

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM ESPIRÔMETRO DE BAIXO CUSTO

Carlos Eduardo Rossi

SÃO PAULO

2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM ESPIRÔMETRO DE BAIXO CUSTO

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Carlos Eduardo Rossi

Orientador: Prof. Antônio Luis de Campos Mariani



Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

SÃO PAULO

2006

TE06
R 735d

1595364

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011835

FICHA CATALOGRÁFICA

Rossi, Carlos Eduardo

Desenvolvimento de um espirômetro de baixo custo / C.E.

Rossi. – São Paulo, 2006.

p. 59

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Equipamentos e provisões hospitalares 2.Pulmão (Patolo-
gia; Diagnóstico) I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um Espirômetro, que é um equipamento utilizado para avaliação da capacidade dos pulmões de indivíduos que possuem algum tipo de patologia pulmonar. Há duas restrições que devem ser superadas neste projeto, o custo e a eficiência do equipamento desenvolvido. O tema foi proposto pelo Programa Poli Cidadã juntamente com o Hospital do Câncer de Barretos que devido a ausência de verba necessita de um espirômetro de baixo custo para o Departamento de Fisioterapia. Serão mostradas as equações necessárias para a determinação da densidade do ar úmido e do número de Reynolds. Serão apresentados os conceitos e termos básicos da espirometria bem como alguns tipos de espirômetros encontrados no mercado. Após análise de diversos tipos de medidores de vazão, será escolhido o modelo utilizado até o fim deste projeto. Este trabalho também tem como alvo a fabricação de um protótipo de um espirômetro, de acordo com o modelo de medidor de vazão escolhido. Serão elaborados diversos testes e ensaios para avaliação da exatidão do equipamento que estará sendo testado e será feita uma análise dos gastos envolvidos na fabricação do protótipo para verificação da redução de custos proposta neste projeto.

ABSTRACT

This Project has as objective the development of a Spirometer, that is an equipment used for evaluation of the capacity of the lungs of people that have some type of pulmonary pathology. There are two restrictions that must be dealt in this project, the cost and the efficiency of the developed equipment. The subject was considered by the Program Poli Cidadã with the Hospital of Cancer in Barretos, institution that doesn't have enough money to buy one Spirometer for the Department of Physiotherapy. In this first stage the parameters needed to develop the project will be shown with the plenty of types of existing equipment in the market and its prices. This work will show many equations that will help to find the air density and the Reynolds number. Many concepts and terms related to Spirometry and kinds of spirometers will be shown. Many types of flow meters will be analysed and the flow meter that will be used in the rest of the project will be chosen. This project also involves the manufacture of one prototype of a spirometer, in accordance with the model of flow meter chosen. A plenty of tests and assays for evaluation of the exactness of the equipment that will be tested will be elaborated and an analysis of the expenses involved in the manufacture of the prototype will be made in order to verify the cost reduction that is one of the targets of this project.

Lista de Figuras

Fig. 1: Foto de uma das alas do hospital	1
Fig. 2: Obras de ampliação	2
Fig. 3: Sala de espera	2
Fig. 4: Pavilhão João Paulo & Daniel	3
Fig. 5: Gráfico de volume pelo tempo indicando CPT, VRI, VRE e VR	10
Fig. 6: Gráfico de volume pelo tempo indicando CPT, CI, CRF e CV	11
Fig. 7: Gráfico do fluxo pelo volume	12
Fig. 8: Esquema de sensor tipo turbina	22
Fig. 9: Peças de sensor tipo turbina	22
Fig. 10: Exemplo de espirômetro tipo turbina – Microquark	23
Fig. 11: Um dos tipos de termistor	24
Fig. 12: Exemplo de sistema de medição de vazão tipo termistor - TSI – modelo 4140	24
Fig. 13: Esquema do funcionamento de um sensor pneumotacógrafo	25
Fig. 14: Exemplo de espirômetro pneumotacógrafo – Vitalograph modelo 2120	26
Fig. 15: Esquema do funcionamento de um sensor ultra-sônico	27
Fig. 16: Exemplo de espirômetro com sensor ultra-sônico – EasyOne	27
Fig. 17: Esquema de espirômetro de deslocamento de volume tipo pistão	28
Fig. 18: Gasômetro para aferição de medidores de vazão de gases	29
Fig. 19: Esquema de espirômetro de deslocamento de volume selado em água – campânula	30
Fig. 20: Esquema de espirômetro de deslocamento de volume tipo fole	31
Fig. 21: Espirômetro Microlab – R\$ 16.968,00	31
Fig. 22: Espirômetro Microquark - R\$ 9.801,00	32
Fig. 23: Espirômetro One Flow - Cement-Clark - R\$6.652,80	32
Fig. 24: Espirômetro Pony FX - Cosmed - R\$20.302,59	32
Fig. 25: Spirom2 - Phisys - R\$6.648,50	32
Fig. 26: Campânula utilizada no protótipo	37
Fig. 27: Esquema da base	38
Fig. 28: Base principal utilizada no protótipo	39
Fig. 29: Base de sustentação utilizada no protótipo	39

Fig. 30: Cotovelo	40
Fig. 31: Tubos e mangueira	41
Fig. 32: Bocal de PVC	41
Fig. 33: Contrapeso e hastes verticais	42
Fig. 34: Esquema do quimógrafo	43
Fig. 35: Termômetro	44
Fig. 36: Esquema do riscador	44
Fig. 37: Esquema do espirômetro	45
Fig. 38: Protótipo montado	45
Fig. 39: Filtro anti-bacteriano e anti-viral	46
Fig. 40: Aparato para realização do teste	47
Fig. 41: Seringa de calibração acoplada ao protótipo	48
Fig. 42: Experimento antes da injeção do ar	48
Fig. 43: Experimento após à injeção do ar	49
Fig. 44: Imagem do software de edição de vídeo no início do teste ($t=0$ s)	50
Fig. 45: Imagem do software de edição de vídeo após 1 s do início do teste ($t=1$ s).....	50
Fig. 46: Espirômetro tipo pneumotacógrafo utilizado no teste no consultório	51
Fig. 47: Detalhe do bocal de papelão utilizado no teste no consultório	52
Fig. 48: Gráfico obtido na tomada de dados 2 no teste 2	54

Lista de Tabelas

Tabela 1: Recomendações para equipamentos de espirometria	13
Tabela 2: Matriz de decisão	35
Tabela 3: Dados obtidos e calculados no Teste 1	52
Tabela 4: Temperaturas e fatores de correção BTPS.....	53
Tabela 5: Deslocamentos e volumes utilizados no cálculo e avaliação da CVF.....	53
Tabela 6: Deslocamentos e volumes utilizados no cálculo e avaliação da VEF1.....	54
Tabela 7: Dados obtidos na tomada de dados 2.....	55

Lista de Anexos

1. Valores preditos de espirometria no Brasil
2. Tabelas de descrições sobre medidores de vazão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. O Projeto Poli Cidadã.....	1
1.2. O Hospital do Câncer de Barretos	1
1.3. Necessidade do espirômetro	3
2. OBJETIVO DESTE PROJETO	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. Equações psicrométricas	6
3.2. Determinação do volume específico e da densidade do ar	7
3.3. Cálculo do Número de Reynolds	7
4. ESPIROMETRIA	9
4.1. Definição	9
4.2. Parâmetros utilizados na espirometria	9
4.3. Requisitos recomendados para espirômetros	12
4.4. Fatores que afetam a função pulmonar	13
4.5. Realização do exame	17
4.6. Correções de volume para espirômetros	19
5. TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO	21
5.1. Sensores de fluxo	21
5.1.1. Tipo turbina	21
5.1.2. Tipo termistor	23
5.1.3. Tipo pneumotacógrafo	25
5.1.1. Tipo ultra-sônico	26
5.2. Medidores de deslocamento de volume	28
5.2.1. Tipo pistão	28
5.2.2. Tipo selado em água – campânula	29
5.2.3. Tipo fole	30
5.3. Preço de espirômetros.....	31

6. ESCOLHA DA SOLUÇÃO	33
6.1. Parâmetros a serem considerados	33
6.2. Matriz de decisão	35
7. ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO SELECIONADA E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPO	36
7.1. Simplificações do modelo	36
7.2. Especificações técnicas dos componentes do espirômetro	37
7.3. Funcionamento do equipamento	44
7.4. Higiene	46
8. TESTES E ENSAIOS DO PROTÓTIPO	47
8.1. Equipamentos e programas utilizados nos ensaios	47
8.2. Procedimento experimental	48
8.2.1. Teste 1 – Teste comparativo com seringa de calibração	48
8.2.2. Teste 2 – Teste comparativo com espirômetro tipo pneumotacógrafo.....	49
8.3. Dados medidos e resultados calculados	52
8.3.1. Dados medidos e calculados no teste 1	52
8.3.2. Dados medidos e calculados no teste 2	53
8.4. Discussão dos resultados obtidos nos testes	56
9. CONCLUSÕES	57
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. Introdução

1.1. O Projeto Poli Cidadã

O Projeto Poli Cidadã foi lançado no segundo semestre do ano de 2003 e tem como objetivo a integração da universidade com a sociedade, buscando necessidades presentes no cotidiano da população e de diversas instituições que não têm acesso à tecnologia e recursos financeiros, incentivando a realização de projetos de conclusão da graduação que atendam a essas necessidades, aliando os conhecimentos teóricos adquiridos pelo aluno ao longo de sua formação com o senso de responsabilidade social.

1.2. O Hospital do Câncer de Barretos

Este projeto foi sugerido pelo Hospital do Câncer de Barretos, mantido pela Fundação Pio XII, que foi instituída em 1967, há 30 anos. Este hospital foi o primeiro a atender casos de câncer no interior do Estado de São Paulo e atende pacientes de todo o Brasil.



Fig. 1: Foto de uma das alas do hospital

O complexo hospitalar da Fundação Pio XII compreende um total de mais de 26.943,98 m² e continua em expansão para poder atender melhor a todos os seus pacientes.



Fig. 2: Obras de ampliação

O Hospital do Câncer de Barretos é o que mais atende proporcionalmente pacientes do SUS, cerca de 98% dos atendimentos são realizados pelo sistema único de saúde. Desde 1998, o hospital é considerado centro de referência no tratamento do câncer. Conta com uma equipe médica multidisciplinar altamente capacitada de dedicação exclusiva em período integral e realiza mais de 1.800 atendimentos por dia. Seus equipamentos e instalações são de última geração.



Fig. 3: Sala de espera

O objetivo da Fundação Pio XII é acolher e tratar com dignidade pacientes portadores de câncer que não podem pagar pelo seu tratamento. Por este motivo o hospital é uma instituição deficitária que necessita do apoio financeiro da comunidade, de artistas ou da iniciativa privada. O fluxo de caixa para este empreendimento é gerado, por uma comissão de construção, através de eventos por ela produzidos, tais como, rifas, doações espontâneas, leilões, etc.

O hospital homenageia aqueles que contribuem com a causa do câncer dando o nome de quem ajudou aos seus pavilhões.



Fig. 4: Pavilhão João Paulo & Daniel

1.3. Necessidade do Espirômetro

O teste de espirometria é um exame onde é realizada a medição do volume e do fluxo de ar nas vias aéreas ou brônquios, onde é avaliada a função pulmonar e as capacidades mecânicas do sistema respiratório, permitindo firmar-se o diagnóstico de diversas doenças pulmonares quantificando suas gravidades e estudando as evoluções e respostas aos tratamentos.

A espirometria é muito importante para a realização do diagnóstico precoce e o acompanhamento de pacientes com enfisema pulmonar e asma, por exemplo e tem como indicações a investigação de sintomas respiratórios, doença pulmonar

obstrutiva crônica (DPOC), ou bronquite causada pelo cigarro e incapacidade funcional, avaliação pós-operatória, avaliação e diagnóstico de doenças respiratórias relacionadas ao trabalho. Em pacientes a serem submetidos a cirurgias, em especial nos que possuem doença pulmonar ou mesmo pacientes sem enfermidades respiratórias, mas que se submeterão a cirurgias do tórax, a avaliação da função pulmonar pré-operatória pode ajudar a prever o risco de complicações pulmonares após a cirurgia. Esse tipo de exame é imprescindível para pacientes vítimas de câncer nos pulmões.

O Hospital do Câncer de Barretos não possui nenhum espirômetro em suas dependências e, devido à ausência de recursos para a compra de todos os aparelhos necessários para o tratamento dos diversos tipos de câncer, a liberação da verba para a aquisição deste equipamento é muito difícil, fazendo com que o tema “Desenvolvimento de um Espirômetro de Baixo Custo” fosse encaminhado ao Projeto Poli Cidadã.

Foi realizada uma visita ao Hospital do Câncer de Barretos, onde foram apresentadas todas as dependências do hospital, sua filosofia e o profissional que solicitou o desenvolvimento do espirômetro, Dr. Almir José Sarri do Departamento de Fisioterapia.

2. Objetivo deste projeto

Este projeto tem como objetivo principal o desenvolvimento de um espirômetro. Para tanto, há duas grandes restrições a serem atingidas para que o projeto seja bem sucedido.

A primeira restrição é relativa à eficiência do equipamento, que deve oferecer como resultado um exame preciso que possa identificar a existência de algum tipo de patologia nos pacientes e avaliar suas reais condições de saúde sem o oferecimento de riscos de contaminação.

A segunda restrição, mais importante e que fez com que este fosse um tema sugerido pelo Hospital do Câncer de Barretos, é o custo deste novo espirômetro, que deve ser significativamente menor do que os dos equipamentos atualmente comercializados pelo fato destes serem importados e muito caros.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Equações Psicrométricas

Neste item serão apresentadas as equações psicrométricas que auxiliarão no cálculo de algumas das propriedades do ar que se aplicam a este projeto.

Para o cálculo da pressão atmosférica em função da altitude local temos:

$$P = 101,3250 \times (1 - 2,2560^{-5} \times \text{Altitude})^{5,2560}$$

Onde P é a pressão atmosférica em kPa e a altitude é dada em metros.

A pressão de vapor d'água saturado é dada por:

$$P_{vs} = 22105649,25 \times e^X$$

A P_{vs} é dada em kPa e X é dado pela expressão:

$$X = \frac{-27405,526 + 97,5413 \times T - 0,146244 \times T^2 + 0,00012558 \times T^3 - 0,000000048502 \times T^4}{4,34903 \times T - 0,0039381 \times T^2}$$

T é a temperatura na qual se quer obter a P_{vs}.

Podemos encontrar a umidade específica w em função da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa:

$$w = \frac{0,622 * (UR/100) * P_{vs}(T_{BS})}{P - (UR/100) * P_{vs}(T_{BS})}$$

Onde P é a pressão atmosférica, P_{vs} a pressão de vapor d'água saturado e UR a umidade relativa do ar, w é dado em kg de vapor d'água/ kg de ar seco.

O cálculo do volume específico do ar em m³/kg é feito através de:

$$v = \frac{0,287055 * (T_{BS} + 273)}{P} * \left(1 + \frac{w}{0,622}\right)$$

Por fim, a densidade do Ar em kg/m³ é dada por:

$$\rho = \frac{1}{v}$$

3.2. Determinação do volume específico e da densidade do ar

Para a determinação do volume específico e da densidade do ar consideraremos que:

- A umidade adotada para o ar expirado será de 90%.
- As temperaturas utilizadas serão 37°C, temperatura na qual o ar é expelido dos pulmões, e 30°C, temperatura em que o ar chegará ao equipamento.
- A altitude considerada será no nível do mar.

Com a utilização das equações citadas no Item 3.1, encontramos:

$$P = 101,3250 \text{ kPa}$$

Para 30°C:

$$P_{vs} = 4,20 \text{ kPa}$$

$$w = 0,0241 \text{ kg de vapor d'água/ kg de ar seco}$$

$$v = 0,891 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho = 1,12 \text{ kg/m}^3$$

Para 37°C:

$$P_{vs} = 6,22 \text{ kPa}$$

$$w = 0,0363 \text{ kg de vapor d'água/ kg de ar seco}$$

$$v = 0,930 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rho = 1,08 \text{ kg/m}^3$$

3.3. Cálculo do Número de Reynolds

O diâmetro estimado da tubulação pela qual o ar irá escoar será de 0,025 m e a viscosidade absoluta μ do ar, segundo as tabelas disponíveis na literatura, para as temperaturas desejadas será de aproximadamente 0,0000187 Pa.S. Utilizaremos o ρ mais baixo, ou seja 1,08 kg/m³.

$$R_e = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$$

Podemos encontrar a velocidade média do escoamento através de:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Considerando a vazão mais baixa de 0,01 L/s ou $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ e a área do tubo onde será instalado o medidor de vazão igual a $0,001963495 \text{ m}^2$ temos que:

$$V = 0,005 \text{ m/s}$$

Portanto:

$$R_e = 7$$

Com o conhecimento do Número de Reynolds podemos selecionar através das tabelas encontradas no anexo 2 algumas das possíveis alternativas de solução para este projeto.

4. Espirometria

4.1. Definição

O teste de espirometria é um exame que avalia a função respiratória, capacidade pulmonar e propriedades mecânicas do sistema respiratório. Ele permite classificar as insuficiências respiratórias, seguir sua evolução e avaliar a eficácia dos diversos tipos de tratamento.

Esse método consiste em registrar o volume de ar movimentado para dentro e para fora dos pulmões expresso em litros ou frações de litros. Através de um bocal conectado à sua boca, o paciente inspira e expira de acordo com a orientação do examinador, fazendo com que sejam obtidos gráficos indicando o fluxo de ar movimentado em função do tempo.

A espirometria é muito importante para a realização do diagnóstico precoce e o acompanhamento de pacientes com patologias pulmonares. Em pacientes a serem submetidos a cirurgias a avaliação da função pulmonar pré-operatória pode ajudar a prever o risco de complicações pulmonares após a cirurgia. Esse tipo de exame é imprescindível para pacientes vítimas de câncer nos pulmões.

O exame nos permite avaliar diversos parâmetros, que serão relacionados no próximo item deste trabalho.

4.2. Parâmetros utilizados na espirometria

- CPT (Capacidade Pulmonar Total): a quantidade de gás contida no pulmão ao final de uma inspiração máxima.
- VC (Volume Corrente): volume de ar inspirado e expirado a cada ciclo respiratório (0,6L).
- VRI (Volume de Reserva Inspiratório): máximo de volume de ar inspirado a partir do nível de repouso respiratório (3,0L).
- VRE (Volume de Reserva Expiratório): máximo de volume de ar expirado a partir do nível de repouso respiratório (1,2L).

- VR (Volume Residual): volume de ar que permanece nos pulmões após uma expiração máxima (1,2 L).

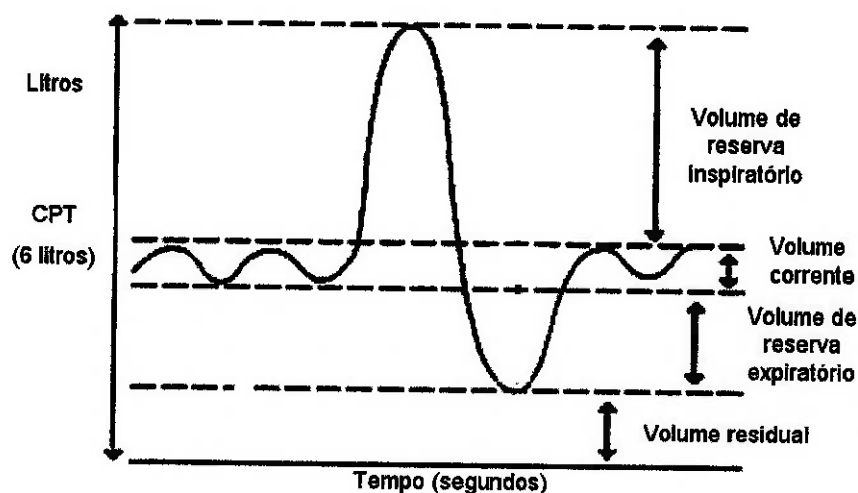


Fig. 5: Gráfico de Volume pelo Tempo Indicando CPT, VRI, VRE e VR

Outros parâmetros também podem ser calculados:

- CI (Capacidade Inspiratória): é a quantidade de ar que pode ser inspirada a partir do volume pulmonar expiratório normal e distendendo ao máximo os pulmões (3,6 L). $CI = VC + VRI$
- CRF (Capacidade Residual Funcional): quantidade de ar que permanece nos pulmões ao final da expiração normal (2,4L). $CRF = VRE + VR$
- CV (Capacidade Vital): é a quantidade de ar que pode ser expirada pelos pulmões, após uma inspiração máxima seguida de expiração máxima. maior volume de ar mobilizado, podendo ser medido tanto na inspiração quanto na expiração (4,5L; 75% da CPT).

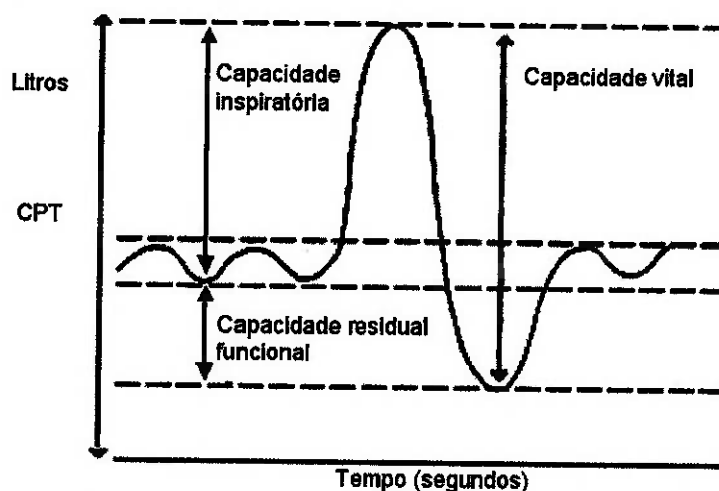


Fig. 6: Gráfico de volume pelo tempo indicando CPT, CI, CRF e CV

Os parâmetros mais importantes que serão o foco deste projeto são:

- CVF (Capacidade Vital Forçada): é a quantidade de ar que pode ser expirada pelos pulmões, após uma inspiração máxima seguida de expiração máxima forçada.
- VEF1 (Volume Expiratório Forçado no 1º Segundo): é o volume máximo que é possível exalar no primeiro segundo de uma respiração forçada.

Um outro instrumento importante para análise na espirometria é a curva fluxo-volume. Ela consiste na representação gráfica do fluxo pelo volume, durante uma manobra de CVF. Por convenção, o fluxo expiratório é disposto com uma curva para cima do eixo das ordenadas, sendo positivo, e o fluxo inspiratório, negativo, fica abaixo do eixo das ordenadas.

Na curva fluxo-volume, o paciente inspira até a capacidade pulmonar total (CPT), depois ele expira fortemente. Nota-se um pico do fluxo expiratório, seguido de uma rampa decrescente até o final da expiração, quando o fluxo se iguala a zero. Em seguida o paciente inspira profundamente até a CPT, passando pelo pico do fluxo inspiratório, na manobra inversa.

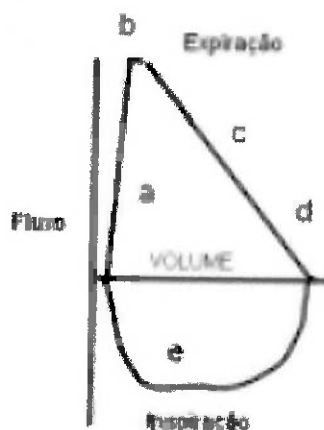


Fig. 7: Gráfico do fluxo pelo volume

Os dados obtidos com a Espirometria são comparados com valores de referência, que levam em conta a idade do paciente, o peso, a altura e sexo. No anexo 1 encontram-se alguns dos valores de referência utilizados no Brasil.

4.3. Requisitos ecomendados para espirômetros

Diversas sociedades internacionais e a ABNT estabeleceram padrões para os espirômetros em relação à sua capacidade, acurácia, erro, linearidade e registros gráficos.

Quando a CVF (Capacidade Vital Forçada) e o VEF1 (Volume Expiratório Forçado no 1º Segundo) são medidos, o equipamento deve ser capaz de medir volumes de ar de pelo menos 7 litros, medir fluxos entre 0 e 12 L/s e ter menos de 3% ou 50 mL de erro de medida em relação a um valor de referência. Quando a CV (Capacidade Vital) for medida, o espirômetro deve ser capaz de acumular volume por até 30s, na medida da CVF, a capacidade deve ser de no mínimo 15 s. Um espirômetro que mede fluxo deve ser 95% acurado (ou dentro de 0,2 L/s, o que for maior), na faixa inteira de 0 a 12 L/s.

Recomendações para equipamentos de espirometria

Teste	Amplitude/Acurácia (BTPS-L)	Faixa de fluxo (L/s)	Tempo (s)	Resistência e pressão retrógrada
CV	7L $\pm$ 3% da leitura ou 50ml*	0-12	30	
CVF	7L $\pm$ 3% da leitura ou 50ml*	0-12	15	Menos de 1,5 cmH ₂ O/L/s de 0-12L/s
VEF ₁	7L $\pm$ da leitura ou 50ml*	T		
Tempo zero	O ponto inicial da medida do VEF ₁		Determinado por extrapolação retrógrada	
FEF _{25-75%}	7L $\pm$ ou 200ml/s*	0-12	15	Idem VEF ₁
FEF _{x%}	12L/s $\pm$ 5% ou 200ml/s*	0-12	15	Idem VEF ₁

* Escolher a variação maior, percentual ou numérica.

Obs.: A amplitude de volume ideal deve ser 8L e a faixa de fluxo 14L/s

Tabela 1: Recomendações para equipamentos de espirometria

4.4. Fatores que afetam a função pulmonar

- **Sexo**

Responde por 30% da variação da função pulmonar, sendo usual a separação das equações de referência por sexo. Os volumes pulmonares são maiores no sexo masculino, mas a relação VEF₁/CVF é discretamente menor, em média, provavelmente ela maior compressão dinâmica resultante da maior força muscular. Após corrigir para o tamanho, as meninas têm maiores fluxos que os meninos, enquanto os homens adultos têm maiores volumes e fluxos do que as mulheres.

- **Estatura**

A estatura é a variável com maior influência nos valores previstos para a função pulmonar e sua medida deve ser rigorosa. A estatura deve ser medida sem sapatos. A estatura cai com a idade e quase sempre os indivíduos, especialmente os

idosos, hiperestimam sua estatura. Valor para a estatura referida pelo indivíduo é inaceitável.

A estatura idealmente deve ser medida por um antropômetro, já que este permite a liberdade das mãos do observador para posicionar o indivíduo. Os calcanhares devem estar juntos e o indivíduo deve estar o mais ereto possível, com os calcanhares, panturrilhas, nádegas e dorso em contato com o antropômetro.

Procedimento incorreto pode resultar em mudanças de estatura aparente de até 5cm. A medida correta da estatura resulta em excelente reprodutibilidade.

- **Envergadura**

A envergadura é uma alternativa para que seja estimada a altura de pacientes que possuam alguma deformidade espinhal ou sempre que não for possível medir a estatura. A medida entre as pontas dos dedos dos braços estendidos horizontalmente pode ser usada como estimativa da estatura biológica. Para realização da medida, o indivíduo estende e abduz o braço esquerdo completamente. A semi-envergadura é o comprimento da ponta do dedo mais longo ao centro da fúrcula esternal. A distância é medida com uma fita e então duplicada para que se obtenha a envergadura. Em crianças, a envergadura estima com precisão a estatura. Na população brasileira adulta, a estatura pode ser calculada dividindo-se a envergadura por 1,03 nas mulheres e por 1,06 nos homens.

- **Idade**

Os valores máximos de CVF são alcançados em torno de 25 anos no sexo masculino e 20 anos no sexo feminino.

Estudos de valores de referência transversais levam à idéia de que a função pulmonar começa a declinar tão logo o crescimento cessa. Estudos longitudinais demonstram, entretanto, que após a fase de crescimento máximo, a CVF permanece inalterada até 35 a 40 anos, seguindo-se uma fase de declínio que se acelera após os 55 anos.

A falta de declínio na CVF poderia refletir um aumento na muscularidade e na força respiratória, num tempo em que a CV deveria sofrer redução por perda da elasticidade do parênquima. Este aumento da força muscular pode entretanto levar a queda dos fluxos medidos ao nível da boca, devido à maior compressão das vias dinâmicas aéreas. A seleção do ponto de mudança para inclusão da idade nas equações de referência é, portanto, relativamente arbitrária, já que a transição do crescimento para a queda ocorre em idades diferentes para diferentes medidas.

A CVF e o VEF_1 sofrem declínio mais acelerado a partir de 55 a 60 anos, mas idosos podem ter valores bem preservados, por efeito de seleção, já se demonstrou que maior função pulmonar confere vantagem de sobrevida.

Os fluxos expiratórios caem com a idade, principalmente os terminais. Os fluxos terminais caem mais que os iniciais porque as vias periféricas perdem calibre e se tornam mais flácidas, ao contrário do que ocorre com as vias aéreas centrais. A relação VEF_1/CVF declina com a idade.

- **Raça**

Foi sugerido que os volumes pulmonares são 10 a 15% menores na raça negra. Pessoas com mistura de raças usualmente têm valores intermediários.

No Brasil, um estudo com 139 indivíduos do sexo masculino e 56 do sexo feminino, de raça negra, derivou equações de referência e comparou os resultados obtidos para a raça branca, concluindo que não existiam diferenças. Os negros de outros países têm relação tronco/membros menor, o que não parece suceder no Brasil.

- **Peso**

O peso afeta a maioria das medidas funcionais, primeiro por aumento da função – um efeito de muscularidade – e então diminuindo a função à medida que o peso se torna excessivo – efeito de obesidade.

No Brasil, os valores espirométricos derivados para adultos não se relacionam com o peso. Em crianças, embora a contribuição tenha sido pequena, teve influência

significativa. O peso, provavelmente por refletir o aumento da massa muscular, tem considerável influência nos valores funcionais da adolescência.

- **Altitude**

Residentes de altas altitudes têm pulmões maiores. No Brasil este fator tem pequena influência.

- **Técnica**

Além de fatores biológicos e ambientais, variações de medida podem explicar valores diferentes obtidos em populações semelhantes. As fontes de variação técnica nos testes de função pulmonar podem situar-se no instrumento, procedimento, observador, indivíduo testado, nas interações entre estes e outros fatores como temperatura, altitude, posição e seleção e análise das curvas.

- **Estado de Saúde**

Este fator também pode influenciar bastante nos testes de função pulmonar, pois pacientes com alguns tipos de problema de saúde podem ter dificuldades para realização do exame.

- **Poluição Ocupacional e Ambiental**

O fator mais importante é o tabagismo, que afeta a função pulmonar nas crianças e adultos. Há aumento da reatividade brônquica. Inalação de outros poluentes e irritantes pode resultar em broncoconstrição em portadores de hiper-reatividade brônquica.

- **Estado Socioeconômico**

Indivíduos fumantes de menor nível socioeconômico têm função pulmonar menor. Isso provavelmente resulta de condições ambientais desfavoráveis, maior frequência de doenças respiratórias e acesso menos aos serviços de saúde e medicamentos.

4.5. Realização do Exame

Quando o paciente marcar exame, as seguintes instruções ou observações devem ser feitas:

- Infecção respiratória nas últimas 3 semanas como gripe, resfriado, bronquite e pneumonia, pode alterar a função pulmonar ou levar à hiper-responsividade brônquica. Em pacientes acompanhados longitudinalmente (por exemplo pacientes com DPOC), estes testes podem dar impressão de perda funcional acelerada.
- Broncodilatadores de ação curta devem ser suspenso por 4 horas e os de ação prolongada por 12 horas antes dos testes, se o objetivo for a verificação da presença de obstrução reversível. Se a finalidade do exame for encontrar a máxima função pulmonar, ou se a redução do broncodilatador resultar em dispnéia acentuadas, estes podem ser mantidos.
- Jejum não é necessário.
- Café e chá não devem ser ingeridos nas últimas 6 horas, por efeito broncodilatador, especialmente quando testes de broncoprovocação forem programados.
- Cigarro – aumenta a resistência ao fluxo aéreo e deve ser proibido por pelo menos duas horas antes do exame.
- Álcool não deve ser ingerido nas últimas 4 horas.
- Refeições volumosas devem ser evitadas uma hora antes dos testes

O Indivíduo deve repousar 5 a 10 minutos antes do teste. O procedimento deve ser descrito cuidadosamente, com ênfase na necessidade de evitar vazamentos

em torno da peça bucal e da necessidade de inspiração máxima seguida de expiração rápida e sustentada até que o observador ordene a interrupção. O técnico deve demonstrar o procedimento utilizando um tubete.

Em sistemas fechados, o espirômetro deve ser lavado com ar a cada 2 testes, para prevenir hipoxemia e hepercapnia. Dentaduras devem ser mantidas, a menos que estejam mal-ajustadas.

O ambiente deve ser calmo e privado. Roupas apertadas devem ser evitadas.

Se o paciente apresenta expectoração em maior quantidade, transitoriamente, o teste deve ser adiado. Alternativamente, fisioterapia pode ser feita no dia anterior.

Os fluxos expiratórios são menores ao acordar e máximos entre o meio dia e o final da tarde. Testes longitudinais devem ser feitos aproximadamente no mesmo horário do dia, especialmente para detecção de influências ambientais.

Durante o exame, o paciente deve estar na posição sentada. Em pessoas de meia idade e idosos, a CVF é maior em pé (1 a 2%) e menor (7 a 8%) na posição deitada, em relação à posição sentada, o que não ocorre normalmente em pessoas mais jovens. A cabeça deve ser mantida em posição neutra e mais ou menos fixa. A flexão e a extensão da cabeça reduzem e elevam, respectivamente, os fluxos expiratórios forçados iniciais por variação da rigidez traqueal.

A pausa pós-inspiratória não deve exceder 3 segundos. A inspiração máxima produz broncodilatação e mudanças na retração elástica. Em normais e indivíduos com asma e DPOC, os fluxos expiratórios são significativamente maiores sem uma pausa ao final da respiração precedente à manobra, em comparação com os testes feitos com uma pausa pós-inspiratória. Isso deve-se à perda progressiva da retração elástica dos pulmões e da parede torácica com a pausa. A diferença no PFE em normais é de 15% e em DPOC de 30%, quando pausas de 5 segundos ou mais são comparadas com ausência de pausa ou pausa com duração inferior a 2 segundos.

Em sistemas de registro gráfico, como é o caso deste projeto, a “pena” ou o papel devem já estar se movendo com velocidade constante antes do início da manobra de CVF. Se a expiração começa ao mesmo tempo em que o sistema é acionado, a velocidade pode ser menor no início da manobra e o fluxo expiratório inicial será incorreto.

Durante a expiração o técnico deve observar o indivíduo e o estimular positivamente para que o esforço seja mantido pelo tempo necessário. A imitação simultânea da manobra por parte do técnico, a visualização do gráfico por parte do indivíduo testado ou a utilização de telas de incentivo podem ser de auxílio em casos mais difíceis.

4.6. Correções de volume para espirômetros

O termo BTPS significa *Body Temperature and ambient Pressure, Saturated with water vapor at body temperature*.

As medidas do volume de gás expirado são feitas no equipamento de registro, onde as moléculas de gás estão em temperatura e pressão ambiente (ATP) se o espirômetro é de volume; o gás expirado é usualmente também saturado com vapor d'água e nestas circunstâncias sua condição é designada ATPS. As condições ambientais variam de maneira que os volumes devem ser convertidos para uma condição padrão, a qual, para maioria dos propósitos, é aquela obtida no pulmão. Nesta condição o gás está na temperatura e pressão corporal e saturado com vapor d'água (BTPS). Em outras circunstâncias, o volume de gás é expresso para condições padrão de temperatura de 0°C e com pressão de 1 atm (760 mmHg de gás seco), chamado então de STPD.

Para converter o volume de gás da temperatura e pressão ambiental no espirômetro para o expirado, em condições corporais, usa-se a seguinte equação:

$$V_{BTPS} = V_{ATP} \times \frac{273 + 37}{273 + T} \times \frac{P_B - P_{H_2O}(T)}{P_B - P_{H_2O}(37^\circ C)}$$

Onde V é o volume de gás sob as condições especificadas, T é a temperatura ambiente ou interna do equipamento e 37 é a temperatura corporal em graus Celsius. P_B é a pressão barométrica e P_{H_2O} é a pressão do vapor d'água na temperatura indicada. Valores para a P_{H_2O} em gás saturado podem ser obtidos para outras temperaturas pela equação:

$$P_{H_2O}(T) = 10 - 0,395 \times T + 0,0378 \times T^2$$

A pressão barométrica deve ser baseada na média anual de cada localização, que pode ser obtida sabendo-se a altitude. A aplicação de fator de correção diário é menor do que os erros potenciais da medida de pressão. A aquisição de um barômetro é, portanto, dispensável.

A conversão das medidas dos volumes respirados de ATPS para BTPS é baseada na presunção de que a temperatura do gás dentro do espirômetro resfria-se à temperatura ambiente, enquanto que a mecânica do espirômetro não se modifica com a mudança da temperatura. Este equilíbrio não é completo pois quando o indivíduo realiza manobra da CVF, o ar sai dos pulmões a 37°C mas entra no espirômetro em temperatura entre 33 e 35°C. Dependendo da temperatura ambiente, o fator de correção BTPS pode chegar a 10%.

5. Tipos de medidores de vazão

5.1. Sensores de fluxo

Os espirômetros com sensores de fluxo medem o fluxo diretamente e integram eletronicamente, para determinação do volume. Estes aparelhos usam vários princípios físicos para produzir um sinal proporcional ao fluxo de gás.

5.1.1. Tipo turbina

Para a aplicação neste projeto seria utilizada uma turbina com saída eletrônica, pois a vazão do fluido deve ser registrada instantaneamente. Este tipo de turbina é na maioria das vezes do tipo de rotor axial. A partir da rotação ocasionada pela passagem do fluido pelo rotor, pode-se totalizar a vazão que atravessa o mesmo. Existem dois sistemas principais de medição de rotação: o sistema magnético e o de radiofrequência. No sistema magnético, um sensor de proximidade é sensível à passagem das pás da turbina. O sensor é composto de um ímã permanente e de uma bobina. O fluxo magnético varia cada vez que uma pá da turbina modifica a distribuição das linhas magnéticas, pela sua passagem no campo do ímã. A bobina gera, desta forma, uma sequência de pulsos cuja frequência é diretamente proporcional à rotação da turbina e, conseqüentemente, à vazão volumétrica.

O sistema de radiofrequência é uma sofisticação em relação ao anterior, objetivando eliminar o torque reativo do rotor, provocado pela medição de rotação, aumentando assim a sensibilidade do equipamento. Uma bobina alimentada por uma corrente alternada em radiofrequência é o sensor de passagem das pás da turbina. Ao passarem pelo campo magnético criado pela bobina, as pás modulam o sinal portador. A frequência de modulação é diretamente proporcional à velocidade angular do rotor e, conseqüentemente, à vazão volumétrica.

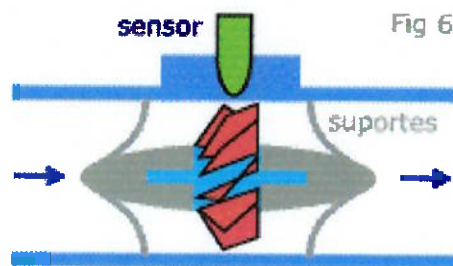


Fig. 8: Esquema de Sensor Tipo Turbina

Ambos os tipos de sensores eletrônicos são intrinsecamente compatíveis com a leitura digital do volume totalizado. Quando são utilizados instrumentos digitais, a exatidão alcançada pode ser de 0,5% do valor instantâneo da vazão.

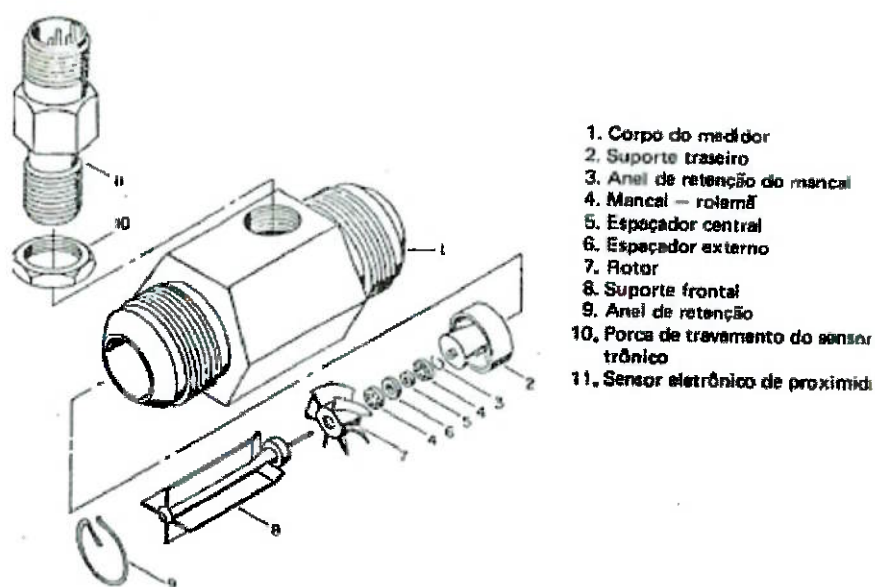


Fig. 9: Peças de sensor tipo turbina



Fig. 10: Exemplo de espirômetro tipo turbina - microquark

Faixa de medição de vazão: 0.03 a 20 L/s

Máximo volume: 12 Litros

Exatidão: $\pm 2\%$

Temperatura de operação: 0 a 50°C

O principal problema para a construção de um medidor de vazão baseado em turbina medidora de fluxo é que deve se minimizar o atrito, momento e inércia do rotor. Deve-se tomar cuidado, pois podem ser efetuadas medidas de forma incorreta, uma vez que devido ao excesso de momento a turbina pode continuar girando após o término da passagem do fluido, ou uma vazão mínima é necessária para que o rotor comece a girar.

5.1.2. Tipo termistor

A medição da vazão nos sensores termistores baseia-se na convecção térmica ou transferência de calor para o fluxo de gás. Este dispositivo apresenta um ou dois fios metálicos (anemômetro de fio quente), uma esfera ou uma membrana são aquecidos e mantidos em temperaturas elevadas.

O fluxo do fluido que atravessa o termistor remove o calor do objeto aquecido, ou seja, quanto maior este fluxo, maior a transferência de calor. A quantidade de corrente elétrica necessária para manter a temperatura constante do objeto quente é proporcional à taxa de fluxo.

O desempenho deste sistema é melhor quando o fluxo que o atravessa é laminar, pois a transferência de calor é mais linear, porém pode-se minimizar o fluxo turbulento colocando-se o sensor de fluxo a uma distância maior da fonte de fluido. Um dos problemas apresentados é que com termistores não se pode distinguir a direção do fluxo.

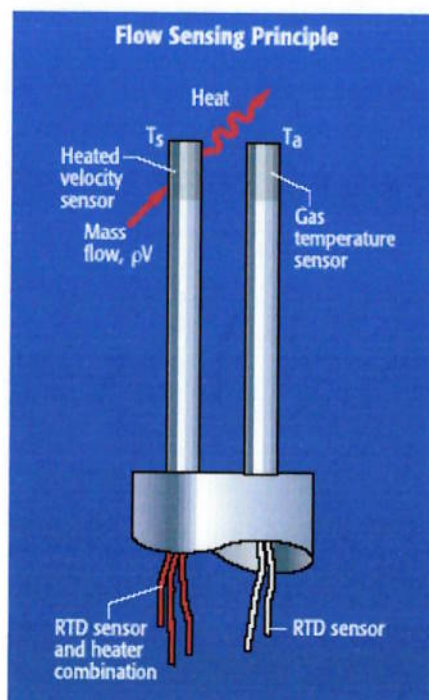


Fig. 11: Um dos tipos de Termistor

Sua principal desvantagem é a dificuldade de construção devido a sua complexidade e o custo para aquisição de um sistema já pronto.



Fig. 12: Exemplo de sistema de medição de vazão tipo termistor - TSI – modelo 4140

Faixa de medição de vazão: 0.01 a 20 L/s

Máximo volume: sem limite

Exatidão: $\pm 2\%$ ou 0.005 L

Temperatura de operação: 0 a 50°C

5.1.3. Tipo pneumotacógrafo

Os sensores pneumotacógrafos medem a resistência e o fluxo de acordo com membranas que são sensíveis a diferenciar pressão. A medição do fluxo através deste tipo de sensor já é utilizada em diversos espirômetros.

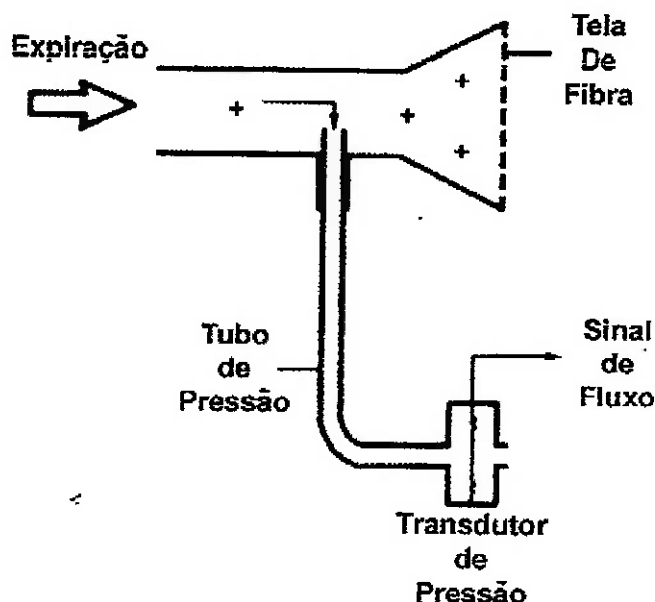


Fig. 13: Esquema do funcionamento de um sensor pneumotacógrafo

O sensor mede uma diferença de pressão muito baixa. A medida do fluxo é derivada da queda de pressão através do sistema, pela lei de Poiseuille. Se a resistência é conhecida, constante e baixa o suficiente de modo que o fluxo não seja limitado durante a expiração contra a resistência, haverá um pequeno, mas mensurável aumento de pressão. Um transdutor diferencial de pressão é utilizado para medir a mudança de pressão através da resistência e os fluxos são calculados dividindo-se as pressões pelo valor da resistência.



Fig. 14: Exemplo de espirômetro pneumotacógrafo – Vitalograph – modelo 2120

Faixa de medição de vazão: -16 a 16 L/s

Máximo volume: 8 Litros

Exatidão: $\pm 3\%$

Temperatura de operação: 5 a 40°C

5.1.4. Ultra-sônico

Outro método para medição de vazão, que também já utilizado em alguns tipos de espirômetros é a medição por ultra-som.

Transdutores instalados conforme figura abaixo emitem e recebem sinais de som em direções opostas. Quando há fluxo na tubulação, o pulso que viaja em direção contrária ao fluxo tem sua velocidade reduzida e, portanto leva mais tempo para atingir o transdutor oposto. Da mesma forma, o pulso que viaja na mesma direção do fluxo é acelerado e leva um intervalo de tempo menor para atingir o transdutor oposto.

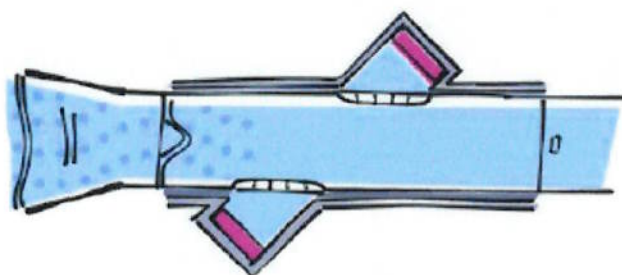


Fig. 15: Esquema do funcionamento de um sensor ultra-sônico

A medição ultra-sônica baseia-se no fato de que a velocidade do som num fluido em movimento em um determinado ponto é o resultado da soma da velocidade característica do som no fluido em repouso com a componente da velocidade do fluido naquele ponto na direção de propagação da onda ultra-sônica. Os sensores permitem medir a velocidade do som no fluido a partir das diferentes velocidades de propagação dos pulsos ultra-sônicos, contra e a favor da corrente.

Uma das principais vantagens deste sistema é que não há a necessidade de sua calibração, evitando erros que uma calibração incorreta poderia causar.



Fig. 16: Exemplo de espirômetro com sensor ultra-sônico – EasyOne

Faixa de medição de vazão: -16 a 16 L/s

Máximo volume: 12 Litros

Exatidão: $\pm 2\%$ ou 0.02L

Temperatura de operação: -

5.2. Medidores de deslocamento de volume

Aparelhos com deslocamento de volume são simples e precisos para medidas de volumes, porém, devido à movimentação das partes mecânicas, as forças de inércia, fricção e momento e o efeito da gravidade devem ser minimizados para que as medidas dos volumes e fluxos sejam exatas e precisas. Uma das vantagens destes tipos de medidores que serão apresentados é seu custo que é muito inferior aos espirômetros com sensor de fluxo.

5.2.1 Tipo pistão

Consiste em um pistão leve montado horizontalmente num cilindro. O pistão é sustentado por uma haste que repousa em suporte com baixo atrito. O pistão tem uma grande área de superfície, de modo que seu movimento horizontal é pequeno e é acoplado ao cilindro por meio de um selo macio, flexível e rolante.

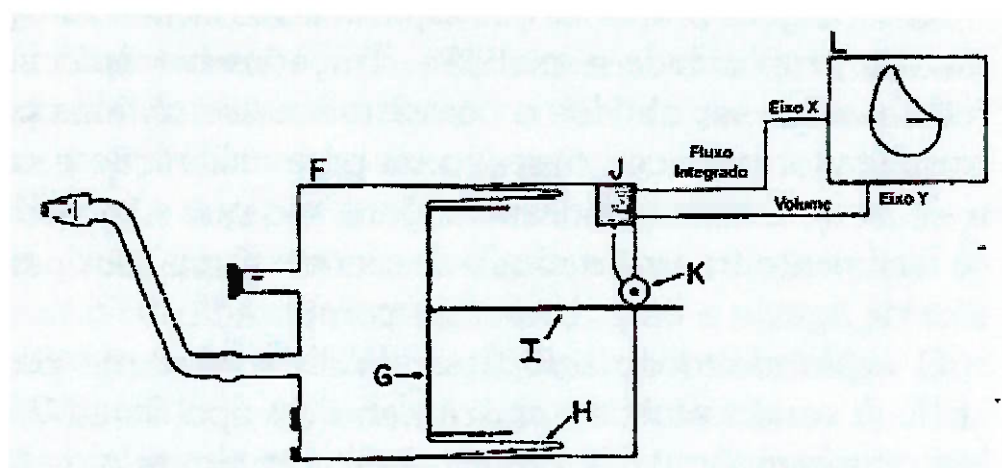


Fig. 17: Esquema de espirômetro de deslocamento de volume tipo pistão

Suas principais desvantagens são o aumento da resistência do sistema e desenvolvimento de rigidez do sistema de rolamentos com o uso. A limpeza envolve a desmontagem completa do sistema e periodicamente deve ser avaliada a existência de vazamentos.

A conexão a um computador deve ser feita através de uma placa conversora A/D ligada a um potenciômetro (linear ou rotatório).

5.2.2. Tipo selado em água – campânula

É um dos tipos de gasômetros. Consiste em uma campânula grande de 7 a 10L suspensa num reservatório de água com extremidade aberta da campânula abaixo da superfície da água, que faz a selagem do equipamento. Um sistema de tubos dá acesso ao interior da campânula e medidas precisas de volumes podem ser obtidas. Com os gasômetros há possibilidade de efetuar medições com nível de incerteza de até 0,3% e é comumente utilizado para a aferição de medidores de vazão de Gases.

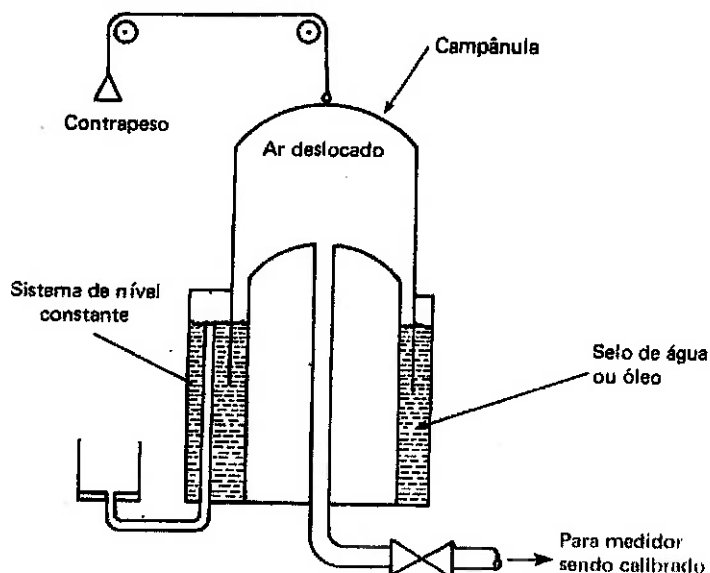


Fig. 18: Gasômetro para aferição de medidores de vazão de gases

Este equipamento pode ser acoplado a um quimógrafo, que registrará em um papel o gráfico obtido, ou em um potenciômetro linear, que pode possibilitar a conexão a um computador.

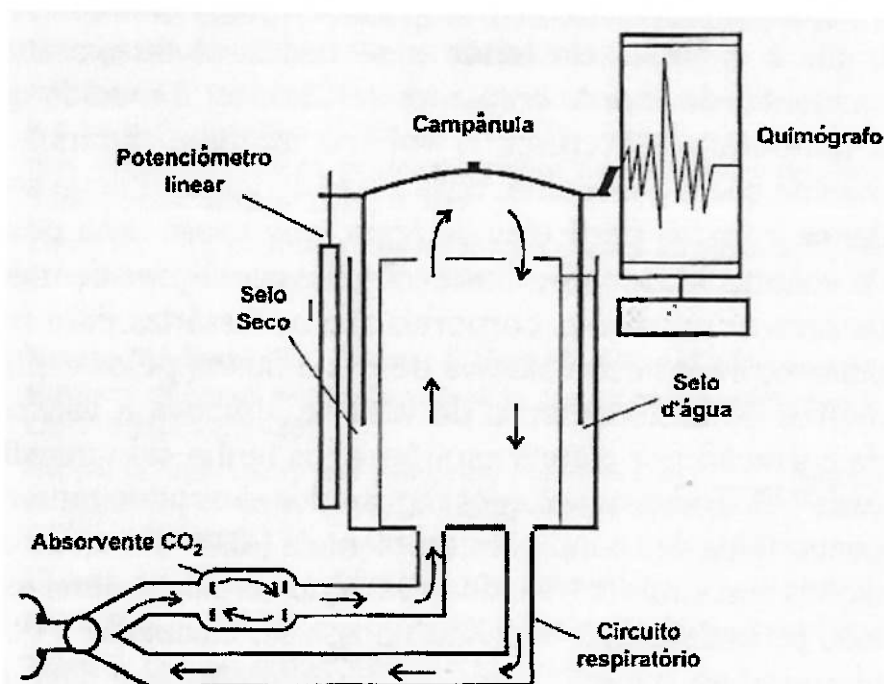


Fig. 19: Esquema de espirômetro de deslocamento de volume selado em água - campânula

Sua principal vantagem é a simplicidade e baixo custo e as principais desvantagens são o tamanho e dificuldade de deslocamento do aparelho e sua praticidade, pois devem ser tomados maiores cuidados na sua limpeza e verificação da existência de vazamento.

Faixa de medição de vazão: -

Máximo volume: a ser definido

Exatidão: 3 %

Temperatura de operação: 17 a 40°C (para espirômetros)

5.2.3. Tipo fole

Este tipo consiste em foles que se dobram e desdobram em resposta à entrada de fluido em seu interior.

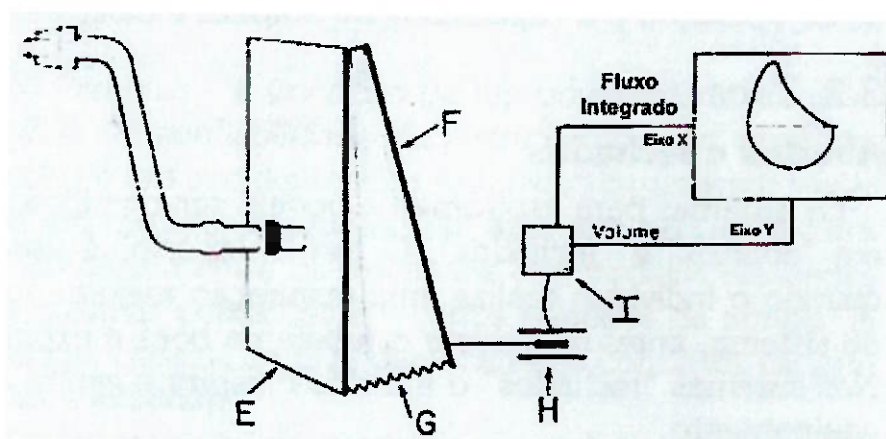


Fig. 20: Esquema de espirômetro de deslocamento de volume tipo fole

Uma extremidade é fixa enquanto a outra é deslocada em proporção ao volume inspirado ou expirado. O deslocamento do fole por um volume de gás é traduzido por um sistema de registro mecânico ou ligado a um potenciômetro.

O fole é comumente composto de um material mole ou complacente, de borracha, silicone ou PVC. A complacência do fole pode ser dependente da temperatura; ambientes frios podem diminuir a complacência. Foles compostos de polietileno são menos influenciados pela temperatura.

Este tipo de equipamento pode ser bastante exato para a medição de volume, porém sua higienização é um pouco complexa, pois após múltiplas expirações podem fazer com que suas dobras tornem-se úmidas e pegajosas, também comprometendo a linearidade das medidas.

5.3. Preço de Espirômetros

Abaixo estão relacionados modelos e preços de alguns espirômetros que estão disponíveis para compra no mercado nacional. Podemos notar que estes aparelhos são caros e em sua maioria são importados.



Fig. 21: Espirômetro Microlab – R\$ 16.968,00



Fig. 22: Espirômetro Microquark - R\$ 9.801,00



Fig. 23: Espirômetro One Flow - Cement-Clark - R\$6.652,80



Fig. 24: Espirômetro Pony FX - Cosmed - R\$20.302,59



Fig. 25: Spirom2 - Phisys - R\$6.648,50

6. Escolha da solução

Neste capítulo será feita a escolha da solução que melhor atende a uma série de requisitos e aos requisitos principais deste projeto. Será feita uma matriz de decisão para auxiliar a definição de qual tipo de Espirômetro deverá ser utilizado.

6.1. Parâmetros a serem considerados

Abaixo serão definidos parâmetros que auxiliarão na escolha da melhor solução através da matriz de decisão. Será atribuído um peso para cada parâmetro, de acordo com a sua importância. Os pesos variam entre 1 e 5. Serão atribuídas notas para cada tipo de sistema de medição de vazão em cada um dos parâmetros e estas notas variam entre 1 e 5.

- **Higiene**

Este parâmetro engloba a facilidade da execução da limpeza do equipamento bem como a segurança de que o usuário não irá contrair nenhum tipo de doença ou infecção com o uso. Por isso, o peso deste parâmetro é 5.

- **Custo**

O custo é um fator determinante para este projeto uma vez que a redução de custo é um de seus objetivos. O peso deste parâmetro é 4.

- **Facilidade de construção**

Este fator é importante pois devido ao curto prazo para execução do projeto, disponibilidade dos componentes, o tempo e a facilidade para construção são relevantes. O peso deste parâmetro é 3.

- **Capacidade de atender aos requisitos (indicado na matriz de decisão por “Requisitos”)**

Parâmetro muito importante pois o equipamento deve fornecer condições para que seja possível avaliar a real condição do paciente (usuário). O peso deste parâmetro é 4.

- **Praticidade**

Leva em conta a praticidade para obtenção dos resultados. O peso deste parâmetro é 1.

- **Manutenção**

O equipamento desenvolvido deve ser de fácil manutenção e apresentar um baixo custo para a substituição de peças ou reparos. O peso deste parâmetro é 3.

- **Durabilidade**

O equipamento deve ser resistente e apresentar uma durabilidade que justifique a redução de custos para sua aquisição. O peso deste parâmetro é 2.

6.2. Matriz de decisão

A partir dos diversos tipos de soluções possíveis apresentados no capítulo 5 e dos parâmetros estabelecidos no item anterior deste capítulo, podemos montar uma matriz de decisão.

	Higiene	Custo	Construção	Requisitos	Praticidade	Manutenção	Durabilidade	Total
Turbina	3	1	2	5	5	1	5	63
Termistor	4	1	2	5	5	2	5	71
Pneumotacógrafo	4	2	2	5	5	2	5	75
Ultra-sônico	5	1	1	5	5	1	5	70
Pistão	3	5	3	3	2	5	3	74
Campânula	3	5	4	3	1	5	3	81
Fole	2	5	4	3	3	5	3	78

Tabela. 2: Matriz de decisão

Através desta matriz de decisão a solução que apresenta mais adequada aos requisitos do projeto é a do medidor de vazão de deslocamento de volume de Campânula.

7. Especificação da solução selecionada e fabricação de protótipo

7.1. Simplificações do modelo

Uma das restrições deste projeto é o custo do equipamento, que deverá ser consideravelmente inferior ao custo dos espirômetros existentes no mercado nacional. Por este motivo, optou-se pela escolha de materiais que fossem facilmente encontrados no mercado, pois a fabricação de alguns itens em dimensões especiais, tais como tubos e mangueiras, inviabilizaria economicamente o projeto.

Os parâmetros do teste de espirometria que serão alvo deste projeto são a Capacidade Vital Forçada (CVF) e o Volume Expiratório Forçado no 1º Segundo (VEF1), que são os valores mais importantes do teste e permitem que, através de comparação com os valores previstos da literatura, possa ser realizada a avaliação das condições do paciente.

7.2. Especificações técnicas dos componentes do espirômetro

- **Campânula**

Deve ser construída em um plástico de baixa densidade para que seu peso não tenha grande influência na medida do volume. Seu formato será cilíndrico. De acordo com a tabela 1 apresentada, o volume no interior da campânula deve ser de no mínimo 7 L.

Para a montagem do protótipo, foi escolhido como campânula um recipiente cilíndrico de polipropileno, pois este é um material atóxico, apresenta baixo custo, tem boa resistência química e ao impacto, além de ser soldável e moldável.



Fig. 26: Campânula utilizada no protótipo

Características da campânula:

- . Diâmetro: 0,235 m
- . Comprimento: 0,24 m
- . Espessura: 0,02 m
- . Densidade: 0,92 g/cm³
- . Peso: 220 g

Custo da campânula R\$ 18,50

- **Base principal**

Deve apoiar a campânula e possuir espaço para o reservatório de água. Em seu interior há um tubo onde será conectada a mangueira com o bocal para o paciente. Não há necessidade de seu material ser leve. Seu formato também será cilíndrico. A folga entre a campânula e a base deve ser pequena, pois caso contrário a subida da campânula pode ser instável. A base também deve ter boa resistência mecânica e à umidade.

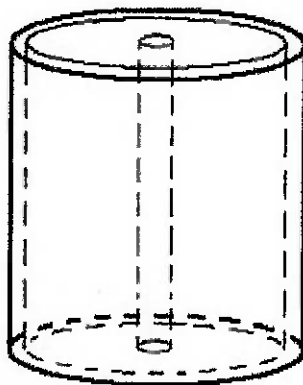


Fig. 27: Esquema da base principal

Para o protótipo, escolheu-se o cilindro externo da base e o tubo interno de PVC, pois este material tem resistência à exposição ao tempo e a agentes químicos, pode receber soldagem de alta frequência, térmica ou ultrassom e é utilizado em diversos equipamentos hospitalares. Para o cilindro interno, escolheu-se um recipiente de polipropileno disponível no mercado.

Características do cilindro externo:

- . Diâmetro: 0,250 m
- . Comprimento: 0,20 m
- . Espessura: 0,03 m
- . Densidade: 1,4 g/cm³

Características do cilindro interno:

- . Diâmetro: 0,200 m
- . Comprimento: 0,23 m
- . Espessura: 0,02 m
- . Densidade: 0,92 g/cm³

Características do tubo interno:

- . Diâmetro: 0,037 m
- . Comprimento: 0,29 m
- . Espessura: 0,01 m
- . Densidade: 1,4 g/cm³

Custo da base principal: R\$ 35,00



Fig. 28: Base principal utilizada no protótipo

- **Base de sustentação**

O material escolhido para a confecção da base de sustentação, que dará apoio à base principal e que possuirá as hastes para colocação do contrapeso, foi a madeira MDF, pois esta apresenta resistência mecânica suficiente para a sustentação do equipamento e é um material de fácil aquisição.

Custo total da base de sustentação: R\$ 20,00



Fig. 29: Base de sustentação utilizada no protótipo

- **Tubos, conexões e mangueira**

Após o tubo interno da base principal será utilizado um cotovelo em PVC, acoplado a um outro tubo de PVC. A conexão com o bocal será feita por uma mangueira flexível de plástico, que possui diâmetro um pouco maior do que o do tubo de PVC. O tubo de PVC e a mangueira estão acoplados com ajuste por interferência, que será o mesmo utilizado entre a mangueira e o bocal.

Características do cotovelo (90°):

- . Diâmetro de entrada: 0,037 m
- . Diâmetro de saída: 0,037 m
- . Densidade: 1,4 g/cm³

Características do Tubo:

- . Diâmetro: 0,037 m
- . Comprimento: 0,28 m
- . Espessura: 0,01 m
- . Densidade: 1,4 g/cm³

Características da mangueira:

- . Diâmetro interno: 0,037 m
- . Comprimento: 0,39 m
- . Espessura: 0,02 m

Custo dos tubos, conexões e mangueiras: R\$ 6,00



Fig. 30: Detalhe do Cotovelo



Fig. 31: Tubos e mangueira utilizados

- **Bocal**

É a peça que estará em contato com a boca do paciente. Pode ser descartável, feito com um tipo de papel, ou esterilizável, feito de plástico. Vários tipos de bocais são disponibilizados no mercado.

No protótipo optou-se pela utilização de bocal feito em PVC.

Características do bocal:

- . Diâmetro: 0,037 m
- . Comprimento: 0,11 m
- . Espessura: 0,01 m

Custo do bocal: incluso no custo dos tubos



Fig. 32: Bocal de PVC

- **Contrapeso**

Consiste em um bloco que deverá equilibrar o peso da campânula. A utilização do contrapeso se faz necessária, pois diminuindo a influência do peso da campânula, que aumentará a resistência à expiração. Acoplada ao contrapeso haverá um riscador, que consiste em uma caneta de ponta porosa que registrará o gráfico no papel do quimógrafo.

O contrapeso do protótipo foi feito de madeira MDF. Também foram construídas hastes verticais para que o contrapeso pudesse ter apenas deslocamento vertical.

Custo do contrapeso e das hastes: já inclusos no custo da base de sustentação.



Fig. 33: Contrapeso e hastes verticais

- **Quimógrafo**

Elemento que fará o registro gráfico da curva do exame de espirometria. Ele é composto por dois rolos, um com papel milimetrado e outro que irá puxar o papel do rolo anterior. O riscador vai preso ao contrapeso e está em contato com o papel do rolo. Na medida em que o rolo gira, o gráfico é registrado no papel.

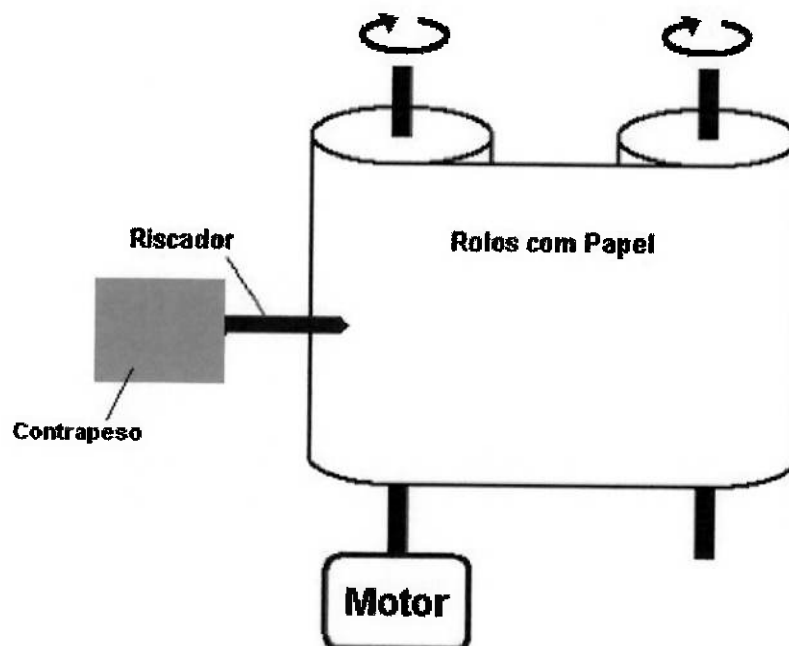


Fig. 34: Esquema do quimógrafo

Características do quimógrafo:

- . Velocidade da folha: 0,03 m/s
- . Altura da folha: 0,21 m
- . Diâmetro do rolo com papel: 0,02 m
- . Rotação do rolo com papel: 14,32 RPM

Neste projeto não é abordado o desenvolvimento deste dispositivo, sendo considerado acessório à parte. O registro dos valores medidos pelo expirômetro aqui projetado foi realizado através de sistema de aquisição imagens, que monitora a posição de uma escala linear que desloca-se com a campânula. Os testes feitos com o protótipo utilizaram uma câmera tipo Webcam, que registrou digitalmente imagens que posteriormente foram analisadas para obtenção dos dados...

- **Termômetro**

Deve-se possuir um termômetro para que se possa fazer a medição da temperatura ambiente no local de realização do exame. Com isso será possível a execução da correção do BTPS já especificada.



Fig. 35: Termômetro

- **Riscador e sua fixação**

Com o uso do quimógrafo deve-se empregar um riscador que pode adotar de modo simplificado uma caneta de ponta porosa que atravessará o contrapeso e estará fixada nele através de prensamento com um parafuso.

Custo do riscador: desprezível

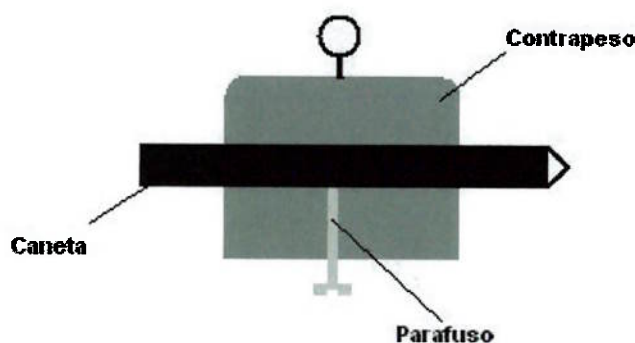


Fig. 36: Esquema do riscador

7.3. Funcionamento do equipamento

O paciente deverá colocar o bocal do espirômetro em sua boca e em seguida deverá realizar uma manobra expiratória. Com a entrada do ar no equipamento, a campânula se deslocará verticalmente para cima, fazendo com que o contrapeso, que deverá estar acoplado à uma caneta de ponta porosa, se desloque para baixo. A caneta de ponta porosa irá traçar um gráfico no papel que está girando no quimógrafo ou o deslocamento vertical será registrado em conjunto de imagens através da câmera, conforme método proposto para ensaios no protótipo.

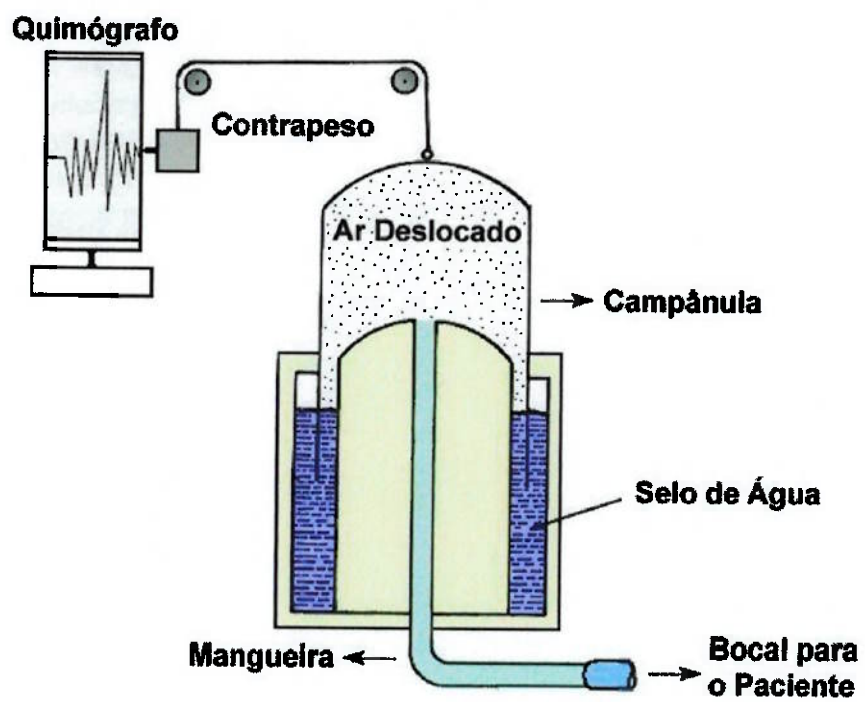


Fig. 37: Esquema do espirômetro



Fig. 38: Protótipo montado

7.4. Higiene

Outro ponto importante para a realização deste projeto, é a higiene da solução escolhida, pois é inaceitável que um paciente possa se contaminar durante o teste de espirometria.

As peças bucais e a parte proximal tubulação são as regiões mais críticas do espirômetro, pois são nessas regiões onde há probabilidade de haver bactérias ou vírus.

Para a solução escolhida, o espirômetro de campânula com selo de água, recomenda-se que o bocal seja substituído ou desinfetado para cada paciente. A região proximal da tubulação deve ser limpa a cada utilização do equipamento.

Para facilitar a depuração de aerossóis, entre cada paciente deve ser realizada uma “lavagem” do equipamento com ar ambiente por cinco vezes, ou seja, deve-se movimentar a campânula na sua faixa inteira de volume para que o ar ambiente entre e saia do espirômetro por cinco vezes.

Recomenda-se que a água que faz a selagem do espirômetro seja trocada diariamente.

Os profissionais que manipulam o equipamento devem lavar as mãos imediatamente após a manipulação de tubos, bocais ou de partes interiores do espirômetro.

Por fim, uma alternativa que pode também ser utilizada é a aplicação de filtros anti-bacterianos e anti-virais descartáveis para uso na passagem do ar pelo bocal. Este, no entanto, poderá impor uma resistência ao sistema e ela deverá ser avaliada e considerada nos cálculos dos volumes. Esses filtros estão disponíveis no mercado.



Fig. 39: Filtro anti-bacteriano e anti-viral

8. Testes e ensaios do protótipo

Para avaliação da exatidão do equipamento, foram realizados testes com o Protótipo do espirômetro, onde foram avaliadas a CVF e o VEF1 e posteriormente foi feita uma comparação com valores de referência obtidos em uma clínica médica.

8.1. Equipamentos e programas utilizados nos ensaios

Para realização dos testes foram utilizados:

- Câmera Doméstica tipo Webcam com Resolução 680 x 400 Pixels e 60 frames/s
- Microcomputador com processador Celeron 1.7 GHz
- Sistema operacional Windows XP
- Software HT Video Editor 6.0 para aquisição das imagens
- Software Jahshaka (Opensource) para análise das imagens
- Seringa de calibração de 3 L



Fig. 40: Aparato para realização do teste

8.2. Procedimento experimental

8.2.1. Teste 1 – Teste comparativo com seringa de calibração

Este teste foi realizado em um consultório médico e foi avaliado o deslocamento vertical da campânula com a entrada de ar provindo de uma seringa de calibração de 3L.

Primeiramente acoplou-se a seringa o cotovelo na entrada do protótipo conforme a figura 42.



Fig. 41: Seringa de calibração acoplada ao protótipo

O deslocamento vertical da campânula pôde ser observado ao final da injeção do ar no protótipo.



Fig. 42: Experimento antes da injeção do ar



Fig. 43: Experimento após à injeção do ar

No teste 1, com a variação do deslocamento vertical da campânula, levando em consideração o diâmetro da campânula, pôde-se calcular geometricamente o volumes deslocado com a injeção do ar.

8.2.2. Teste 2 – Teste comparativo com espirômetro tipo pneumotacógrafo

Para a realização deste ensaio, estarão sendo comparados testes espirométricos realizados por um mesmo indivíduo com um espirômetro do tipo pneumotacógrafo e com o protótipo em questão. Foram avaliados os parâmetros CVF (Capacidade Vital Forçada) e o VEF1 (Volume Expiratório Forçado no Primeiro Segundo).

Na primeira etapa deste teste, na qual o indivíduo realizou a prova de função pulmonar com o protótipo, foi instalada uma régua na campânula para medição dos seus deslocamentos verticais. Com o auxílio de uma Webcam e do software HT Video Editor 6.0, foram realizadas as aquisições de imagens.

Utilizando-se o software Jahshaka para edição de vídeo, pôde-se observar quadro a quadro a subida da campânula e pôde-se assim registrar a posição da régua acoplada a ela.

Para a medição da CVF, observou-se a medição na régua no momento inicial do teste e no momento que a campânula atingia seu deslocamento vertical máximo.

Para a medição da VEF1, a partir do momento em que a campânula começou a subir (tempo $t=0$ s), adiantou-se 1 segundo com o software de edição de imagens e manteve-se a imagem congelada. Desta forma, foi possível a leitura da régua acoplada à campânula.

Para evitar-se problemas devido à campânula estar encostada à base principal, iniciou-se o teste a partir da altura 1 cm da régua conforme indicado na figura 45.



Fig. 44: Imagem do software de edição de vídeo no início do teste ($t=0$ s)



Fig. 45: Imagem do software de edição de vídeo após 1 s do início do teste ($t=1$ s)

Com a variação do deslocamento vertical da campânula, levando em consideração o diâmetro médio da campânula e efetuando as correções de volume devido à influência da temperatura ambiente, puderam-se calcular geometricamente os volumes obtidos no teste espirométrico.

Na etapa seguinte deste teste, o mesmo indivíduo realizou um teste espirométrico em um consultório médico, para que os dados experimentais obtidos nos testes do protótipo pudessem ser comparados a valores obtidos por um equipamento profissional.

O teste foi feito na Clínica do Dr. Alfredo Franco Jr., Pneumologista, professor da Universidade de São Paulo, no dia 03.02.2006 e foi utilizado um Espirômetro do tipo pneumotacógrafo, cujo funcionamento já foi apresentado o item 5.1.

Os valores obtidos no teste 2 encontram-se na tabela 4, no item 8.3.



Fig. 46: Espirômetro tipo pneumotacógrafo utilizado no teste no consultório



Fig. 47: Detalhe do bocal de papelão utilizado no teste no consultório

8.3. Dados medidos e resultados calculados

A seguir encontram-se as tabelas com os resultados obtidos nos testes descritos no item anterior.

8.3.1. Dados medidos e calculados no teste 1

Na tabela 3 podemos observar o deslocamento vertical sofrido pela campânula após a injeção do ar contido na seringa de calibração, o volume obtido após os cálculos geométricos e por fim o volume de referência da seringa de calibração, que possui volume total único de 3 L.

Protótipo		Referência
Deslocamento Vertical Medido (m)	Volume Calculado com o Deslocamento (L)	Volume da Seringa de Calibração (L)
0,070 ± 0,005	3,04 ± 0,22	3,00

Tabela 3: Dados obtidos e calculados no teste 1

8.3.2. Dados medidos e calculados no Teste 2

Para o teste 2 foram realizados seis testes espirométricos com o protótipo. Na tabela abaixo, encontram-se as temperaturas em que cada uma das seis tomadas de dados foi realizada e os respectivos fatores de correção de volumes, conforme fórmulas referenciadas no item 4.6 deste trabalho.

Tomada de Dados	Temperatura (°C)	Fator de Correção 1	Fator de Correção 2
1	25	1,040268	1,036307
2	25	1,040268	1,036307
3	25	1,040268	1,036307
4	25	1,040268	1,036307
5	25	1,040268	1,036307
6	25	1,040268	1,036307

Tabela 4: Temperaturas e fatores de correção para BTPS

Na tabela 5 têm-se os dados referentes às medidas e cálculos obtidos para a avaliação da CVF do indivíduo.

Tomada de Dados	Deslocamento Medido (m)	CVF Real (L)	CVF BTPS (L)
1	0,132 ± 0,005	5,73 ± 0,10	6,17 ± 0,11
2	0,130 ± 0,005	5,63 ± 0,10	6,08 ± 0,11
3	0,133 ± 0,005	5,77 ± 0,10	6,22 ± 0,11
4	0,133 ± 0,005	5,77 ± 0,10	6,22 ± 0,11
5	0,134 ± 0,005	5,81 ± 0,10	6,27 ± 0,11
6	0,136 ± 0,005	5,9 ± 0,10	6,36 ± 0,11

Média (L)	Desvio Padrão (L)	Valor de Referência Obtido na Clínica (L)	Diferença (%)
6,22 ± 0,11	0,09	6,38	2,51

Tabela 5: Deslocamentos e volumes utilizados no cálculo e avaliação da CVF

Já na tabela 6 encontram-se os dados referentes às medidas e cálculos obtidos para a avaliação da VEF1 do indivíduo.

Tomada de Dados	Deslocamento Medido (m)	VEF1 Real (L)	VEF1 BTPS (L)
1	$0,105 \pm 0,005$	$4,55 \pm 0,08$	$4,91 \pm 0,09$
2	$0,107 \pm 0,005$	$4,64 \pm 0,08$	$5,00 \pm 0,09$
3	$0,109 \pm 0,005$	$4,73 \pm 0,08$	$5,10 \pm 0,09$
4	$0,106 \pm 0,005$	$4,6 \pm 0,08$	$4,96 \pm 0,09$
5	$0,107 \pm 0,005$	$4,64 \pm 0,08$	$5,00 \pm 0,09$
6	$0,109 \pm 0,005$	$4,73 \pm 0,08$	$5,10 \pm 0,09$

Média	Desvio Padrão (L)	Valor de Referência Obtido na Clínica (L)	Diferença (%)
$5,01 \pm 0,09$	0,08	5,04	0,54

Tabela 6: Deslocamentos e volumes utilizados no cálculo e avaliação do VEF1

Buscando obter um gráfico semelhante ao que seria traçado pelo protótipo com a utilização de um quimógrafo, foi realizada uma análise mais detalhada da segunda tomada de dados, registrando-se o deslocamento vertical da campânula a cada 0,1 s. Abaixo, na figura 48, encontra-se o gráfico obtido na segunda tomada de dados e em seguida, na tabela 7, podemos observar os todos valores referentes a este gráfico.

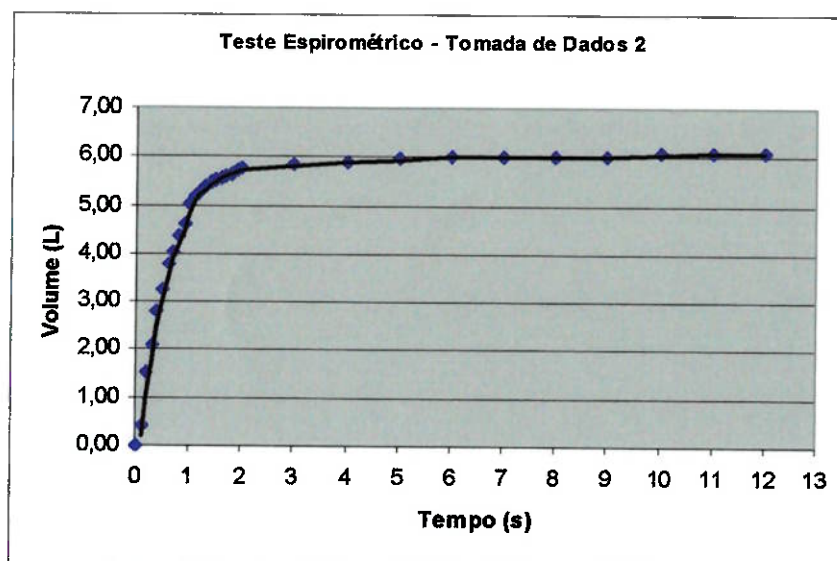


Fig. 48: Gráfico obtido na tomada de dados 2 no teste 2

Tomada de Dados 2		
Deslocamento Medido (m)	Tempo (s)	Volume BTPS (L)
0,000 ± 0,005	0,0	0,00 ± 0,00
0,009 ± 0,005	0,1	0,42 ± 0,01
0,033 ± 0,005	0,2	1,54 ± 0,03
0,045 ± 0,005	0,3	2,10 ± 0,04
0,060 ± 0,005	0,4	2,81 ± 0,05
0,070 ± 0,005	0,5	3,27 ± 0,06
0,081 ± 0,005	0,6	3,79 ± 0,06
0,086 ± 0,005	0,7	4,02 ± 0,07
0,093 ± 0,005	0,8	4,35 ± 0,07
0,099 ± 0,005	0,9	4,63 ± 0,09
0,107 ± 0,005	1,0	5,00 ± 0,08
0,111 ± 0,005	1,1	5,19 ± 0,09
0,113 ± 0,005	1,2	5,28 ± 0,09
0,115 ± 0,005	1,3	5,38 ± 0,09
0,117 ± 0,005	1,4	5,47 ± 0,09
0,118 ± 0,005	1,5	5,52 ± 0,09
0,119 ± 0,005	1,6	5,56 ± 0,10
0,120 ± 0,005	1,7	5,61 ± 0,10
0,121 ± 0,005	1,8	5,66 ± 0,10
0,122 ± 0,005	1,9	5,70 ± 0,10
0,123 ± 0,005	2,0	5,75 ± 0,10
0,125 ± 0,005	3,0	5,84 ± 0,10
0,126 ± 0,005	4,0	5,89 ± 0,10
0,128 ± 0,005	5,0	5,99 ± 0,10
0,129 ± 0,005	6,0	6,03 ± 0,10
0,129 ± 0,005	7,0	6,03 ± 0,10
0,129 ± 0,005	8,0	6,03 ± 0,10
0,129 ± 0,005	9,0	6,03 ± 0,10
0,130 ± 0,005	10,0	6,08 ± 0,10
0,130 ± 0,005	11,0	6,08 ± 0,10
0,130 ± 0,005	12,0	6,08 ± 0,10

Tabela 7: Dados obtidos na tomada de dados 2

8.4. Discussão dos resultados obtidos nos testes

No Teste 1, foi notada uma diferença de 0,04 L entre o volume obtido e o esperado, o que dá uma variação de apenas 1,3%.

No Teste 2, na medição da CVF, obtivemos uma diferença de 0,16 L na média dos valores obtidos em relação ao valor esperado, o que nos mostra uma variação de 2,5%. Já na medição do VEF1, a diferença entre o valor obtido e o valor esperado foi de 0,03 L, ou 0,5%.

Embora se tenha obtido uma diferença maior na medição do CVF, os valores encontrados em todos os testes foram muito próximos aos valores esperados, o que mostrou que o protótipo possui uma boa exatidão, aferindo os dados com bastante confiabilidade.

Para a segunda tomada de dados do teste 2 foi realizada uma análise mais detalhada do movimento da campânula e pôde-se obter o gráfico do volume expirado em função do tempo. Este gráfico é semelhante ao que seria obtido com a utilização de uma caneta de ponta porosa, acoplada ao contrapeso, efetuando o registro dos dados no papel do quimógrafo.

9. Conclusões

Após visitas ao Hospital do Câncer de Barretos e à clínicas médicas, puderam ser identificadas as necessidades básicas para a realização deste trabalho, bem como foram coletados dados importantes a respeito da prova de função pulmonar, espirometria e higiene em equipamentos hospitalares.

Foram realizados levantamentos de dados técnicos de equipamentos já existentes e revisão bibliográfica à respeito do tema. Nestes foram avaliados a efeitos da temperatura na medição de volume, fatores que influenciam no teste de espirometria e parâmetros de comparação e que devem ser considerados nos exames. Neste estudo foram avaliados diversos tipos de medidores de vazão disponíveis no comércio, os quais também são ou podem ser utilizados em espirômetros profissionais, tendo em vista uma posterior escolha do modelo que mais se adequava aos requisitos do projeto.

Através de uma matriz de decisão foi selecionada uma solução, e detalhada a especificação de seus componentes, seu funcionamento e as características para fabricação de um protótipo. O protótipo fabricado foi submetido a testes e ensaios, realizados segundo procedimentos que avaliassem a funcionalidade do equipamento fabricado.

Os principais resultados obtidos através dos ensaios foram 3,04 L no teste 1, quando o valor esperado era de 3 L, 6,22 L na avaliação da CVF no teste 2, quando esperava-se 6,38 L e 5,01 L na avaliação do VEF1, também no teste 2, quando o valor de referência era 5,04 L.

Estes resultados mostraram que as diferenças entre os volumes medidos com a utilização do protótipo e os volumes de referência foram abaixo de 3%, que podem ser consideradas dentro dos requisitos esperados, que eram de 3% do valor de leitura, conforme apresentados na referência de recomendações para equipamentos de espirometria, reproduzida na tabela 1, concluindo-se confirmar a exatidão do equipamento proposto, nos testes 1 e 2.

O custo total envolvido para a construção do protótipo foi de aproximadamente R\$ 90,00 e este valor inclui apenas gastos com o material para construção, não tendo sido considerados os gastos de mão-de-obra. Visando a

redução drástica dos custos envolvidos, foram utilizados materiais facilmente encontrados em mercados ou lojas, que pudessem ser adaptados, evitando assim a necessidade de fabricação de componentes com dimensões específicas. Este resultado confirma também a possibilidade de viabilizar um espirômetro de baixo custo.

O quimógrafo não foi construído, porém com a utilização de materiais e dispositivos existentes no mercado o custo para sua manufatura também seria compatível com a proposta deste projeto. Verificou-se que a solução de medição por imagem também é possível e pode ser empregada.

Por fim, considerando os resultados obtidos neste estudo, podemos concluir que a solução escolhida atinge satisfatoriamente aos objetivos deste projeto, realizando medidas confiáveis dos volumes expiratórios e apresentando um baixo custo de fabricação.

10. Referências Bibliográficas

DELMÉE, G. Jean, 1938 – **Manual de Medição de Vazão**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

SIMPÓSIO Brasileiro de Medição de Vazão, I, 1989. Anais, São Paulo: IPT, 1989.

CARMELIER, A. **Curso Espirometria - Aulas 1, 2 e 3**. Disponível em : <http://www.respirar.com.br/exam_espirometria.asp>. Acesso em: 25 de abril de 2005.

PEREIRA, C. A. C. - **Calculadora para dados de Referência**. Disponível em : <<http://www.espiroatual.com.br/frame.asp?content=400>>. Acesso em: 15 de maio de 2005.

NEDER, J. A., PEREIRA, C. A. C. - **Diretriz Brasileira de Função Pulmonar**. Disponível em : <<http://www.pneumoatual.com.br/trataconsensos.asp?url=http%3A%2F%2Fwww%2Esbpt%2Eorg%2Ebr%2F>>. Acesso em: 15 de maio de 2005.

XENON Equipamentos Médico – Hospitalares. Disponível em: <<http://www.xenon.com.br/pneumologia/espirometro.html>>. Acesso em: 20 de junho de 2005.

TECNOVIP **Tecnologia em Medição**. Disponível em <<http://www.tecnovip.com/>>. Acesso em: 20 de junho de 2005.

GERARNET **Produtos Hospitalares** Disponível em: <<http://www.gerarnet.com.br>>. Acesso em: 20 de junho de 2005.