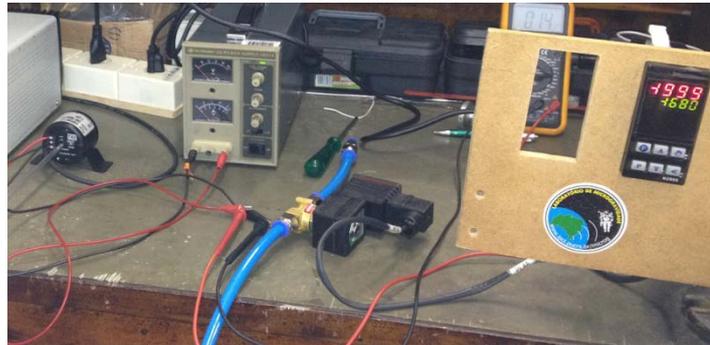
De acordo com o manual técnico N2000, esse controlador processado possui algoritmo PID integrado com capacidade de autossintonia. Ele pode ser programado para aceitar uma variedade de sinais, incluindo milivolts, volts, termopares etc. As saídas podem ser do tipo chave ou linear entre quatro e vinte miliampéres. O modelo a ser utilizado foi escolhido também com comunicação RS485.

O transdutor possui saída analógica variando de zeroacincovolts, então se configurou a entrada analógica do controlador N2000 para que recebesse exatamente esta faixa de sinal ajustando a variável de configuração “*type*” para 18 (dezoito).

Para verificar se a configuração do sinal recebido estava sendo lido pelo controlador e que o parâmetro estava correto, conectou-se uma fonte de tensão variávelpara simular a saída do transdutor(Figura 29).

Em seguida, configuraram-se os parâmetros de controle.Conforme a variação da entrada atuava, o controlador tentou atuar para estabilizar a pressão oscilando o sinal de controle na porta analógica OI5 observado no multíteste.

Figura 29. Teste das configurações



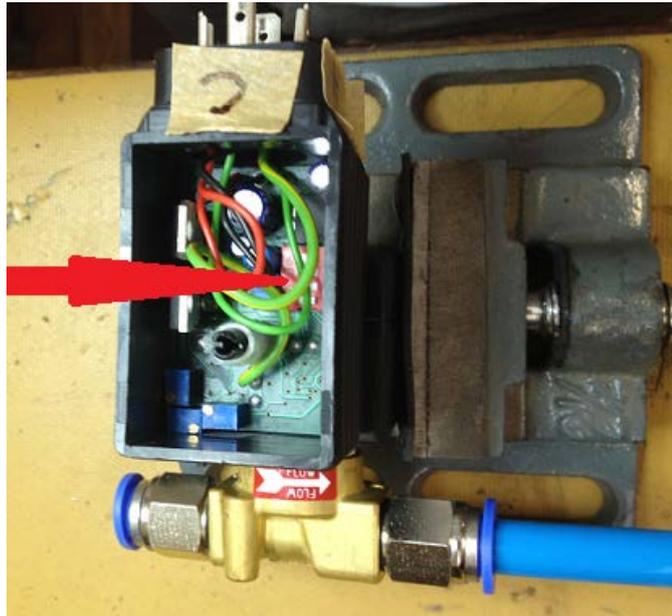
Fonte: Autor

Para conectar a saída analógica ao atuador precisou ser selecionado o correto tipo de sinal de saída do controlador e o tipo de sinal de entrada do controlador da válvula. O sinal foi configurado para enviar uma corrente entre 4 e 20mA minimizando, assim, problemas de ruído na transmissão do sinal. Isto pôde ser ajustado configurando a IO5 para o valor 12 (doze).

Os parâmetros das chaves tipo “*dip switch*” do controlador da válvula podem ser observados naFigura 30.

Note que é necessário conectar o comum do sinal enviado pelo controlador com o circuito de terra da fonte de alimentação da válvula para a leitura correta do sinal. Foi utilizado um cabo elétrico com blindagem para minimizar ainda mais os ruídos de transmissão. Para evitar transferências no sinal também é importante observar a disposição dos fios, que não podem estar cruzando com cabos de alimentação de energia elétrica.

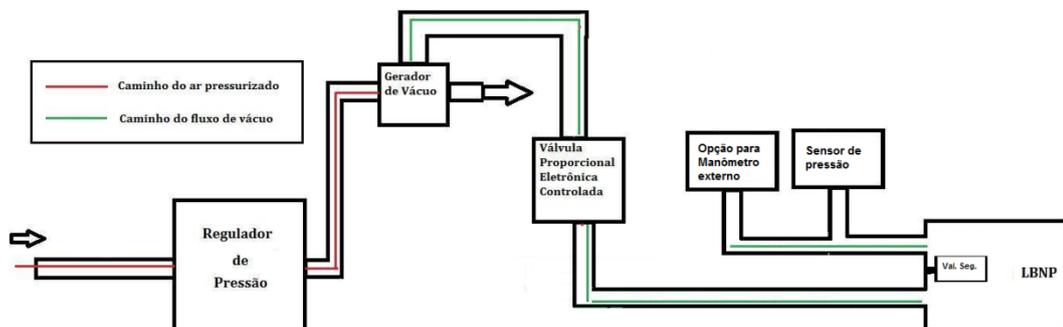
Figura 30: Ajuste interno do controlador da válvula



Fonte: Autor

Conectaram-se todos os componentes entre si. Pode-se então perceber o controlador atuando na válvula proporcional. Neste momento foi configurado o ponto alvo (-40mmHg) onde a pressão deve se manter. Na Figura 31 está o esboço do fluxograma pneumático parcial do processo.

Figura 31. Fluxograma pneumático



Fonte: Autor

4.9 Interface Homem-Máquina

Inicialmente, a interface homem-máquina (HMI) era composta por um computador industrial com as certificações BSMI, CCC, CE, FCC e UL, sistema de refrigeração sem a utilização de ventilador interno, montado na forma de painel com o usuário de frente para o equipamento e na posição vertical. O sistema operacional utilizado era o Windows XP (Figura 32).

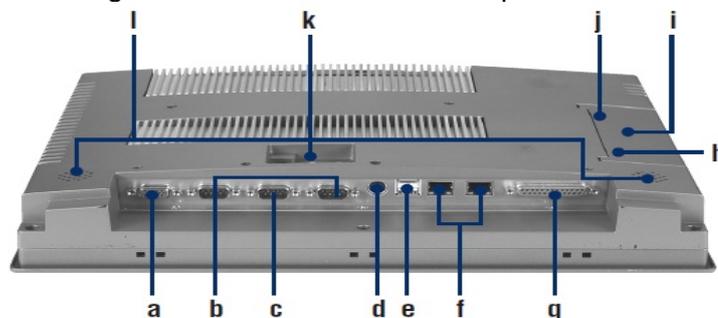
Figura 32: Ilustração do computador



Fonte: Manual do Usuário Advantec™

Seu sistema de hardware era composto de: processador Pentium 1.4 GHz, 1 GB SDRAM, (f) rede TPC 10/100 Tx2, HD de 2.5" SATA HDD resistente a oscilações e vibrações, (b) duas portas RS232 na COM1 e COM3, (c) uma porta de comunicação RS485 com autocontrole de fluxo de dados utilizado na comunicação com o N2000 para a comunicação entre a interface por toque e o envio dos parâmetros de SP e variáveis de controle, (e) duas portas USB, (g) LPT, (l) speakers (Figura 33).

Figura 33: Vista traseira do computador



Fonte: Advantec™

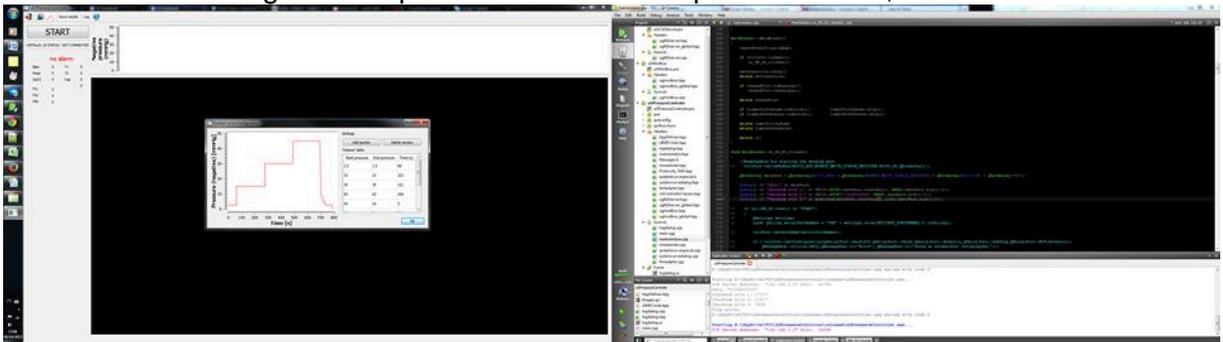
O display era constituído por tela XGA TFT LCD, quinze polegadas, 1024x768 de resolução, e proteção no painel frontal NEMA4 e IP65.

Porém, ao longo dos testes o equipamento precisou ir para a manutenção ainda em garantia duas vezes em um ano e, por isso, optou-se por substituir esta interface pelo HMI, também sensível ao toque, Painelview C400® de quatro polegadas da Rockwell™.

4.9.1 Aplicativo de interface

Um aplicativo de interface com o usuário foi desenvolvido em paralelo (Figura 34) pelo aluno de graduação Martin Bittencourt como trabalho de conclusão de curso.

Figura 34: Aplicativo desenvolvido por Bittencourt, 2014.



Fonte: BITTENCOURT, 2014

O aplicativo faz a comunicação entre o usuário e o controlador N2000 através de uma interface amigável através da tela sensível ao toque. Foi utilizado o protocolo de comunicação industrial Modbus do controlador N2000, que se comunicou através de um conversor RS485 - USB também da Novus (Figura 35).

Figura 35: Conversor USB/RS485 Novus

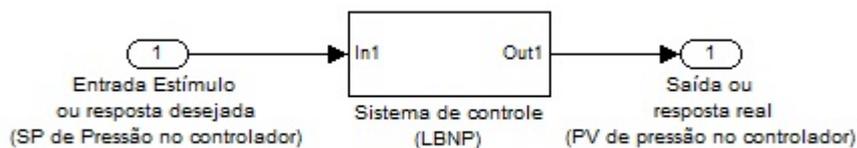


Fonte: Autor

4.10 Sistema de Controle

Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos reunidos com o propósito de controlar a saída do processo (NISE, 2002) A entrada do sistema representa a resposta desejada, ou excitação, chamada de ponto de ajuste, ou do inglês “*setpoint*” (SP) do controlador; a saída é a resposta real chamada de ponto valor, ou “*point value*” (PV) do controlador.

Figura 36: Ilustração no Simulink® de um sistema de controle em malha aberta



Fonte: Autor

Um sistema de controle pode ser considerado estático ou dinâmico. Um sistema estático é aquele em que as propriedades descritivas não variam com o tempo podendo variar espacialmente. Já no sistema dinâmico tais propriedades variam no tempo (PEREIRA, 2007). No caso da LBNP Box, a propriedade a ser controlada que varia no tempo é a pressão interna da câmara, portanto, é um sistema dinâmico. A entrada é o valor de pressão desejada (SP) o controlador universal de processos irá atuar e modificar a variável de controle, do inglês “*manipulatedvariable*” (MV) que será o valor em porcentagem da corrente elétrica a ser enviada para a válvula proporcional eletrônica de vácuo. Conforme a abertura da válvula for alterada (manipulada), a proporção de ar que sai da câmara irá alterar para mais ou para menos a pressão interna causando uma diferença de pressão de um momento para o outro. Por sua vez, essa diferença de pressão irá alterar o valor recebido por um sensor (transdutor de pressão). Por fim, o sensor identificará a pressão atual dentro da câmara da LBNP e fornecerá a resposta (saída) do sistema representado pelo valor da pressão real (PV).

O sistema em estudo, além de dinâmico, pode ser subclassificado como sistema “fluido pneumático”, pois sua variável (pressão) é constituída de um fluido gasoso: o ar. (OGATA, 1997).

4.10.1 Sistema Linear

Um sistema linear é aquele que satisfaz a propriedade da Homogeneidade e o Princípio de Superposição (DORF, BISHOP, 1998).

Princípio da Superposição: Se um sistema com entrada $x_1(t)$ possuir uma saída $y_1(t)$, e um sistema com entrada $x_2(t)$ possuir uma saída $y_2(t)$, então um sistema com entrada $x_1(t) + x_2(t)$ deverá ter uma saída $y_1(t) + y_2(t)$.

Se $x_1(t) \xrightarrow{\text{Sistema}} y_1(t)$ e $x_2(t) \xrightarrow{\text{Sistema}} y_2(t)$, então:

$$x_1(t) + x_2(t) \xrightarrow{\text{Sistema}} y_1(t) + y_2(t)$$

Propriedade da Homogeneidade: Se um sistema com entrada $x_1(t)$ possuir uma saída $y_1(t)$, então um sistema com entrada $\beta x_1(t)$ deverá ter uma saída $\beta y_1(t)$

Se $x_1(t) \xrightarrow{\text{Sistema}} y_1(t)$, então $\beta x_1(t) \xrightarrow{\text{Sistema}} \beta y_1(t)$

4.11 Configurações de Sistemas de Controle

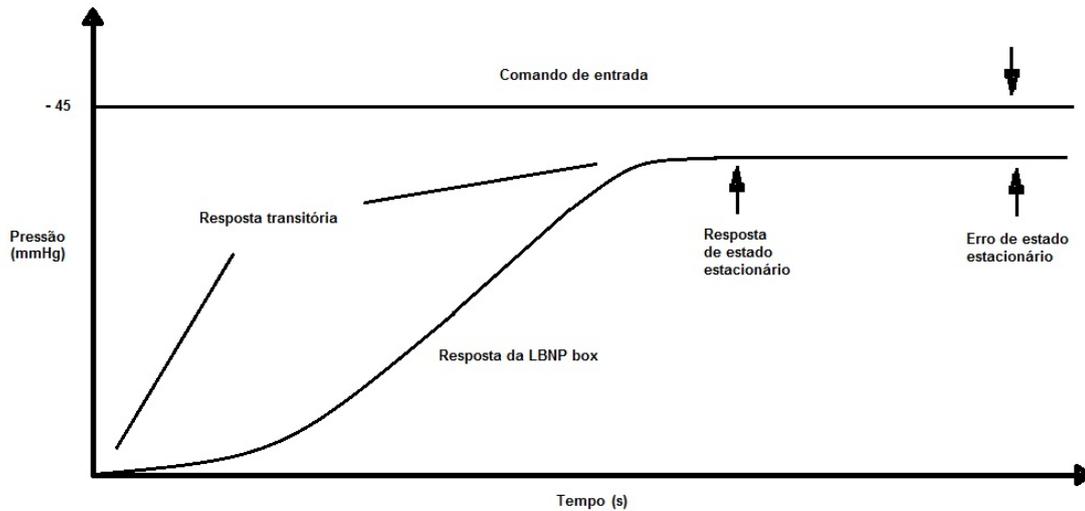
4.11.1 Sistemas a Malha Aberta

Em um sistema a malha aberta um comando de entrada ou referência é enviado ao controlador (SP de pressão desejada) que por sua vez irá alterar o valor de saída gerando a resposta de estado estacionário (PV representando a pressão na LBNP Box).

A curva de transição para a pressão alcançar o estado estacionário é chamada de resposta transitória (Figura 37).

O erro de estado estacionário mostrado no gráfico é causado por perturbações que ocorrem no sistema. Um sistema a malha aberta é incapaz de corrigir erro de estado estacionário (NISE, 2002), o qual só pode ser corrigido através de um sistema com retroação.

Figura 37: Resposta no tempo da LBNP



Fonte: autor

4.11.2 Sistemas a malha fechada (Controle com Retroação)

Em sistemas a malha fechada o sinal de saída é subtraído do sinal de entrada e o resultado é o sinal atuante no controle. Enquanto os sinais forem diferentes, o controle continuará atuando até que se obtenha o sinal real sinal (pressão) desejado.

4.12 Modelagem do Sistema

É possível fazer o controle do sistema através de métodos clássicos, ou seja, sem modelar matematicamente o processo. O método escolhido foi o primeiro método sugerido por Ziegler e Nichols (Z-N) em 1942.

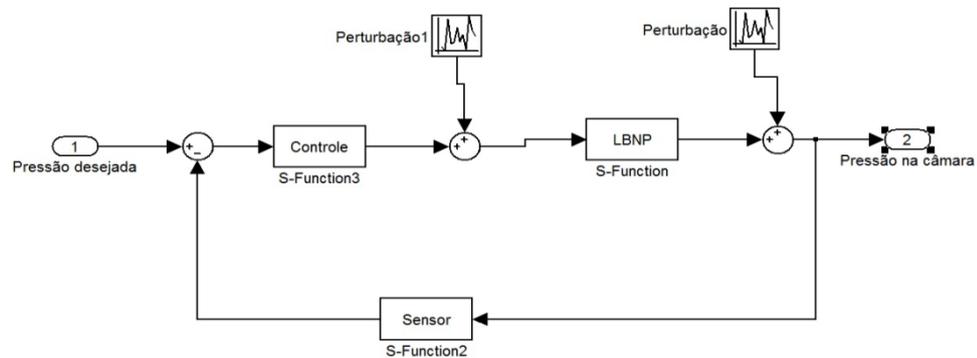
Os controladores, em geral, possuem a funcionalidade de controle por PID em seu hardware, permitindo a configuração com a entrada dos parâmetros K_p , T_i e T_d que podem ser obtido através de diversos tipos de técnicas, inclusive através da tabela proposta nesse primeiro método.

4.12.1 Modelagem no Sistema de Controle

Na Figura 38 está proposto um diagrama de blocos simplificado do controle a ser desenvolvido.

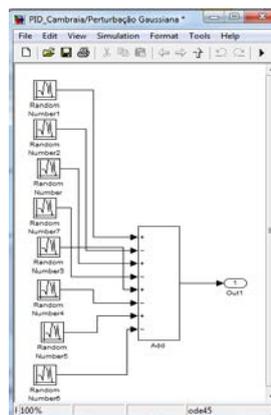
Para ter uma melhor aproximação do sistema real, foram modelados e adicionados na simulação acima dois subsistemas de ruído branco conforme a Figura 39, a qual exemplifica como foi feito o subsistema de sinal gaussiano no Simulink®. Este gerador de sinal é uma aproximação com oito geradores randômicos, quatro somados e quatro subtraídos. Um sinal randômico real tem infinitos sinais somados e infinitos sinais subtraídos (WOOLF, 2006).

Figura 38: Diagrama de blocos do sistema de controle a malha fechada da LBNP Box.



Fonte: autor

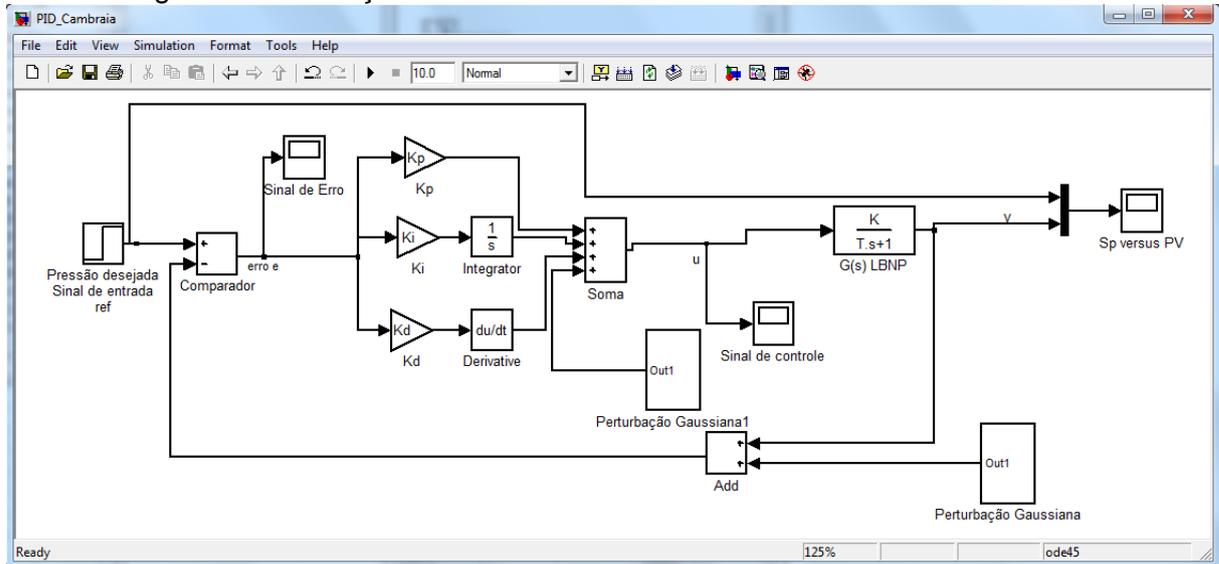
Figura 39: Modelagem do ruído branco no Simulink®



Fonte: Autor

Na figura 40o sistema de controle do tipo PID foi introduzido na simulação.

Figura 40: Simulação do controle da LBNP Box feito no Matlab/Simulink®



Fonte: Autor

4.13 Controle PID

Esse é o tipo de controle de sistemas mais utilizado no mundo atualmente. Ele possui diversas funções importantes: fornece a realimentação do sistema; tem a habilidade de eliminar o offset no espaço de estados através da ação integral; pode antecipar o futuro através da ação derivativa.

O controle PID possui a seguinte função de transferência (DORF; BISHOP, 1998).

$$G_s(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\tau_d s + 1}$$

A real equação do termo derivativo, na maioria das vezes, é descartada por ser menor que a constante de tempo do processo, então se tem:

$$G_s(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_d s^2 + K_p s + K_i$$

Considerando $a = \frac{K_p}{K_d}$, e $b = \frac{K_i}{K_d}$, podemos encontrar as raízes do sistema e obter a equação:

$$G_c(S) = \frac{K_d(s^2 + as + b)}{s} = \frac{K_d(s + z_1)(s + z_2)}{s}$$

Portanto, podemos observar que o controle a três termos com a estrutura proporcional, integral e derivativa introduz no sistema uma função de transferência com um polo na origem (representado por s no denominador). E também dois zeros que podem estar localizados em qualquer parte à esquerda do eixo imaginário do plano s (representado pelas variáveis z_1 e z_2 no numerador). (ASTROM, HAGGKUND, 1998) (DORF; BISHOP, 1998).

Dentro da faixa de banda proporcional (Pb), ou seja, onde o sistema se comporta de maneira linear e o atuador não satura, o comportamento da versão teórica do algoritmo PID pode ser descrito da seguinte forma:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Onde $u(t)$ é a variável de controle e $e(t)$ é o controle de erro (ASTROM, K; HAGGKUND, 1998).

As variáveis a serem informadas para o controlador de processo são: o ganho proporcional K , o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d .

4.14 Sugestão futura para Integrador Windup

A válvula proporcional eletronicamente controlada foi escolhida para atuar no controle do fluxo de saída de ar e, por consequência, na pressão interna da LBNP Box. Por isso, ela é chamada de atuador do sistema. Todo atuador possui suas limitações. A limitação dessa válvula está definida pela capacidade de abertura e fechamento proporcional, o qual não pode ser menor que zero e nem maior que cem por cento. Uma ordem vinda do sistema de controle para que ela abra acima de cem por cento, ou seja, buscando um fluxo de saída de ar do sistema maior do que o possível e, dessa forma, poderá (ou não) instabilizar o sistema. Caso instabilize o sistema se comportará como se estivesse em malha aberta (DORF; BISHOP, 1998), pois o atuador irá manter-se em cem por cento. Isso poderia ser causado, por

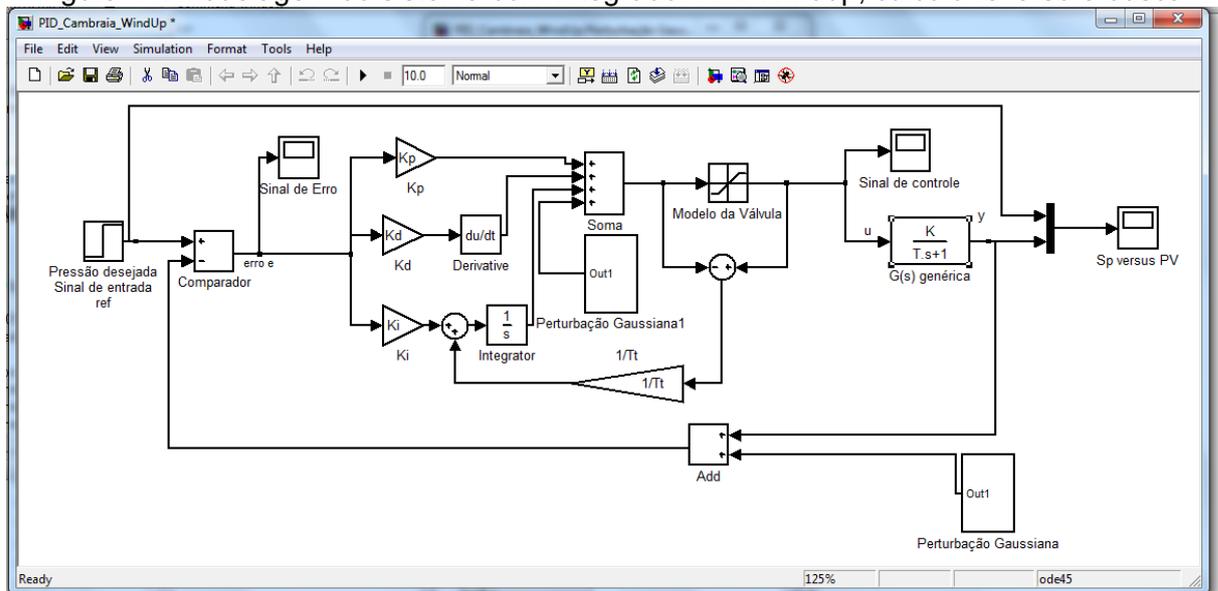
exemplo, pela má abertura da válvula de entrada de ar do equipamento, que faria com que o gerador de vácuo não atingisse a eficiência que possuía durante sua modelagem. Ou ainda, por um grande vazamento de ar no sistema da LBNP.

Um sistema instável pode ser imprevisível, podendo causar respostas indesejadas ao sistema colocando em risco a saúde do candidato. Por este motivo, o sistema possui uma válvula de emergência e uma válvula de segurança.

Contudo, o controlador universal de processos N2000 possui a opção de limites de alarmes o que impede que, mesmo sem sistema mecânico de segurança o sistema atinja um valor de SP muito alto. Outra segurança do sistema é o degrau de mudanças no SP de acordo com os valores da curva padrão adotada, pois evita que um SP com uma diferença muito alta em relação ao valor de SP anterior seja escolhido. Uma mudança muito alta, ou muito baixa, no valor do SP também poderia causar um efeito windup.

Caso futuros testes demonstrem necessário aplicar uma técnica para evitar o windup, segue um modelo de anti-windup proposta por (Bishop, 1998) aplicada à simulação no Matlab® para controle PID adaptado para o presente trabalho (Figura 41).

Figura 41: Modelagem do sistema com Integrador Anti-Windup, cálculo reverso e busca



Fonte: Adaptado de BISHOP, 1998

5. Resultados e Discussões

5.1 Objetivos atingidos

5.1.1 Desenvolver o circuito pneumático com válvula industrial eletronicamente controlada

Apesar do alto custo da válvula proporcional eletronicamente controlada e da dificuldade em se achar esse componente com a especificação e preço acessível no mercado local o objetivo foi atingido plenamente. A válvula apresentou ótima integração com o controlador, pois permitiu seu ajuste de leitura de sinal de controle para o mesmo tipo de sinal de corrente sem a necessidade de um conversor evitando mais gastos financeiros e possíveis ruídos no sinal. A válvula possui ajustes em seu hardware através de potenciômetros que permitem ajustar seu desempenho de acordo com as necessidades do projeto.

No que diz respeito á posição da válvula,obrigatoriamente, ela precisa ficar entre o gerador de vácuo e a câmara. Ela só é capaz de regular fluxo de vácuo em sua saída de passagem de ar.Quando ocorre o desligamento de energia do sistema, a válvula fecha automaticamente e cancela a sucção de ar da câmara garantido a integridade do voluntário.

5.1.2 Usar gerador de vácuo conectado ao abastecimento de ar comprimido para gerar a pressão negativa

O gerador de vácuo mostrou-se capaz de substituir o antigo aspirador de pó e até mesmo uma bomba de vácuo.

Apresentou, também, ruído menor do que o aspirador de pó (Gerador Venturi = 65 dB com silenciador contra 75 dB do aspirador de pó do outro lado da parede localizado na sala ao lado).Este ruído pode ainda ser reduzido caso o duto de saída de ar for prolongado para outro ambiente ou receber um silenciador de melhor qualidade. É importante que se entenda que o decibel é uma unidade logarítmica e que o aumento de 10 dB equivale à aumentar o ruído em dez vezes. Portanto, o novo sistema é dez vezes mais silencioso do que o utilizado anteriormente.

É preciso lembrar que a resistência extra que o comprimento da canalização pneumática e do novo silenciador pode modificar a dinâmica do processo. Isso

resultará na necessidade de novos ajustes de sintonia para o controle a menos que seja compensado o fluxo com a válvula de precisão colocada na entrada do sistema. Para fazer este ajuste, seria necessário abrir a malha, ajustar o SP e anotar a pressão. Após colocar o prolongamento do cano na saída do exaustor do gerador de vácuo deve-se ajustar o regulador até que a pressão volte ao estado anterior. Pois, uma vez que o mesmo fluxo de saída for mantido, as mesmas propriedades da função de transferência do sistema serão mantidas.

5.1.3 Programar e configurar um controlador universal de processos ao sistema

O controlador universal foi programado com sucesso. Foi possível adequar as opções de configuração com os sensores e atuadores escolhidos. Também foi possível utilizar a funcionalidade de comunicação do controlador com a porta RS485 do computador.

A comunicação RS485 é utilizada para a comunicação de sinal dentro de plantas industriais grandes que necessitam trafegar sinais por longos caminhos até os atuadores. Porém, nosso atuador está próximo do controlador e torna essa facilidade desnecessária. Teria sido mais vantajoso se a comunicação fosse do tipo ethernet, pois facilitaria o desenvolvimento da aplicação sem a necessidade de se desenvolver uma aplicação de interface especificamente para esta comunicação economizando tempo de projeto.

Além da dificuldade de comunicação entre o controlador e o aplicativo de interface com o usuário, outras dificuldades se mostraram presentes com relação ao controlador N2000. A primeira delas foi a incapacidade do controlador em incrementar o ganho K_p enquanto o controle estava ligado em malha fechada. Essa característica do controlador dificultou a utilização do segundo método de malha fechada proposto por Ziegler e Nichols para a obtenção do período crítico tornando o processo de obtenção dos dados lento.

A segunda característica foi a incapacidade de se configurar uma tabela de diferentes parâmetros para o controlador PID em diferentes valores de SP. Assim, o sistema ficou dependente dos comandos enviados pelo aplicativo desenvolvido para receber os comandos e criar a curva padrão automaticamente. Caso no futuro seja

necessário contornar este problema, recomenda-se a substituição do controlador N2000 por um controle do tipo controlador lógico programável (CLP).

5.1.4 Integrar sensores e válvulas com o controlador universal de processos

O objetivo foi atingido plenamente. Os novos sensores e válvulas foram integrados permitindo o controle do equipamento. A saída de sinal foi transmitida numa faixa de corrente (4 a 20 mA) e o sinal do sensor foi recebido de 0 a 5 Vdc, dispensando qualquer tratamento ou amplificação de sinal. Isso garante uma simplicidade, robustez e baixo custo ao projeto de instrumentação desenvolvido no novo sistema.

5.1.5 Adicionar um controle PID autônomo e independente

O objetivo foi atingido com restrições. Na versão anterior da LBNP o sistema de PID rodava em um computador tipo PC. Agora, com um controlador dedicado com essa facilidade de PID integrado, o sistema impede que problemas anteriores com a frequência e o tempo de comunicação entre controle e atuador (Piccoli, 2002) aconteçam. Porém, o controle independente não permite sem a ajuda de um aplicativo externo a alteração dos parâmetros PID para diferentes faixas de SP.

5.1.6 Troca da capa da estrutura

O objetivo foi plenamente atingido. Inicialmente, todas as faixas de pressão foram calculadas. Porém, foi necessária a troca da lona de vinil durante os testes. A nova lona apresentou diferentes curvas em resposta ao degrau e não puderam ser utilizados os antigos dados dos valores dos parâmetros obtidos inicialmente.

Isso se deve à alteração do processo devido à dinâmica da nova capa e do novo sistema de vedação da câmara.

Figura 42: Troca da Lona de Vinil



Fonte: Autor

5.1.6.1 Procedimento de calibração

A temperatura da sala foi estabilizada em torno dos 22 °C, a LBNP Box foi ligada e sua pressão interna ajustada em -30mmHg para que uma pressão fosse exercida na lona de vinil esticando o material. Recomenda-se aguardar 45 minutos para iniciar a calibração ou qualquer teste de ensaio no equipamento. Isto garantirá que o equipamento esteja em uma temperatura homogênea e que a lona transparente perca um pouco de seu efeito de amortecimento inicial em baixa diferença de pressão garantindo uma melhor aproximação para diferentes valores de SP.

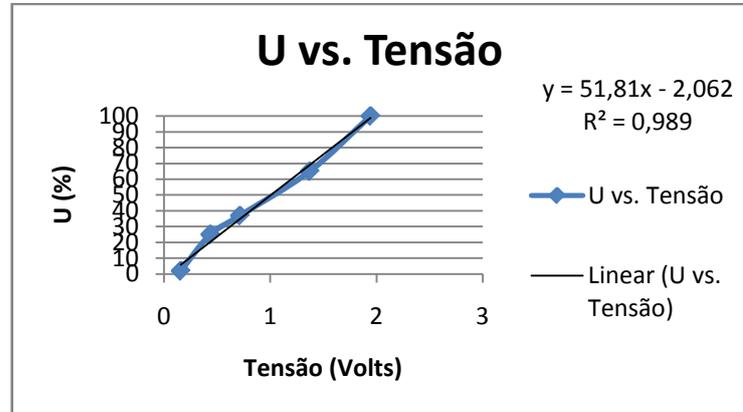
O Quadro 2 apresenta os valores obtidos na calibração antes do ensaio.

Quadro 2: Valores para Calibração

Pressão (mmHg)	Setpoint	MV (%)	Tensão (mV)
4,25	-163	2	155
10,44	-95,3	25	435
16,59	-28,3	37	714
31,1	129,5	65	1371
43,8	267,5	100	1944

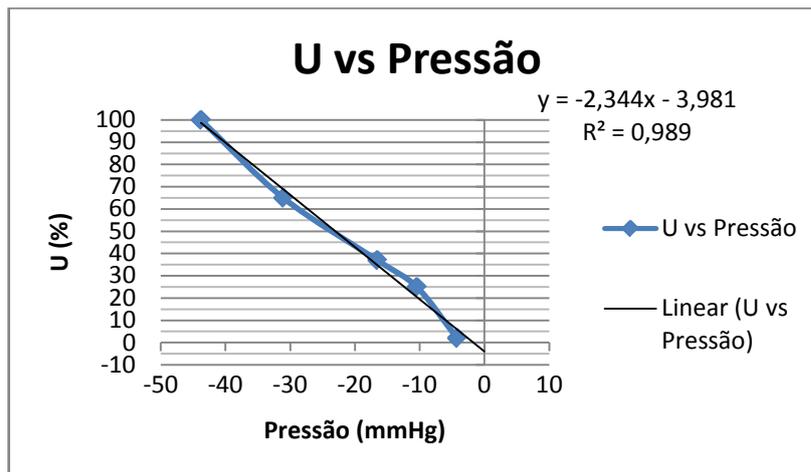
Fórmulas auxiliares para serem utilizadas na criação do aplicativo estão disponíveis no canto superior direito da Figura 43 e da Figura 44.

Figura 43: U vs Tensão



Fonte: Autor

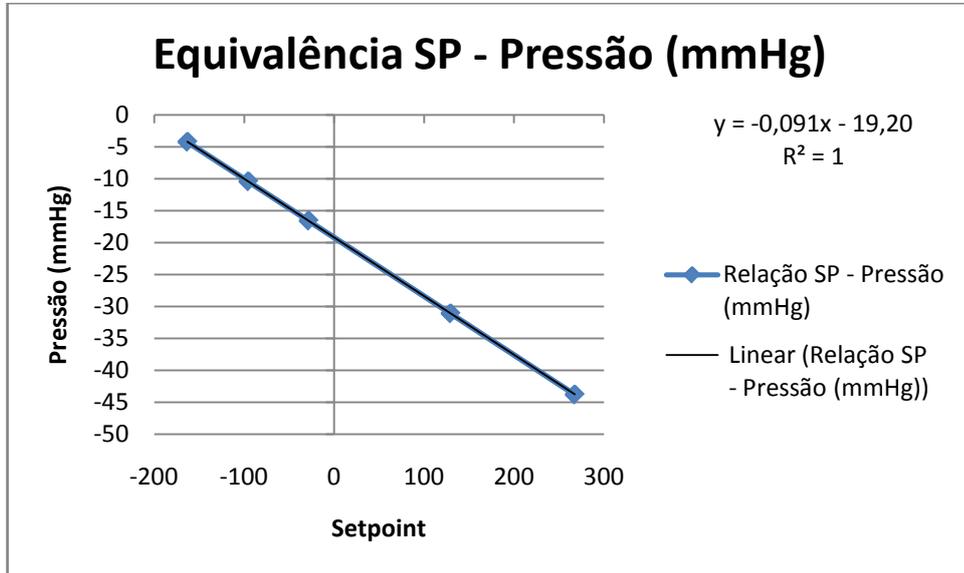
Figura 44: U vs Pressao



Fonte: Autor

Para atingir a pressão escolhida é preciso aplicar a fórmula e regular o valor de SP obtido pela fórmula de aproximação do gráfico na (Figura 45).

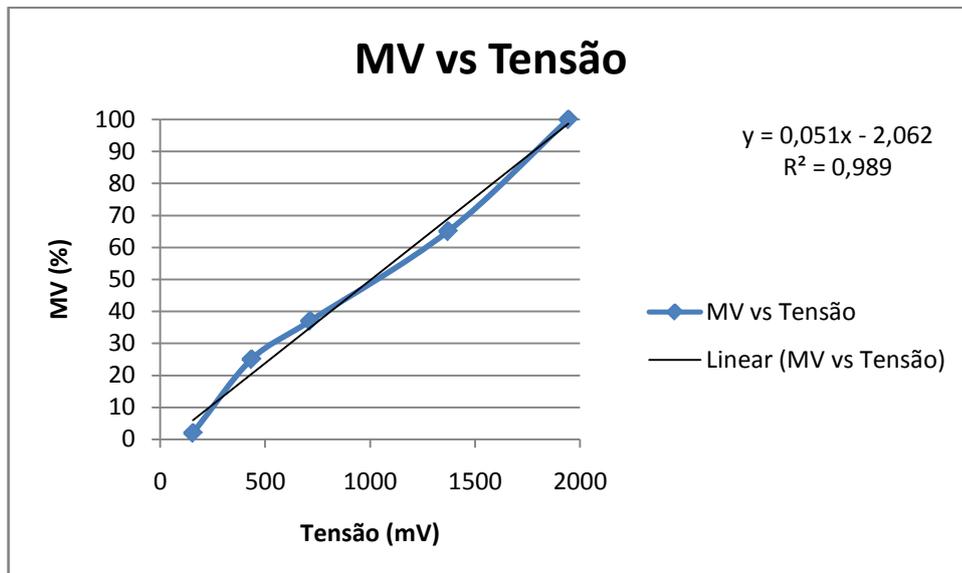
Figura 45: Relação entre SP e Pressão



Fonte: Autor

A relação entre o percentual e tensão pode ser encontrada na equação fornecida pela Figura 46.

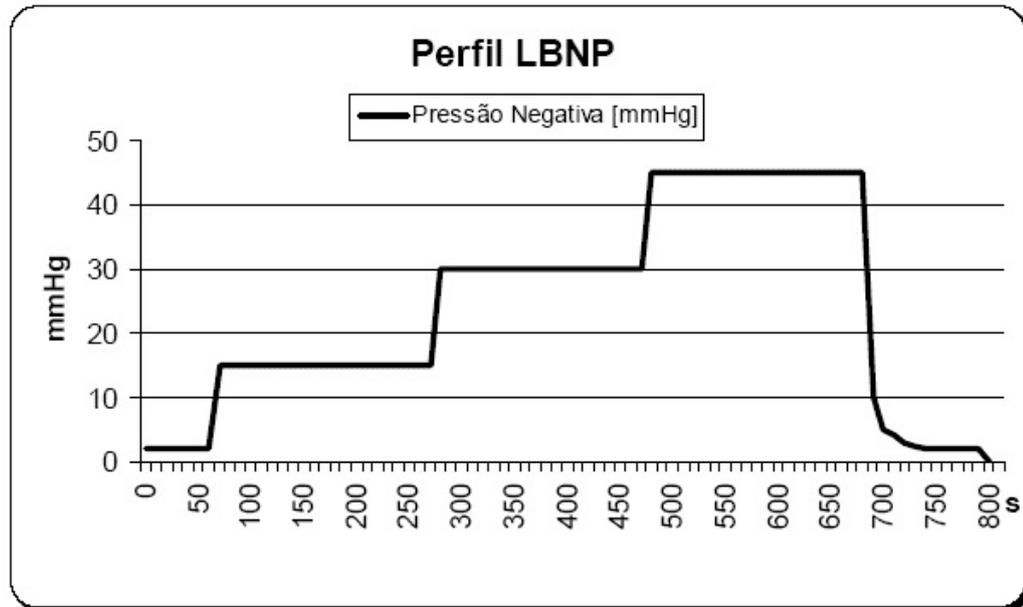
Figura 46: Relação MV vs Tensão



Fonte: Autor

As faixas de interesse foram definidas pelos valores alvo do perfil de pressão conforme gráfico abaixo.

Figura 47: Perfil de estágios de pressão fornecido pela DLR



Fonte: Piccoli 2004

Foi utilizado o Sistema de aquisição de dados da NationalInstruments® DU-148 conectado na saída do sinal do transdutor.

5.1.7 Sintonizar o controle PID documentando as variáveis de controle para ser utilizado pelo aplicativo de interface

Condições de temperatura e pressão durante o ensaio:

Temperatura: 21.5

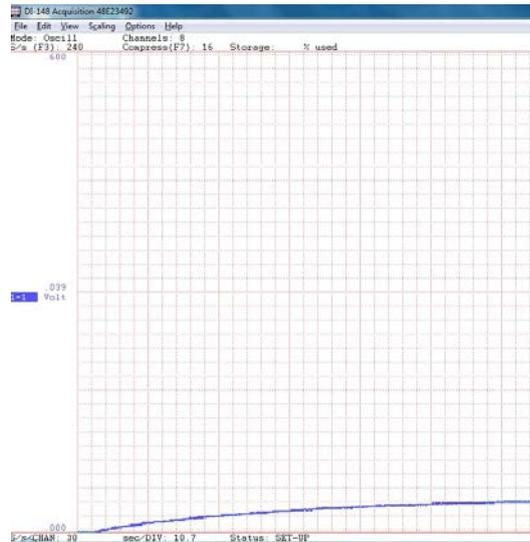
Umidade: 47%

Válvula de sangria: Meia volta Aberta

O gráfico da Figura 48 mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta. Pra a obtenção da curva foi dado o degrau variando U manualmente.

$U_0 = 0\%$. $U_{\Delta} = 6\%$ $SP_0 = 0\text{mmHg}$ e $SP = -2\text{mmHg}$

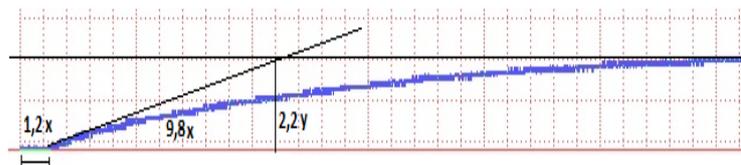
Figura 48: Ponto de interesse: -2mmHg



Fonte: Autor

Abaixo na Figura 49 é apresentado em detalhe os parâmetros obtidos na curva de reação.

Figura 49: Detalhe do gráfico



Fonte: Autor

Os seguintes dados podem ser obtidos do gráfico:

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

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

$$CO = 2,2y = 2,2 \text{ div} \times \frac{17,64\text{mV}}{\text{div}} = 40\text{mV}$$

Contudo, o valor do cateto oposto (CO) precisa ser fornecido em porcentual para ser utilizado na tabela.

Logo tem-se:

$$CO_{\%} = 0.0518 \times CO = 2\%$$

O cateto adjacente (CA) pode ser encontrado na fórmula

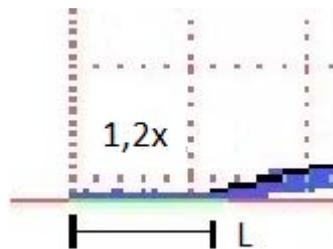
$$CA = 9,8x = 9,8\text{div} \times \frac{0,1783\text{min}}{\text{div}} = 1,747\text{min}$$

Para o cálculo do gradiente temos:

$$\text{Gradiente} = R = \tan \theta = \frac{CO_{\%}}{CA} = \frac{2\%}{1,747\text{min}} = 1,14 \frac{\%}{\text{min}}$$

Do detalhe ampliado ilustrado na Figura 50 podemos obter o atraso de transporte (L).

Figura 50: Detalhe do atraso de transporte



Fonte: Autor

De acordo com a (fórmula) o valor aproximado de L em minutos é:

$$L = 1,2 \times 0,1783 = 0,214\text{min}$$

Inserindo os valores no Quadro 3

Quadro 3: Tabela Z-N primeiro método para obter os parâmetros PID

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{1,2}{\frac{LR}{U}}$	2L	0,5L

Quadro 4: Valores calculados

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	29,5	0,43	6

O controlador comercial utilizado exige a entrada dos seguintes parâmetros:

Pb = banda proporcional

A banda proporcional pode ser obtida do ganho proporcional – Kp.

$$Pb = \frac{100}{Kp}$$

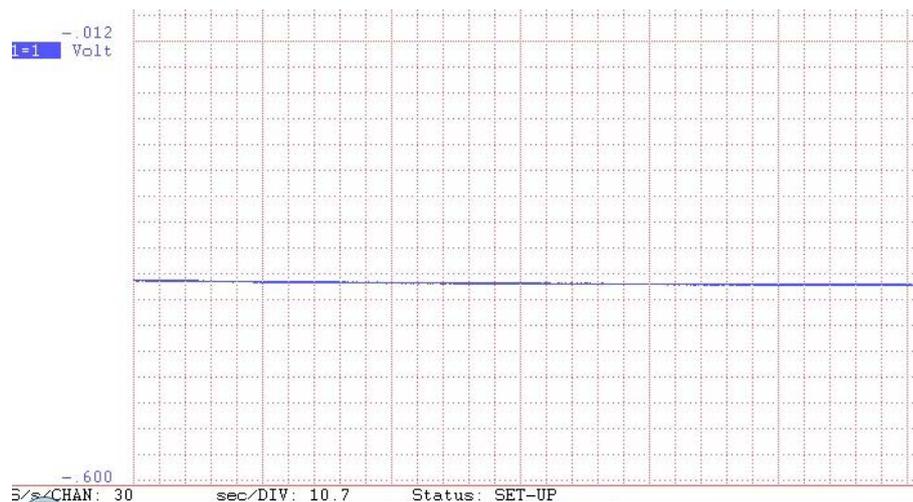
Ir = taxa integrativa em minutos

Dt = tempo derivativo em segundos

Ct = tempo de ciclo em segundos

A curva obtida para os valores calculados estão na figura 51. Como pode ser observada, após um longo período de tempo, a pressão ainda não havia atingido seu valor desejado.

Figura 51: Resposta ao degrau com resposta muito lenta



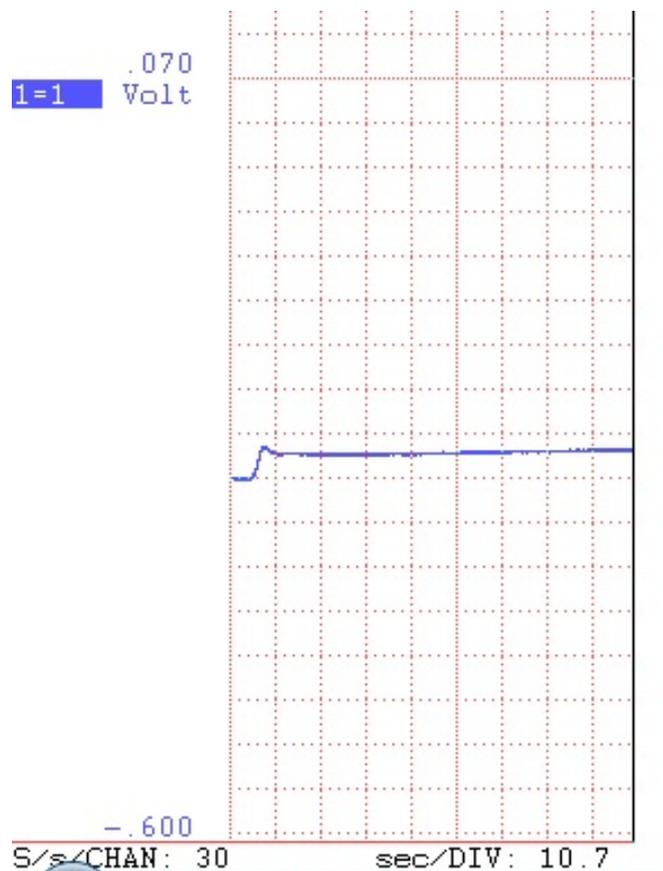
Inserindo os parâmetros no controlador e sintonizando manualmente obtemos os seguintes valores:

Quadro 5: Valores obtidos por sintonia

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

A curva na figura 52 demonstra o resultado da resposta espaço tempo para um degrau aplicado de zero à 2 mmHg (dois milímetros de mercúrio).

Figura 52: Resposta ao degrau sintonizada

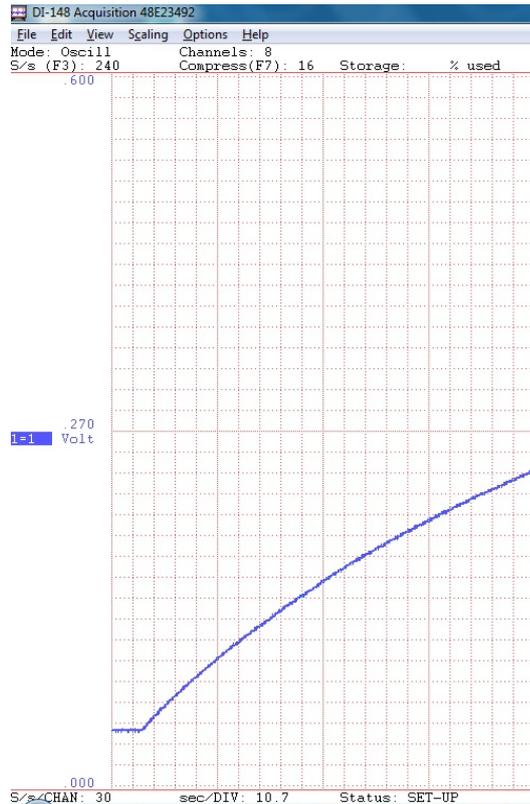


Fonte: Autor

O gráfico da Figura 48 mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta com ponto de interesse de -10mmHg.

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

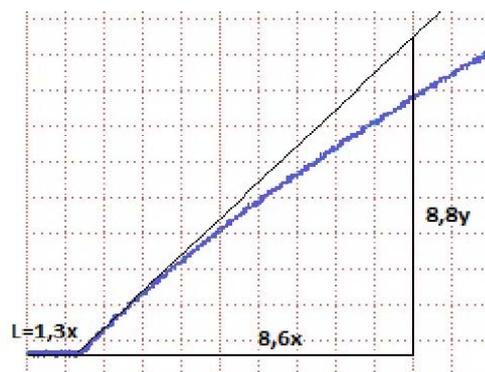
Figura 53: Ponto de interesse: -10mmHg



Fonte: Autor

Abaixo na Figura 54 é apresentado em detalhe os parâmetros obtidos na curva de reação

Figura 54: Detalhe do gráfico



Fonte: Autor

Os seguintes dados podem ser obtidos do gráfico:

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

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

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

Logo tem-se:

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

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

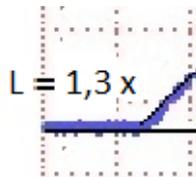
$$CA = 8,6x = 8,6 \text{ div} \times \frac{0,1783 \text{ min}}{\text{div}} = 1,53 \text{ min}$$

Para o cálculo do gradiente temos:

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

Do detalhe ampliado ilustrado na Figura 55 podemos obter o atraso de transporte (L).

Figura 55: 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 6: 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 56: Resposta ao degrau sintonizada



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

Quadro 7: 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 57: Resposta ao degrau sintonizada

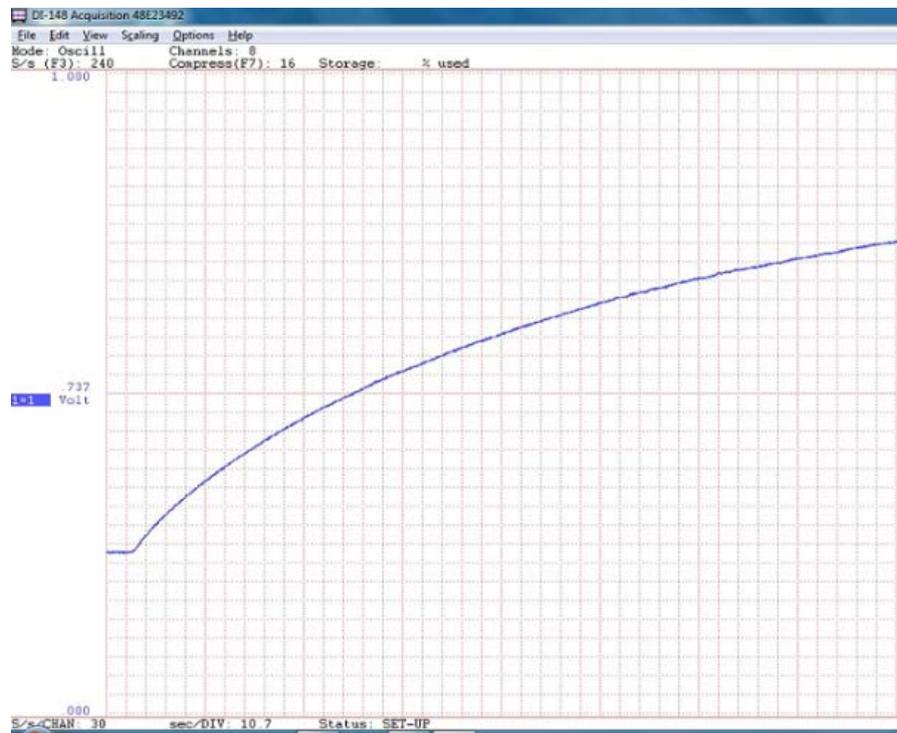


Fonte: Autor

O gráfico da Figura 58 mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta com ponte de interesse de -15mmHg .

$$U_0 = 10\% \cdot U_{\Delta} = 10\% SP_0 = -6\text{mmHg} \text{ e } SP = -18\text{mmHg}$$

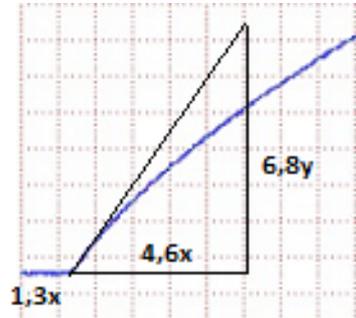
Figura 58: Ponto de interesse: -15mmHg



Fonte: Autor

Abaixo na Figura 59 é apresentado em detalhe os parâmetros obtidos na curva de reação.

Figura 59: Detalhe do gráfico



Fonte: Autor

Os seguintes dados podem ser obtidos do gráfico:

$$y = \frac{1000mV}{34 \text{ divisões}} = 29,41 \frac{mV}{div.}$$

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

$$CO = 6,8y = 6,8 \text{ div} \times \frac{29,41mV}{div} = 200mV$$

Logo tem-se:

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

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

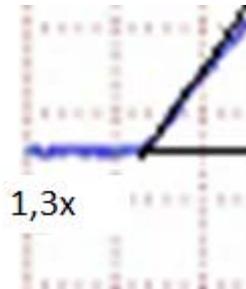
$$CA = 4,6x = 4,6div \times \frac{0,1783min}{div} = 0,82min$$

Para o cálculo do gradiente temos:

$$\text{Gradiente} = R = \tan \theta = \frac{CO_{\%}}{CA} = \frac{10\%}{0,82min} = 0,12 \frac{\%}{min}$$

Do detalhe ampliado ilustrado na Figura 60 podemos obter o atraso de transporte (L).

Figura 60: 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 8tem-se:

Quadro 8: Valores calculados

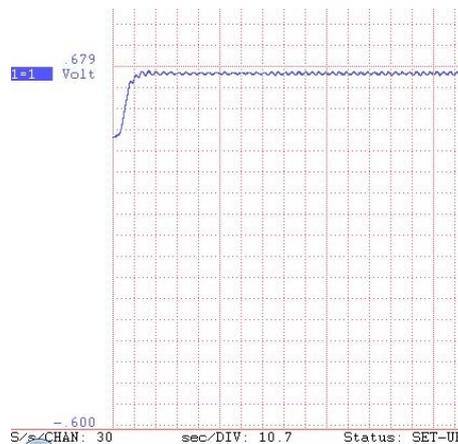
Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	423	0,46	7

Inserindo os parâmetros no controlador e sintonizando obteve-se os seguintes valores:

Quadro 9: Valores obtidos por sintonia

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

Figura 61: Resposta sintonizada

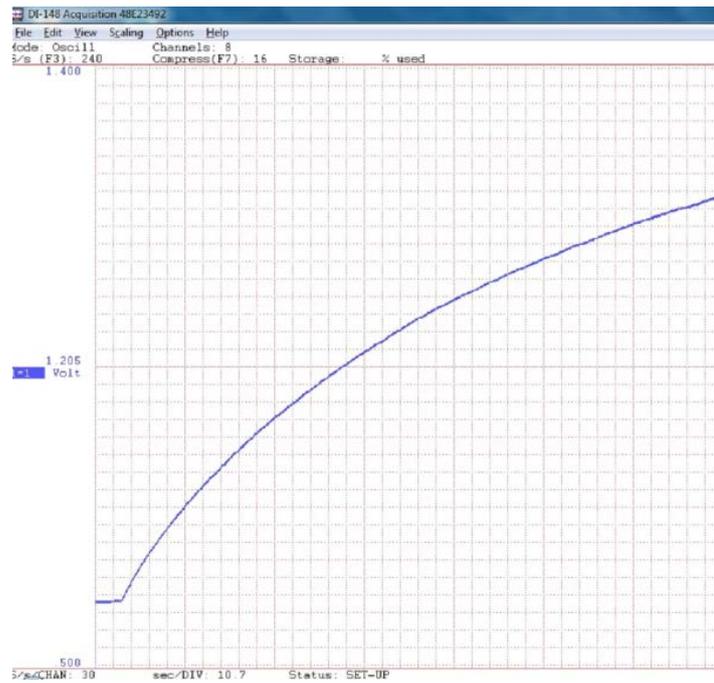


Fonte: Autor

O gráfico da Figura 62 mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta com ponte de interesse de -30mmHg .

$$U_0 = 16\%. U_{\Delta} = 10\% SP_0 = -14 \text{ mmHg e } SP = -27 \text{ mmHg}$$

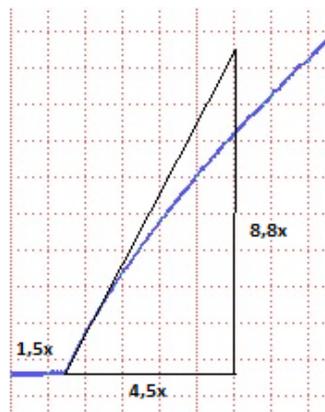
Figura 62: Ponto de interesse: -30mmHg



Fonte: Autor

Abaixo na figura 63 são apresentados em detalhe os parâmetros obtidos na curva de reação.

Figura 63: Detalhe do gráfico



Fonte: Autor

Os seguintes dados podem ser obtidos do gráfico:

$$y = \frac{900mV}{34 \text{ divisões}} = 26,47 \frac{mV}{div.}$$

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

Nota-se que $CO_{\%}$ é o valor do degrau aplicado. Neste caso, também 10%

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

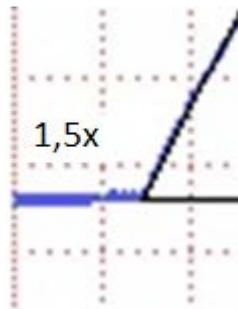
$$CA = 4,5x = 4,5div \times \frac{0,1783min}{div} = 0,80min$$

Para o cálculo do gradiente temos:

$$\text{Gradiente} = R = \tan \theta = \frac{CO_{\%}}{CA} = \frac{10\%}{0,80min} = 0,125 \frac{\%}{min}$$

Do detalhe ampliado ilustrado na Figura 64 podemos obter o atraso de transporte (L).

Figura 64: Detalhe do atraso de transporte



Fonte: Autor

O valor aproximado de L em minutos é:

$$L = 1,5 \times 0,1783 = 0,267min$$

Inserindo os valores no Quadro 10 tem-se:

Quadro 10: Valores calculados

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	423	0,53	8

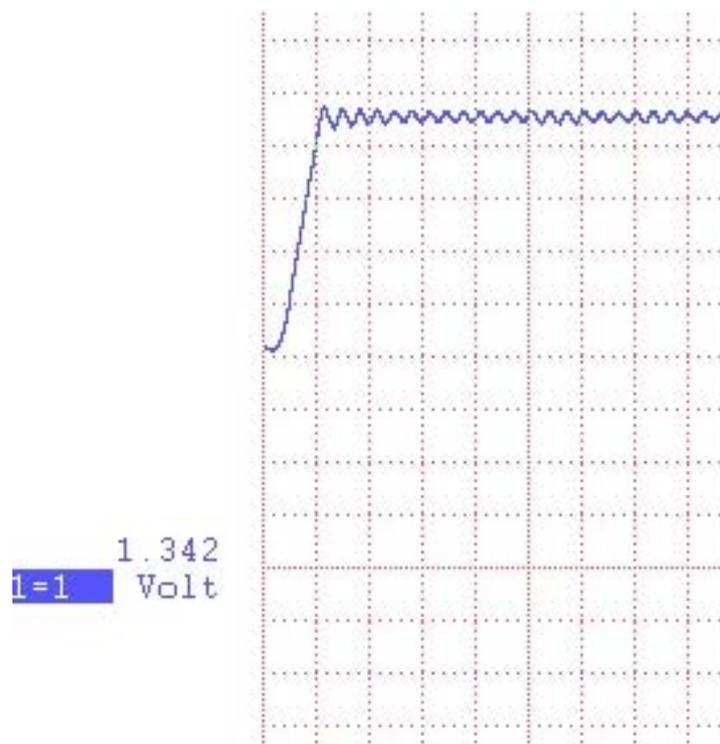
Inserindo os parâmetros no controlador e sintonizando manualmente obtemos os seguintes valores:

Quadro 11: Valores obtidos por sintonia

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	0,9	24	0

A figura 65 apresenta a resposta ao degrau de -15 à -30 mmHg após sintonia.

Figura 65: Após sintonia

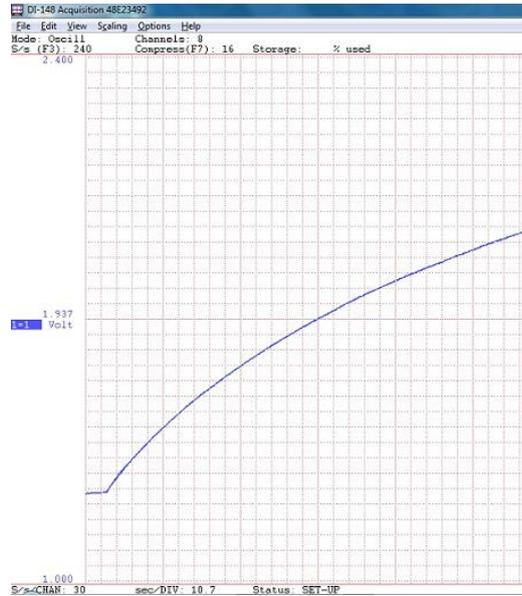


Fonte: Autor

O gráfico da figura 66 mostra a resposta ao degrau do sistema em malha-aberta com ponte de interesse de - 45mmHg.

$$U_0 = 26\% \cdot U_{\Delta} 10\% SP_0 = -28 \text{ mmHg e } SP = -50 \text{ mmHg}$$

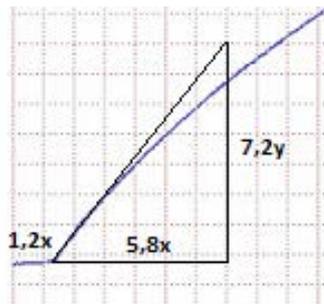
Figura 66: Ponto de interesse: - 45mmHg



Fonte: Autor

Abaixo na Figura 67 é apresentado em detalhe os parâmetros obtidos na curva de reação.

Figura 67: Detalhe do gráfico



Fonte: Autor

Os seguintes dados podem ser obtidos do gráfico:

$$y = \frac{1400mV}{34 \text{ divisões}} = 41,17 \frac{mV}{div.}$$

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

Nota-se que $CO_{\%}$ é o valor do degrau aplicado. Neste caso, também 10%
O cateto adjacente (CA) pode ser encontrado na fórmula:

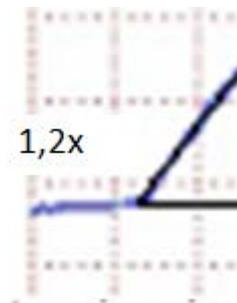
$$CA = 4,5x = 4,5div \times \frac{0,1783min}{div} = 0,80min$$

Para o cálculo do gradiente temos:

$$\text{Gradiente} = R = \tan \theta = \frac{CO_{\%}}{CA} = \frac{10\%}{0,80min} = 0,125 \frac{\%}{min}$$

Do detalhe ampliado ilustrado na Figura 68 podemos obter o atraso de transporte (L).

Figura 68: Detalhe do atraso de transporte



Fonte: Autor

O valor aproximado de L em minutos é:

$$L = 1,2 \times 0,1783 = 0,214min$$

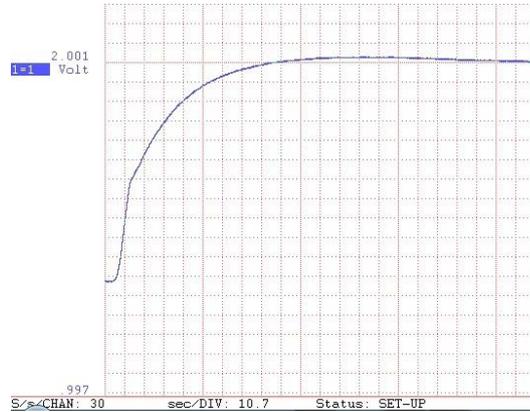
Inserindo os valores no Quadro 12tem-se:

Quadro 12: Valores calculados

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	448	0,43	6

A resposta ao degrau do PID com os parâmetros calculados acima está demonstrada na Figura 69.

Figura 69: Ponto de interesse: -45 mmHg sem sintonia



Fonte: Autor

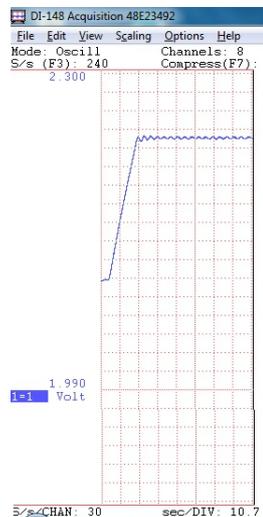
Inserindo os parâmetros no controlador e sintonizando manualmente obtemos os seguintes valores:

Quadro 13: Valores obtidos por sintonia

Controle	Kp	Ti (min)	Td (s)
PID	1,1	24	0

A figura 70 apresenta a resposta ao degrau de - 30 à - 45 mmHg após sintonia.

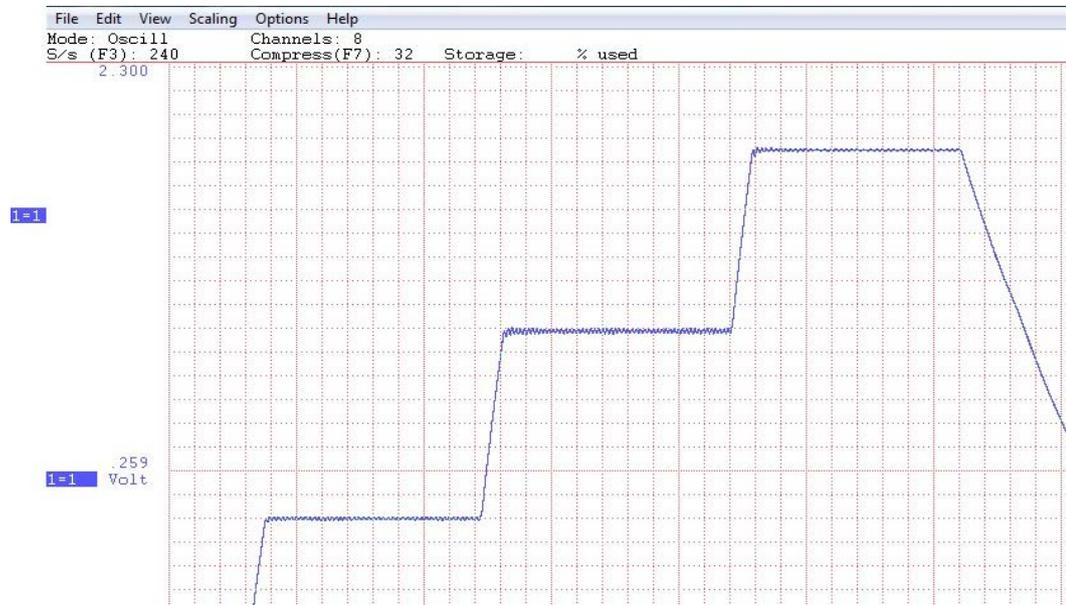
Figura 70: Ponto de interesse: -45 mmHg com sintonia



Fonte: Autor

Na figura 71 é apresentada a simulação da utilização do perfil padrão fornecido pela DLR para a utilização da LBNP box.

Figura 71: Curva obtida com o controle PI utilizado.



Fonte: Autor

5.1.8 Permitir uma interface homem-máquina amigável

O objetivo foi atingido, mas o projeto passa por fase de melhoria. O computador sugerido como plataforma de interface para este projeto não atingiu a expectativa. Em um período de dois anos dois computadores tiveram problemas e precisaram ser trocados. Atualmente, está sendo usado um computador normal até que o primeiro (que foi para reparo) retorne. Os computadores estragaram em momentos em que não estavam sendo utilizados e sem que cabos do experimento estivessem conectados. Isso demonstra que nem sempre equipamentos industriais IP65 com certificações podem garantir a confiabilidade de funcionamento do produto.

Como solução para o problema acima, foi realizada a compra de uma nova interface HMI para substituir este monitor. A nova interface é a tela sensível ao toque C400® da Rockwell™. Infelizmente, o produto não havia chegado até a data de entrega deste trabalho.

5.1.9 Substituir tubulação externa por material específico para sistemas pneumáticos;

O objetivo foi plenamente alcançado. A válvula hidráulica foi substituída por uma moderna válvula proporcional eletronicamente controlada e pelo módulo de controle eletrônico inteligente. As novas conexões e tubulação são específicas para sistemas pneumáticos mantendo confiabilidade e robustez ao equipamento.

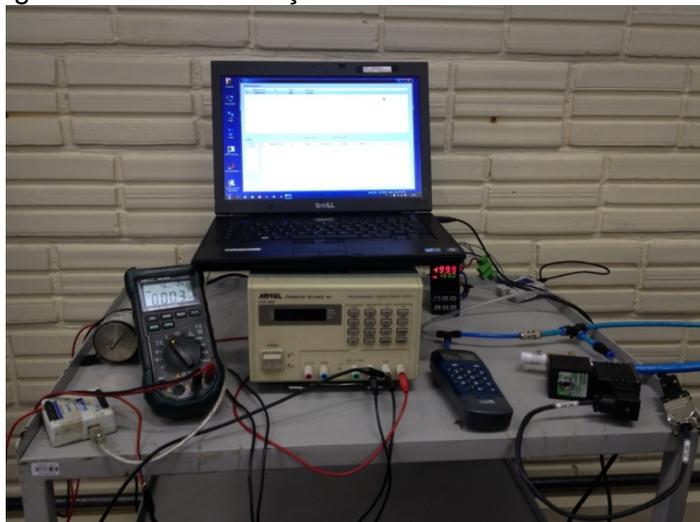
A conexão primária do aspirador de pó foi mantida permitindo, assim, a portabilidade do equipamento para feiras e eventos. Ou seja, o equipamento ainda pode ser utilizado com o sistema de aspirador de pó quando não estiver alocado no laboratório.

5.1.10 Substituir antigas chapas de vedação feitas de nylon por novas de polietileno eliminando os orifícios em desuso

A redução de buracos é importante para manter o sistema livre de vazamentos. Comprova-se uma chapa de um metro quadrado de plástico de engenharia (Polietileno). A sobra de material será usada para fazer um painel fechado aonde irão os sensores, atuadores, gerador de vácuo e demais componentes do sistema que não precisam, e não devem ficar expostos. Decidiu-se aguardar o novo controlador CLP da Rockwell™ para realizar o projeto do painel.

Na imagem da Figura 72, é possível observar todos os componentes de instrumentação, assim como o módulo de aquisição de dados utilizado para coletar as respostas ao degrau do sistema e demais informações de controle durante a sintonia de PID.

Figura 72: Instrumentação de Controle finalizado



Fonte: Autor

5.2 Discussão

Acreditava-se que a estrutura dinâmica era não linear durante as variações de pressão tornando a modelagem inviável por apresentar esse comportamento (RUSSOMANO et al, 2006). Por este motivo, a estratégia de controle foi baseada em aproximações empíricas (OGATA, 1997).

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 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 N2000® da Novus™.

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.

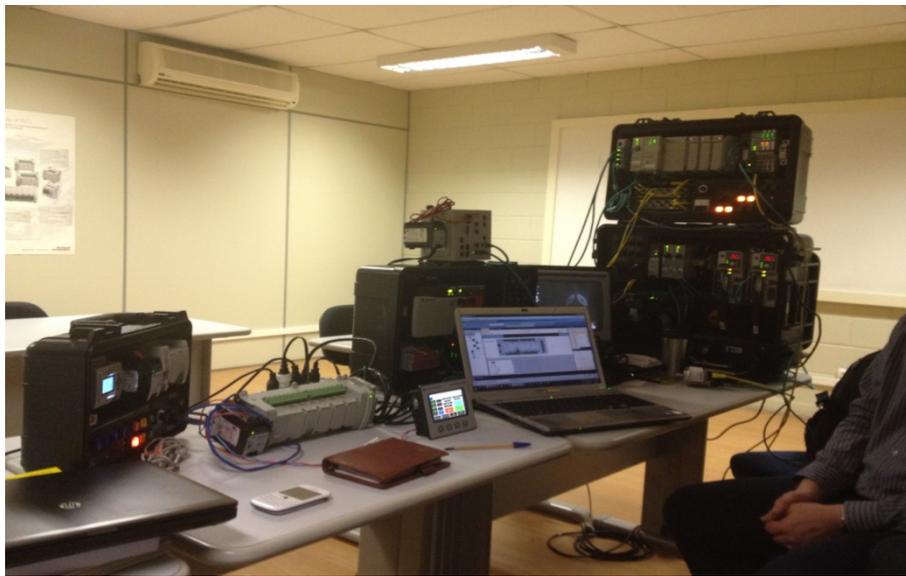
Além disso, ainda se faz necessário um computador com tela sensível ao toque e sistema operacional o que aumenta o custo do equipamento.

Com referência ao controle PID, o controlador N2000® 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. Abaixo segue foto durante visita ao fornecedor para escolher o equipamento para a nova versão da LBNP Box.

Figura 73: Imagem dos testes realizados em diversos CLPs da Rockwell® para a escolha do novo CLP com interface HMI nas dependências do fornecedor



Fonte: Autor

Espera-se que, além de resolver problemas de interface, também contorne problemas de comunicação por RS485, pois o modelo escolhido utilizará uma porta ethernet para comunicação e configuração. É importante salientar que estas melhorias não alterarão o processo aqui desenvolvido (sistema pneumático e instrumentação), sensores, atuadores ou cálculos de sintonia. Todo o presente trabalho será agregado ao novo equipamento. Ainda, a programação em linguagem Ladder propiciará mudanças feitas por graduandos que já tiverem realizado a disciplina respectiva. Isso não aconteceria com o atual controlador, que necessitaria de semanas de testes e entendimento para utilizar um equipamento com pouco material didático disponível além dos manuais técnicos.

Quadro 14: Comparação entre a fase de testes e fase final do projeto

Fase de teste	Fase final
	
Figura 74: Cabos desenvolvidos para teste	Figura 75: Cabo blindado adquirido
	
Figura 76: Teste do transdutor de pressão	Figura 77: Transdutor em funcionamento final

Fase de teste



Figura 78: Teste da válvula com fonte de tensão externa controlável

Fase final

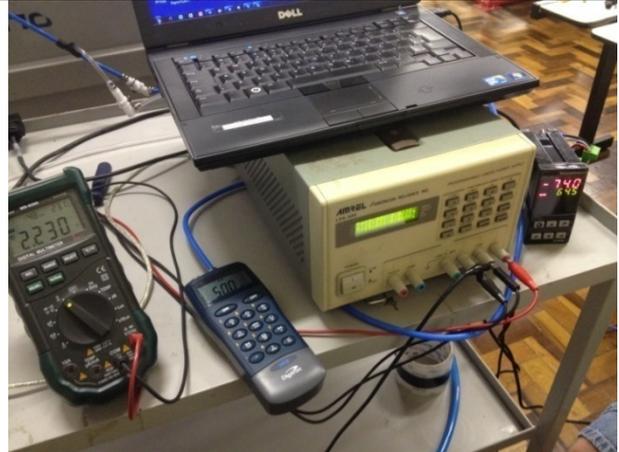


Figura 79: Calibração dos valores de pressão com um manômetro digital certificado

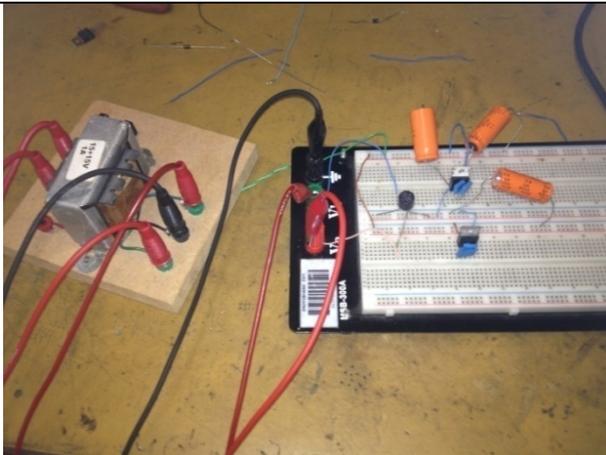


Figura 80: Teste em protoboard da fonte simétrica

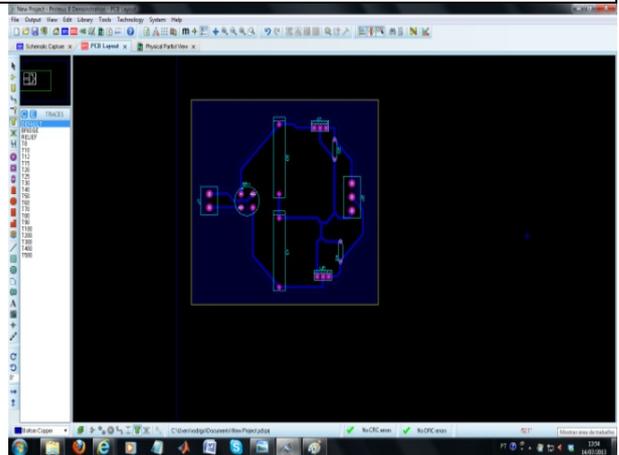


Figura 81: Design final da placa de circuito impresso

Fase de teste

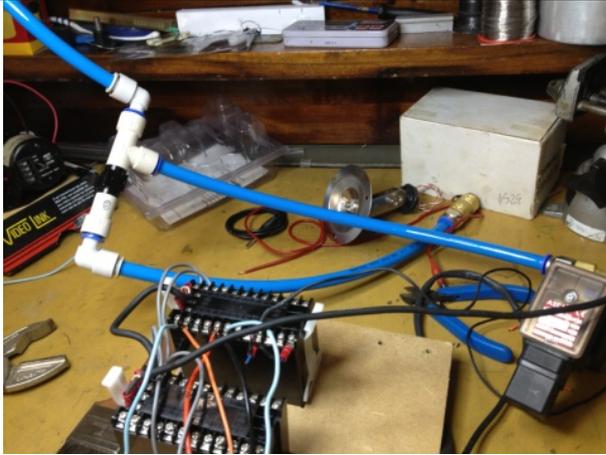


Figura 82: Conexões elétricas

Fase final

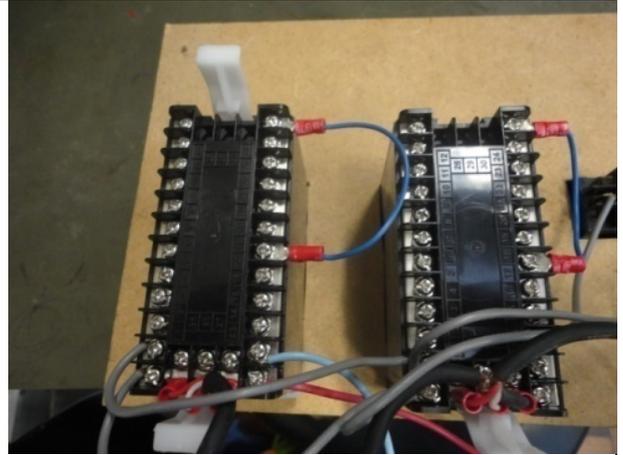


Figura 83: Conexões elétricas padronizadas



Figura 84: Utilização de fonte simétrica para transdutor

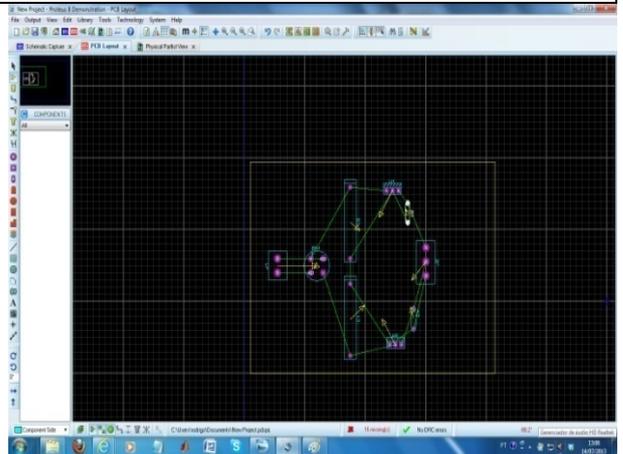
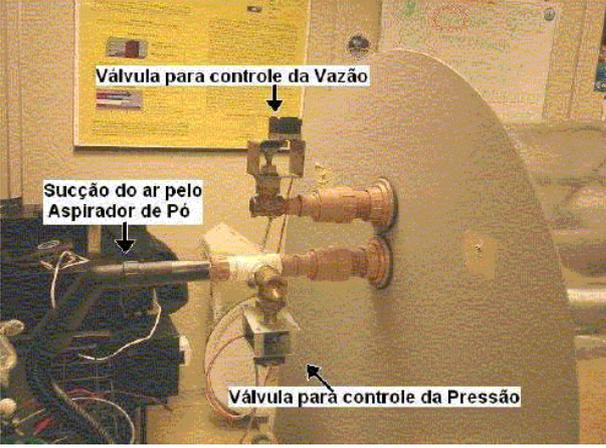
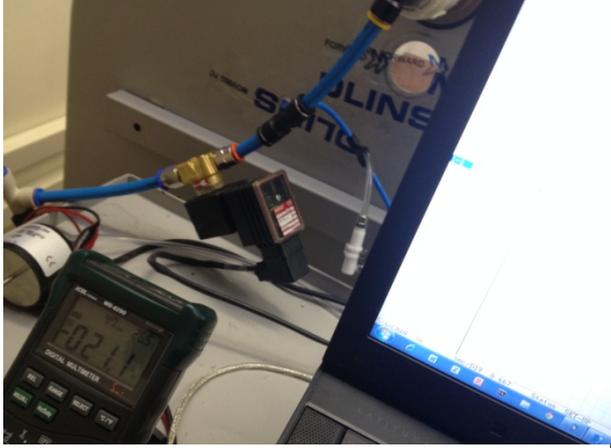


Figura 85: Design de fonte simétrica desenvolvido

Antes da atualização	Depois da atualização
	
<p>Figura 86: Canos hidráulicos para controle de ar</p>	<p>Figura 87: Dutos pneumáticos e engates apropriados</p>
	
<p>Figura 88: Válvula gaveta hidráulica acoplada à engrenagem caseira para regular fluxo</p>	<p>Figura 89: Válvula proporcional eletronicamente controlada</p>

Antes da atualização	Depois da atualização
	
<p>Figura 90: Botão de emergência</p>	<p>Figura 91: Botão de emergência</p>
	
<p>Figura 92: Controlador rodando em computador remoto</p>	<p>Figura 93: Controlador PID dedicado</p>

Antes da atualização	Depois da atualização
 <p>Válvula limitadora de Pressão</p>	
Figura 94: Válvula de segurança caseira	Figura 95: Válvula de segurança
	
Figura 96: Diversos furos no painel de Nylon causando vazamento	Figura 97: Redução de entradas e vedação com chapa de polietileno

Apêndice

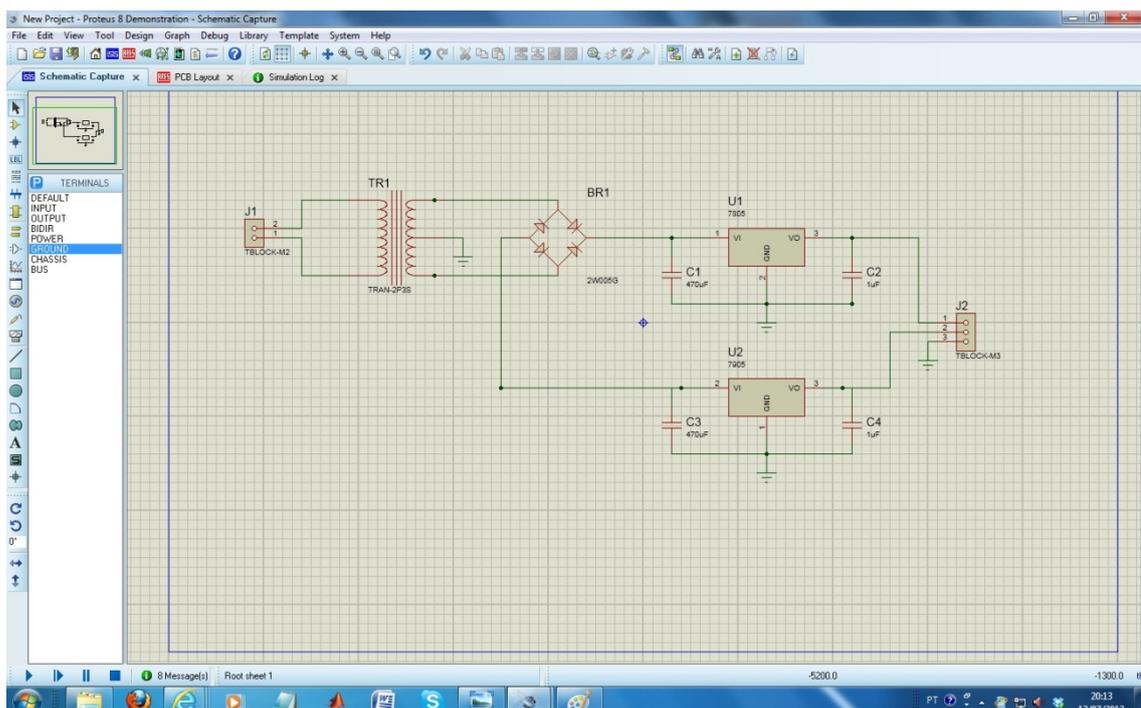
Circuito da Fonte Simétrica para o Transdutor

Fontes de alimentação simétricas são largamente utilizadas em circuitos com amplificadores operacionais e circuitos que necessitam valores positivos e negativos de tensão para funcionar. A fonte simétrica desenvolvida para a alimentação do transdutor de pressão fornece tensões positiva e negativa de 15 Vdc utilizando o regulador do tipo 7815, para tensão positiva e 7915 para a tensão negativa.

A figura 98 apresenta o circuito da fonte. O diodo 1N4001 tem por função retificar a tensão, por sua vez, os capacitores eletrolíticos de 1000 uF com tensão de operação de 25 volts, são utilizados para remover as harmônicas de frequência de 60Hz. Os reguladores de tensão são responsáveis por fixar a tensão de saída na tensão necessária. Os capacitores de 10uF filtram ruídos produzidos pelo regulador de tensão e protegem os circuitos subsequentes de valores de tensão indesejados durante o transitório dos reguladores.

Na figura 98 foi feito o projeto no software Altium Design® para a produção da placa de circuito impresso do sistema.

Figura 98: Projeto da fonte simétrica no software Altium Design®



Fonte: Autor

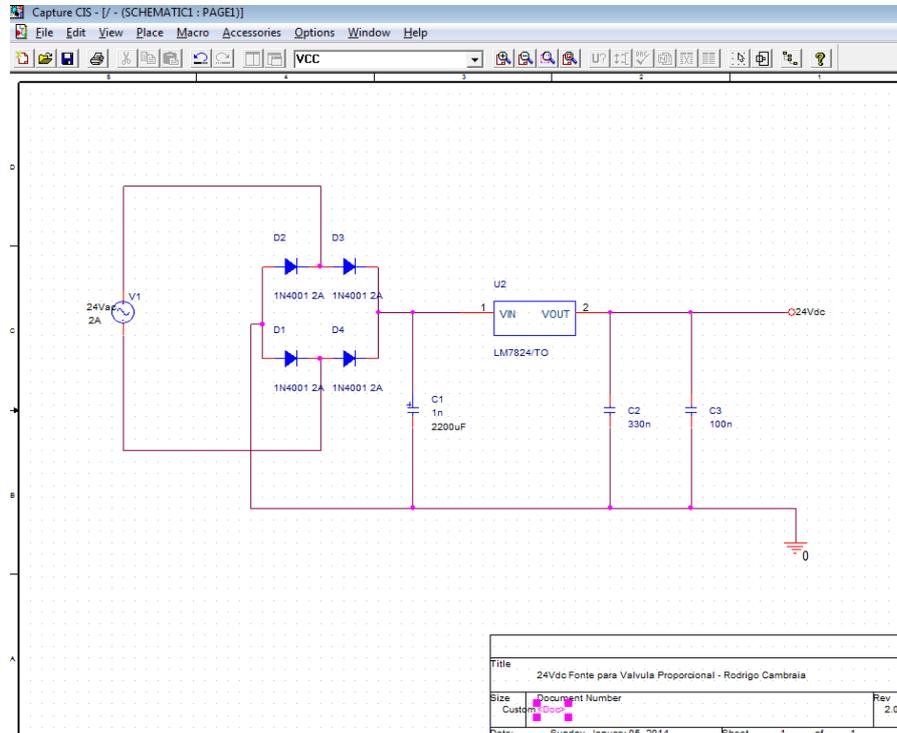
Listas de componentes da fonte simétrica:

- 2 capacitores de 1000uF por 25 v;
- 2 capacitores de 10uF por 16 v;
- 2 diodos 1N4001;
- 1 Regulador LM7815C;
- 1 Regulador LM7915C;
- Transformador 127/220 para 15+15 1A;
- 2 Dissipadores de calor para os reguladores de tensão.

Sugestão projeto de fonte 24VDC

Na figura 99 apresentado o esquemático desenvolvido em Orcad/Pspice Capture para a fonte e componentes eletrônicos.

Figura 99: Esquemático elétrico em Orcad® da fonte de 24Vdc



Fonte: Autor

REFERÊNCIAS

- AMORIM, FABIANO T.; SCHNEIDER, SUZANNE M.; LEE, STUART M.C; BODA, WANDA L.; WATENPAUGH, DONALD E.; HARGENS, ALAN R. **FACSMTwins Bed Rest Project: LBNP/Exercise Minimizes Changes in Lean Leg Mass, Strength and Endurance: 2187: Board #124 2:00 PM - 5:00 PM** *Medicine & Science in Sports & Exercise* Issue: Volume 38(5) Supplement, May 2006, p S389-S390
- ARBEILLE, P. ; KERBECCI, P.; MATTAR, L.; SHOEMAKER, J. K.; HUGHSON, R. Insufficient flow reduction during LBNP in both splanchnic and lower limb areas is associated with orthostatic intolerance after bedrest **American Journal of Physiology Heart And Circulation** n. 295, p. H1846–H1854, 2008.
- ASTROM, K; HAGGKUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2ed. New York: ISA. 1994. 343p.
- BODA, W. L.; WATENPAUGH, D. E.; BALLARD, R. E.; HARGENS, A. R. Supine lower body negative pressure exercise simulates metabolic and kinetic features of upright exercise. **Journal of Applied Physiology** n. 89, p. 649–654, 2000.
- BROWN, C. M. ; HECHT, M. J. ; NEUNDÖRFER, B. ; HILZ, M. J. Effects of Lower Body Negative Pressure on Cardiac and Vascular Responses to Carotid Baroreflex Stimulation **Physiological Research**.n. 52, p. 637-645, 2003.
- BUCKEY, J. C. **Space Physiology**. Ed. 1 Oxford University Press, USA: 2006.
- CHARLES, J. B. **Studies of Orthostatic Intolerance with the Use of LBNP**. Mir 18 Final Science Report. Houston TX: National Aeronautics and Space.
- CONVERTINO, V. A. ; MATHES, K. L.; LASLEY, M. L., TOMASELLI, C. M.; FREY, M. A. B. ; HOFFLER G. W. Hemodynamic and hormonal responses to lower body negative pressure in men with varying profiles of strength and aerobic power. **European Journal of Applied Physiology**, v.67, n. 6, p. 492-498. 1993.
- DÁZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Feedback Control System Analysis & Synthesis** 2^a ed. Tóquio: Ed. McGraw-Hill. 1960. 824p.
- DORF, R. C.; BISHOP, R.H. **Modern Control Systems**. Califórnia : Addison-Wesley, 8^a ed. 1998, 855p.
- ESCH, B. T. A.; SCOTT, J. M.; WARBURTON D. E. R. Construction of a lower body negative pressure chamber. **Advances in Physiology Education** n.31, p. 76–81, 2007.
- GOSWAMI, N.; LOEPPKY, J. A.; HINGHOFER-SZALKAY, H. LBNP: Past Protocols and Technical Considerations for Experimental Design.

Environmental Medicine. v.79, p.459-471, 2008.

HACHIYA, T. **Vasoconstrictor responses assessed by near-infrared spectroscopy during graded low body negative pressure.** Dissertation (PhD). Burnaby: Simon Fraser University, 2006.

IAIZZO, P. A. Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices. Minneapolis. Ed. Springer. 2 ed. 2009, 700p.

JOHNSTON, R.L., Dietlein, L.F. Biomedical Results from Skylab, NASA SP-377. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1977.

LIGTENBERG, G.; BLANKESTIJN, P. J.; KOOMANS H. A. Hemodynamic Response During Lower Body Negative Pressure: Role of Volume Status. **Journal of the American Society of Nephrology** v. 9, n 1 p.105-113. 1998.

McARDLE, W. D.; KATCH, F. I.; KATCH, V. L. Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance. Philadelphia : Ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2010. 1038p.

MCPHEE, S. J.; PAPADAKIS, M. A.; RABOW, M. W. **CURRENT: Medicina** (Lange), 51.ed. Porto Alegre: Ed. Atmed. 2013. 1816p.

MICROG LAB. Projetos de Pesquisa. **Desenvolvimento de uma Caixa LBNP para Estudos em Fisiologia Espacial- Construção dos Trolleys.** Disponível em: http://www.pucrs.br/feng/microg/labs/engbio/projetos/lbnp/desenvolvimento_caixa_lbnp_construcao_trolleys.htm Acesso em: 02 jun. 2012.

MOHRMAN, D. E. ; HELLER, L. JANE Fisiologia Cardiovascular (Lange) 6ª Ed. Rio de Janeiro : Ed. McGraw-Hill, 2008. 258p.

MONGA, M.; MARCIAS, B.; GROPPPO, E.; KOSTELEK, M.; HARGENS, A. **Journal of Urology** 176(1):127-131, July 2006.

NASA, Headline News - **Gravity Hurts (So Good)**. Disponível em: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast02aug_1/ Acesso em: 02/06/2012.

NASA, **REDUCED GRAVITY: Effects on the Human Body.** A Digital Learning Network Guide Designed to Share the Vision of Space Exploration. Disponível em: <http://education.nasa.gov/dln> Acesso em: 02/06/2012.

NETO, J. E. Contribuição dos Grandes Vasos Arteriais na Adaptação Cardiovascular a Ortostase. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia** vol. 87, n. 2, p. 209-222. 2006.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 695 p

Novus. **Manual Técnico N2000** Disponível em: <http://www.novus.com.br> Acesso em : 06 jan. 2012

OGATA, K. W. 5 ed. 1997.

PAPOULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**. New York: McGraw – Hill. 1998.

PEREIRA L. F. A. Sistema de equações lineares - Apostila de aula – GACS. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PICCOLI, L. **Desenvolvimento de uma Caixa LBNP para Estudos em Fisiologia Espacial**. 2001. (Trabalho de Conclusão), Faculdade de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

POSSAMAI, E. **Desenvolvimento de um sistema de mensuração e aquisição de dados de uma centrífuga humana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012

PROTHEROE, C.L.; RAVENSBERGEN, H.R.; INSKIP, J.A.; CLAYDON V. E. Tilt testing with combined lower body negative pressure: a "gold standard" for measuring orthostatic tolerance. **Journal of Visualized Experiments** n. 21, p. 73, 2013.

RAFF, H.; LEVITZKY, M. **Fisiologia Médica**. Uma abordagem integrada. Porto Alegre: Ed. McGraw-Hill. 2011. 800p.

ROSA, M. M. da. **Desenvolvimento de um sistema de comunicação e monitoramento de centrífugas**. 2005. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RUSSOMANO, T.; ALLAN, J.; BECK, L.; PETRAT, G.; MAY, F.; THOMPSEN, 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.

RUSSOMANO, T.; BECK, L.; FALCÃO, F.; DOS SANTOS, C.R.V.; AZEVEDO, D.F.G. Desenvolvimento de uma Caixa LBNP para Estudos em Fisiologia Espacial. 57th International Astronautical Congress, 2006. Valencia, Espanha.

SANTANA, E. G. **Dinâmica de fluídos**, Efeito Venturi - www.fisica.ufs.br acesso em: 10 jun. 2012

STEWART, J. M. **Orthostatic Intolerance**. Medscape. 06 jan. 2011 Disponível em : <http://emedicine.medscape.com/article/902155-overview#a30> Acesso em: 06

out. 2013

TORTORA, G. J.; DERRICKSO, B. *Corpo Humano: Fundamentos de anatomia e fisiologia*. 8ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. 712p.

WATENPAUGH, D.E.; O'LEARY, D. D.; SCHNEIDER, S. M. et al. Lower body negative pressure exercise plus brief postexercise lower body negative pressure improve post-bed rest orthostatic tolerance. **Journal of Applied Physiology** n.103, p.1964–1972, 2007.

WOOLF, P. **Noise Modeling**.MIT. Massachusetts VídeoAula 6- 2006. Disponível em: https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Recorded_Lectures Acesso em : 10 out. 2013.

ZHANG, L. F. Vascular adaptation to microgravity: what have we learned?**Journal of Applied Physiology** n. 91 p. 2415–2430, 2001.

ZIEMER, R. E.**Elements of Engineering Probability and Statistics**, New Jersey: Prentice Hall, 1997.