



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DETERMINAÇÃO DOS ÂNGULOS DA ÁRVORE**  
**BRÔNQUICA E SUAS RELAÇÕES COM OS ÂNGULOS**  
**DE GIRO DE UM DISPOSITIVO MECÂNICO**  
**DESENVOLVIDO PARA DRENAGEM POSTURAL**

**JOSÉ RENATO BARBOSA DE DEUS**

**Belo Horizonte, 16 de Fevereiro de 2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

José Renato Barbosa de Deus

**DETERMINAÇÃO DOS ÂNGULOS DA ÁRVORE  
BRÔNQUICA E SUAS RELAÇÕES COM OS ÂNGULOS DE  
GIRO DE UM DISPOSITIVO MECÂNICO DESENVOLVIDO  
PARA DRENAGEM POSTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Antônio E. de Melo Pertence  
(UFMG/DEMEC)

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2006



**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**DETERMINAÇÃO DOS ÂNGULOS DA ÁRVORE  
BRÔNQUICA E SUAS RELAÇÕES COM OS ÂNGULOS DE  
GIRO DE UM DISPOSITIVO MECÂNICO DESENVOLVIDO  
PARA DRENAGEM POSTURAL**

**JOSÉ RENATO BARBOSA DE DEUS**

Dissertação defendida e aprovada em 16 de fevereiro de 2006, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "Projetos Mecânicos".

---

Prof. Dr. Antônio E. de Melo Pertence (UFMG) - Orientador

---

Prof<sup>da</sup> Ms. Maria da Glória R. Machado (UNIBH-MG) - Co-orientadora

---

Prof. Dr. Luiz Machado (UFMG) - Examinador

---

Prof. Dr. Paulo César de Matos Rodrigues (UFMG) - Examinador

## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais e a minha companheira, Shirley.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Shirley, fonte de inspiração em minha vida, por todos os momentos em que, com seu jeito gentil e terno, transformou dificuldades em vontade de me superar.

Aos meus pais, por tudo.

Ao Professor Antônio Pertence, pela gentileza e serenidade com que me recebeu em seu laboratório e, também, pela incansável participação em todas as etapas do projeto.

À Professora Maria da Glória, pelas idéias originais e desafiadoras que permitiram o encontro entre a Engenharia e a Fisioterapia.

Ao Professor Germán Arturo B. Mahecha, do Laboratório de Morfologia de Aves e Biologia da Reprodução (ICB), que gentilmente forneceu um modelo da árvore brônquica.

Ao Dr. Eliazor, por permitir o uso de sua biblioteca particular.

Às fisioterapeutas Luana e Francimara, pela participação no projeto.

A todos os meus professores do DEMEC, pela paciência na lida com um aluno que já estava afastado da vida acadêmica há vinte anos.

Às secretárias Sandra e Josiane, pela colaboração em todas as etapas do transcorrer do mestrado.

A todos os amigos do DEMEC, por eles existirem.

A CAPES, por financiar o projeto.

À Faculdade Pitágoras, pelo empréstimo do boneco anatômico.

À UFMG, pela oportunidade de recomeçar minha carreira profissional.

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	3
AGRADECIMENTOS .....	4
SUMÁRIO .....	5
NOMENCLATURA .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE GRÁFICOS.....	11
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	13
RESUMO .....	14
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa.....	17
1.2 Objetivos .....	18
1.2.1 Objetivo geral .....	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
2 Revisão Bibliográfica .....	19
2.1 Considerações sobre o sistema respiratório .....	19
2.1.1 Pulmões e segmentação pulmonar.....	20
2.1.2 Resistências à ventilação .....	23
2.1.3 Controle da ventilação pulmonar.....	26
2.1.4 Produção de muco, clearance e disfunção mucociliar das vias aéreas.....	28
2.2 Fisioterapia respiratória.....	29
2.2.1 Postura de drenagem.....	30
3 Metodologia.....	33
3.1 Convenções e simplificações adotadas.....	34
3.1.2 Sistema de coordenadas global.....	34
3.1.3 Sistema de coordenadas local.....	35
3.1.4 Descrição dos brônquios no espaço.....	35
3.1.5 Sistema de coordenadas adotado .....	35
3.1.6 Divisão do sistema coordenado em oito quadrantes .....	37
3.2 Análise dos ângulos.....	37
3.2.1 Análise dos ângulos das projeções no primeiro quadrante .....	38
3.2.2 Análise dos ângulos das projeções no segundo quadrante.....	41
3.2.3 Análise dos ângulos das projeções no terceiro quadrante.....	42
3.2.4 Análise dos ângulos das projeções no quarto quadrante.....	42
3.2.5 Análise dos ângulos das projeções no quinto quadrante.....	42
3.2.6 Análise dos ângulos das projeções no sexto quadrante .....	42
3.2.7 Análise dos ângulos das projeções no sétimo quadrante .....	43
3.2.8 Análise dos ângulos das projeções no oitavo quadrante.....	43
3.3 Determinação das coordenadas dos segmentos da árvore brônquica .....	43
3.3.1 Determinação da árvore brônquica arbitrada a partir da literatura .....	44
3.3.2 Determinação das coordenadas da árvore brônquica a partir de um modelo físico.....	47
3.3.2.1 Dispositivo para medir coordenadas espaciais .....	48
3.3.2.2 Determinação das coordenadas dos segmentos da árvore brônquica.....	54
3.4 Determinação dos ângulos de projeção dos brônquios segmentares .....	55
3.4.1 Determinação de $\alpha$ .....	55
3.4.1.1 Primeiro quadrante .....	56
3.4.1.2 Segundo quadrante .....	56
3.4.1.3 Terceiro quadrante.....	56
3.4.1.4 Quarto quadrante .....	56
3.4.2 Determinação de $\beta$ .....	56
3.4.3 Determinação de $\lambda$ .....	57
3.4.4 Determinação de $\omega$ .....	58
3.5 Determinação dos ângulos de giro do dispositivo de drenagem postural .....	58
3.5.1 Ângulo de giro em relação ao eixo Y .....	58
3.5.2 Ângulo de giro em relação ao eixo X .....	58

3.5.3 Verificação dos ângulos de giro .....	59
3.6 Avaliação das incertezas de medição .....	59
3.6.1 Calibração do sistema de medição.....	59
3.6.2 Compensação dos efeitos sistemáticos .....	60
3.6.3 Determinação dos efeitos aleatórios (incerteza padrão) .....	60
3.6.4 Determinação das incertezas para as medidas indiretas nos brônquios segmentares .....	60
3.6.4.1 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta X)$ .....	60
3.6.4.2 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Y)$ .....	61
3.6.4.3 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Z)$ .....	61
3.6.4.4 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Y/ \Delta X)$ ou $u(\text{tg}(\alpha))$ .....	61
3.6.4.5 Determinação da incerteza padrão $u(\text{Hip}XY)$ .....	61
3.6.4.6 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Z//\text{Hip}XY)$ ou $u(\text{tg}(\beta))$ .....	62
3.6.4.7 Determinação da incerteza padrão da hipotenusa definida por $\beta$ $u(\text{Hip}Z)$ .....	62
3.6.4.8 Determinação da incerteza padrão de $\alpha$ $u(\alpha)$ .....	63
3.6.4.9 Determinação da incerteza padrão de $\beta$ $u(\beta)$ .....	63
3.6.4.10 Determinação da incerteza padrão de $\omega$ $u(\omega)$ .....	63
3.6.4.11 Determinação da incerteza padrão de $\lambda$ $u(\lambda)$ .....	64
3.6.5 Expansão das incertezas padrão para 95% (U95%).....	64
3.7 Simulação do posicionamento dos brônquios segmentares .....	65
3.8 Desenvolvimento do dispositivo de drenagem postural .....	65
3.8.1 Mecanismo para efetuar a rotação .....	65
3.8.2 Dispositivo extra para alteração dos ângulos segundo um eixo paralelo a Y .....	66
3.8.3 Desenho do dispositivo de drenagem postural .....	67
3.8.4 Construção do protótipo do dispositivo para drenagem postural.....	68
3.8.5 Teste do protótipo.....	68
4 Resultados e Discussões .....	69
4.1 Árvore brônquica arbitrada.....	70
4.2 Modelo físico.....	71
4.2.1 Determinação do ângulo para coleta das coordenadas .....	71
4.2.2 Determinação das coordenadas da medição .....	73
4.2.3 Compensação dos efeitos sistemáticos .....	78
4.2.4 Desenho da árvore brônquica .....	80
4.2.5 Coordenadas dos brônquios segmentares .....	81
4.2.6 Determinação dos ângulos de projeção dos brônquios segmentares .....	82
4.2.7 Calibração do medidor de coordenadas .....	83
4.2.7.1 Eixo X.....	83
4.2.7.2 Para os eixos Y e Z.....	85
4.2.8 Determinação dos efeitos aleatórios da medição .....	86
4.2.9 Incertezas para medidas indiretas nos brônquios segmentares .....	88
4.2.10 Simulação do giro da árvore brônquica no AutoCAD release 2000®.....	99
4.3 Protótipo do dispositivo de drenagem postural .....	119
4.3.1 Mecanismo para girar o dispositivo de drenagem postural em relação ao eixo X.....	119
4.3.2 Mecanismo para girar o dispositivo de drenagem postural em relação ao eixo Y.....	119
4.3.3 Dispositivo extra para alteração dos ângulos segundo um eixo paralelo a Y .....	120
4.3.4 Testes do protótipo .....	121
4.3.4.1 Ângulos de rotação máximos atingidos em torno do eixo Y .....	121
4.3.4.2 Ângulos de rotação máximos atingidos em torno do eixo X .....	122
4.3.4.3 Paralelismo entre as três seções da mesa.....	122
4.3.4.4 Valores extremos dos dispositivos extra de rotação .....	123
4.3.4.5 Teste para a postura de drenagem para o segmento apical .....	123
5 Conclusões .....	128
6 Sugestões para estudos futuros .....	129
ABSTRACT .....	130
Referências bibliográficas .....	132
ANEXO A .....	136
A.1 Posturas de Drenagem .....	136
ANEXO B .....	137



## NOMENCLATURA

### Letras latinas

<i>u</i>	<i>Incerteza padrão [função da grandeza medida]</i>
<i>C</i>	<i>Correção parâmetro de correção do erro sistemático [função da grandeza medida]</i>
<i>q</i>	<i>Variável aleatória [função da grandeza medida]</i>
<i>n</i>	<i>Valor independente [adimensional]; coeficiente do diâmetro</i>
<i>s</i>	<i>Desvio padrão [função da grandeza medida]</i>
<i>m</i>	<i>Valor independente [adimensional]</i>
<i>p</i>	<i>Valor independente [adimensional]</i>
<i>CC</i>	<i>Correção combinada [função da grandeza medida]</i>
<i>C<sub>k</sub></i>	<i>Correção associada a k-ésima fonte de incerteza [função da grandeza medida]</i>
<i>X1</i>	<i>Variável aleatória estatisticamente independente incerteza [função da grandeza medida]</i>
<i>X2</i>	<i>Variável aleatória estatisticamente independente incerteza [função da grandeza medida]</i>
<i>K95%</i>	<i>Fator de abrangência [adimensional]</i>
<i>U95%</i>	<i>Incerteza expandida a 95% [função da grandeza medida]</i>
<i>G</i>	<i>Grandeza função de diversas outras [função da grandeza medida]</i>
<i>F( )</i>	<i>função [adimensional]</i>
<i>u(G)</i>	<i>Incerteza padrão da grandeza G [função da grandeza medida]</i>
<i>x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub></i>	<i>Grandezas de entrada [função da grandeza medida]</i>
<i>r(x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub>)</i>	<i>Coefficiente de correlação [adimensional]</i>
<i>X,Y,Z</i>	<i>Eixos coordenados [adimensional]</i>
<i>a</i>	<i>distância [mm]</i>
<i>b</i>	<i>distância [mm]</i>
<i>c</i>	<i>distância [mm]</i>
<i>d</i>	<i>distância [mm]</i>
<i>e</i>	<i>distância [mm]</i>
<i>f</i>	<i>distância [mm]</i>
<i>g</i>	<i>distância [mm]</i>

$XY, XZ, ZY$	<i>Plano do sistema de coordenadas</i>
$r$	<i>Razão entre vazões [adimensional]</i>
$d_0, d_1, d_2$	<i>Diâmetro bronquial [mm]</i>
$HipXY$	<i>Hipotenusa do triângulo definido por <math>\alpha</math> [mm]</i>
$HipZ$	<i>Hipotenusa do triângulo definido por <math>\beta</math> [mm]</i>
$Td$	<i>Tendência, estimativa do erro sistemático [função da grandeza medida]</i>
$T$	<i>Coefficiente de Student [adimensional]</i>
$R_e$	<i>Repetitividade [função da grandeza medida]</i>
$MI$	<i>Média [função da grandeza medida]</i>

### **Letras gregas**

$\Delta I_{máx}$	<i>Varição máxima de uma indicação [função da grandeza medida]</i>
$\mu$	<i>Média [função da grandeza medida]</i>
$\sigma$	<i>Desvio padrão [função da grandeza medida]</i>
$\nu_{ef}$	<i>grau de liberdade efetivo [adimensional]</i>
$\alpha$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\beta$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\lambda$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\omega$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\Lambda$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\Omega$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\Theta$	<i>Ângulo [grau]</i>
$\Delta$	<i>Acréscimo numa variável [adimensional]</i>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA.2.1 - Anatomia do sistema respiratório.....	19
FIGURA 2.2 – Desenho esquemático das vias aéreas .....	20
FIGURA 2.3 – Face costal dos pulmões direito e esquerdo.....	21
FIGURA 2.4 - Brônquio traqueal.....	22
FIGURA 2.5. - Tipos de fluxo.....	24
FIGURA 2.6 – Relação entre resistência e geração das vias aéreas .....	25
FIGURA 2.7- Relação entre resistência de vias aéreas e condutância e o volume pulmonar .....	26
FIGURA 3.1 - Desenho simplificado da bifurcação dos brônquios até a terceira geração.....	33
FIGURA 3.2 - Postura de drenagem.....	34
FIGURA 3.3 - Sistema de coordenadas global sobre o dispositivo .....	34
FIGURA 3.4 - Representação de um dos 18 sistemas de coordenadas locais .....	35
FIGURA 3.5 - Sistema de coordenadas esféricas .....	36
FIGURA 3.6 – Sentido positivo da rotação em torno dos eixos coordenados.....	36
FIGURA 3.7 - Quadrantes do sistema de coordenadas esféricas .....	37
FIGURA 3.8 - Ângulos das projeções no 1o quadrante .....	38
FIGURA 3.9 – Triângulos constituintes.....	38
FIGURA 3.10 – Posição do brônquio antes e após o giro de $90^\circ - \lambda$ .....	41
FIGURA 3.11 – Posição do brônquio antes e após o giros $90^\circ - \omega$ .....	41
FIGURA 3.12- Representação assimétrica da árvore brônquica.....	45
FIGURA 3.13 – Divisão bronquial ocorrendo no mesmo plano.....	46
FIGURA 3.14 – Modelo físico da árvore brônquica.....	48
FIGURA 3.15 – Dispositivo para medida das coordenadas espaciais. ....	49
FIGURA 3.16 – Dispositivo para medida das coordenadas espaciais após giro $(- )90^\circ$ .....	50
FIGURA 3.17 – Dispositivo para medida das coordenadas espaciais .....	51
FIGURA 3.18 – Detalhe das régua e da ponteira laser.....	51
FIGURA 3.19 – Detalhe do nivelamento do dispositivo .....	53
FIGURA 3.20 – Detalhe do alinhamento do pino roscado .....	53
FIGURA 3.21 Detalhe do alinhamento da traquéia .....	54
FIGURA 3.22 Detalhe da medição das coordenadas da traquéia .....	54
FIGURA 3.23 Detalhe da medição das coordenadas do brônquio principal esquerdo .....	55
FIGURA 3.24 Conceito do dispositivo para drenagem postural.....	65
FIGURA 3.25 Mecanismo para rotação em X .....	66
FIGURA 3.26 Mecanismo para rotação em Y .....	66
FIGURA 3.27 Mecanismo extra para rotação num eixo paralelo a Y .....	67
FIGURA 3.28 Desenho do dispositivo para drenagem postural .....	67
FIGURA 4.1 Representação unifilar (à esquerda) e virtual (à direita) da árvore brônquica arbitrada..	71
FIGURA 4.2 Árvore brônquica unifilar gerada com as médias das seis medições e o modelo físico na mesma orientação.....	80
FIGURA 4.3 Árvore brônquica unifilar girada de $(+)30^\circ$ em relação ao eixo X e o modelo físico na mesma orientação.....	81
FIGURA 4.4 Desenho unifilar da árvore brônquica .....	100
FIGURA 4.5 Rotação do brônquio segmentar 1D em Y de $(+)55^\circ$ e em X de $(-)1^\circ$ .....	101
FIGURA 4.6 Rotação do brônquio segmentar 2D .....	102
FIGURA 4.7 Rotação do brônquio segmentar 3D em Y de $(+)10^\circ$ e em X de $(-)20^\circ$ .....	103
FIGURA 4.8 Rotação do brônquio segmentar 4D em Y de $(-)24^\circ$ e em X de $(-)42^\circ$ .....	104
FIGURA 4.9 Rotação do brônquio segmentar 5D em Y de $(-)39^\circ$ e em X de $(-)17^\circ$ .....	105
FIGURA 4.10 Rotação do brônquio segmentar 6D em Y de $(+)39^\circ$ e em X de $(+)69^\circ$ .....	106
FIGURA 4.11 Rotação do brônquio segmentar 7D em Y de $(-)16^\circ$ e em X de $(+) 23^\circ$ .....	107
FIGURA 4.12 Rotação do brônquio segmentar 8D em Y de $(-)68^\circ$ e em X de $(+)33^\circ$ .....	108
FIGURA 4.13 Rotação do brônquio segmentar 9D em Y de $(-)47^\circ$ e em X de $(-)42^\circ$ .....	109

FIGURA 4.14 Rotação do brônquio segmentar 10D em Y de (-)71° e em X de (-)12° .....	110
FIGURA 4.15 Rotação do brônquio segmentar 1-2E em Y de (+)72° e em X de (-)20° .....	111
FIGURA 4.16 Rotação do brônquio segmentar 3E em Y de (+)66° e em X de (+)23° .....	112
FIGURA 4.17 Rotação do brônquio segmentar 4E em Y de (+)35° e em X de (+)27° .....	113
FIGURA 4.18 Rotação do brônquio segmentar 5E em Y de (-)69° e em X de (+)26° .....	114
FIGURA 4.19 Rotação do brônquio segmentar 6E em Y de (-)65° e em X de (-)11° .....	115
FIGURA 4.20 Rotação do brônquio segmentar 7-8E em Y de (-)21° e em X de (+)22° .....	116
FIGURA 4.21 Rotação do brônquio segmentar 9E em Y de (-)81° e em X de (+)38° .....	117
FIGURA 4.22 Rotação do brônquio segmentar 10E em Y de (-)64° e em X de (+)0,8° .....	118
FIGURA 4.23 Protótipo do dispositivo de drenagem postural .....	119
FIGURA 4.24 Mecanismo para girar o protótipo em torno do eixo X .....	119
FIGURA 4.25 Mecanismo para girar o protótipo em torno do eixo Y .....	120
FIGURA 4.26 Mecanismo para girar as extremidades do protótipo em torno de um eixo paralelo a Y .....	120
FIGURA 4.27 Rotação de (-)45° em relação ao eixo Y .....	121
FIGURA 4.28 Rotação de 50° em relação ao eixo Y .....	121
FIGURA 4.29 Rotação de (-)23° em relação ao eixo Y .....	122
FIGURA 4.30 Rotação de (+)21° em relação ao eixo Y .....	122
FIGURA 4.31 Paralelismo das seções mesa .....	123
FIGURA 4.33 Combinação dos ângulos de giro do dispositivo e do sistema extra .....	124
FIGURA 4.34 Somente o giro do dispositivo .....	124
FIGURA 4.35 ângulo de giro calculado (+)55° .....	125
FIGURA 4.36 Postura de drenagem para os segmentos posteriores .....	125
FIGURA 4.37 Configuração mista .....	126
FIGURA 4.38 Postura de drenagem para os segmentos anteriores .....	126
FIGURA 4.39 Configuração simples .....	126
FIGURA 4.40 Postura de drenagem para o lobo médio direito .....	127
FIGURA 4.41 Configuração simples .....	127

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1. – Curva de erros do medidor de coordenadas para o eixo X.....	84
GRÁFICO 4.2. – Curva de erros do medidor de coordenadas para os eixos Y e Z.....	86

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 2.1 Segmentação da árvore brônquica .....	23
QUADRO 2.2 Principais posições para drenagem postural .....	31
TABELA 3.1 Modelo assimétrico da árvore brônquica, derivado da medição de um modelo .....	45
TABELA 4.1 Ângulos de bifurcação dos brônquios até a terceira geração .....	70
TABELA 4.2 Determinação dos ângulos para a coleta das coordenadas .....	72
TABELA 4.3 Primeiro conjunto de medição das coordenadas do pulmão direito .....	73
TABELA 4.4 Segundo conjunto de medição das coordenadas do pulmão direito .....	74
TABELA 4.5 Primeiro conjunto de medição das coordenadas do pulmão esquerdo .....	75
TABELA 4.6 Segundo conjunto de medição das coordenadas do pulmão esquerdo .....	76
TABELA 4.7 Média das medições das coordenadas .....	77
TABELA 4.8 Coordenadas após os efeitos sistemáticos serem compensados .....	79
TABELA 4.9 Coordenadas após giro de 30° em X .....	82
TABELA 4.10 Ângulos definidores, de projeção, e de rotação dos brônquios segmentares .....	83
TABELA 4.11 Medições e cálculo da média .....	83
TABELA 4.12 Cálculo da tendência e repetitividade .....	84
TABELA 4.13 Medições e cálculo da média .....	85
TABELA 4.14 Cálculo da tendência e repetitividade .....	85
TABELA 4.15 Cálculo da tendência e repetitividade .....	87
TABELA 4.16 Incertezas das medidas indiretas e grau de liberdade efetivo .....	88
TABELA 4.17 Incertezas das medidas indiretas adimensionais e grau de liberdade efetivo .....	89
TABELA 4.18 Incertezas padrão $u(\operatorname{tg}(\alpha))$ e $u(\alpha)$ a 68% .....	90
TABELA 4.19 Incertezas padrão $u(\operatorname{tg}(\alpha))$ e $u(\alpha)$ a 95% .....	90
TABELA 4.20 Incertezas padrão $u(\operatorname{tg}(\beta))$ e $u(\beta)$ a 68% .....	91
TABELA 4.21 Incertezas padrão $u(\operatorname{tg}(\beta))$ e $u(\beta)$ a 95% .....	91
TABELA 4.22 Incerteza padrão $u(\cos(\omega))$ 68%, grau de liberdade efetivo e a faixa de variação do co-seno .....	92
TABELA 4.23 Incerteza padrão $u(\omega)$ 68% .....	93
TABELA 4.24 Incerteza padrão $u(\cos(\omega))$ 95% e a faixa de variação do co-seno .....	94
TABELA 4.25 Incerteza padrão $u(\omega)$ 95% .....	95
TABELA 4.26 Incerteza padrão $u(\operatorname{tg}(\lambda))$ 68%, grau de liberdade efetivo e a faixa de variação da tangente .....	96
TABELA 4.27 Incerteza padrão $u(\lambda)$ 68% .....	97
TABELA 4.28 Incerteza padrão $u(\operatorname{tg}(\lambda))$ 95% e a faixa de variação da tangente .....	98
TABELA 4.29 Incerteza padrão $u(\lambda)$ 95% .....	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
ICB	Instituto de Ciências Biológicas
DP	Drenagem Postural
CRF	Capacidade Residual Funcional
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
RF	Rádio Frequência
SM	Sistema de Medição
RM	Resultado de Medição
RB	Resultado Base
IM	Incerteza de Medição
FI	Faixa de Indicação
FM	Faixa de Medição
VD	Valor de Divisão de Escala
R	Resolução
$E_s$	Erro Sistemático
VVC	Valor Verdadeiro Convencional
CR <sub>n</sub>	Característica de Resposta Nominal
CR <sub>r</sub>	Característica de Resposta Real
CE	Curva de Erro
E <sub>max</sub>	Erro Máximo
MDF	Medium Density Fiberboard
PUC-MG	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
FCMMG	Faculdade de Ciências Médicas de Minas Gerais
Uni-BH	Centro Universitário de Belo Horizonte

## RESUMO

A drenagem postural, também denominada drenagem brônquica ou drenagem postural broncosseletiva, consiste numa técnica empregada na fisioterapia respiratória para drenar secreções pulmonares da árvore brônquica, através da ação da força da gravidade. Anatomicamente, os brônquios se dividem em aproximadamente 25 gerações, tendo uma disposição estrutural semelhante à configuração de uma árvore em posição invertida. Assim, a técnica de drenagem postural busca posicionar o paciente de tal forma que as secreções pulmonares naturalmente fluam, pela ação da força gravitacional, em direção à região mais superior da árvore brônquica e, desse modo, possam ser eliminadas. Esse procedimento normalmente é feito considerando-se os brônquios da terceira geração para drenagem dos segmentos pulmonares. O presente trabalho visou ao desenvolvimento e à avaliação de um protótipo mecânico capaz de posicionar o paciente nos diversos ângulos conhecidos favoráveis à drenagem postural. Para tanto, criou-se uma metodologia, através do desenvolvimento de um conjunto de equações para relacionar os ângulos da árvore brônquica aos ângulos de giro do dispositivo, utilizando-se um sistema de coordenadas global, posicionado nos eixos de giro do protótipo, e 18 sistemas de coordenadas locais, paralelos ao sistema global, cujas origens eram a base de cada brônquio segmentar. O protótipo foi construído utilizando-se estruturas de madeira, pranchas de MDF, perfis de aço e alumínio, e partes adaptadas de outros equipamentos. Uma vez que não foram encontradas informações específicas sobre a posição espacial dos diversos segmentos brônquicos e, portanto, sobre os ângulos da árvore brônquica, optou-se pelo levantamento desses dados, através de duas técnicas. Na primeira, foram utilizadas simplificações de modelos matemáticos obtidos na literatura, baseados no estudo de escoamento de secreção pulmonar, a partir do qual, foi arbitrada uma árvore brônquica e gerado um modelo tridimensional virtual, com o uso do software AUTOCAD realase 2000®. Na segunda técnica, os dados das posições espaciais dos brônquios foram obtidos a partir da medição direta de um modelo físico, gerado de forma semelhante ao modelo tridimensional virtual. Com o propósito de se avaliar a metodologia desenvolvida para relacionar os ângulos da árvore brônquica aos ângulos de giro do dispositivo, foi feita uma simulação das posições de drenagem dos brônquios segmentares,



através do posicionamento angular do desenho tridimensional da árvore brônquica, cujas coordenadas foram obtidas do modelo físico, gerando resultados que foram considerados satisfatórios. No caso do protótipo mecânico, avaliou-se inicialmente a possibilidade do equipamento atender a uma seqüência de posições convencionalmente utilizadas nos procedimentos fisioterápicos de drenagem postural, indicados pela literatura (Pryor e Webber, 2002). Posteriormente, foi feita a simulação, pelos fisioterapeutas, utilizando-se algumas das posições angulares obtidas através da metodologia desenvolvida. Nesse caso, nem todas as posições angulares foram atingidas por limitações de curso. Acredita-se que, a partir de ajustes no protótipo mecânico, essas posições poderão ser alcançadas. Simulou-se também a utilização do dispositivo extra, proposto pelos fisioterapeutas, combinado com os ângulos de giro do dispositivo de drenagem. Assim, verifica-se que é possível a utilização da metodologia desenvolvida para relacionar os ângulos da árvore brônquica aos ângulos de giro do dispositivo e a utilização do protótipo mecânico para facilitar e aprimorar os procedimentos da drenagem postural.

**Palavras-Chaves:** drenagem postural, secreção pulmonar, protótipo mecânico, equipamento.

# 1 INTRODUÇÃO

A drenagem postural (drenagem bronquial, drenagem postural broncosseletiva ou postura de drenagem) consiste em posicionar o paciente de modo a auxiliar o deslocamento de secreção na árvore brônquica, facilitada pela ação da gravidade (CIESLA, 1988).

A drenagem postural é uma técnica bastante utilizada pela fisioterapia respiratória, estudada inicialmente por William Ewart, em 1901. Recebeu muitas contribuições até 1945 (Bushnell, Jackson e Jackson e P. Nelson), mas adquiriu um maior respaldo científico apenas entre 1952 e 1953, ao ser descrita por Kane a localização dos segmentos pulmonares em radiografias pósterio-anteriores do tórax e ao observar que, quanto mais corretamente se usava a ação da gravidade no brônquio que drenava, mais eficaz era a drenagem postural (MACKENZIE, 1988).

A principal fundamentação da drenagem postural é o princípio físico da ação da gravidade. A posição e o grau de inclinação a serem adotados durante a realização do procedimento irão variar de acordo com a área do pulmão a ser drenada (HUMBERSTONE, 1994).

A técnica considera a estrutura anatômica do sistema respiratório, constituído de vias aéreas superiores (nariz e boca, faringe, laringe) e inferiores, que incluem a traquéia, a qual se divide em brônquios principais, e, ao penetrarem nos pulmões, continuam se subdividindo em 16 gerações, favorecendo a troca gasosa para todos os lobos e segmentos pulmonares (RUPPED, 2000).

O posicionamento específico segmentar das vias respiratórias deve ser capaz de possibilitar que a gravidade atue na drenagem do excesso de secreção, fazendo com que esta se desloque das ramificações brônquicas segmentares para as lobares e, a partir destas, para os brônquios principais e a traquéia, para finalmente ser eliminada pela tosse ou técnica de aspiração (COSTA, 1999).

Os benefícios clínicos das posições de drenagem assistidas pela gravidade, reconhecidas pela American Thoracic Society, realizadas isoladamente ou associadas a outras técnicas como vibração, percussão e técnica de expiração forçada, com intuito de acelerar o deslocamento da secreção até as vias aéreas proximais, podem ser indicados por avaliações individuais (PRYOR e WEBBER, 2002).

A proposta do presente trabalho consiste no projeto e na construção de um dispositivo capaz de posicionar o paciente nos diversos ângulos conhecidos, favoráveis à drenagem postural, bem como, criar a metodologia para relacionar os ângulos da árvore brônquica aos ângulos de giro do dispositivo.

## **1.1 Justificativa**

A fisioterapia tem um importante papel na manutenção das vias aéreas e dos pulmões desobstruídos, principalmente, quando patologias de gênese hipersecretiva estão envolvidas ou quando disfunções neuromusculares tornam a tosse ineficaz. As técnicas desobstrutivas também fazem parte dos programas pré e pós-operatórios de cirurgias cardíacas, torácicas e abdominais, com objetivo profilático contra pneumonias e atelectasias.

Para que haja a drenagem da secreção patológica, o paciente deverá ser mantido em posição capaz de facilitar o fluxo (vazão) da mesma, das ramificações brônquicas segmentares para as lobares. A partir dessas ramificações, a secreção segue para os brônquios principais e a traquéia e, finalmente, para fora do sistema respiratório (MACCAGNO, 1999).

Além da drenagem das secreções pulmonares, a drenagem postural também poderá promover melhora da relação ventilação/perfusão (V/Q). Com a simples manobra de virar o paciente da posição de decúbito ventral para lateral ou vice-versa, observa-se melhora na oxigenação (CIESLA, 1988; COSTA, 1999).

Apesar das muitas considerações sobre a drenagem postural, nota-se a carência de afirmações pautadas em fundamentos científicos, dentre os quais o tempo real em que o paciente deverá permanecer numa determinada posição. Contudo, desde 1970, alguns estudos demonstraram a validade desta técnica, especialmente em pacientes com muco viscosidade e com infecção do trato respiratório, marcando as secreções pulmonares com partículas radioativas e medindo a mobilidade dessas secreções durante as inclinações, que variam de 0° a 25° (WONG, 1977).

Assim, o projeto e a construção de um dispositivo capaz de posicionar o paciente nos diversos ângulos conhecidos, favoráveis à drenagem brônquica, têm grande significado, pois o dispositivo também servirá de ferramenta para novas pesquisas, nas quais se busquem a otimização desses ângulos e até a determinação de novos.

As contribuições deste estudo, portanto, poderão beneficiar tanto os profissionais de saúde, especificamente, os fisioterapeutas respiratórios, no manejo de pacientes com doenças respiratórias secretivas, como a sociedade em geral, pois o produto oferecido auxilia tratamentos específicos a um baixo custo. Além disso, acontece um enriquecimento pessoal, pois os conhecimentos construídos irão favorecer a inclusão do profissional de Engenharia na solução de problemas da Medicina.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Desenvolver a metodologia para relacionar os ângulos da árvore brônquica aos ângulos de giro de um dispositivo mecânico capaz de posicionar o paciente nos ângulos que permitam a execução da técnica de drenagem postural.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Fazer o levantamento básico dos ângulos para a árvore brônquica até a terceira geração.

Conceber um dispositivo capaz de medir os ângulos de um modelo de árvore brônquica.

Desenvolver e construir um protótipo do dispositivo de drenagem postural.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações sobre o sistema respiratório

As vias aéreas consistem de uma série de tubos, os quais se tornam mais estreitos, curtos e numerosos em direção à periferia dos pulmões (WEST, 2002) FIG. 2.1.

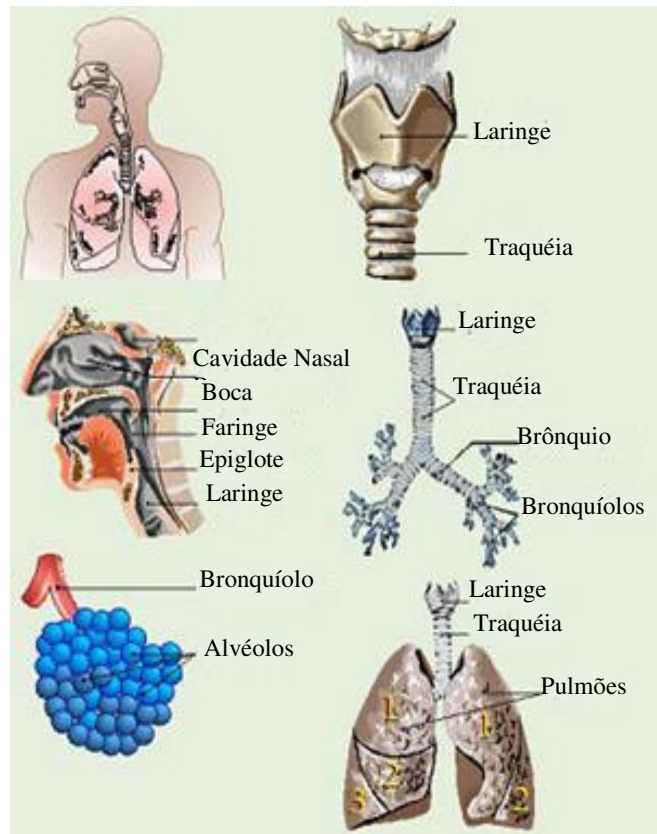


FIGURA 2.1 - Anatomia do sistema respiratório

FONTE - Adaptado de CARTER, 2005.

A traquéia, considerada a geração zero da árvore respiratória, divide-se em brônquios principais direito e esquerdo, os quais se subdividem em brônquios lobares, segmentares, bronquíolos terminais (16<sup>a</sup> geração) e respiratórios, ductos alveolares, sacos alveolares e alvéolos (23<sup>a</sup> geração). A diferença entre brônquios e bronquíolos consiste na presença de cartilagem na parede dos primeiros. A região compreendida entre a boca ou nariz até os bronquíolos terminais é denominada de zona condutora ou espaço morto anômico. A região a partir dos bronquíolos respiratórios, os quais contêm alvéolos em suas paredes, é denominada de zona respiratória (WEST, 2002) (FIG. 2.2).

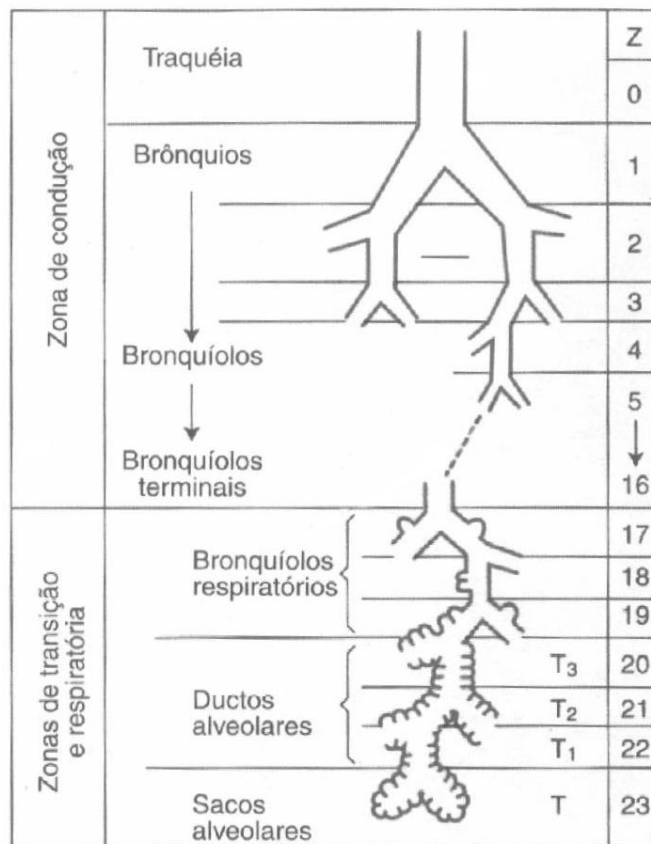


FIGURA 2.2 – Desenho esquemático das vias aéreas. BR, brônquio; BL, bronquíolo; BLT, bronquíolo terminal; BLR, bronquíolo respiratório; CA, conduto alveolar; SA, saco alveolar; URT, unidade respiratória.

FONTE – WEST, 2002.

### 2.1.1 Pulmões e segmentação pulmonar

Os pulmões apresentam uma forma cônica, denominada superiormente de ápice e inferiormente de base, e possuem três faces, diafragmática, costal e mediastinal. A superfície mediastinal apresenta uma concavidade, a qual acomoda o pericárdio e o coração e uma leve depressão, denominada de região hilar, local de entrada e saída dos vasos pulmonares e entrada dos brônquios principais direito e esquerdo.

Os pulmões dividem-se em lobos e, seqüencialmente, em segmentos broncopulmonares. O pulmão direito é dividido em lobo superior, médio e inferior, por duas fissuras interlobares, e o esquerdo em superior e inferior, por uma fissura interlobar.

A fissura oblíqua divide o pulmão esquerdo em lobos superior e inferior, nas projeções anterior e posterior. Diferentemente, essa fissura divide o pulmão direito em lobos superior e

inferior, na projeção posterior, e, em lobos médio e inferior, na projeção anterior. A delimitação entre os lobos superior e médio é feita pela fissura transversa, presente somente no pulmão direito. A FIG. 2.3 ilustra os lobos pulmonares nos pulmões direito e esquerdo.

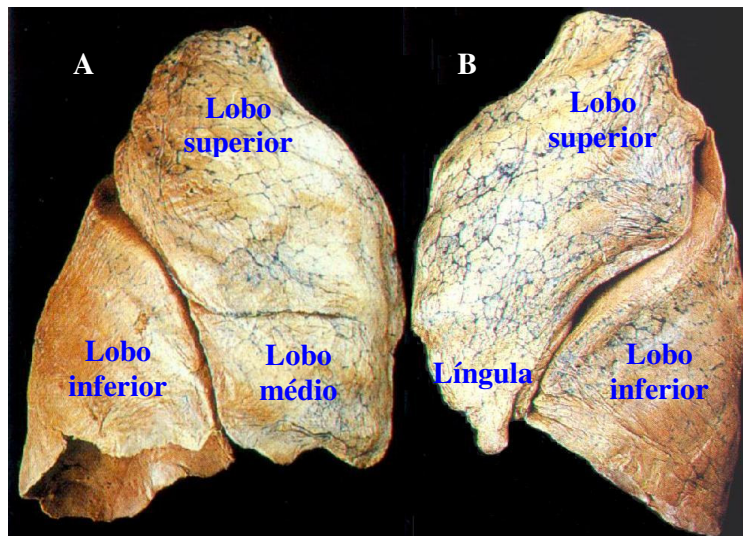


FIGURA 2.3 – Face costal dos pulmões direito e esquerdo: (A) Lobos superior, médio e inferior do pulmão direito e delimitados pelas fissuras transversa e oblíqua, e (B) Lobos superior e inferior do pulmão esquerdo, delimitados pela fissura oblíqua.

FONTE – GOSLING e col., 1992, p. 2.14 e 2.15

Os lobos pulmonares são subdivididos em segmentos broncopulmonares, os quais são supridos por um brônquio segmentar, artéria e veia. Cada segmento recebe a denominação do brônquio segmentar que o supre. A anatomia dos brônquios segmentares é sujeita à variação, sendo a mais comum a origem do brônquio segmentar apical, especialmente do lado direito, o qual nasce diretamente da traquéia FIG. 2.4.

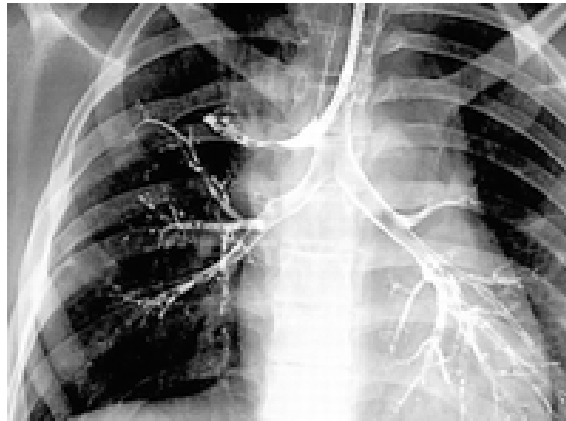


FIGURA 2.4 - Brônquio traqueal. Observar a origem do brônquio do lobo superior a partir da traquéia, visualizado em um exame de broncografia.

FONTE - BERROCAL e col., 2003.

Considerando-se os dois pulmões, existem 2 brônquios principais e 5 brônquios lobares, os quais dão origem a 18 brônquios segmentares, que ventilam 20 segmentos broncopulmonares. A fusão de dois brônquios segmentares nos lobos superior (brônquio segmentar ápico-posterior) e inferior (brônquio segmentar ântero-medial) do pulmão esquerdo justifica o menor número de segmentos broncopulmonares deste lado.

A traquéia se divide em nível da 5ª ou 6ª vértebra torácica, em brônquios principal direito e esquerdo. Esses brônquios são assimétricos, sendo o brônquio principal esquerdo mais horizontalizado, longo e fino. O QUADRO 2.1 apresenta a segmentação da árvore brônquica.



QUADRO 2.1

Segmentação da árvore brônquica

Brônquio principal	Brônquio lobar	Brônquio segmentar
Brônquio principal D	Brônquio lobar superior D	1-Brônquio segmentar apical
		2-Brônquio segmentar posterior
		3-Brônquio segmentar anterior
	Brônquio lobar médio	4-Brônquio segmentar lateral
		5-Brônquio segmentar medial
	Brônquio lobar inferior D	6- Brônquio segmentar Apical
		7- Brônquio segmentar basal medial
		8- Brônquio segmentar basal anterior
		9-Brônquio segmentar basal lateral
		10- Brônquio segmentar basal posterior
Brônquio principal	Brônquio lobar	Brônquio segmentar
Brônquio principal E	Brônquio lobar superior E (Ramo ascendente)	1-2-Brônquio segmentar ápico-posterior
		3-Brônquio segmentar posterior
	(Ramo descendente)	4-Brônquio segmentar lingular superior
		5-Brônquio segmentar lingular inferior
	Brônquio lobar inferior E	6- Brônquio segmentar apical
		7-8 Brônquio segmentar ântero-medial
		9-Brônquio segmentar basal lateral
		10- Brônquio segmentar basal posterior

### 2.1.2 Resistências à ventilação

As impedâncias mecânicas oferecidas pelos pulmões (resistência das vias aéreas e complacência pulmonar) e parede torácica, durante a respiração, são vencidas pelo trabalho desenvolvido pelos músculos inspiratórios (WEST, 2002). A energia potencial armazenada nas estruturas elásticas durante a inspiração é, normalmente, suficiente para superar a resistência ao fluxo (vazão) aéreo durante a expiração. Trabalho mecânico expiratório adicional é necessário, quando as propriedades mecânicas do aparelho respiratório encontram-se alteradas por alguma doença ou durante expiração forçada.

Para que haja fluxo (vazão) através das vias aéreas, é necessário que haja diferença de pressão entre a atmosfera e a pressão alveolar. A diferença de pressão depende da velocidade e do padrão de fluxo (vazão). Em presença de baixas taxas de fluxo (vazão), ele é laminar - FIG. 2.5-A. Esse tipo de fluxo (vazão) ocorre nas vias aéreas de pequeno calibre. Quando a taxa de fluxo (vazão) aumenta muito, ele se torna turbulento - FIG. 2.5-C. Esse tipo de fluxo (vazão) é encontrado na traquéia. Entretanto, na maior parte da via aérea, predomina o fluxo (vazão) transacional - FIG. 2.5-B.

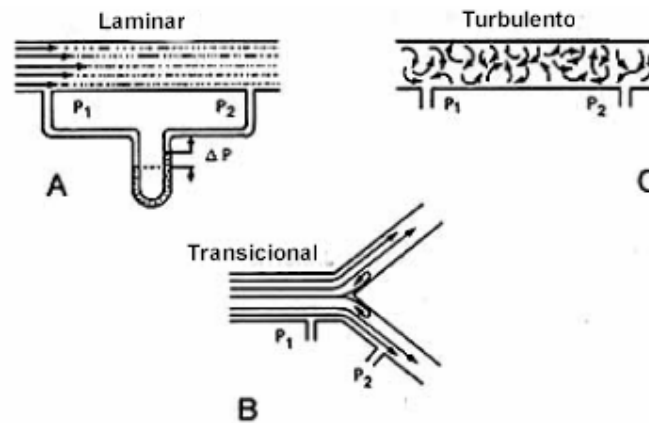


FIGURA. 2.5. - Tipos de fluxo (vazão): fluxo (vazão) laminar (A), transacional (B) e turbulento (C).

FONTE - WEST, 2002.

A maior resistência das vias aéreas se encontra em nível dos brônquios segmentares - FIG. 2.6. A grande ramificação das vias aéreas aumenta a área de secção transversa e as vias aéreas de pequeno calibre contribuem muito pouco para a resistência total (20 %).

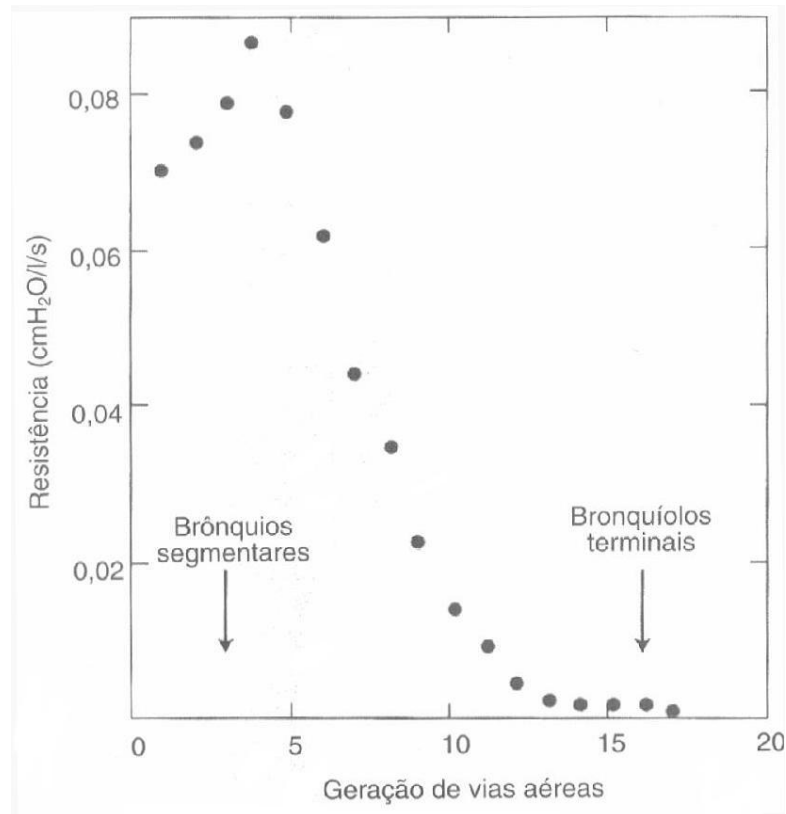


FIGURA 2.6 – Relação entre resistência e geração das vias aéreas. A maior resistência ocorre nos brônquios segmentares.

FONTE - WEST, 2002.

O volume pulmonar tem efeito importante sobre as vias aéreas - FIG 2.7. Em volumes pulmonares pequenos, a resistência das vias aéreas aumenta muito. Similarmente, a contração da musculatura lisa da parede das vias aéreas, a viscosidade e a densidade dos gases também aumentam a resistência ao fluxo (vazão) de ar.

### Mecânica da Respiração

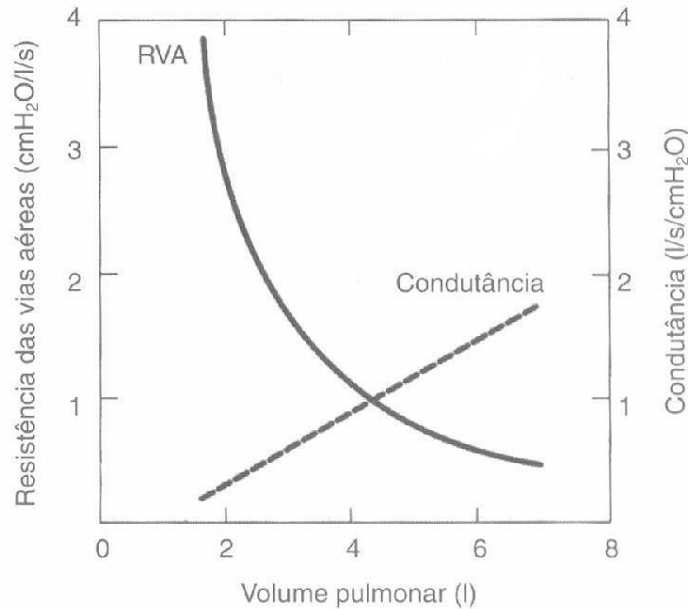


FIGURA 2.7 - Relação entre resistência de vias aéreas e condutância e o volume pulmonar.  
FONTE - WEST, 2002.

#### 2.1.3 Controle da ventilação pulmonar

A ventilação pulmonar é monitorizada e ajustada constantemente para manter a pressão parcial de O<sub>2</sub> (PaO<sub>2</sub>) e pH dentro dos limites normais. Esta homeostasia requer sistema de sensores, mecanismos controladores centrais e um sistema efetor (WEST, 1992). Alterações humorais, carga mecânica, taxa metabólica e receptores estimulam o sistema respiratório, o qual se adapta a circunstâncias fisiológicas como o sono, o exercício, a altitude, bem como, alterações patológicas do sistema respiratório.

Os principais sensores respiratórios são: 1) quimiorreceptores periféricos, 2) quimiorreceptores centrais, 3) receptores intrapulmonares, e 4) mecanorreceptores dos músculos e da parede torácica.

Os quimiorreceptores periféricos localizam-se nas artérias aorta e carótida, sendo a última localização a mais importante em humanos. Sua estimulação ocorre quando reduz o pH, PaO<sub>2</sub> e aumenta da pressão parcial de CO<sub>2</sub> (PaCO<sub>2</sub>) (GONZÁLES e col., 1993). Os quimiorreceptores centrais estão localizados na região ventral do bulbo (BRUCE e CHERNIACK, 1992). O aumento da PaCO<sub>2</sub> ou H<sup>+</sup> nessa região inibem a ventilação.

Os receptores pulmonares estão presentes nas vias aéreas e no parênquima pulmonar. Os receptores das vias aéreas estão subdivididos em receptores de adaptação lenta e rápida. Os receptores de adaptação lenta, os quais estão localizados na musculatura lisa das vias aéreas causam relaxamento desta musculatura, promovendo dilatação das vias aéreas. Os receptores de adaptação rápida localizam-se no epitélio de revestimento das vias aéreas. São considerados receptores de irritação, respondendo a estímulos nocivos: gases tóxicos, deformação das vias aéreas, frio, calor, aumento da resistência ao fluxo (vazão) e redução da complacência pulmonar (SELLICK e col., 1970).

A participação desses receptores parece ser mais importante na detecção de disfunção das vias aéreas. Os receptores do parênquima pulmonar são denominados de receptores justacapilares, devido à localização próxima aos capilares, na parede alveolar. Esses receptores respondem a hiperinsuflação dos pulmões e a presença de estímulo químico na circulação. A respiração rápida e superficial, broncoconstrição, e o aumento de secreções nas vias aéreas também podem estimular esses receptores (COLERIDGE e COLERIDGE, 1984).

Os mecanorreceptores dos músculos ou parede do tórax respondem a alterações no comprimento, tensão ou movimento.

O controle respiratório central é dividido em controle do tronco cerebral (involuntário) e córtex cerebral (voluntário). O tronco cerebral é subdividido em centros pneumotáxico, apnêustico e bulbar.

Os centros pneumotáxico e apnêustico, situados na região superior e inferior da ponte, respectivamente, modulam a duração da inspiração (MITCHELEL e col., 1981; BERGER e col., 1977).

O centro bulbar é subdividido em grupos de neurônios dorsais (GND) e ventrais (GNV). O GND situa-se no bulbo e integra impulsos aferentes das vias aéreas superiores, quimiorreceptores periféricos e parênquima pulmonar. Este núcleo é um centro processador de reflexos respiratórios e o local de origem do estímulo respiratório rítmico normal. O GNV, composto de neurônios, ins e expiratórios, inerva os músculos respiratórios através dos nervos frênicos, intercostais e abdominais (BERGER e col., 1977). Sua ativação aumenta durante a expiração forçada, como ocorre durante o exercício ou aumento da resistência das vias aéreas (MARTIN e col., 1982). O córtex cerebral modula o controle ventilatório e pode influenciar ou sobrepor o controle involuntário em atividades como a tosse, a fala, o canto, etc. (MITHOEFFER, 1964).

O sistema efetor constitui-se de vias ascendentes e descendentes e músculos envolvidos na geração dos ciclos respiratórios. Os músculos respiratórios são músculos esqueléticos, cuja principal função é deslocar ritmicamente a parede do tórax para possibilitar a ventilação pulmonar e manter os gases sanguíneos arteriais dentro dos limites normais. Sua posição de repouso é determinada pelo equilíbrio entre as forças de recolhimento elástico dos pulmões e parede torácica. O controle de suas funções é voluntário e automático.

#### 2.1.4 Produção de muco, clearance e disfunção mucociliar das vias aéreas

A secreção brônquica é um fluido heterogêneo constituído de água (95%), eletrólitos, aminoácidos, açúcares e macromoléculas. O muco é uma porção mais específica da secreção brônquica, composta por uma suspensão coloidal de várias macromoléculas de glicoproteínas (RUBIN, 2002).

Essa secreção é produzida pelo pulmão assim que entra em contato com partículas inaladas, e seu transporte é feito das áreas periféricas para centrais e destas para a orofaringe. O muco é produzido na árvore brônquica por diferentes tipos de células: células serosas, células de Goblet, células claras e células alveolares do tipo II (VAN DER SCHANS, 1957).

Considerando que a ventilação expõe o trato respiratório, desde o nariz até os alvéolos, a diversas partículas orgânicas e inorgânicas e gases com ações potencialmente prejudiciais, uma série de mecanismos de defesa estão presentes para proteger as vias aéreas. Um deles é o aparelho mucociliar da árvore respiratória, cujas principais funções são: 1) serve como barreira mecânica e transporte de partículas; 2) age com um *screen* químico – o muco tem atividade anti-oxidante, e 3) tem função de barreira biológica, interagindo com microorganismos e células inflamatórias, prevenindo a aderência e a migração através do epitélio (WANNER, 1996).

Para POSTIAUX (2004), a função do muco é de proteger, hidratar e lubrificar o epitélio brônquico subjacente.

O muco brônquico é o material polissacarídeo que recobre a árvore respiratória e facilita a aderência das partículas inaladas, aderidas à parede. O muco respiratório possui propriedades reológicas e propriedades de superfície que desempenham o papel fundamental na depuração das vias aéreas. Duas camadas superpostas compõem o muco brônquico: uma fase sol, profunda, bastante fluida na qual batem os cílios vibráteis; uma fase gel, superficial, viscosa, não solúvel em água, que recobre a primeira, recebe e fixa os aerocontaminantes.

A produção diária de muco é cerca de 100ml. O muco é distribuído em uma fina camada de 5 microns, o que significa que há, no máximo, 2ml de muco em todo o aparelho respiratório em um dado momento (RUBIN, 2002).

A disfunção mucociliar pode ser definida como qualquer defeito no componente ciliar e secretório da interação mucociliar, que compromete as funções de defesa física, biológica e química do epitélio das vias aéreas (SALATHE e col., 1996).

As doenças das vias aéreas, tais como, asma, bronquite crônica, fibrose cística e bronquiectasia, constituem as principais desordens pulmonares associadas com a disfunção mucociliar. O tabagismo contribui de forma importante para essa disfunção. As principais complicações para o comprometimento mucociliar são: tosse, infecção respiratória e obstrução ao fluxo (vazão) aéreo.

## **2.2 Fisioterapia respiratória**

A fisioterapia respiratória tem como finalidade prevenir complicações respiratórias e melhorar a função pulmonar em casos de doenças pulmonares agudas ou crônicas. Os objetivos das intervenções fisioterápicas geralmente são: manter os movimentos normais do tórax, fortalecer a musculatura respiratória e acessória, mobilizar secreções, manter ou melhorar a tolerância à atividade física, estabelecer um padrão respiratório funcional e otimizar a função pulmonar. Para alcançar esses objetivos, muitas técnicas têm sido desenvolvidas atualmente e podem ser aplicadas de acordo com a necessidade de cada paciente (SCANLAN, WILKINS e STOLLER, 2000).

A fisioterapia respiratória é essencial no tratamento de pacientes com acometimentos respiratórios agudos e crônicos, sendo, então, a dificuldade em expectorar as secreções retidas o principal problema. Os pacientes que possuem essa dificuldade são chamados de hipersecretivos e apresentam um desequilíbrio na formação da secreção e na eliminação da mesma (clearance mucociliar), iniciando, assim, a retenção da secreção (SCANLAN, WILKINS e STOLLER, 2000).

Os pacientes com doenças das vias aéreas, como doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), asma, fibrose cística e discinesia ciliar primária desenvolvem uma predisposição considerável para o desenvolvimento de infecções pulmonares (CIESLA, 1988).

A retenção de secreção possibilita o aparecimento de infecções recorrentes e contribui para a progressão da doença base. Contribui, também, para a obstrução do fluxo (vazão) respiratório, reduzindo o diâmetro das vias aéreas, diminui a capacidade ventilatória do paciente e aumenta o trabalho dos músculos respiratórios. Desse modo, os pacientes apresentam limitações durante as atividades físicas (MACKENZIE, 1988; HUMBERSTONE, 1994; RUPPED, 2000).

Essa retenção ocorre pelo transporte ineficaz ou pelo aumento da quantidade de produção do muco. Os principais objetivos do tratamento em pacientes hipersecretivos são: alterar as propriedades reológicas do muco, reduzir o grau de obstrução das vias aéreas, aumentar a função do aparelho mucociliar e promover a expectoração. Aliado ao tratamento medicamentoso, a fisioterapia respiratória tem sido indicada com os objetivos de remover secreções de regiões periféricas para as mais centrais e promover sua remoção dos pulmões (KIM, 1997).

Algumas técnicas usadas por fisioterapeutas, como exercícios respiratórios, percussão manual e postura de drenagem são utilizadas desde o início do século (MACCAGNO, 1999; PRYOR e WEBBER, 2002).

### 2.2.1 Postura de drenagem

Um dos principais recursos utilizados pela fisioterapia respiratória, com o objetivo de aumentar o *clearance* mucociliar, é conhecido como postura de drenagem.

A postura de drenagem (DP) é uma das técnicas de higiene brônquica capaz de mobilizar secreções através do posicionamento do segmento lobar acometido por uma patologia de caráter obstrutivo. (SCANLAN, WILKINS e STOLLER, 2000).

A (DP) consiste numa técnica de posicionamento do paciente para drenar secreções pulmonares da árvore brônquica, de forma que o brônquio correspondente ao segmento broncopulmonar que será drenado permaneça na posição vertical. Nessa posição, o brônquio sofrerá a ação do princípio físico da ação da gravidade, que atuará favorecendo a aceleração do deslocamento da secreção em direção à região mais superior da árvore brônquica, podendo, assim, ser eliminada a secreção. (POSTIAUX, 2004).

Várias seqüências de posturas específicas, correspondentes aos diferentes segmentos broncopulmonares, têm sido recomendadas a partir da localização dos segmentos e/ou do trajeto dos brônquios segmentares. Entretanto, as posturas recomendadas parecem ser



baseadas simplesmente na localização do segmento e não na investigação clínica e anatômica (TAKAHASHI, 2004).

Na literatura, existem descrições do posicionamento adequado do paciente para se obter a drenagem postural (QUADRO 2.2) (ANEXO A.1).

QUADRO 2.2  
Principais posições para drenagem postural

Segmentos	Postura
Segmento Apical Anterior	Decúbito dorsal (Supino) com elevação de tronco a 45°
Segmento Apical Posterior	Inclinação anterior de tronco (flexão de tronco) a 45°
Segmentos Anteriores	Decúbito Dorsal (Supino)
Segmento Posterior Direito	Paciente rodado ¼ do decúbito ventral (DV) para o lado esquerdo
Segmento Posterior Esquerdo	Paciente rodado ¼ do decúbito ventral (DV) para o lado direito, com cabeça e ombro elevados a 45°.
Língua	Paciente rodado ¼ do decúbito dorsal com o lado direito apoiado em travesseiros e 30° de abaixamento da cabeça.
Lobo médio	Paciente rodado ¼ do decúbito dorsal c sobre lado esquerdo, apoiado com travesseiros atrás da coluna com a cabeça abaixada a 30°.
Segmento Anterior (Lobo Inferior)	Decúbito dorsal com elevação dos pés da cama de 45°, com travesseiros sob os joelhos.
Segmentos Posteriores (Lobo Inferior)	Decúbito Ventral com travesseiros sob o abdômen, cabeça abaixada a 45°.
Segmento Lateral Esquerdo (Lobo Inferior)	Decúbito Lateral direito com a cabeça abaixada 45°.
Segmento Lateral Direito (Lobo Inferior)	Decúbito Lateral esquerdo com a cabeça abaixada 45°.
Segmentos Superiores (Lobo Inferior)	Decúbito Ventral com travesseiro sob abdômen.

FONTE - KISNER e COLBY, (2004).

No entanto, não há na literatura relatos isolados da eficácia da postura de drenagem. Existem relatos da associação dessa técnica com outros recursos fisioterápicos (PRYOR e WEBBER, 2002).

THOMAS et al, (1995), em uma meta análise de 35 estudos, mostrou que a drenagem postural associada à técnica de percussão melhorou significativamente a mobilização de secreção. Dentre os efeitos clínicos demonstrados pela utilização dessa

técnica, destacam-se a melhora da capacidade residual funcional (CRF), a redução de atelectasias e outras complicações respiratórias, e a melhora da ventilação alveolar e do fluxo (vazão) sanguíneo no capilar pulmonar.

Poucos estudos anatômicos têm sido conduzidos em relação à postura de drenagem. Sabe-se que o padrão de ramificação dos brônquios subsegmentares varia muito, principalmente nos lobos superiores. Além disso, brônquios subsegmentares, em uma determinada posição, podem apresentar-se em posição negativa em relação ao plano horizontal (TAKAHASHI, 2004).

### 3 METODOLOGIA

O estudo desenvolvido para a concepção e a construção de um protótipo de um dispositivo mecânico, que favorecesse a realização da técnica de drenagem postural, consistiu na análise geométrica dos ângulos das projeções de cada brônquio segmentar, em um sistema de coordenadas local próprio, paralelo a um sistema de coordenadas global.

A origem de cada um dos 18 sistemas de coordenadas locais foi definida pela base de cada brônquio segmentar. O sistema de coordenadas global foi localizado nos eixos de giro do dispositivo mecânico, tendo seu eixo coordenado Z a mesma direção e sentido contrário à força gravitacional.

Uma vez estabelecidas as relações entre as diversas projeções, foi possível orientar o eixo longitudinal de cada brônquio segmentar a ser drenado, de maneira que ele ficasse na mesma direção da força gravitacional (eixo coordenado Z), tendo sua base, em relação ao eixo Z, uma cota inferior ao seu topo.

A FIG 3.1 apresenta a estrutura simplificada da árvore brônquica.

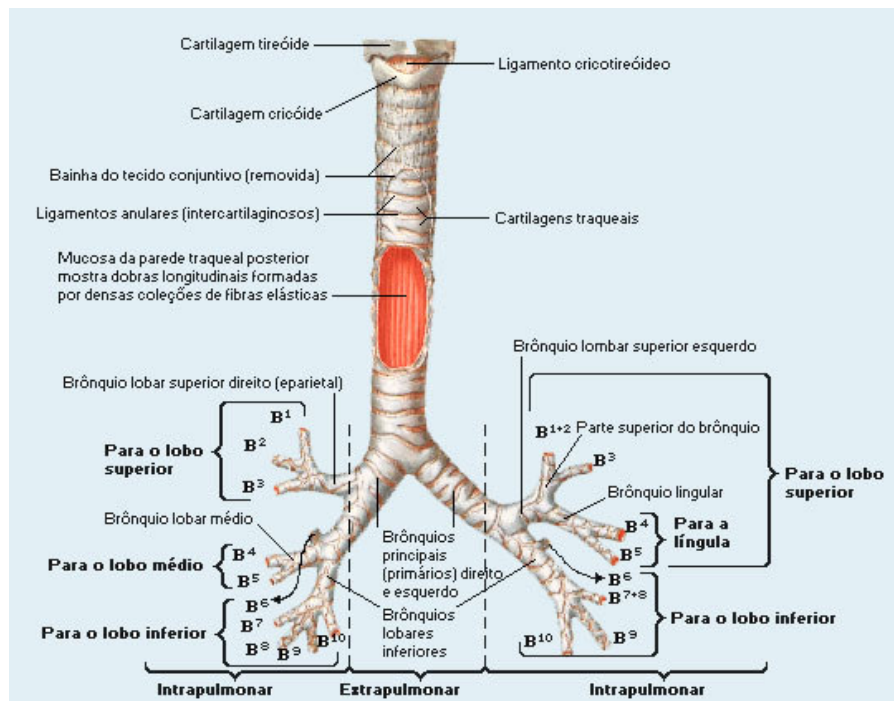


FIGURA 3.1 - Desenho simplificado da bifurcação dos brônquios até a terceira geração

FONTE - NETTER, 1996, p. 190.

A FIG 3.2 ilustra a árvore brônquica e sua disposição durante a realização de uma postura específica de drenagem brônquica.

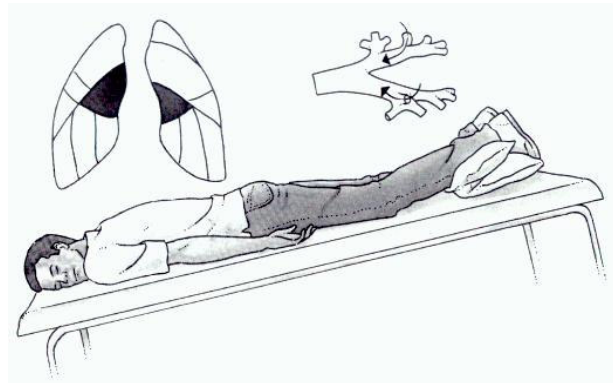


FIGURA 3.2 - Postura de drenagem do segmento broncopulmonar superior do lobo inferior de ambos os pulmões

FONTE - COSTA (1999) p. 67.

### 3.1 Convenções e simplificações adotadas

#### 3.1.2 Sistema de coordenadas global

Definiu-se um sistema de coordenadas global, localizado na mesa do dispositivo, com origem logo acima da interseção dos eixos de giro do mesmo, e seus eixos coordenados contidos no plano da mesa (XY) devem estar na mesma direção dos eixos de giro do dispositivo (FIG 3.3).

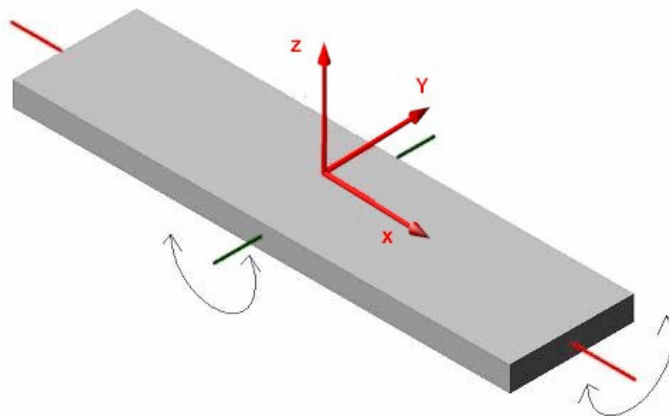


FIGURA 3.3 - Sistema de coordenadas global sobre o dispositivo

### 3.1.3 Sistema de coordenadas local

Definiu-se um sistema de coordenadas local, para cada um dos brônquios segmentares, paralelos ao sistema global e com origem localizada no encontro do brônquio segmentar com seu respectivo brônquio lobar (FIG 3.4).

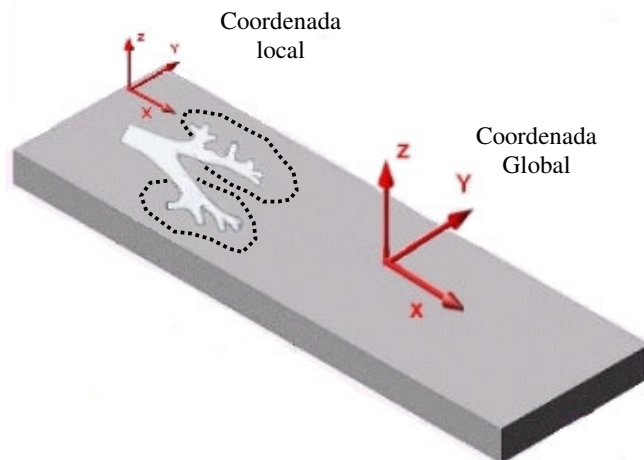


FIGURA 3.4 - Representação de um dos 18 sistemas de coordenadas locais, e do sistema de coordenadas global

### 3.1.4 Descrição dos brônquios no espaço

Para a drenagem postural, somente a orientação é relevante. Portanto, a localização espacial dos brônquios segmentares não foi considerada. Como os sistemas de coordenadas global e locais são paralelos, as projeções dos ângulos têm os mesmos valores angulares.

### 3.1.5 Sistema de coordenadas adotado

Foi utilizado o sistema de coordenadas esféricas para se representar a árvore brônquica e o dispositivo e, assim, determinar a orientação de cada brônquio - FIG 3.5.

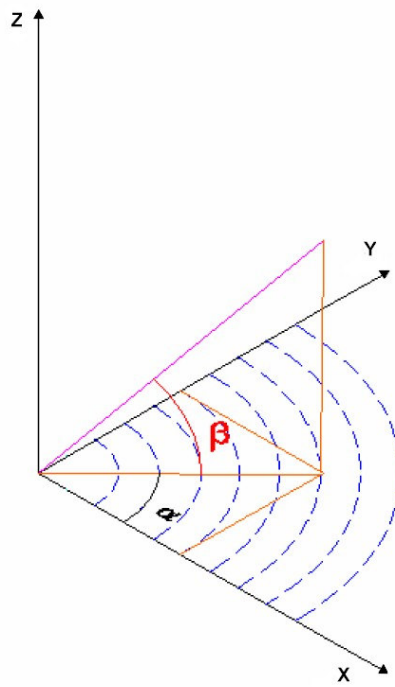


FIGURA 3.5 - Sistema de coordenadas esféricas

O sentido positivo de rotação em torno de cada eixo coordenado foi definido conforme a FIG 3.6. Assim, a indicação dos ângulos será feita considerando-se também seu sentido de rotação através dos sinais (+) e (-).

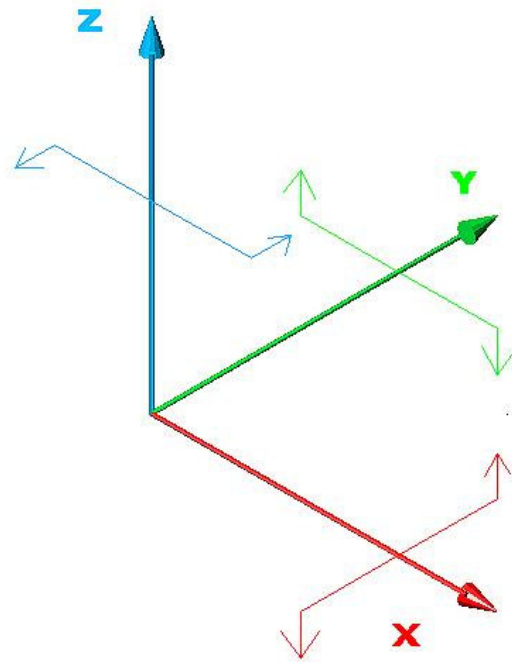


FIGURA 3.6 – Sentido positivo da rotação em torno dos eixos coordenados

### 3.1.6 Divisão do sistema coordenado em oito quadrantes

Como, à exceção do ângulo  $\alpha$  que está contido no plano XY, foram feitas deduções de equações angulares espaciais para as projeções, as fórmulas foram ajustadas para cada um dos oito quadrantes - FIG 3.7.

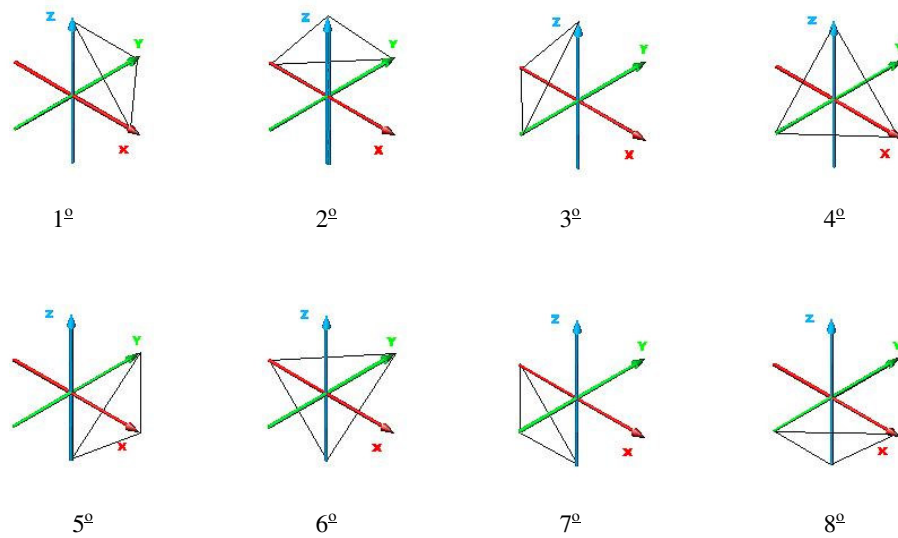


FIGURA 3.7 - Quadrantes do sistema de coordenadas esféricas

### 3.2 **Análise dos ângulos**

Primeiramente, procedeu-se a uma análise das projeções de um brônquio segmentar em seu sistema local de coordenadas, para se obter as relações geométricas que permitissem associar sua orientação espacial às suas projeções e, assim, relacioná-las ao dispositivo de drenagem postural.

Posteriormente, com as informações referentes às coordenadas esféricas da árvore brônquica, partindo-se da traquéia até que se atingisse os brônquios segmentares, foi possível desenhar esquematicamente cada segmento de maneira que se pôde tratar a imagem e se obteve os ângulos ideais de giro do dispositivo para se efetuar a drenagem postural.

### 3.2.1 Análise dos ângulos das projeções no primeiro quadrante

A FIG 3.8 representa um brônquio segmentar em seu sistema de coordenadas local. Neste quadrante, teremos:  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  e  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ .

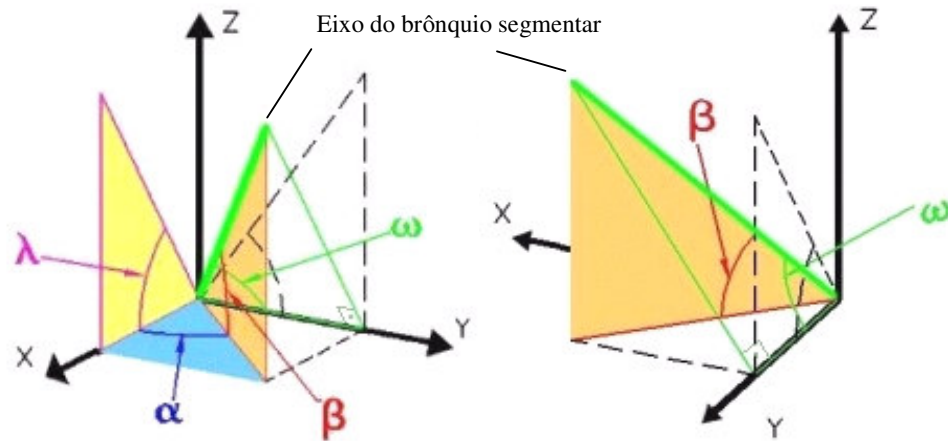


FIGURA 3.8 - Ângulos das projeções no 1º quadrante

Decompondo-se os triângulos da FIG 3.8 com seus respectivos lados, obteve-se a FIG 3.9.

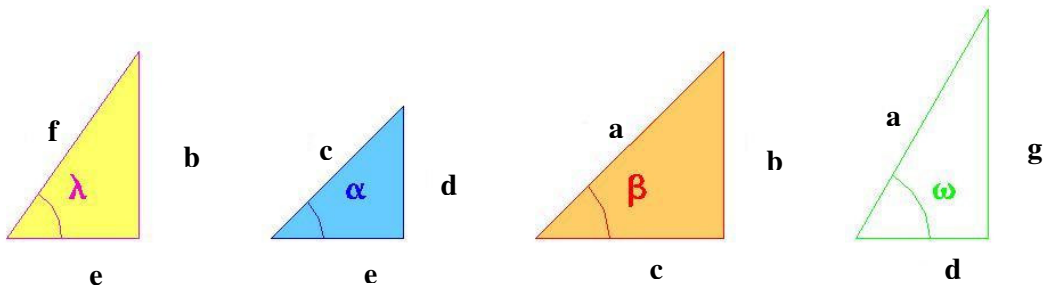


FIGURA 3.9 – Triângulos constituintes

Dessa figura, verificamos o seguinte:  $\lambda$  é o ângulo entre a projeção do segmento brônquial no plano XZ e o eixo X;  $\alpha$  é o ângulo entre a projeção do segmento brônquial no plano XY e o eixo X;  $\beta$  é o ângulo do segmento brônquial e sua projeção no plano XY;  $\omega$  é o ângulo entre o segmento brônquial e o eixo Y.

Ao se observar os triângulos retângulos da FIG 3.9, verificam-se as seguintes propriedades: a dimensão do cateto oposto ao ângulo  $\beta$  é igual à do ângulo  $\lambda$ ; o cateto



adjacente a  $\beta$  é a hipotenusa de  $\alpha$  e também de  $(90 - \alpha)$ ; o cateto adjacente a  $\alpha$  é igual ao adjacente a  $\lambda$ ; a hipotenusa de  $\beta$  é igual à hipotenusa de  $\omega$ ; o cateto adjacente a  $\omega$  é igual ao adjacente a  $(90 - \alpha)$ .

Para se determinar  $\lambda$ , através das relações trigonométricas, obteve-se: EQ. (3.1); EQ. (3.2); EQ. (3.3), e, eliminando-se a dimensão “c”, obteve-se a EQ. (3.4).

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{b}{c} \quad (3.1)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{e}{c} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{tg}(\lambda) = \frac{b}{e} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{tg}(\lambda) = \frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(\alpha)} \quad (3.4)$$

Calculou-se o arco da EQ. (3.4) e obteve-se  $\lambda$  EQ. (3.5).

$$\lambda = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{tg}\beta}{\cos(\alpha)}\right) \quad (3.5)$$

Para se determinar  $\omega$ , através das relações trigonométricas, obteve-se: EQ. (3.6); EQ. (3.7); EQ. (3.8) e, eliminando-se a dimensão “d”, a EQ. (3.9).

$$\cos(\beta) = \frac{c}{a} \quad (3.6)$$

$$\cos(\omega) = \frac{d}{a} \quad (3.7)$$

$$\cos(90^\circ - \alpha) = \frac{d}{c} \quad (3.8)$$

$$\cos(\omega) = \cos(\beta) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \quad (3.9)$$

Calculou-se o arco da EQ. (3.9) obteve-se  $\omega$  EQ. (3.10).

$$\omega = \arccos(\cos(\beta) \cdot \cos(90^\circ - \alpha)) \quad (3.10)$$

Como  $\lambda$  é o ângulo da projeção do brônquio que está sendo drenado, no plano XZ, para que esta projeção fique paralela ao eixo Z, é necessário que a mesma seja girada, em relação ao eixo Y, de  $\Lambda$  EQ (3.11), conforme o sentido convencional de rotação.

$$\Lambda = [-(90^\circ - \lambda)] \quad (3.11)$$

Após essa operação - FIG 3.10,  $\omega$  tornou-se o ângulo da projeção no plano YZ, e, para que essa projeção ficasse paralela ao eixo Z, foi necessário girá-la, no sentido anti-horário em relação ao eixo X, de  $\Omega$  EQ. (3.12). Concluídas as duas operações de giro - FIG 3.11, ambas as projeções, tanto no plano XZ quanto YZ, ficaram paralelas ao eixo Z e, conseqüentemente, o brônquio também ficou.

$$\Omega = (90^\circ - \omega). \quad (3.12)$$

Como o sistema global foi convenientemente locado paralelo aos sistemas locais, estes também foram os valores dos ângulos de giro do dispositivo. Assim, após girá-lo, pela origem do sistema de coordenadas global, os brônquios segmentares foram, cada um a sua vez, posicionados paralelamente ao eixo Z.

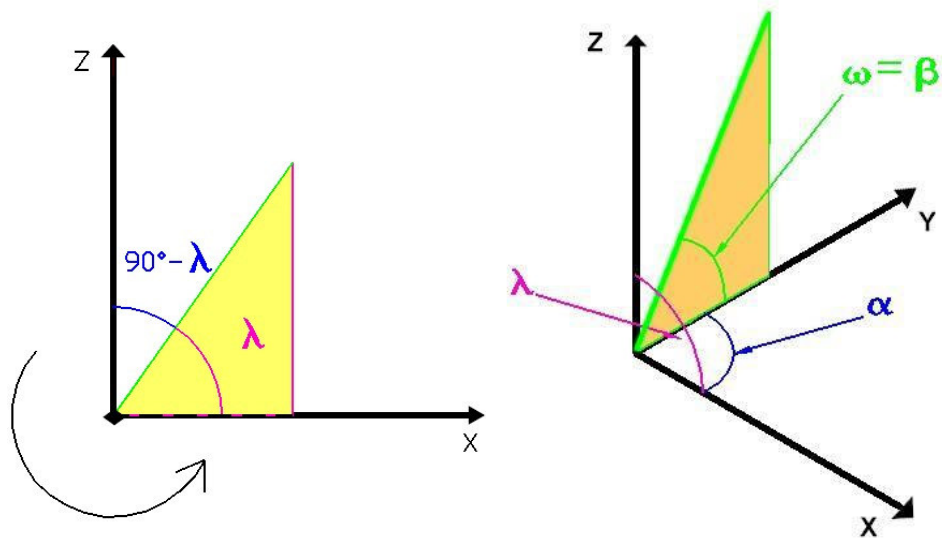


FIGURA 3.10 – Posição do brônquio antes e após o giro de  $90^\circ - \lambda$

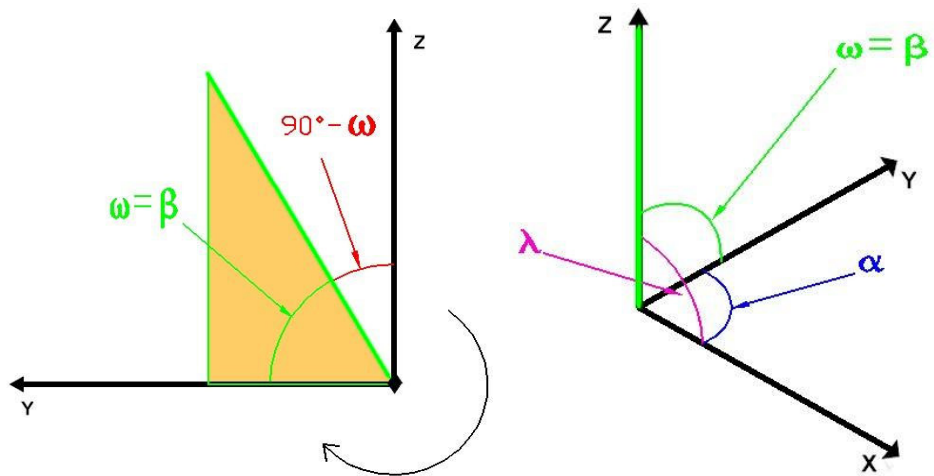


FIGURA 3.11 – Posição do brônquio antes e após o giro de  $90^\circ - \omega$ .

### 3.2.2 Análise dos ângulos das projeções no segundo quadrante

Neste quadrante, teremos:  $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  e  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.13), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\text{tg}(\beta)}{\cos(180 - \alpha)}\right) \quad (3.13)$$

### 3.2.3 Análise dos ângulos das projeções no terceiro quadrante

Neste quadrante, teremos:  $180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$  e  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.14), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(\alpha - 180^\circ)}\right) \quad (3.14)$$

### 3.2.4 Análise dos ângulos das projeções no quarto quadrante

Neste quadrante, teremos:  $270^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  e  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.15), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(360^\circ - \alpha)}\right) \quad (3.15)$$

### 3.2.5 Análise dos ângulos das projeções no quinto quadrante

Neste quadrante, teremos:  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  e  $-90^\circ \leq \beta \leq 0^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.16), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = 360^\circ + \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(\alpha)}\right) \quad (3.16)$$

### 3.2.6 Análise dos ângulos das projeções no sexto quadrante

Neste quadrante, teremos:  $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  e  $-90^\circ \leq \beta \leq 0^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.17), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(180^\circ - \alpha)}\right) \quad (3.17)$$

### 3.2.7 Análise dos ângulos das projeções no sétimo quadrante

Neste quadrante, teremos:  $180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$  e  $-90^\circ \leq \beta \leq 0^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.18), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(\alpha - 180^\circ)}\right) \quad (3.18)$$

### 3.2.8 Análise dos ângulos das projeções no oitavo quadrante

Neste quadrante, teremos:  $270^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  e  $-90^\circ \leq \beta \leq 0^\circ$ . A equação para o cálculo de  $\lambda$  foi corrigida para EQ. (3.19), porém a equação para  $\omega$  se manteve inalterada.

$$\lambda = 360^\circ + \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(360^\circ - \alpha)}\right) \quad (3.19)$$

## 3.3 **Determinação das coordenadas dos segmentos da árvore brônquica**

Primeiramente, tentou-se obter as coordenadas da árvore brônquica por meio de revisão bibliográfica na área médica, em bibliotecas públicas. As fontes de dados foram constituídas de 16 capítulos de livros/dissertações e de 12 artigos publicados em revistas específicas.

Porém, após pesquisas na literatura disponível nas bibliotecas da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, PUC Minas - BH, Faculdade de Ciências Médicas de Minas Gerais - FCMMG e do Centro Universitário de Belo Horizonte - Uni-BH, não foi encontrada informação suficiente que possibilitasse reconstruir esquematicamente a árvore brônquica.

A segunda etapa da busca pela informação ocorreu entre os meses de março e julho de 2005, por meio de pesquisa em bases de dados das bibliotecas da UFMG e FCMMG, bases de dados dos periódicos da CAPES, com acesso aos sistemas Bireme, Medline e Pubmed, e em sites de busca educacionais e científicos (Altavista, Yahoo, Google). Tais dados representaram um suporte informacional composto de 58 sites, 21 artigos, 16 documentos em \* html e 46 documentos em \* pdf, elaborados por organizações especializadas, nas diversas áreas da Engenharia e Bioengenharia, Anatomia e Fisioterapia Respiratória.

O levantamento e a indexação de documentos foram realizados utilizando-se das palavras-chave: árvore brônquica, ângulos da árvore brônquica, anatomia pulmonar, ângulos de drenagem brônquica, drenagem postural, brônquios, brônquios segmentares, “human bronchial tree”, “lung”, “human airway tree”, “branching angles tracheobronchial airway”, “postural drainage”, “bronchi”, “lungs anatomy”.

A análise do conteúdo levantado foi limitada pelo assunto, pelo idioma e pelo período de abrangência da pesquisa, considerando-se apenas os textos de maior relevância em português e inglês, os quais estão citados nas referências bibliográficas do presente estudo.

Nessa etapa, também não foram obtidos dados suficientes para reconstruir esquematicamente a árvore brônquica. Uma das referências mais concisas, SAURET et al (2002), ao tentar discutir o estudo da geometria tridimensional das vias aéreas bronquiais centrais em humanos, usando tomografia computadorizada, relata que há pouca informação com enfoque na morfometria das vias aéreas humanas e, também, que os dados angulares na literatura ainda são muito esparsos.

Desse modo, cientes desse contexto, muitos pesquisadores tentaram modelar matematicamente os ângulos bronquiais e apresentam na literatura algumas equações.

Portanto, diante da impossibilidade de reunir dados bibliográficos suficientes para recriar a árvore brônquica e, assim, efetuar os testes das equações desenvolvidas para este estudo, decidiu-se por dois caminhos. O primeiro seria arbitrar uma árvore brônquica, tendo, como base, simplificações do modelo tridimensional das vias aéreas humanas, proposto por KITAOKA et al (1999), associado aos estudos de HORSFIELD e CUMMING (1968) sobre a morfologia da árvore bronquial humana. A outra possibilidade seria determinar as coordenadas da árvore brônquica, utilizando-se de um modelo físico da mesma, o qual pode ser obtido por injeção de poliuretano no sistema respiratório de corpos humanos, cuja causa morte não esteja relacionada a distúrbios respiratórios.

### 3.3.1 Determinação da árvore brônquica arbitrada a partir da literatura

Foram utilizados os dados citados por HORSFIELD e CUMMING (1968) para determinação da árvore brônquica, da geração 25 até a 15, em referência ao diâmetro e comprimento dos brônquios - TAB. 3.1, e ao modelo assimétrico de representação da árvore brônquica, a partir da geração mais elevada - FIG 3.12.

TABELA 3.1

Modelo assimétrico da árvore brônquica, derivado da medição de um modelo

Estrutura	Geração	Nº	Diâmetro mm	Comprimento mm
Traquéia	25	1	16,0	100
	24	1	12,0	40
	23	2	10,3	26
	22	2	8,9	18
	21	2	7,7	14
	20	3	6,6	11
	19	6	5,7	10
	18	8	4,9	10
	17	12	4,2	10
	16	14	3,5	10
	15	20	3,3	9,6
	14	30	3,1	9,1
	13	37	2,9	8,6
	12	46	2,8	8,2
	11	64	2,6	7,8
	10	85	2,4	7,4
	9	114	2,3	7,0
	8	158	2,2	6,7
	7	221	2,0	6,3
	6	341	1,78	5,7
	5	499	1,51	5,0
	4	760	1,29	4,4
	3	1104	1,10	3,9
	2	1675	0,93	3,5
	1	2843	0,79	3,1

FONTE – Adaptada de HORSFIELD E CUMMING, 1968, p. 380

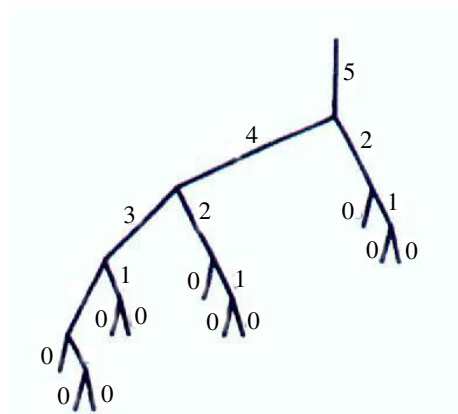


FIGURA 3.12 - Representação assimétrica da árvore brônquica, iniciando pela geração mais elevada

FONTE – Adaptada de HORSFIELD e CUMMING, 1968, p.374

Adotou-se uma simplificação do modelo de divisão brônquica, conforme representação de KITAOKA e al. (1999) - FIG 3.13.

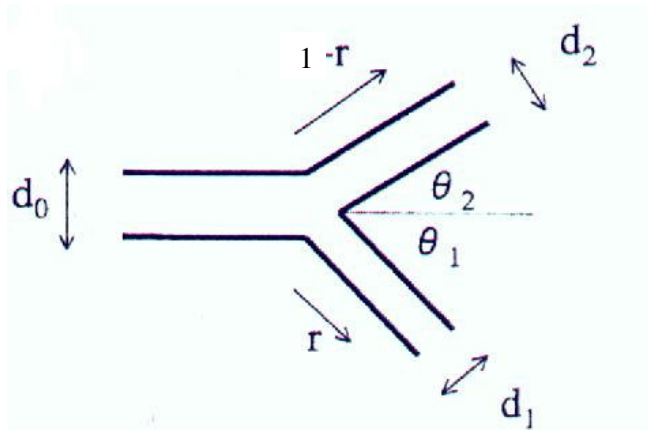


FIGURA 3.13 – Divisão brônquial ocorrendo no mesmo plano

FONTE – KITAOKA et. al, 1999, p. 2208

Utilizando-se a EQ. (3.20) e a EQ. (3.21), apresentadas por KITAOKA e al. (1999), para construir um modelo de árvore brônquica, associada aos dados dos diâmetros da TAB 3.1, pôde-se explicitar a variável “r”, que os autores definiram como razão de divisão de vazão, dando origem à EQ. (3.22).

$$d_1 = d_0 r^{1/n} \quad (3.20)$$

$$d_2 = (1 - r)^{1/n} \quad (3.21)$$

$$r = \left( \frac{d_1^n}{d_1^n + d_2^n} \right) \quad (3.22)$$

“r” é a razão entre a vazão de ar no brônquio de diâmetro \$d\_1\$ e a vazão no brônquio de diâmetro \$d\_0\$ (diâmetro do brônquio pai);

\$d\_1\$ e \$d\_2\$ são os diâmetros médios dos brônquios filhos;

\$n\$ é uma constante chamada de expoente do diâmetro e foi estimada, pelos autores, como sendo 2,8 para pulmões humanos.



Assim, utilizando-se a EQ. (3.23) e a EQ. (3.24), apresentadas por KITAOKA e al. (1999), calcularam-se os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$ .

$$\cos \theta_1 = \left[ 1 + r^{4/n} - (1-r)^{4/n} \right] / 2r^{2/n} \quad (3.23)$$

$$\cos \theta_2 = \left[ 1 + (1-r)^{4/n} - r^{4/n} \right] / 2(1-r)^{2/n} \quad (3.24)$$

Para efeito de simplificação do modelo, foram adotadas apenas as regras: 1) Os brônquios se bifurcam; 2) O brônquio pai e seus dois brônquios filhos repousam no mesmo plano; 4) A região suprida pelo brônquio pai é dividida em duas regiões filhas, é perpendicular ao plano da divisão e se estende para fora da região do pai, e 8) Se a ramificação continua numa determinada direção, o brônquio filho se torna o novo brônquio pai e o plano de divisão é fixo, perpendicular ao plano de divisão anterior, conforme KITAOKA et al (1999).

Com esses dados e utilizando-se do software AutoCAD release 2000®, a árvore brônquica foi desenhada.

### 3.3.2 Determinação das coordenadas da árvore brônquica a partir de um modelo físico

Em novembro de 2005, foi fornecido pelo Professor Germán Arturo B. Mahecha, do Laboratório de Morfologia de Aves e Biologia da Reprodução - ICB-UFMG, um modelo físico da árvore brônquica.

O modelo físico foi elaborado através da injeção de poliuretano nas vias aéreas de um cadáver humano. Posteriormente, o tórax do mesmo foi aberto e o conjunto árvore brônquica e pulmões removidos do corpo. Essas peças receberam banhos de ácido clorídrico, o que promoveu a remoção do material biológico, ficando somente a estrutura observada na FIG 3.14.



FIGURA 3.14 – Modelo físico da árvore brônquica.

### 3.2.2.1 Dispositivo para medir coordenadas espaciais

Para se obter as coordenadas espaciais do modelo, idealizou-se um dispositivo no qual os eixos coordenados estivessem fixos numa das laterais do mesmo, conforme a FIG 3.15, onde se pode ler as coordenadas X e Y, por meio de duas réguas paralelas aos eixos, após o ajuste de um ponto *laser* no centro da estrutura que estava sendo medida.

Através do giro de  $(-90^\circ)$  do modelo em torno de seu próprio eixo, paralelo ao eixo X, e do giro de  $(-90^\circ)$  do sistema de coordenadas em torno do eixo X, pode-se ler a coordenada Z, da mesma forma com que foi lida a coordenada Y - FIG. 3.16.

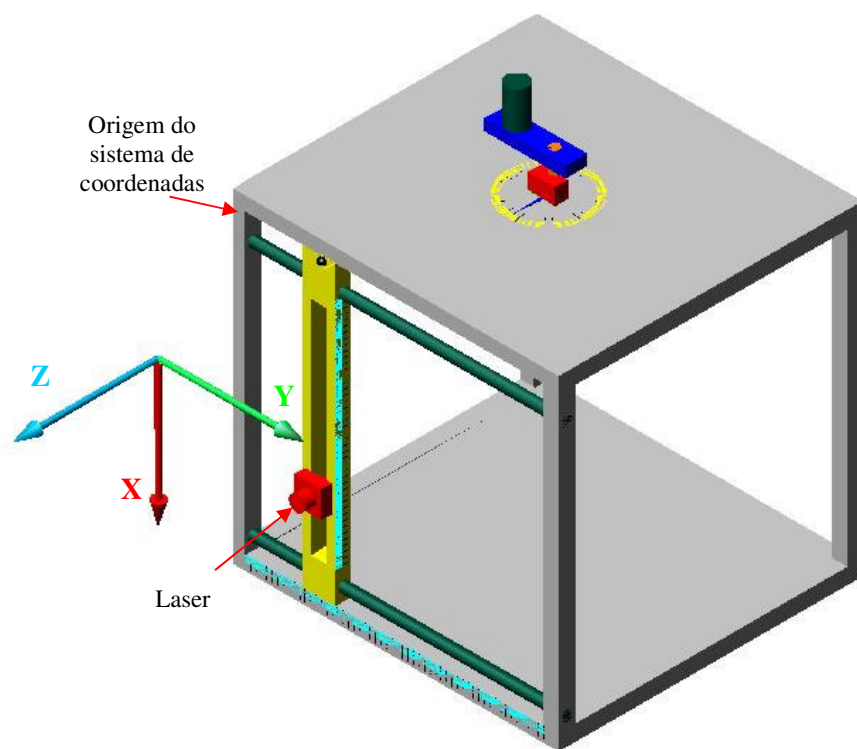


FIGURA 3.15 – Dispositivo para medida das coordenadas espaciais

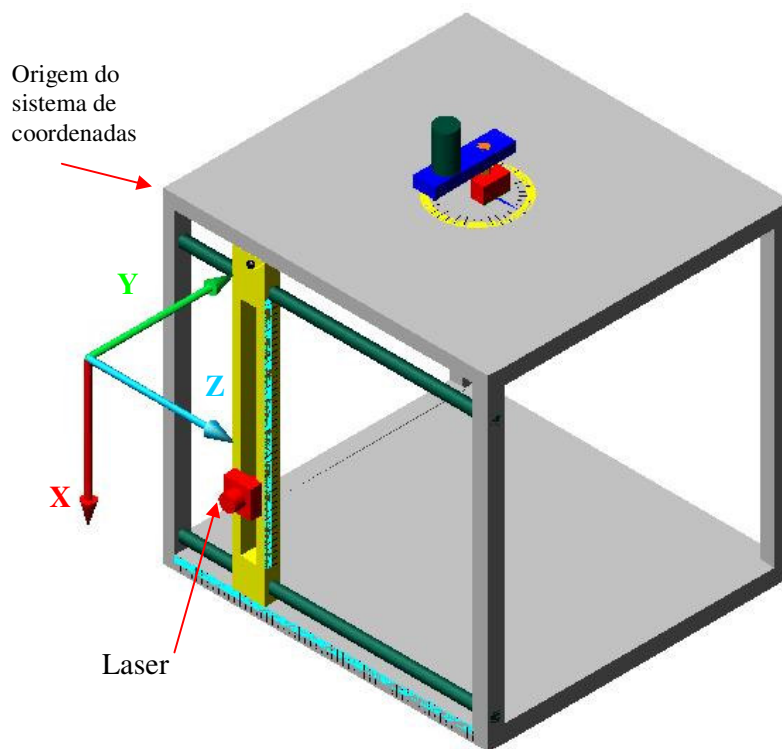


FIGURA 3.16 – Dispositivo para medida das coordenadas espaciais após giro (-)90°.

Baseando-se nos desenhos esquemáticos - FIG. 3.15 e 3.16, foi construído o protótipo do medidor de coordenadas espaciais - FIG 3.17, o qual contém um suporte para acoplamento do modelo físico da árvore brônquica. A FIG 3.18 mostra detalhe das réguas e da ponteira *laser* presentes no sistema de medição.

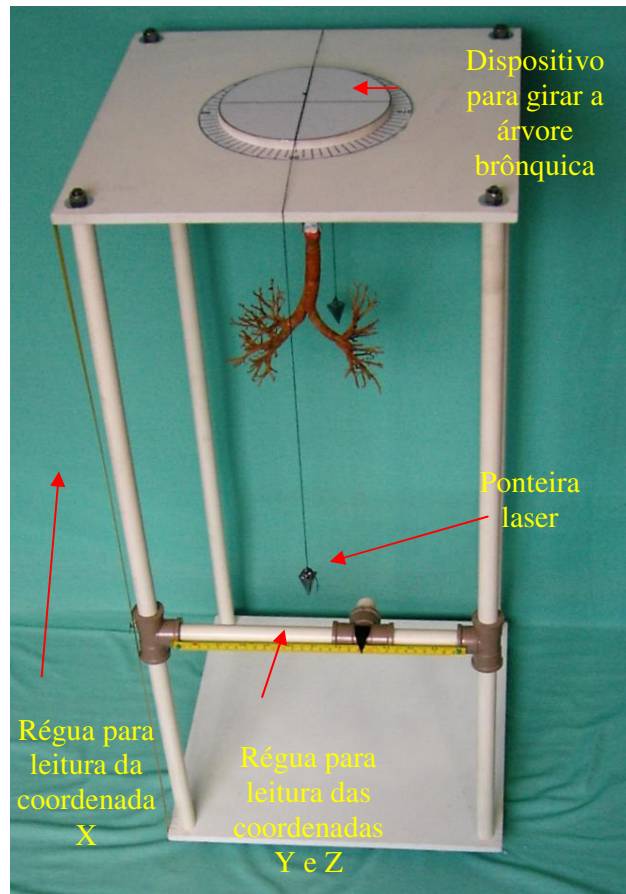


FIGURA FIGURA 3.17 – Dispositivo para medida das coordenadas espaciais

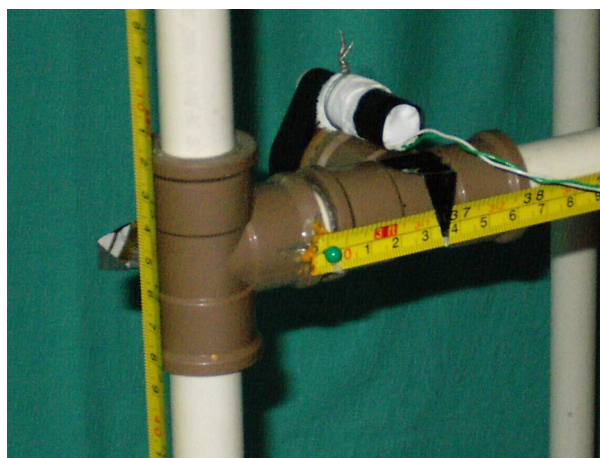


FIGURA 3.18 – Detalhe das régua e da ponteira laser

O dispositivo foi construído utilizando-se de:

- a). Duas placas de MDF de 400x400x10mm, sendo que uma delas possuía um furo central de 128mm;

- b). Uma peça circular em MDF de 20mm de espessura, com diâmetro interno com espessura de 10mm, de 127 mm, e externo de 162mm e espessura de 10mm;
- c). Quatro barras rosqueadas, de 7mm de diâmetro e 840mm de comprimento;
- d). Oito porcas e oito arruelas para as barras rosqueadas; quatro tubos de pvc de 800 mm de comprimento e 12,7mm de diâmetro;
- e). Um tubo de pvc, com 12,7mm de diâmetro e 310mm de comprimento;
- f). Três conexões em pvc com diâmetros iguais, de 12,7mm;
- g). Duas réguas graduadas de aço de 310mm e 820mm de comprimento;
- h). Uma ponteira laser de diodo, com comprimento de onda de 630 a 680mm - classe II;
- i). Duas chapas triangulares de alumínio usadas como ponteiros para a medição;
- j). 1200 mm de fio de cobre com diâmetro de 1mm;
- k). Um interruptor modelo 2603 mar-cirius;
- l). Uma fonte de corrente contínua Ftg, modelo FT-1462P, de 7 saídas reguladas para 110V de entrada e 1,5 V de saída;
- m). Uma escala de ângulos, circular, em papel, recoberta com adesivo plástico transparente;
- n). Um pino roscado de 60mm de comprimento e 10 mm de diâmetro;
- o). Duas chapas metálicas de 110mm de comprimento e 15mm de largura;
- p). Dois parafusos para madeira e arruelas de 3mm de diâmetro;
- q). Dois parafusos auto-atarrachantes, com cabeça de 10 mm de diâmetro;
- r). Um nível de bolha;
- s). Dois pesos de chumbo e 1000mm de linha de algodão.

Primeiramente, o dispositivo foi nivelado com o nível de bolha, como indicado na foto - FIG. 3.19.

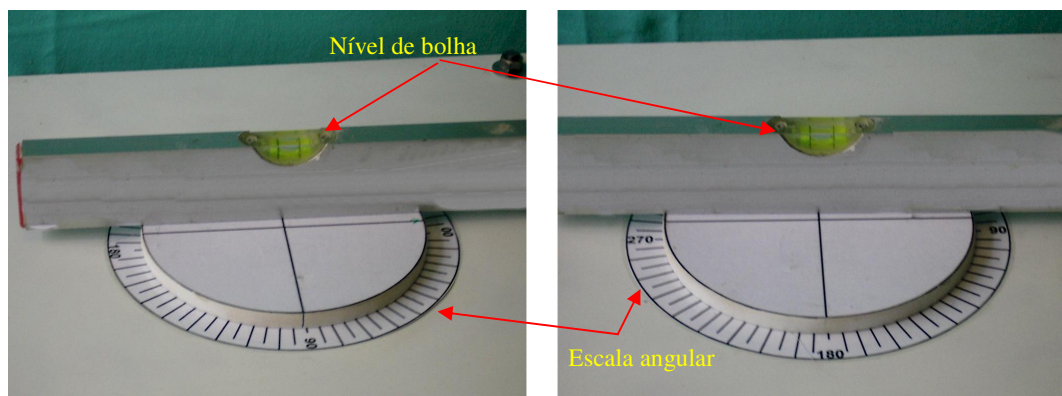


FIGURA 3.19 – Detalhe do nivelamento do dispositivo

Logo a seguir, antes de fixar a árvore brônquica, o pino roscado de 60mm foi alinhado, conforme a - FIG. 3.20.

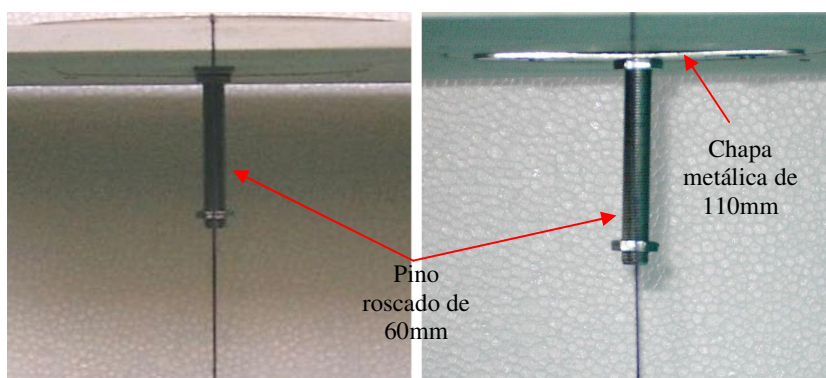


FIGURA 3.20 – Detalhe do alinhamento do pino roscado de 60mm

A árvore brônquica foi presa numa das chapas de 110mmx15mm, que previamente teve suas duas pontas dobradas, fazendo um ângulo de 90° com a parte central da mesma.

Seguindo orientações anatômicas e recomendações do Professor Gérmam Arturo B. Mahecha (2005), a traquéia deveria ser fixada de maneira que ficasse paralela à mesa do dispositivo, simulando a posição de decúbito dorsal.

Portanto, a árvore brônquica foi fixada à chapa e presa paralelamente ao pino roscado, pois o mesmo estava alinhado paralelo ao eixo coordenado X, definido, contido no plano da mesa - FIG. 3.21.

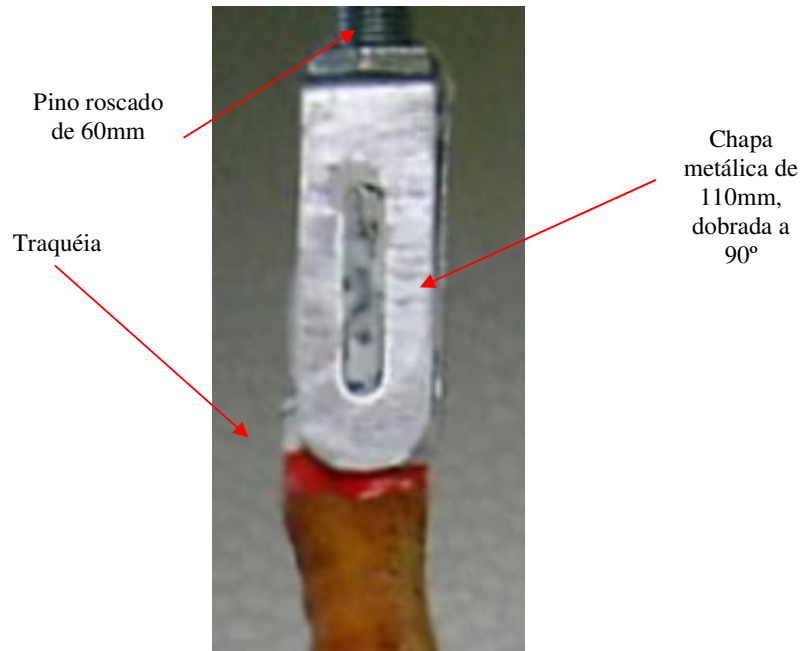


FIGURA 3.21 - Detalhe do alinhamento da traquéia

### 3.3.2.2 Determinação das coordenadas dos segmentos da árvore brônquica

Com a árvore brônquica presa ao medidor de coordenadas, já devidamente nivelado, os pontos coordenados foram identificados através da comparação com a FIG 3.1 e medidos após o foco do *laser* ser posicionado no centro da via aérea (posição inicial e final dos segmentos brônquicos), que estava sendo medida - FIG 3.22 e FIG 3.23.

Nestas figuras, também pode ser observada a inserção de escalas e elementos geométricos ao fundo. Esse procedimento foi feito visando verificar e reduzir as distorções apresentadas nas fotos, caso estas fossem utilizadas para a obtenção das coordenadas dos segmentos brônquicos, devido alguma impossibilidade na prática da medição direta. Entretanto, tal procedimento não foi necessário.



FIGURA 3.22 - Detalhe da medição das coordenadas da traquéia





FIGURA 3.23 - Detalhe da medição das coordenadas do brônquio principal esquerdo

Como a árvore brônquica é uma estrutura muito complexa, algumas de suas estruturas se sobrepunham às outras, o que tornou necessário que fossem feitas 12 medidas com rotações a intervalos de  $(- )30^\circ$  entre cada uma delas, para que se pudesse selecionar o par mais adequado.

Após a escolha, foram feitas seis medições para cada ponto, calculou-se a média e, com ela, depois de compensados os efeitos sistemáticos da calibração do medidor de coordenadas, desenhou-se a árvore brônquica, utilizando-se o software AutoCAD release 2000®.

Como o par escolhido estava deslocado de  $(- )30^\circ$  par  $[Y((-)30^\circ), Z((-)120^\circ)]$ , foi feita, no desenho da árvore brônquica, através do AutoCAD release 2000®, uma rotação de  $(+)30^\circ$  em relação ao eixo X, e coletadas as novas coordenadas.

### 3.4 Determinação dos ângulos de projeção dos brônquios segmentares

Com as coordenadas do modelo físico determinadas, foram calculados os ângulos das coordenadas esféricas e, posteriormente, os ângulos de projeção de cada brônquio segmentar.

#### 3.4.1 Determinação de $\alpha$

O ângulo  $\alpha$  conforme a - FIG 3.5, está contido no plano XY. Portanto seu valor pôde ser determinado através do cálculo do arco tangente da inclinação da projeção do brônquio no plano XY - EQ. (3.25).

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) \quad (3.25)$$

onde:  $\Delta Y = Y_2 - Y_1$ ;  
 $\Delta X = X_2 - X_1$ .

#### 3.4.1.1 Primeiro quadrante

Neste quadrante, observou-se que:  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ;  $\Delta X \geq 0$  e  $\Delta Y \geq 0$ . Assim, a equação foi mantida inalterada, e o ângulo  $\alpha$  foi determinado pela EQ. (3.25).

#### 3.4.1.2 Segundo quadrante

Neste quadrante, observou-se que:  $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ;  $\Delta X \leq 0$  e  $\Delta Y \geq 0$ . Assim, a equação foi ajustada para a EQ. (3.26).

$$\alpha = (180^\circ + \arctg(\frac{\Delta Y}{\Delta X})) \quad (3.26)$$

#### 3.4.1.3 Terceiro quadrante

Neste quadrante, observou-se que:  $180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ ;  $\Delta X \leq 0$  e  $\Delta Y \leq 0$ . Assim, a equação foi mantida inalterada, e o ângulo  $\alpha$  será determinado pela EQ. (3.26).

#### 3.4.1.4 Quarto quadrante

Neste quadrante, observou-se que:  $180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ ;  $\Delta X \geq 0$  e  $\Delta Y \leq 0$ . Assim, a equação foi ajustada para a EQ. (3.27).

$$\alpha = (360^\circ + \arctg(\frac{\Delta Y}{\Delta X})) \quad (3.27)$$

#### 3.4.2 Determinação de $\beta$

O ângulo  $\beta$  varia entre  $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ , conforme a FIG 3.5, e é formado pelo brônquio segmentar e sua projeção no plano XY. Portanto, seu valor pôde ser determinado através do cálculo do arco tangente da variação em Z - EQ (3.28), e o valor do módulo da

hipotenusa do triângulo retângulo definido pelo ângulo  $\alpha$  no plano XY - EQ. (3.29). O sinal do ângulo foi definido por  $\Delta Z$ .

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 \quad (3.28)$$

O módulo da hipotenusa do triângulo retângulo definido por  $\alpha$  (Hip. XY) foi dada pela EQ. (3.29).  $\beta$  foi determinado pela EQ. (3.30).

$$HipXY = \left| \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)} \right| \quad (3.29)$$

$$\beta = arctg\left(\frac{\Delta Z}{HipXY}\right) \quad (3.30)$$

### 3.4.3 Determinação de $\lambda$

O ângulo da projeção do brônquio segmentar no plano XZ,  $\lambda$ , foi determinado pelas equações: EQ. (3.5); e EQ. (3.13) à EQ. (3.19).

$$\lambda = arctg\left(\frac{tg\beta}{\cos(\alpha)}\right) \quad (3.5)$$

$$\lambda = 180^\circ - arctg\left(\frac{tg(\beta)}{\cos(180 - \alpha)}\right) \quad (3.13)$$

$$\lambda = 180^\circ - arctg\left(\frac{tg(\beta)}{\cos(\alpha - 180^\circ)}\right) \quad (3.14)$$

$$\lambda = arctg\left(\frac{tg(\beta)}{\cos(360^\circ - \alpha)}\right) \quad (3.15)$$

$$\lambda = 360^\circ + arctg\left(\frac{tg(\beta)}{\cos(\alpha)}\right) \quad (3.16)$$

$$\lambda = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(180^\circ - \alpha)}\right) \quad (3.17)$$

$$\lambda = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(\alpha - 180^\circ)}\right) \quad (3.18)$$

$$\lambda = 360^\circ + \arctg\left(\frac{\operatorname{tg}(\beta)}{\cos(360^\circ - \alpha)}\right) \quad (3.19)$$

#### 3.4.4 Determinação de $\omega$

O ângulo formado entre o brônquio segmentar e o eixo Y,  $\omega$ , foi determinado pela equação EQ. (3.10).

$$\omega = \arccos(\cos(\beta) \cdot \cos(90^\circ - \alpha)) \quad (3.10)$$

### 3.5 **Determinação dos ângulos de giro do dispositivo de drenagem postural**

Conforme o desenho esquemático da FIG 3.3, o dispositivo de drenagem tem seus eixos de giro paralelos aos eixos coordenados X e Y.

#### 3.5.1 Ângulo de giro em relação ao eixo Y

Considerando-se o sentido convencional de rotação em torno do eixo Y, o ângulo de giro do dispositivo em relação ao eixo Y foi definido como  $\Lambda$  EQ. (3.11).

$$\Lambda = [-(90^\circ - \lambda)] \quad (3.11)$$

#### 3.5.2 Ângulo de giro em relação ao eixo X

Considerando-se o sentido convencional de rotação em torno do eixo X, o ângulo de giro do dispositivo em relação ao eixo X foi definido como  $\Omega$  - EQ. (3.12).

$$\Omega = (90^\circ - \omega). \quad (3.12)$$

### 3.5.3 Verificação dos ângulos de giro

Depois de calculados os ângulos de giro do dispositivo de drenagem postural, os mesmos foram simulados no desenho da árvore brônquica, feito no AutoCAD release 2000®.

### **3.6 Avaliação das incertezas de medição**

A determinação das coordenadas da árvore brônquica é uma tarefa complexa, primeiramente, porque, a rigor, não se poderia determiná-las apenas com a utilização de um único modelo físico, pois, além dos possíveis erros cometidos na confecção do mesmo, ainda se poderia estar medindo alguma árvore brônquica que possuísse anomalias morfológicas. Isso, se considerarmos que as árvores brônquicas não possuem variação de sua forma nas diversas etnias existentes.

Outro fator que contribuiu para o incremento dos erros de medição recai sobre o próprio medidor de coordenadas, fabricado de maneira artesanal com materiais não apropriados para a construção de um instrumento de medição. Essas eram as limitações técnicas do Laboratório de Projetos Mecânicos – UFMG.

Certamente, vários outros fatores não contabilizados contribuíram para aumentar os erros de medição, entretanto, fugia ao escopo deste trabalho a determinação precisa das coordenadas da árvore brônquica, pois nosso objetivo era gerar uma estrutura semelhante à árvore brônquica para testarmos as equações desenvolvidas.

Assim, a determinação das incertezas de medição, foram avaliadas de maneira preliminar, com muitas simplificações, e, apenas inseridas, por serem uma parte importante da metodologia criada.

#### 3.6.1 Calibração do sistema de medição

Para calibrar o sistema de medição, utilizou-se, como valor verdadeiro convencional (VVC), uma barra desenhada em papel, com dez divisões iguais, através do software AutoCAD release 2000®. Por simplificação, não se considerou a incerteza do padrão adotado.

Foram feitas dez medições para cada ponto, para o eixo X, e outras dez para os eixos Y e Z. Calculou-se a média das medições (MI), a Tendência EQ. (B.1-2) e a Repetitividade (Re) - EQ. (B.1-3). Com esses valores calculados, levantou-se a curva de erros.

$$Td = MI - VVC \quad (B.1-2)$$

$$Re = \pm t.s \quad (B.1-1)$$

### 3.6.2 Compensação dos efeitos sistemáticos

Com os valores da tendência estimados na calibração, esta foi subtraída da média das medidas para faixas de medição próximas das obtidas na calibração.

### 3.6.3 Determinação dos efeitos aleatórios (incerteza padrão)

Por simplificação, considerou-se apenas o erro aleatório da calibração e a repetitividade. Esses efeitos foram tratados como estatisticamente independentes e a sua soma foi obtida pela EQ. (B.1-15). Como eram conhecidos os dados da calibração, o grau de liberdade efetivo foi determinado considerando-se o número de medições feitas na calibração e na medida das coordenadas através da EQ. (B.1-16).

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2} \quad (B.1-15)$$

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (B.1-16)$$

### 3.6.4 Determinação das incertezas para as medidas indiretas nos brônquios segmentares

Por simplificação, foram consideradas as incertezas das medidas indiretas estatisticamente dependentes, conforme subtítulo B.1-9.7.

#### 3.6.4.1 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta X)$

A incerteza padrão foi somada e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (B.1-16)$$

### 3.6.4.2 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Y)$

A incerteza padrão foi somada e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

### 3.6.4.3 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Z)$

A incerteza padrão foi somada e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

### 3.6.4.4 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Y / \Delta X)$ ou $u(\text{tg}(\alpha))$

Aplicou-se a EQ. (B.1-22) e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| u(x_1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| u(x_2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| u(x_3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_4} \right| u(x_4) + \dots \quad (\text{B.1-22})$$

### 3.6.4.5 Determinação da incerteza padrão $u(\text{HipXY})$

Aplicou-se a EQ. (B.1-22) na EQ. (3.29) e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x1} \right| u(x1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x2} \right| u(x2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x3} \right| u(x3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x4} \right| u(x4) + \dots \quad (\text{B.1-22})$$

$$\text{HipXY} = \left| \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \right| \quad (3.29)$$

#### 3.6.4.6 Determinação da incerteza padrão $u(\Delta Z/\text{HipXY})$ ou $u(\text{tg}(\beta))$

Aplicou-se a EQ. (B.1-22) em  $\Delta Z/\text{HipXY}$  e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x1} \right| u(x1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x2} \right| u(x2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x3} \right| u(x3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x4} \right| u(x4) + \dots \quad (\text{B.1-22})$$

#### 3.6.4.7 Determinação da incerteza padrão da hipotenusa definida por $\beta$ $u(\text{HipZ})$

A hipotenusa definida por  $\beta$  foi calculada pela EQ. (3.31). Para o cálculo da incerteza padrão, aplicou-se a EQ. (B.1-22) em EQ. (3.31), e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x1} \right| u(x1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x2} \right| u(x2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x3} \right| u(x3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x4} \right| u(x4) + \dots \quad (\text{B.1-22})$$

$$\text{HipZ} = \left| \sqrt{\Delta Z^2 + \text{HipXY}^2} \right| \quad (3.31)$$



### 3.6.4.8 Determinação da incerteza padrão de $\alpha$ $u(\alpha)$

Calculou-se a  $\text{tg}(\alpha)$  e, primeiramente, acrescentou-se a incerteza padrão  $u(\text{tg}(\alpha))$ , calculou-se o arco da tangente do valor apurado, subtraiu-se deste valor o ângulo  $\alpha$ . Assim, obteve-se a incerteza padrão de  $\alpha$  para a soma da incerteza padrão  $u(\text{tg}(\alpha))$ . Posteriormente, repetiu-se o cálculo subtraindo-se  $u(\text{tg}(\alpha))$ .

### 3.6.4.9 Determinação da incerteza padrão de $\beta$ $u(\beta)$

Calculou-se a  $\text{tg}(\beta)$  e, primeiramente, acrescentou-se a incerteza padrão  $u(\text{tg}(\beta))$ , calculou-se o arco da tangente do valor apurado subtraiu-se deste valor o ângulo  $\beta$ . Assim, obteve-se a incerteza padrão de  $\beta$  para a soma da incerteza padrão  $u(\text{tg}(\beta))$ . Posteriormente, repetiu-se o cálculo, subtraindo-se  $u(\text{tg}(\beta))$ .

### 3.6.4.10 Determinação da incerteza padrão de $\omega$ $u(\omega)$

Utilizou-se a EQ. (3.9), e, onde se verificou que  $\cos(90^\circ - \alpha) = \frac{\Delta Y}{\text{Hip}XY}$  e  $\cos(\beta) = \frac{\text{Hip}XY}{\text{Hip}Z}$ , encontrou-se a EQ. (3.32). Para o cálculo da incerteza padrão  $u(\cos(\omega))$ , aplicou-se a EQ. (B.1-22) em EQ. (3.32), e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ. (B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x1} \right| u(x1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x2} \right| u(x2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x3} \right| u(x3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x4} \right| u(x4) + \dots \quad (\text{B.1-22})$$

$$\cos(\omega) = \cos(\beta) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \quad (3.9)$$

$$\cos(\omega) = \frac{\Delta Y}{\text{Hip}Z} \quad (3.32)$$

Calculou-se o  $\cos(\omega)$  e, primeiramente, acrescentou-se a incerteza padrão  $u(\cos(\omega))$ , calculou-se o arco do co-seno do valor apurado e subtraiu-se deste valor o ângulo  $\omega$ . Assim, obteve-se a incerteza padrão de  $\omega$  para a soma da incerteza padrão  $u(\cos(\omega))$ . Posteriormente, repetiu-se o cálculo subtraindo-se  $u(\cos(\omega))$ .

#### 3.6.4.11 Determinação da incerteza padrão de $\lambda$ $u(\lambda)$

Utilizou-se a EQ. (3.4) e, onde se verificou que  $\text{tg}(\beta) = \frac{\Delta Z}{\text{Hip}XY}$  e que  $\cos(\alpha) = \frac{\Delta X}{\text{Hip}XY}$ , encontrou-se a EQ. (3.33). Para o cálculo da incerteza padrão ( $u(\text{tg}(\lambda))$ ), aplicou-se a EQ. (B.1-22) em EQ.(3.33), e seu grau de liberdade efetivo foi calculado pela EQ.(B.1-16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (\text{B.1-16})$$

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x1} \right| u(x1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x2} \right| u(x2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x3} \right| u(x3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x4} \right| u(x4) + \dots \quad (\text{B.1-22})$$

$$\text{tg}(\lambda) = \frac{\text{tg}(\beta)}{\cos(\alpha)} \quad (3.4)$$

$$\text{tg}(\lambda) = \frac{\Delta Z}{\Delta X} \quad (3.33)$$

Calculou-se a  $\text{tg}(\lambda)$  e, primeiramente, acrescentou-se a incerteza padrão  $u(\text{tg}(\lambda))$ , calculou-se o arco da tangente do valor apurado, subtraiu-se deste valor o ângulo  $\lambda$ . Assim, obteve-se a incerteza padrão de  $\lambda$  para a soma da incerteza padrão  $u(\text{tg}(\lambda))$ . Posteriormente, repetiu-se o cálculo subtraindo-se  $u(\text{tg}(\lambda))$ .

#### 3.6.5 Expansão das incertezas padrão para 95% (U95%)

Com os valores calculados para as incertezas padrão e seu grau de liberdade efetivo, obteve-se da TAB B.1-1 o fator de abrangência ( $k_{95\%}$ ). Assim, utilizou-se a EQ. (B.1-17) para se encontrar a incerteza expandida (U95%).

$$U_{95\%} = k_{95\%} \cdot u_c \quad (\text{B.1-17})$$

### 3.7 Simulação do posicionamento dos brônquios segmentares

Para avaliar os resultados obtidos, utilizou-se a árvore brônquica virtual, desenhada no AUTOCAD. Cada brônquio foi girado de acordo com os ângulos calculados e sua orientação comparada com o eixo coordenado Z.

### 3.8 Desenvolvimento do dispositivo de drenagem postural

Para o desenvolvimento do dispositivo de drenagem postural, partiu-se do conceito de que ele deveria permitir rotações em dois eixos coordenados - FIG. 3.24.

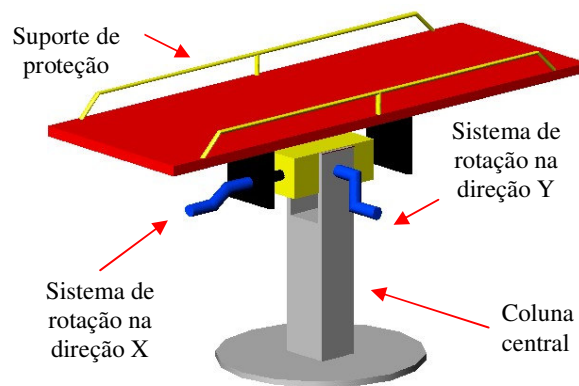


FIGURA 3.24 - Conceito do dispositivo para drenagem postural

Do conceito, partiu-se para o desenvolvimento dos mecanismos que permitissem os movimentos.

#### 3.8.1 Mecanismo para efetuar a rotação

Por razões operacionais, optou-se por dois mecanismos diferentes. Para se efetuar as rotações em torno do eixo X, onde a magnitude dos ângulos a serem atingidos era menor, optou-se pelo mecanismo parafuso-porca - FIG 3.25.

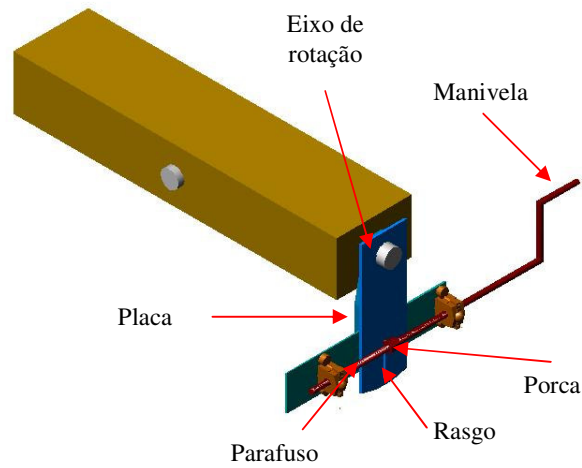


FIGURA 3.25 Mecanismo para rotação em X

Para a rotação em relação ao eixo Y, onde os ângulos e esforços eram maiores, optou-se pelo uso de um macaco automotivo do tipo sanfona - FIG 3.26.

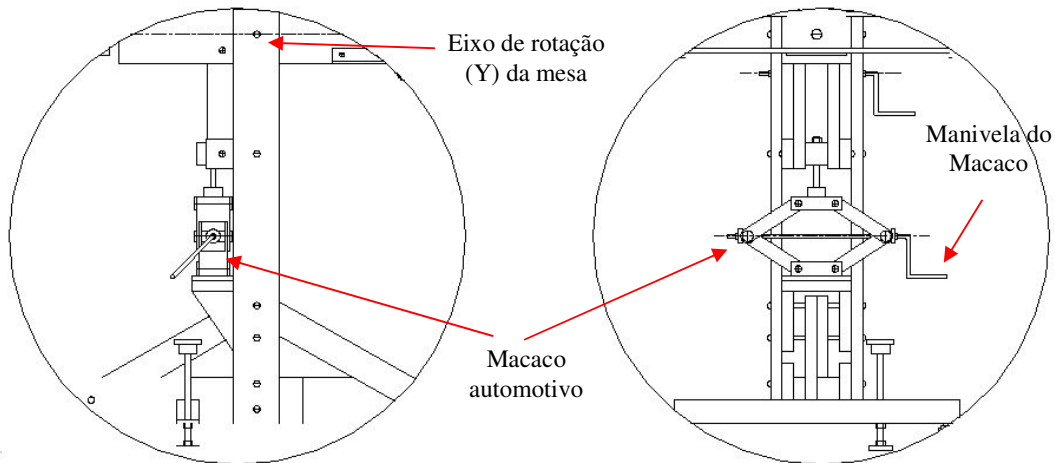


FIGURA 3.26 Mecanismo para rotação em Y

### 3.8.2 Dispositivo extra para alteração dos ângulos segundo um eixo paralelo a Y

Para atender à solicitação das fisioterapeutas que acompanharam o projeto, foi idealizado um dispositivo capaz de alterar as angulações da mesa, em relação a um eixo paralelo a Y, independente dos mecanismos anteriores. Para isso, foi necessário dividir a mesa em três seções. Utilizou-se o mecanismo de uma prancheta de desenho - FIG 3.27.

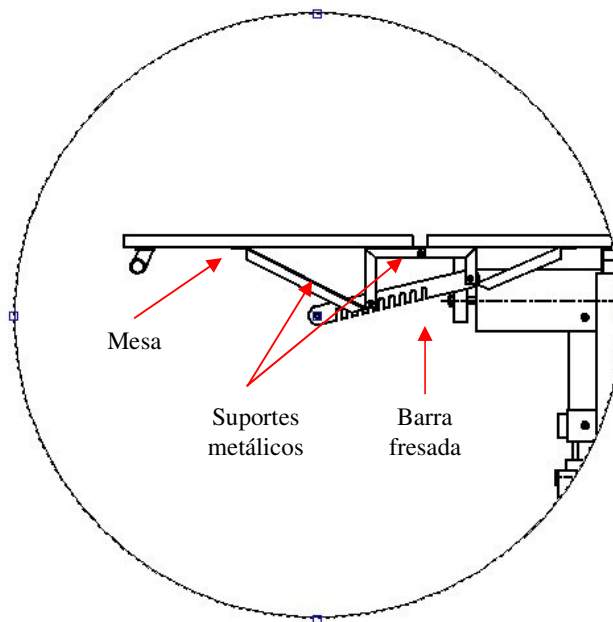


FIGURA 3.27 - Mecanismo extra para rotação num eixo paralelo a Y

### 3.8.3 Desenho do dispositivo de drenagem postural

Integraram-se os mecanismos, e obteve-se o dispositivo de drenagem postural - FIG. 3.28.

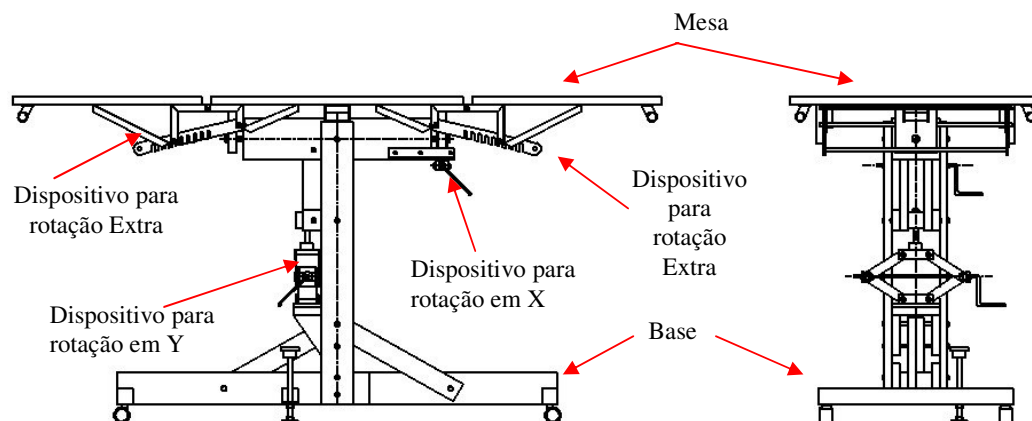


FIGURA 3.28 - Desenho do dispositivo para drenagem postural

#### 3.8.4 Construção do protótipo do dispositivo para drenagem postural

O protótipo foi construído utilizando-se estruturas de madeira, pranchas de MDF, perfis de aço e alumínio, e partes adaptadas de outros equipamentos. Os dispositivos que permitiram os movimentos necessários eram feitos de aço - FIG 3.28.

#### 3.8.5 Teste do protótipo

O primeiro teste consistiu na verificação dos ângulos atingidos pelo dispositivo em relação aos eixos X e Y.

O segundo teste consistiu na verificação do paralelismo entre as três partes que compunham a mesa.

O terceiro teste consistiu na verificação dos ângulos atingidos pelo dispositivo extra, proposto pelas fisioterapeutas.

O quarto teste consistiu em comparar a postura de drenagem para o segmento apical, utilizando-se o dispositivo de maneira mista, combinando os ângulos de giro do dispositivo e o ângulo do dispositivo extra e de maneira mista, mas com os ângulos calculados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na revisão da literatura, muito poucos trabalhos foram encontrados sobre os valores dos ângulos entre os brônquios, e, mesmo assim, quando havia alguma informação, esta não disponibilizava dados suficientes para que se construísse um modelo real da árvore brônquica. De forma semelhante, os ângulos utilizados para se fazer o procedimento de drenagem postural são vagos e, algumas vezes, nem estão definidos, existindo apenas descrições das posições em que o paciente deve ser colocado para se efetuar o procedimento.

Assim, se fez necessário a busca do estabelecimento da árvore brônquica, primeiramente, utilizando-se adaptações de modelos matemáticos. Posteriormente, com a obtenção de um modelo físico da árvore brônquica, procurou-se desenvolver um medidor de coordenadas espaciais, capaz de levantar os ângulos entre os segmentos brônquicos.

É importante salientar que o método proposto para a determinação das coordenadas espaciais da árvore brônquica e, por conseguinte, dos respectivos ângulos, embora seja plenamente aceitável, não apresenta resultados conclusivos do ponto de vista morfológico.

O equipamento de medição foi desenvolvido utilizando-se materiais de baixo custo, o que não propiciou a obtenção de valores com a precisão adequada para este fim. Além disso, se utilizou um único modelo físico não havendo uma base de dados estatisticamente adequada, uma vez que diversos fatores como anomalias genéticas e diferenças morfológicas, entre as diversas etnias, poderiam influenciar os resultados encontrados.

Por outro lado, o conjunto de equações de correlação entre os ângulos da árvore brônquica e os ângulos de giro do dispositivo é matematicamente correto, não sendo afetada por quaisquer imprecisões na obtenção dos dados da árvore brônquica.

Os resultados foram apresentados, sempre que possível, na seqüência em que foram citados na metodologia.

#### 4.1 Árvore brônquica arbitrada

Com as equações e simplificações tratadas no item 3.3.1, montou-se a TAB. 4.1.

TABELA 4.1  
Ângulos de bifurcação dos brônquios até a terceira geração

Geração brônquio	comprimento mm	Diametro hidráulico mm	razão de fluxo ( r )	$\theta_1^\circ$	$\theta_2^\circ$
25	100	16			
24	40	12	0,4	41,0	28,9
23	26	10,3			
23	26	10,3	0,4	41,0	28,9
20	11	6,6	0,4	41,1	28,9
21	14	7,7			
22	18	8,9	0,5	34,9	34,9
22	18	8,9			
17	10	4,2	0,4	41,1	28,9
18	10	4,9			
18	10	4,9	0,5	34,9	34,9
18	10	4,9	0,4	41,1	28,9
17	10	4,2			
18	10	4,9	0,4	41,0	29,0
19	10	5,7			
20	11	6,6	0,4	40,8	29,1
19	10	5,7			
19	10	5,7	0,3	46,8	23,6
18	10	4,9	0,1	61,6	11,5
20	11	6,6	0,3	46,7	23,7
18	10	4,9			
19	10	5,7	0,4	41,0	29,0
18	10	4,9	0,5	34,9	34,9
18	10	4,9			
19	10	5,7	0,2	57,2	14,8
18	10	4,9	0,4	41,0	29,0
19	10	5,7			

Com o valor do comprimento de cada brônquio, os ângulos de bifurcação calculados e as regras de formação, desenhou-se, através do Software AutoCAD release 2000®, a representação unifilar da árvore brônquica. Esta foi definida pela linha de centro de cada via aérea. Com base nessa representação, gerou-se a árvore brônquica virtual - FIG. 4.1.



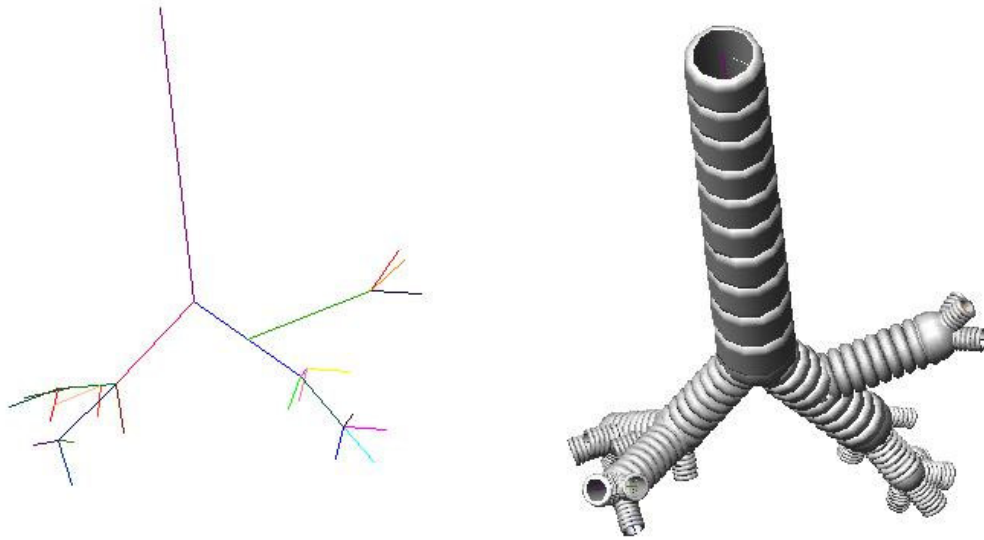


FIGURA 4.1 - Representação unifilar (à esquerda) e virtual (à direita) da árvore brônquica arbitrada

Embora fosse completamente aceitável utilizar-se a árvore brônquica arbitrada para efetuar os testes da metodologia desenvolvida, como se conseguiu um modelo físico, a árvore brônquica arbitrada foi abandonada.

## 4.2 Modelo físico

### 4.2.1 Determinação do ângulo para coleta das coordenadas

Para se escolher o ângulo mais adequado, foram feitas 12 medições defasadas de  $(-)\text{30}^\circ$  em relação ao eixo coordenado X - TAB. 4.2.

TABELA 4.2

Determinação dos ângulos para a coleta das coordenadas

Brônquio	Localização		Posição	X	Y	Y	Y	Z	Z	Z	Y	Y	Y	Z	Z	Z
	Secção	D / E			0°	-30°	-60°	-90°	-120°	-150°	-180°	-210°	-240°	-270°	-300°	-330°
Traquéia	1		Inicial	140	1045	1048	1052	1052	1051	1045	1043	1041	1038	1038	1038	1040
			Final	173	1043	1043	1045	1046	1046	1046	1044	1044	1043	1042	1042	1042
	2		Inicial	173	1043	1043	1045	1046	1046	1046	1044	1044	1043	1042	1042	1042
			Final	206	1039	1036	1034	1037	1041	1045	1049	1051	1052	1051	1047	1042
	3		Inicial	206	1039	1036	1034	1037	1041	1045	1049	1051	1052	1051	1047	1042
			Final	239	1032	1026	1026	1029	1036	1047	1055	1069	1067	1060	1049	1039
Primário Direito	1	D	Inicial	239	1032	1026	1026	1029	1036	1047	1055	1069	1067	1060	1049	1039
			Final	254	1014	1011	1012	1028	1044	1056	1070	1075	1071	1062	1043	1024
	2	D	Inicial	254	1014	1011	1012	1028	1044	1056	1070	1075	1071	1062	1043	1024
			Final	268	1004	1001	1011	1030	1048	1066	1080	1082	1076	1060	1040	1015
lobo sup.	1	D	Inicial	254	1014	1011	1012	1028	1044	1056	1070	1075	1071	1062	1040	1015
lobo médio	1	D	Inicial	268	1004	1001	1011	1030	1048	1066	1080	1082	1076	1060	1040	1015
			Final	276	993	1000	1016	1043	1067	1086	1093	1087	1068	1044	1018	1000
lobo inf.	1	D	Inicial	268	1004	1001	1011	1030	1048	1066	1080	1082	1076	1060	1040	1015
			Final	281	978	978	998	1028	1062	1093	1109	1107	1089	x	1025	993
1	1	D	Inicial	251	1001	1000	1011	1030	1055	1076	1088	1088	1078	1056	1031	1012
			Final	241	1002	1003	1018	1038	1062	1079	1086	1082	x	1050	1027	1008
2	1	D	Inicial	251	1001	1000	1011	1030	1055	1076	1088	1088	1078	1056	1031	1012
			Final	246	996	995	1001	1029	1054	1078	1091	1094	1082	x	1034	1011
3	1	D	Inicial	251	1001	1000	1011	1030	1055	1076	1088	1088	1078	1056	1031	1012
			Final	249	996	1002	1017	1041	1067	1084	1090	1087	x	1046	1020	1003
4	1	D	Inicial	276	993	1000	1016	1043	1067	1086	1093	1087	1068	1044	1018	1000
			Final	280	983	997	1022	1050	1078	1096	1104	1089	1064	1034	1006	988
5	1	D	Inicial	276	993	1000	1016	1043	1067	1086	1093	1087	1068	1044	1018	1000
			Final	285	990	1002	1022	1050	1079	1090	1093	1084	x	1032	1008	992
6	1	D	Inicial	268	1004	1001	1011	1030	1048	1066	1080	1082	1076	1060	1040	1015
			Final	261	979	977	990	1018	1053	1085	1103	1107	1095	x	1032	1001
7	1	D	Inicial	281	978	978	998	1028	1062	1093	1109	1107	1089	x	1025	993
			Final	286	978	965	982	1014	1053	1090	1110	1114	1102	x	1032	998
8	1	D	Inicial	281	978	978	998	1028	1062	1093	1109	1107	1089	x	1025	993
			Final	282	972	973	991	1025	1062	1094	1113	1114	1096	x	1026	998
9	1	D	Inicial	281	978	978	998	1028	1062	1093	1109	1107	1089	x	1025	993
			Final	282	971	974	997	1033	1070	1100	1115	1111	1089	x	1014	1088
10	1	D	Inicial	275	978	988	998	1028	1056	1093	1109	1107	1089	x	1025	993
			Final	292	984	987	1005	1034	1063	1087	1101	1097	1080	1055	1021	995
Primário Esquerdo	1	E	Inicial	239	1032	1026	1026	1029	1036	1047	1055	1069	1067	1060	1049	1039
			Final	253	10039	1032	1025	x	1027	1038	1048	1056	1060	1060	1057	1048
	2	E	Inicial	253	10039	1032	1025	x	1027	1038	1048	1056	1060	1060	1057	1048
			Final	271	1055	1042	1029	1021	1011	1019	1031	1041	1057	1066	1069	1064
lobo sup.	1	E	Inicial	271	1055	1042	1029	1021	1011	1019	1031	1041	1057	1066	1069	1064
			Final	277	1064	1053	1040	1024	1011	1010	1020	1033	1050	1061	1068	1069
divisão sup.	1	E	Inicial	277	1064	1053	1040	1024	1011	1010	1020	1033	1050	1061	1068	1069
			Final	276	1073	1058	1040	x	1009	1005	1009	1026	1045	1062	1076	1078
Lingular	1	E	Inicial	277	1064	1053	1040	1024	1011	1010	1020	1033	1050	1061	1068	1069
			Final	282	1068	1056	1043	x	1015	x	1015	1026	1042	1059	1069	1071
lobo inf.	1	E	Inicial	271	1055	1042	1029	1021	1011	1019	1031	1041	1057	1066	1069	1064
			Final	296	1067	1050	1030	1015	1001	1004	1011	1035	1053	1069	1079	1078
1- 2	1	E	Inicial	276	1073	1058	1040	x	1009	1005	1009	1026	1045	1062	1076	1078
			Final	258	1078	1061	1038	1017	1001	997	1006	1023	1048	1069	1085	1088
3	1	E	Inicial	276	1073	1058	1040	x	1009	1005	1009	1026	1045	1062	1076	1078
			Final	261	1078	1066	1046	x	1011	1004	1006	1021	1037	1058	1074	1080
4	1	E	Inicial	282	1068	1056	1043	x	1015	x	1015	1026	1042	1059	1069	1071
			Final	281	1077	1069	1055	1039	1023	1013	1010	1015	1030	1047	1065	1073
5	1	E	Inicial	282	1068	1056	1043	x	1015	x	1015	1026	1042	1059	1069	1071
			Final	289	1072	1061	1048	1029	1016	1011	1012	1023	1039	1055	1069	1074
6	1	E	Inicial	280	1062	1045	1023	1010	1007	1010	1025	1040	1060	1072	1079	1079
			Final	290	1066	1045	x	1005	1002	1004	1018	1040	1064	1079	1086	1081
7-8	1	E	Inicial	296	1067	1050	1030	1015	1001	1004	1011	1035	1053	1069	1079	1078
			Final	300	1073	1059	1040	1020	1008	1005	1011	1029	1046	1065	1076	1079
9	1	E	Inicial	296	1067	1050	1030	1015	1001	1004	1011	1035	1053	1069	1079	1078
			Final	316	1084	1065	1039	1014	996	990	999	1020	1044	1070	1087	1092
10	1	E	Inicial	296	1067	1050	1030	1015	1001	1004	1011	1035	1053	1069	1079	1078
			Final	317	1069	1045	1019	1000	992	999	1015	1041	1065	1084	1092	1085

Foram escolhidas as coordenadas defasadas de (-)30° para Y e de (-)120° para Z.

#### 4.2.2 Determinação das coordenadas da medição

Foram feitas seis medições para cada ponto coordenado, e calculada a sua média (MI).

Nas TAB. 4.3 e 4.4, estão os seis conjuntos de medições para as vias aéreas e os brônquios segmentares do pulmão direito.

TABELA 4.3

Primeiro conjunto de medição das coordenadas do pulmão direito

Medições	1			2			3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
		-30°	-120°		-30°	-120°		-30°	-120°
Traquéia	140,0	1048,1	1051,0	140,1	1048,0	1051,2	140,0	1048,0	1051,1
	173,1	1043,1	1046,0	172,9	1043,0	1046,1	173,0	1042,9	1046,0
	173,1	1043,1	1046,0	172,9	1043,0	1046,1	173,0	1042,9	1046,0
	206,0	1036,1	1041,4	206,1	1036,0	1041,0	206,0	1036,1	1041,3
	206,0	1036,1	1041,4	206,1	1036,0	1041,0	206,0	1036,1	1041,3
	239,3	1026,0	1036,0	239,2	1026,0	1036,0	239,4	1026,0	1036,0
Primário Direito	239,3	1026,0	1036,0	239,2	1026,0	1036,0	239,4	1026,0	1036,0
	254,1	1011,2	1043,7	253,8	1011,3	1044,0	253,9	1011,2	1043,9
	254,1	1011,2	1043,7	253,8	1011,3	1044,0	253,9	1011,2	1043,9
	268,0	1001,1	1048,0	268,1	1000,9	1048,1	268,2	1001,0	1048,2
lobo sup.	254,1	1011,2	1043,7	253,8	1011,3	1044,0	253,9	1011,2	1043,9
	251,3	1000,0	1055,4	251,2	999,9	1055,5	251,4	1000,1	1055,4
lobo médio	268,0	1001,1	1048,0	268,1	1000,9	1048,1	268,2	1001,0	1048,2
	276,7	1000,1	1067,2	276,6	1000,0	1067,3	276,5	1000,2	1067,2
lobo inf.	268,0	1001,1	1048,0	268,1	1000,9	1048,1	268,2	1001,0	1048,2
	275,7	988,1	1056,0	275,8	988,0	1056,0	275,6	988,1	1056,0
	275,7	988,1	1056,0	275,8	988,0	1056,0	275,6	988,1	1056,0
	281,9	978,0	1062,3	281,8	978,2	1062,3	281,9	978,1	1062,4
1	251,3	1000,0	1055,4	251,2	999,9	1055,5	251,4	1000,1	1055,4
	241,0	1003,6	1062,0	241,0	1003,5	1062,1	241,1	1003,6	1062,1
2	251,3	1000,0	1055,4	251,2	999,9	1055,5	251,4	1000,1	1055,4
	246,0	995,2	1054,0	246,0	995,2	1054,0	246,1	995,3	1054,1
3	251,3	1000,0	1055,4	251,2	999,9	1055,5	251,4	1000,1	1055,4
	249,0	1002,2	1067,4	249,0	1002,2	1067,4	249,1	1002,2	1067,3
4	276,7	1000,1	1067,2	276,6	1000,0	1067,3	276,5	1000,2	1067,2
	280,0	997,3	1078,0	280,0	997,3	1078,1	280,1	997,3	1078,1
5	276,7	1000,1	1067,2	276,6	1000,0	1067,3	276,5	1000,2	1067,2
	285,4	1002,0	1079,0	285,5	1002,0	1079,0	285,5	1002,1	1079,1
6	268,0	1001,1	1048,0	268,1	1000,9	1048,1	268,2	1001,0	1048,2
	261,6	977,1	1053,0	261,5	977,0	1053,0	261,6	977,0	1053,1
7	281,9	978,0	1062,3	281,8	978,2	1062,3	281,9	978,1	1062,4
	285,9	965,2	1053,0	286,0	965,1	1053,0	285,9	965,2	1053,1
8	281,9	978,0	1062,3	281,8	978,2	1062,3	281,9	978,1	1062,4
	288,2	973,0	1062,7	288,2	973,0	1062,7	288,3	973,1	1062,6
9	281,9	978,0	1062,3	281,8	978,2	1062,3	281,9	978,1	1062,4
	288,0	974,4	1070,0	288,0	974,5	1070,0	288,0	974,4	1070,1
10	275,7	988,1	1056,0	275,8	988,0	1056,0	275,6	988,1	1056,0
	292,6	987,7	1063,0	292,5	987,7	1063,0	292,6	987,8	1063,1

TABELA 4.4

Segundo conjunto de medição das coordenadas do pulmão direito

Medições	4			5			6			
	Brônquio	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
		-30º	-120º	-30º		-120º	-30º		-120º	
Traquéia	139,9	1048,1	1051,0	140,0	1048,0	1051,1	140,1	1048,2	1051,2	
	173,1	1043,0	1046,1	173,0	1043,1	1046,0	173,0	1043,0	1046,1	
	173,1	1043,0	1046,1	173,0	1043,1	1046,0	173,0	1043,0	1046,1	
	206,1	1036,2	1041,2	206,0	1036,0	1041,5	206,0	1036,0	1041,4	
	206,1	1036,2	1041,2	206,0	1036,0	1041,5	206,0	1036,0	1041,4	
	239,2	1026,0	1036,0	239,4	1026,0	1036,0	239,3	1026,0	1036,0	
Primário Direito	239,2	1026,0	1036,0	239,4	1026,0	1036,0	239,3	1026,0	1036,0	
	254,0	1011,3	1044,0	254,0	1011,4	1043,9	254,1	1011,2	1044,0	
	254,0	1011,3	1044,0	254,0	1011,4	1043,9	254,1	1011,2	1044,0	
	268,2	1000,8	1048,0	268,1	1001,0	1048,1	268,0	1001,0	1048,1	
lobo sup.	254,0	1011,3	1044,0	254,0	1011,4	1043,9	254,1	1011,2	1044,0	
	251,3	1000,0	1055,5	251,2	999,9	1055,6	251,1	1000,0	1055,5	
lobo médio	268,2	1000,8	1048,0	268,1	1001,0	1048,1	268,0	1001,0	1048,1	
	276,6	1000,0	1067,3	276,6	1000,1	1067,2	276,7	1000,0	1067,3	
lobo inf.	268,2	1000,8	1048,0	268,1	1001,0	1048,1	268,0	1001,0	1048,1	
	275,7	988,0	1056,0	275,7	988,1	1056,0	275,6	988,2	1056,0	
	275,7	988,0	1056,0	275,7	988,1	1056,0	275,6	988,2	1056,0	
	282,0	978,1	1062,3	281,8	978,1	1062,4	281,9	978,1	1062,3	
1	251,3	1000,0	1055,5	251,2	999,9	1055,6	251,1	1000,0	1055,5	
	241,1	1003,5	1062,0	241,1	1003,6	1062,0	241,0	1003,5	1062,1	
2	251,3	1000,0	1055,5	251,2	999,9	1055,6	251,1	1000,0	1055,5	
	246,0	995,2	1054,0	246,1	995,3	1054,1	246,0	995,3	1054,0	
3	251,3	1000,0	1055,5	251,2	999,9	1055,6	251,1	1000,0	1055,5	
	249,1	1002,3	1067,3	249,0	1002,2	1067,4	249,0	1002,2	1067,4	
4	276,6	1000,0	1067,3	276,6	1000,1	1067,2	276,7	1000,0	1067,3	
	280,0	997,2	1078,0	280,0	997,3	1078,1	280,1	997,2	1078,2	
5	276,6	1000,0	1067,3	276,6	1000,1	1067,2	276,7	1000,0	1067,3	
	285,5	1002,0	1079,0	285,5	1002,1	1079,1	285,4	1002,0	1079,0	
6	268,2	1000,8	1048,0	268,1	1001,0	1048,1	268,0	1001,0	1048,1	
	261,6	977,1	1053,0	261,6	977,0	1053,1	261,5	977,1	1053,1	
7	282,0	978,1	1062,3	281,8	978,1	1062,4	281,9	978,1	1062,3	
	286,0	965,2	1053,0	286,0	965,1	1053,0	286,0	965,2	1053,1	
8	282,0	978,1	1062,3	281,8	978,1	1062,4	281,9	978,1	1062,3	
	288,3	973,0	1062,7	288,2	973,1	1062,7	288,2	973,0	1062,6	
9	282,0	978,1	1062,3	281,8	978,1	1062,4	281,9	978,1	1062,3	
	288,1	974,5	1070,0	288,0	974,4	1070,1	288,0	974,4	1070,1	
10	275,7	988,0	1056,0	275,7	988,1	1056,0	275,6	988,2	1056,0	
	292,7	987,8	1062,9	292,7	987,7	1062,9	292,6	987,7	1063,0	

Nas TAB. 4.5 e 4.6, estão os seis conjuntos de medições para as vias aéreas e os brônquios segmentares do pulmão esquerdo.

TABELA 4.5

Primeiro conjunto de medição das coordenadas do pulmão esquerdo

Medições	1			2			3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-30º		-120º	-30º		-120º	-30º		-120º	
Traquéia	140,0	1048,1	1051,0	140,1	1048,0	1051,2	140,0	1048,0	1051,1
	173,1	1043,1	1046,0	172,9	1043,0	1046,1	173,0	1042,9	1046,0
Primário Esquerdo	239,3	1026,0	1036,0	239,2	1026,0	1036,0	239,4	1026,0	1036,0
	253,0	1032,0	1027,3	253,0	1032,0	1027,3	253,0	1032,1	1027,3
	253,0	1032,0	1027,3	253,0	1032,0	1027,3	253,0	1032,1	1027,3
	270,9	1042,1	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	270,9	1042,1	1011,1
lobo sup.	270,9	1042,1	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	270,9	1042,1	1011,1
	277,0	1053,2	1011,1	277,0	1053,3	1011,0	277,1	1053,2	1011,0
divisão sup.	277,0	1053,2	1011,1	277,0	1053,3	1011,0	277,1	1053,2	1011,0
	276,0	1058,0	1009,3	276,0	1058,0	1009,3	276,1	1058,0	1009,3
Lingular	277,0	1053,2	1011,1	277,0	1053,3	1011,0	277,1	1053,2	1011,0
	282,1	1056,6	1015,7	282,0	1056,6	1015,7	282,0	1056,5	1015,8
lobo inf.	270,9	1042,1	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	270,9	1042,1	1011,1
	280,1	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,2
	280,1	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,2
	296,0	1050,1	1001,2	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1
1-2	276,0	1058,0	1009,3	276,0	1058,0	1009,3	276,1	1058,0	1009,3
	258,0	1061,1	1001,0	258,0	1061,0	1001,0	258,0	1061,0	1001,1
3	276,0	1058,0	1009,3	276,0	1058,0	1009,3	276,1	1058,0	1009,3
	261,1	1066,1	1011,3	261,0	1066,0	1011,3	261,1	1066,0	1011,3
4	282,1	1056,6	1015,7	282,0	1056,6	1015,7	282,0	1056,5	1015,8
	273,0	1069,0	1023,0	273,1	1069,0	1023,0	273,0	1069,0	1023,1
5	282,1	1056,6	1015,7	282,0	1056,6	1015,7	282,0	1056,5	1015,8
	289,0	1061,1	1016,2	289,0	1061,0	1016,2	289,0	1061,1	1016,2
6	280,1	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,2
	290,2	1045,0	1002,1	290,2	1045,0	1002,0	290,2	1045,0	1002,1
7-8	296,0	1050,1	1001,2	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1
	300,1	1059,3	1008,0	300,0	1059,2	1008,0	300,0	1059,3	1008,0
9	296,0	1050,1	1001,2	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1
	316,2	1065,0	996,1	316,2	1065,0	996,0	316,1	1065,0	996,1
10	296,0	1050,1	1001,2	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1
	317,2	1045,0	992,1	317,3	1045,0	992,0	317,2	1045,1	992,0

TABELA 4.6

Segundo conjunto de medição das coordenadas do pulmão esquerdo

Medições	4			5			6			
	Brônquio	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
		-30º	-120º	-30º		-120º	-30º		-120º	
Traquéia	139,9	1048,1	1051,0	140,0	1048,0	1051,1	140,1	1048,2	1051,2	
	173,1	1043,0	1046,1	173,0	1043,1	1046,0	173,0	1043,0	1046,1	
Primário Esquerdo	239,2	1026,0	1036,0	239,4	1026,0	1036,0	239,3	1026,0	1036,0	
	253,1	1032,0	1027,2	253,1	1032,0	1027,2	253,0	1032,0	1027,3	
	253,1	1032,0	1027,2	253,1	1032,0	1027,2	253,0	1032,0	1027,3	
	271,0	1042,0	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	
lobo sup.	271,0	1042,0	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	
	277,0	1053,2	1010,9	277,1	1053,3	1011,0	277,0	1053,3	1011,0	
divisão sup.	277,0	1053,2	1010,9	277,1	1053,3	1011,0	277,0	1053,3	1011,0	
	276,0	1058,1	1009,3	276,0	1058,0	1009,2	276,0	1058,0	1009,0	
Lingular	277,0	1053,2	1010,9	277,1	1053,3	1011,0	277,0	1053,3	1011,0	
	282,1	1056,6	1015,8	282,0	1056,6	1015,7	282,0	1056,6	1015,7	
lobo inf.	271,0	1042,0	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	271,0	1042,0	1011,0	
	280,0	1045,4	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	
	280,0	1045,4	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	
	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1	296,0	1050,0	1001,1	
1-2	276,0	1058,1	1009,3	276,0	1058,0	1009,2	276,0	1058,0	1009,0	
	258,0	1061,0	1001,0	258,0	1061,0	1001,0	258,0	1061,0	1001,0	
3	276,0	1058,1	1009,3	276,0	1058,0	1009,2	276,0	1058,0	1009,0	
	261,0	1066,0	1011,3	261,0	1066,1	1011,3	261,0	1066,0	1011,3	
4	282,1	1056,6	1015,8	282,0	1056,6	1015,7	282,0	1056,6	1015,7	
	273,0	1069,0	1023,0	273,0	1069,0	1023,0	273,0	1069,0	1023,0	
5	282,1	1056,6	1015,8	282,0	1056,6	1015,7	282,0	1056,6	1015,7	
	289,0	1061,0	1016,2	289,0	1061,0	1016,1	289,0	1061,2	1016,0	
6	280,0	1045,4	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	280,0	1045,5	1007,3	
	290,2	1045,0	1002,0	290,2	1045,0	1002,0	290,2	1045,0	1002,0	
7-8	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1	296,0	1050,0	1001,1	
	300,1	1059,3	1008,0	300,0	1059,3	1008,0	300,0	1059,3	1008,0	
9	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1	296,0	1050,0	1001,1	
	316,2	1065,0	996,0	316,2	1065,0	996,0	316,2	1065,0	996,0	
10	296,0	1050,0	1001,2	296,0	1050,1	1001,1	296,0	1050,0	1001,1	
	317,2	1045,0	992,0	317,2	1045,0	992,0	317,3	1045,0	992,1	

A TAB. 4.7 apresenta as médias (MI) das medições para a árvore brônquica.

TABELA 4.7

Média das medições das coordenadas

Medições		Média (n=6)		
Brônquio	Localização	X	Y	Z
	D / E		30º	120º
Traquéia		140,0	1048,1	1051,1
		173,0	1043,0	1046,1
		173,0	1043,0	1046,1
		206,0	1036,1	1041,3
		206,0	1036,1	1041,3
		239,3	1026,0	1036,0
Primário Direito	D	239,3	1026,0	1036,0
	D	254,0	1011,3	1043,9
		254,0	1011,3	1043,9
lobo sup.	D	268,1	1001,0	1048,1
		254,0	1011,3	1043,9
lobo médio	D	251,3	1000,0	1055,5
		268,1	1001,0	1048,1
lobo inf.	D	276,6	1000,1	1067,3
		268,1	1001,0	1048,1
	D	275,7	988,1	1056,0
		275,7	988,1	1056,0
1	D	281,9	978,1	1062,3
		251,3	1000,0	1055,5
2	D	241,1	1003,6	1062,1
		251,3	1000,0	1055,5
3	D	246,0	995,3	1054,0
		251,3	1000,0	1055,5
4	D	249,0	1002,2	1067,4
		276,6	1000,1	1067,3
5	D	280,0	997,3	1078,1
		276,6	1000,1	1067,3
6	D	285,5	1002,0	1079,0
		268,1	1001,0	1048,1
7	D	261,6	977,1	1053,1
		281,9	978,1	1062,3
8	D	286,0	965,2	1053,0
		281,9	978,1	1062,3
9	D	288,2	973,0	1062,7
		281,9	978,1	1062,3
10	D	288,0	974,4	1070,1
		275,7	988,1	1056,0
Primário Esquerdo	E	292,6	987,7	1063,0
		239,3	1026,0	1036,0
	E	253,0	1032,0	1027,3
		253,0	1032,0	1027,3
lobo sup.	E	271,0	1042,0	1011,0
		271,0	1042,0	1011,0
divisão sup.	E	277,0	1053,3	1011,0
		276,0	1058,0	1009,2
Lingular	E	277,0	1053,3	1011,0
		282,0	1056,6	1015,7
lobo inf.	E	271,0	1042,0	1011,0
		280,0	1045,5	1007,3
	E	280,0	1045,5	1007,3
1-2	E	296,0	1050,1	1001,2
		276,0	1058,0	1009,2
		258,0	1061,0	1001,0
3	E	276,0	1058,0	1009,2
		261,0	1066,0	1011,3
4	E	282,0	1056,6	1015,7
		273,0	1069,0	1023,0
5	E	282,0	1056,6	1015,7
		289,0	1061,1	1016,2
6	E	280,0	1045,5	1007,3
		290,2	1045,0	1002,0
7-8	E	296,0	1050,1	1001,2
		300,0	1059,3	1008,0
9	E	296,0	1050,1	1001,2
		316,2	1065,0	996,0
10	E	296,0	1050,1	1001,2
		317,2	1045,0	992,0

#### 4.2.3 Compensação dos efeitos sistemáticos

Para melhor compreensão, antecipou-se, neste ponto, a análise dos efeitos sistemáticos da medição das coordenadas - item 3.6.2 da metodologia.

Os efeitos sistemáticos foram compensados, por simplificação conforme a TAB. 4.8, utilizando-se os valores de tendência, obtidos na calibração do medidor de coordenadas, mais próximos dos valores obtidos nas médias das medições.



TABELA 4.8

Coordenadas após os efeitos sistemáticos serem compensados

Brônquio	Localização D / E	Média (n=6)			Tendência calibração			Média - Tendência		
		X	Y	Z	X	y	z	X	Y	Z
			30º	120º						
Traquéia		140,0	1048,1	1051,1	-1,35	1,2	1,2	141,4	1046,9	1049,9
		173,0	1043,0	1046,1	-1,03	1,8	1,8	174,0	1041,2	1044,3
		173,0	1043,0	1046,1	-1,03	1,8	1,8	174,0	1041,2	1044,3
		206,0	1036,1	1041,3	-0,12	1,8	1,8	206,2	1034,3	1039,5
		206,0	1036,1	1041,3	-0,12	1,8	1,8	206,2	1034,3	1039,5
		239,3	1026,0	1036,0	0,64	1,8	1,8	238,7	1024,2	1034,2
Primário Direito	D	239,3	1026,0	1036,0	0,64	1,8	1,8	238,7	1024,2	1034,2
		254,0	1011,3	1043,9	-0,04	1,2	1,8	254,0	1010,1	1042,1
		254,0	1011,3	1043,9	-0,04	1,2	1,8	254,0	1010,1	1042,1
lobo sup.	D	268,1	1001,0	1048,1	0,68	1,19	1,8	267,4	999,8	1046,3
		254,0	1011,3	1043,9	-0,04	1,2	1,8	254,0	1010,1	1042,1
lobo médio	D	251,3	1000,0	1055,5	-0,04	1,19	1,2	251,3	998,8	1054,3
		268,1	1001,0	1048,1	0,68	1,19	1,8	267,4	999,8	1046,3
lobo inf.	D	276,6	1000,1	1067,3	0,68	1,19	0,21	275,9	998,9	1067,0
		268,1	1001,0	1048,1	0,68	1,19	1,8	267,4	999,8	1046,3
1	D	275,7	988,1	1056,0	0,68	1,19	1,2	275,0	986,9	1054,8
		275,7	988,1	1056,0	0,68	1,19	1,2	275,0	986,9	1054,8
2	D	281,9	978,1	1062,3	0,68	0,51	1,2	281,2	977,6	1061,1
		281,9	978,1	1062,3	0,68	0,51	1,2	281,2	977,6	1061,1
3	D	251,3	1000,0	1055,5	-0,04	1,19	1,2	251,3	998,8	1054,3
		241,1	1003,6	1062,1	0,64	1,19	1,2	240,4	1002,4	1060,9
4	D	251,3	1000,0	1055,5	-0,04	1,19	1,2	251,3	998,8	1054,3
		249,0	1002,2	1067,4	-0,04	1,19	0,21	249,1	1001,0	1067,2
5	D	276,6	1000,1	1067,3	0,68	1,19	0,21	275,9	998,9	1067,0
		280,0	997,3	1078,1	0,68	1,19	0,21	279,4	996,1	1077,9
6	D	276,6	1000,1	1067,3	0,68	1,19	0,21	275,9	998,9	1067,0
		285,5	1002,0	1079,0	0,68	1,19	0,21	284,8	1000,8	1078,8
7	D	268,1	1001,0	1048,1	0,68	1,19	1,8	267,4	999,8	1046,3
		261,6	977,1	1053,1	-0,04	1,19	1,2	261,6	975,9	1051,9
8	D	281,9	978,1	1062,3	0,68	0,51	1,2	281,2	977,6	1061,1
		286,0	965,2	1053,0	0,68	0,51	1,2	285,3	964,7	1051,8
9	D	281,9	978,1	1062,3	0,68	0,51	1,2	281,2	977,6	1061,1
		288,2	973,0	1062,7	0,68	0,51	1,2	287,6	972,5	1061,5
10	D	281,9	978,1	1062,3	0,68	0,51	1,2	281,2	977,6	1061,1
		288,0	974,4	1070,1	0,68	0,51	0,21	287,3	973,9	1069,8
Primário Esquerdo	E	275,7	988,1	1056,0	0,68	1,19	1,2	275,0	986,9	1054,8
		292,6	987,7	1063,0	0,68	1,19	1,2	291,9	986,5	1061,8
lobo sup.	E	239,3	1026,0	1036,0	0,64	1,8	1,8	238,7	1024,2	1034,2
		253,0	1032,0	1027,3	-0,04	1,8	1,8	253,1	1030,2	1025,5
divisão sup.	E	253,0	1032,0	1027,3	-0,04	1,8	1,8	253,1	1030,2	1025,5
		271,0	1042,0	1011,0	0,68	1,8	1,2	270,3	1040,2	1009,8
Lingular	E	271,0	1042,0	1011,0	0,68	1,8	1,2	270,3	1040,2	1009,8
		277,0	1053,3	1011,0	0,68	1,2	1,2	276,4	1052,1	1009,8
lobo inf.	E	277,0	1053,3	1011,0	0,68	1,2	1,2	276,4	1052,1	1009,8
		276,0	1058,0	1009,2	0,68	1,2	1,2	275,3	1056,8	1008,0
1-2	E	277,0	1053,3	1011,0	0,68	1,2	1,2	276,4	1052,1	1009,8
		282,0	1056,6	1015,7	0,68	1,2	1,2	281,4	1055,4	1014,5
3	E	271,0	1042,0	1011,0	0,68	1,8	1,2	270,3	1040,2	1009,8
		280,0	1045,5	1007,3	0,68	1,8	1,2	279,3	1043,7	1006,1
4	E	280,0	1045,5	1007,3	0,68	1,8	1,2	279,3	1043,7	1006,1
		296,0	1050,1	1001,2	0,68	1,2	1,19	295,3	1048,9	1000,0
5	E	276,0	1058,0	1009,2	0,68	1,2	1,2	275,3	1056,8	1008,0
		258,0	1061,0	1001,0	-0,04	1,2	1,19	258,0	1059,8	999,8
6	E	276,0	1058,0	1009,2	0,68	1,2	1,2	275,3	1056,8	1008,0
		261,0	1066,0	1011,3	-0,04	0,21	1,2	261,1	1065,8	1010,1
7-8	E	282,0	1056,6	1015,7	0,68	1,2	1,2	281,4	1055,4	1014,5
		273,0	1069,0	1023,0	0,68	0,21	1,2	272,3	1068,8	1021,8
9	E	282,0	1056,6	1015,7	0,68	1,2	1,2	281,4	1055,4	1014,5
		289,0	1061,1	1016,2	0,68	1,2	1,2	288,3	1059,9	1015,0
10	E	280,0	1045,5	1007,3	0,68	1,8	1,2	279,3	1043,7	1006,1
		290,2	1045,0	1002,0	0,68	1,8	1,19	289,5	1043,2	1000,8
9	E	296,0	1050,1	1001,2	0,68	1,2	1,19	295,3	1048,9	1000,0
		300,0	1059,3	1008,0	0,68	1,2	1,2	299,4	1058,1	1006,8
10	E	296,0	1050,1	1001,2	0,68	1,2	1,19	295,3	1048,9	1000,0
		316,2	1065,0	996,0	0,28	0,21	1,19	315,9	1064,8	994,8
10	E	296,0	1050,1	1001,2	0,68	1,2	1,19	295,3	1048,9	1000,0
		317,2	1045,0	992,0	0,28	1,8	1,19	317,0	1043,2	990,8

#### 4.2.4 Desenho da árvore brônquica

Com os efeitos sistemáticos compensados, utilizou-se o software AutoCAD release 2000®, para desenhar a árvore brônquica - FIG 4.2.

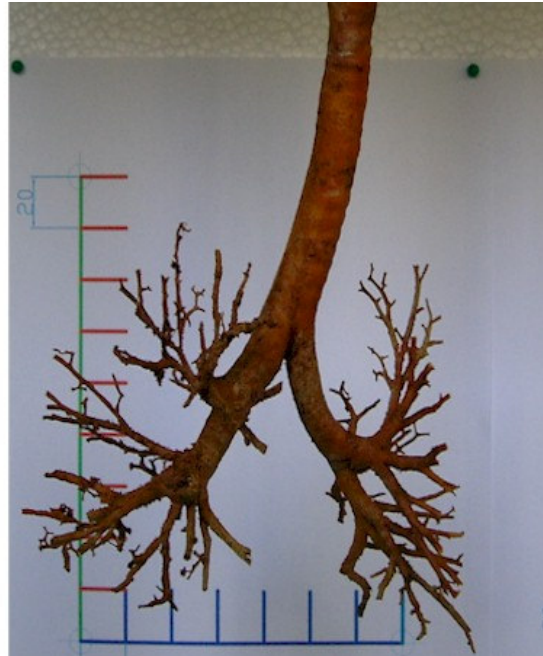
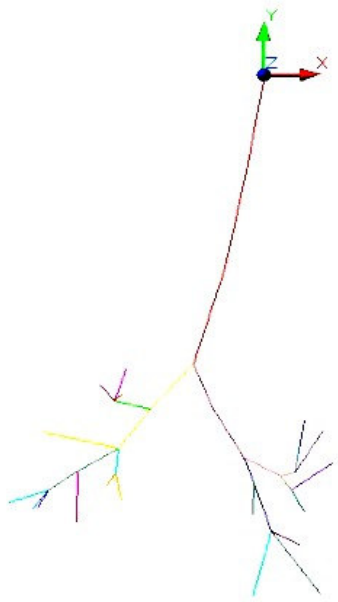


FIGURA 4.2 - Árvore brônquica unifilar gerada com as médias das seis medições, e o modelo físico na mesma orientação

Como a árvore brônquica foi construída com as coordenadas giradas de  $(-30^\circ)$  em relação ao eixo X, utilizou-se o AutoCAD release 2000®, para girá-la de  $(+30^\circ)$  em torno do mesmo, e, assim, posicioná-la correspondentemente a uma pessoa em decúbito dorsal - FIG 4.3.

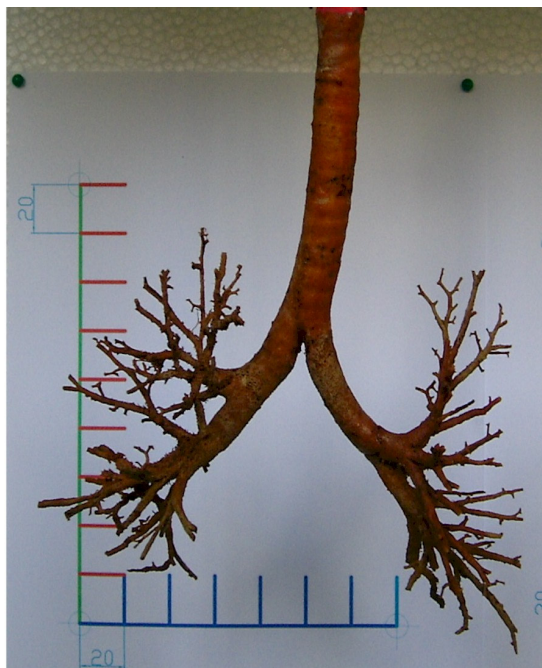
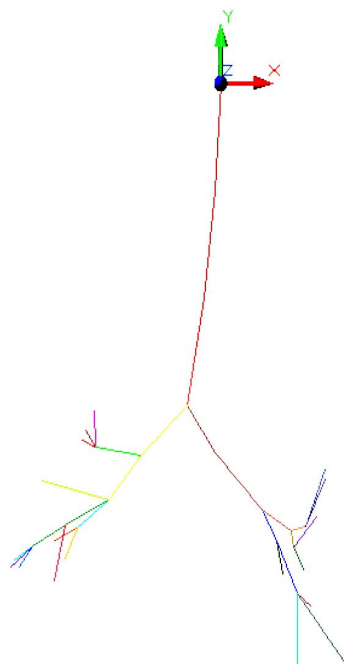


FIGURA 4.3 - Árvore brônquica unifilar girada de  $(+30^\circ)$  em relação ao eixo X, e o modelo físico na mesma orientação

#### 4.2.5 Coordenadas dos brônquios segmentares

Após o giro, usou-se o AutoCAD release 2000@., para se obter as novas coordenadas dos brônquios segmentares - TAB. 4.9.

TABELA 4.9  
Coordenadas após giro de (+)30° em X

Brônquio	Localização	Coordenadas		
		X	Y	Z
1	D	251,3000	1003,0442	1029,6605
		240,4000	1002,8619	1037,1763
2	D	251,3000	1003,0442	1029,6605
		246,1000	999,7239	1026,0115
3	D	251,3000	1003,0442	1029,6605
		249,1000	998,4994	1041,9322
4	D	275,9000	996,7808	1040,7090
		279,4000	988,9059	1048,7487
5	D	275,9000	996,7808	1040,7090
		284,8000	992,5262	1051,8781
6	D	267,4000	1007,9102	1023,2323
		261,6000	984,4122	1016,1321
7	D	281,2000	981,2844	1024,9495
		285,3000	974,7627	1010,4454
8	D	281,2000	981,2844	1024,9495
		287,6000	976,8677	1022,3995
9	D	281,2000	981,2844	1024,9495
		287,3000	973,7301	1030,6339
10	D	275,0000	992,4885	1024,1435
		291,9000	988,6421	1030,0057
1-2	E	275,3000	1076,4237	1018,5635
		258,0000	1083,1217	1012,9621
3	E	275,3000	1076,4237	1018,5635
		261,1000	1083,1679	1024,8822
4	E	281,4000	1071,9612	1023,4927
		272,3000	1079,9160	1036,5147
5	E	281,4000	1071,9612	1023,4927
		288,3000	1075,6083	1026,1757
6	E	279,3000	1066,0287	1010,3681
		289,5000	1068,2457	1005,5282
7-8	E	295,3000	1073,5821	1007,6853
		299,4000	1078,1495	1018,1743
9	E	295,3000	1073,5821	1007,6853
		315,9000	1089,9519	1011,1320
10	E	295,3000	1073,5821	1007,6853
		317,0000	1073,2457	996,8679

#### 4.2.6 Determinação dos ângulos de projeção dos brônquios segmentares

Aplicando-se a metodologia desenvolvida em 3.4, obteve-se a TAB. 4.10, onde  $\Omega$  e  $\Lambda$  são os ângulos de giro do dispositivo de drenagem postural nos eixos X e Y, respectivamente.

TABELA 4.10

Ângulos definidores, de projeção e de rotação, dos brônquios segmentares

Brônquio		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	HipXY	HipZ	$\Delta Y/\Delta X$	$\Delta Z/\text{HipoXY}$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\omega$	$\Omega$	$\Lambda$
1	D	-10,90	-0,18	7,52	10,90	13,24	0,02	0,69	180,96	34,58	145,41	90,79	-0,79	55,41
2	D	-5,20	-3,32	-3,65	6,17	7,17	0,64	-0,59	212,56	-30,60	215,06	117,59	-27,59	125,06
3	D	-2,20	-4,54	12,27	5,05	13,27	2,07	2,43	244,17	67,63	100,16	110,03	-20,03	10,16
4	D	3,50	-7,87	8,04	8,62	11,79	-2,25	0,93	293,96	43,01	66,47	131,93	-41,93	-23,53
5	D	8,90	-4,25	11,17	9,86	14,90	-0,48	1,13	334,45	48,55	51,45	106,59	-16,59	-38,55
6	D	-5,80	-23,50	-7,10	24,20	25,22	4,05	-0,29	256,13	-16,35	230,76	158,69	-68,69	140,76
7	D	4,10	-6,52	-14,50	7,70	16,42	-1,59	-1,88	302,16	-62,03	285,78	113,40	-23,40	195,78
8	D	6,40	-4,42	-2,55	7,78	8,18	-0,69	-0,33	325,39	-18,16	338,28	122,66	-32,66	248,28
9	D	6,10	-7,55	5,68	9,71	11,25	-1,24	0,59	308,92	30,35	42,98	132,18	-42,18	-47,02
10	D	16,90	-3,85	5,86	17,33	18,30	-0,23	0,34	347,18	18,69	19,13	102,14	-12,14	-70,87
1-2	E	-17,30	6,70	-5,60	18,55	19,38	-0,39	-0,30	158,84	-16,80	197,94	69,78	20,22	107,94
3	E	-14,20	6,74	6,32	15,72	16,94	-0,47	0,40	154,59	21,90	156,01	66,54	23,46	66,01
4	E	-9,10	7,95	13,02	12,09	17,77	-0,87	1,08	138,84	47,13	124,95	63,40	26,60	34,95
5	E	6,90	3,65	2,68	7,80	8,25	0,53	0,34	27,86	18,97	21,25	63,77	26,23	-68,75
6	E	10,20	2,22	-4,84	10,44	11,51	0,22	-0,46	12,26	-24,88	334,62	78,89	11,11	244,62
7-8	E	4,10	4,57	10,49	6,14	12,15	1,11	1,71	48,09	59,67	68,65	67,92	22,08	-21,35
9	E	20,60	16,37	3,45	26,31	26,54	0,79	0,13	38,47	7,46	9,50	51,91	38,09	-80,50
10	E	21,70	-0,34	-10,82	21,70	24,25	-0,02	-0,50	359,11	-26,49	333,50	90,79	-0,79	243,50

4.2.7 Calibração do medidor de coordenadas

## 4.2.7.1 Eixo X

TABELA 4.11

Medições e cálculo da média

Ponto	Valores em mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MI
1	19,6	19,8	19,7	19,7	19,6	19,6	19,6	19,6	19,7	19,6	19,65
2	41,0	40,9	41,0	41,0	41,0	40,9	41,0	40,9	41,0	41,0	40,97
3	62,8	62,9	62,9	62,8	62,7	62,8	62,8	62,9	62,8	62,9	62,83
4	83,9	83,8	84,0	83,9	83,9	83,9	83,9	83,8	83,9	83,8	83,88
5	105,7	105,6	105,7	105,6	105,7	105,6	105,6	105,6	105,7	105,6	105,64
6	126,0	125,9	126,0	125,9	126,0	125,9	126,0	125,9	126,0	126,0	125,96
7	147,7	147,7	147,6	147,7	147,8	147,6	147,7	147,7	147,6	147,7	147,68
8	168,7	168,6	168,7	168,6	168,7	168,8	168,6	168,7	168,7	168,7	168,68
9	189,3	189,3	189,2	189,3	189,2	189,3	189,4	189,3	189,3	189,2	189,28
10	210,9	211,0	210,9	210,9	210,8	211,0	210,9	210,8	210,9	211,0	210,91

TABELA 4.12

Cálculo da tendência e repetitividade

Ponto	Valores em mm				
	VVC	MI	Td	Re	Re (95%)
1	21,00	19,65	-1,35	0,07	0,16
2	42,00	40,97	-1,03	0,05	0,11
3	63,00	62,83	-0,17	0,07	0,15
4	84,00	83,88	-0,12	0,06	0,14
5	105,00	105,64	0,64	0,05	0,11
6	126,00	125,96	-0,04	0,05	0,11
7	147,00	147,68	0,68	0,06	0,14
8	168,00	168,68	0,68	0,06	0,14
9	189,00	189,28	0,28	0,06	0,14
10	210,00	210,91	0,91	0,07	0,17

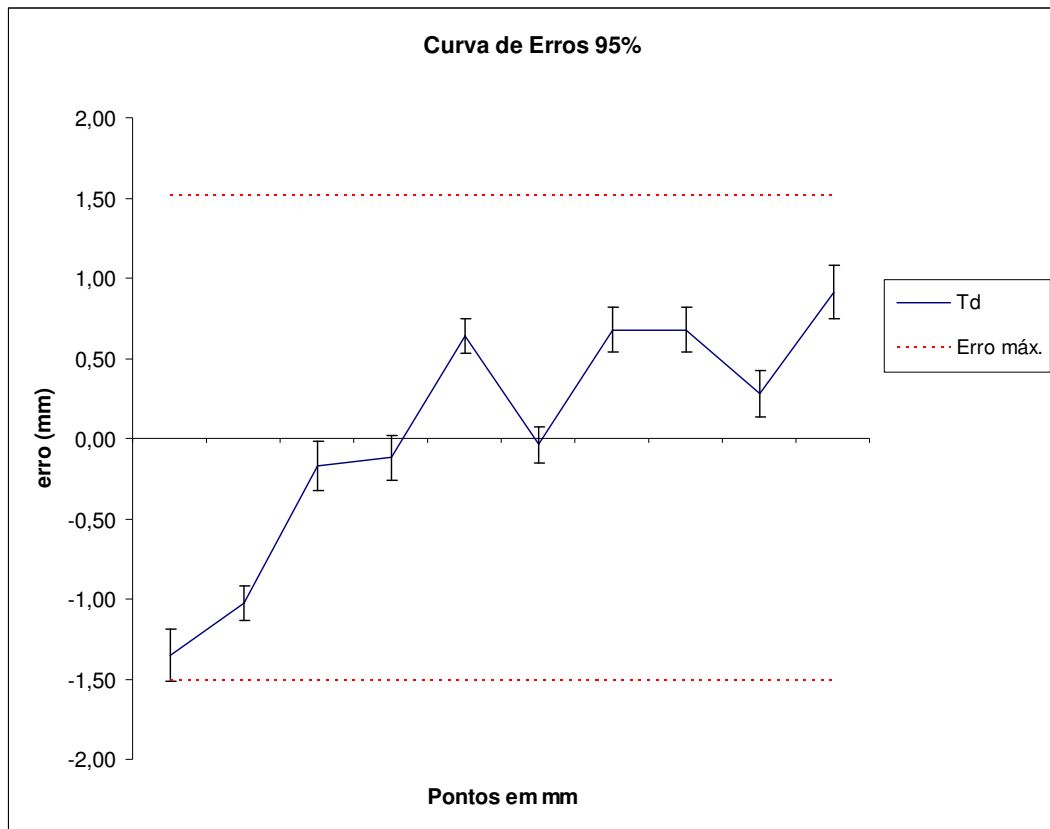


GRÁFICO 4.1 – Curva de erros do medidor de coordenadas para o eixo X

4.2.7.2 Para os eixos Y e Z

TABELA 4.13  
Medições e cálculo da média

Ponto	Valores em mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MI
1	21,3	21,2	21,1	21,2	21,3	21,2	21,2	21,1	21,1	21,2	21,19
2	43,1	42,5	42,5	42,4	42,5	42,4	42,4	42,4	42,4	42,5	42,51
3	64,2	64,2	64,1	64,2	64,3	64,2	64,2	64,2	64,2	64,1	64,19
4	85,2	85,2	85,1	85,2	85,3	85,2	85,1	85,2	85,2	85,3	85,20
5	106,8	106,8	106,7	106,8	106,8	106,9	106,8	106,9	106,8	106,7	106,80
6	127,2	127,1	127,2	127,2	127,2	127,2	127,2	127,2	127,3	127,2	127,20
7	147,2	147,2	147,3	147,2	147,2	147,2	147,3	147,2	147,1	147,2	147,21
8	167,7	167,8	167,8	167,7	167,6	167,8	167,8	167,8	167,8	167,7	167,75
9	188,8	188,9	188,8	188,9	188,8	188,8	188,9	188,7	188,9	188,8	188,83
10	209,4	209,5	209,4	209,4	209,5	209,4	209,3	209,4	209,4	209,5	209,42

TABELA 4.14  
Cálculo da tendência e repetitividade

Ponto	Valores em mm				
	VVC	MI	Td	Re	Re (95%)
1	21,00	21,19	0,19	0,07	0,17
2	42,00	42,51	0,51	0,21	0,12
3	63,00	64,19	1,19	0,06	0,13
4	84,00	85,20	1,20	0,07	0,15
5	105,00	106,80	1,80	0,07	0,15
6	126,00	127,20	1,20	0,05	0,11
7	147,00	147,21	0,21	0,06	0,13
8	168,00	167,75	-0,25	0,07	0,15
9	189,00	188,83	-0,17	0,07	0,15
10	210,00	209,42	-0,58	0,06	0,14

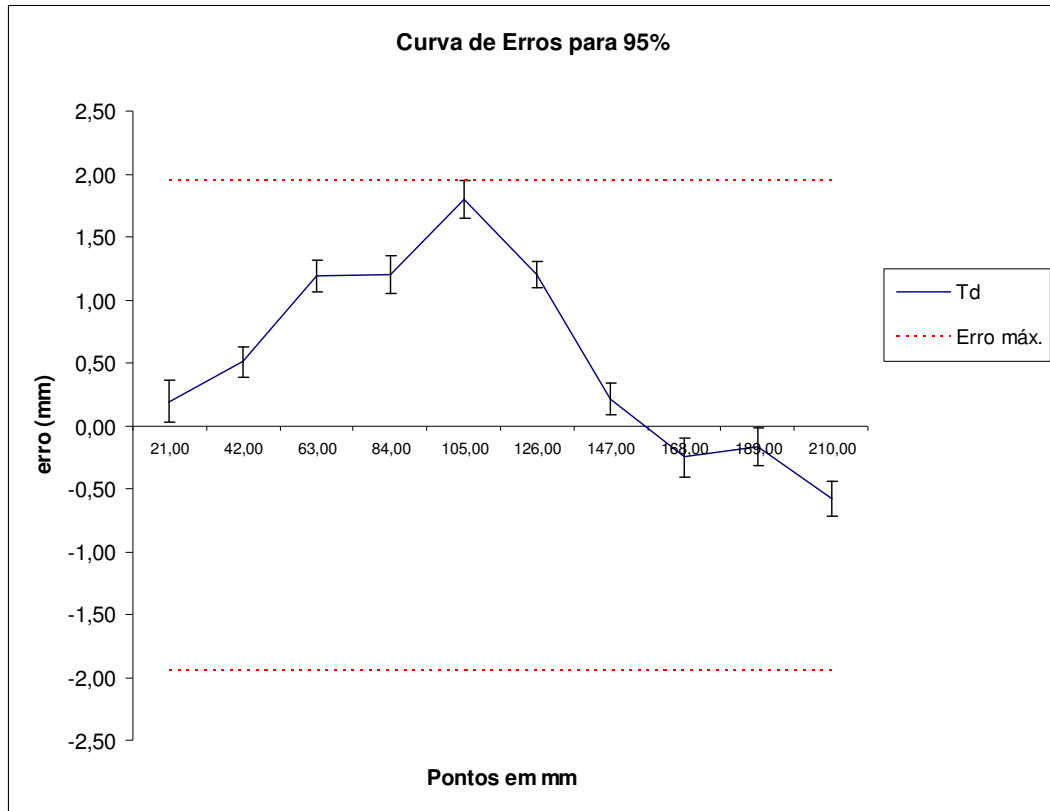


GRÁFICO 4.2 – Curva de erros do medidor de coordenadas para os eixos Y e Z

#### 4.2.8 Determinação dos efeitos aleatórios da medição

Por simplificação, foram considerados apenas os erros aleatórios da calibração e a repetitividade.



TABELA 4.15  
Cálculo da tendência e repetitividade

Brânquio	D / E	Erro al. calibração			Repetitividade			Soma dos erros aleatórios			grau de lib. Ef.		
		x	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
		n=10	n=10	n=10	n=6	n=6	n=6						
Traquéia		± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,09	± 0,10	± 0,10	± 0,10	12,3	8,8	8,2
		± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,08	± 0,05	± 0,09	± 0,10	± 0,09	9,4	12,3	14,0
		± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,08	± 0,05	± 0,09	± 0,10	± 0,09	9,4	12,3	14,0
		± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,08	± 0,18	± 0,08	± 0,11	± 0,19	13,7	11,6	6,6
		± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,08	± 0,18	± 0,08	± 0,11	± 0,19	13,7	11,6	6,6
Primário Direito	D	± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,09	± 0,00	± 0,00	± 0,10	± 0,07	± 0,07	8,2	9,0	9,0
		± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,12	± 0,08	± 0,12	± 0,13	± 0,11	± 0,14	6,9	11,6	8,6
	D	± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,12	± 0,08	± 0,12	± 0,13	± 0,11	± 0,14	6,9	11,6	8,6
lobo sup.		± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,12	± 0,08	± 0,12	± 0,13	± 0,11	± 0,14	6,9	11,6	8,6
	D	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,08	± 0,08	± 0,12	± 0,10	± 0,09	7,3	10,9	9,4
lobo médio		± 0,06	± 0,06	± 0,07	± 0,09	± 0,10	± 0,08	± 0,11	± 0,12	± 0,10	9,4	8,4	12,3
	D	± 0,06	± 0,06	± 0,06	± 0,08	± 0,08	± 0,05	± 0,10	± 0,10	± 0,08	10,9	10,2	13,4
lobo inf.	D	± 0,06	± 0,06	± 0,07	± 0,09	± 0,10	± 0,08	± 0,11	± 0,12	± 0,10	9,4	8,4	12,3
		± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,00	± 0,10	± 0,10	± 0,05	10,9	10,9	9,0
1	D	± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,00	± 0,10	± 0,10	± 0,05	10,9	10,9	9,0
		± 0,06	± 0,21	± 0,05	± 0,08	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,22	± 0,07	10,9	10,6	12,6
2	D	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,08	± 0,08	± 0,12	± 0,10	± 0,09	7,3	10,9	9,4
		± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,07	± 0,08	± 0,07	12,1	13,4	12,1
3	D	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,08	± 0,08	± 0,12	± 0,10	± 0,09	7,3	10,9	9,4
		± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,07	± 0,08	± 0,07	12,6	13,4	12,6
4	D	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,08	± 0,08	± 0,12	± 0,10	± 0,09	7,3	10,9	9,4
		± 0,06	± 0,06	± 0,06	± 0,08	± 0,08	± 0,05	± 0,10	± 0,10	± 0,08	10,9	10,2	13,4
5	D	± 0,06	± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,08	± 0,10	13,7	13,7	10,9
		± 0,06	± 0,06	± 0,06	± 0,08	± 0,08	± 0,05	± 0,10	± 0,10	± 0,08	10,9	10,2	13,4
6	D	± 0,06	± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,08	13,7	13,7	10,9
		± 0,06	± 0,06	± 0,07	± 0,09	± 0,10	± 0,08	± 0,11	± 0,12	± 0,10	9,4	8,4	12,3
7	D	± 0,05	± 0,06	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,07	± 0,08	± 0,07	12,6	13,4	12,1
		± 0,06	± 0,21	± 0,05	± 0,08	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,22	± 0,07	10,9	10,6	12,6
8	D	± 0,06	± 0,21	± 0,05	± 0,08	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,22	± 0,07	10,9	10,6	12,6
		± 0,06	± 0,21	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,05	± 0,08	± 0,22	± 0,07	13,7	10,1	12,6
9	D	± 0,06	± 0,21	± 0,05	± 0,08	± 0,06	± 0,05	± 0,10	± 0,22	± 0,07	10,9	10,6	12,6
		± 0,06	± 0,21	± 0,06	± 0,04	± 0,05	± 0,05	± 0,07	± 0,22	± 0,08	13,9	10,1	13,4
10	D	± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,00	± 0,10	± 0,10	± 0,05	10,9	10,9	9,0
		± 0,06	± 0,06	± 0,05	± 0,08	± 0,05	± 0,08	± 0,10	± 0,08	± 0,09	10,9	13,7	9,4
Primário Esquerdo	E	± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,09	± 0,00	± 0,00	± 0,10	± 0,07	± 0,07	8,2	9,0	9,0
		± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,07	± 0,08	± 0,09	12,6	13,4	14,0
	E	± 0,05	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,07	± 0,08	± 0,09	12,6	13,4	14,0
lobo sup.		± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,04	± 0,08	± 0,09	± 0,08	13,7	14,0	13,4
	E	± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,08	± 0,07	± 0,09	13,7	12,1	13,5
divisão sup.		± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,08	± 0,07	± 0,09	13,7	12,1	13,5
	E	± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,04	± 0,04	± 0,12	± 0,07	± 0,06	± 0,14	13,9	13,9	8,4
Lingular		± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,08	± 0,07	± 0,09	13,7	12,1	13,5
	E	± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,08	± 0,06	± 0,09	13,7	13,9	14,0
lobo inf.		± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,04	± 0,08	± 0,09	± 0,08	13,7	14,0	13,4
	E	± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,04	± 0,04	± 0,04	± 0,07	± 0,08	± 0,08	13,9	13,4	13,4
		± 0,06	± 0,05	± 0,06	± 0,00	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	9,0	12,1	13,4
1-2	E	± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,04	± 0,04	± 0,12	± 0,07	± 0,06	± 0,14	13,9	13,9	8,4
		± 0,05	± 0,06	± 0,06	± 0,00	± 0,04	± 0,04	± 0,05	± 0,07	± 0,07	9,0	13,9	13,9
3	E	± 0,06	± 0,06	± 0,07	± 0,04	± 0,04	± 0,12	± 0,07	± 0,07	± 0,14	13,9	13,9	8,4
		± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,05	± 0,05	± 0,00	± 0,07	± 0,08	± 0,07	12,6	13,7	9,0
4	E	± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,09	13,7	13,4	14,0
		± 0,06	± 0,06	± 0,07	± 0,04	± 0,00	± 0,04	± 0,07	± 0,06	± 0,08	13,9	9,0	13,4
5	E	± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,08	± 0,06	± 0,09	13,7	13,9	14,0
		± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,00	± 0,08	± 0,08	± 0,06	± 0,10	± 0,11	9,0	8,8	11,4
6	E	± 0,06	± 0,07	± 0,07	± 0,04	± 0,04	± 0,04	± 0,07	± 0,08	± 0,08	13,9	13,4	13,4
		± 0,06	± 0,07	± 0,06	± 0,00	± 0,00	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	9,0	9,0	13,7
7-8	E	± 0,06	± 0,05	± 0,06	± 0,00	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	9,0	12,1	13,4
		± 0,06	± 0,05	± 0,07	± 0,05	± 0,04	± 0,00	± 0,08	± 0,06	± 0,07	13,7	13,9	9,0
9	E	± 0,06	± 0,05	± 0,06	± 0,00	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	9,0	12,1	13,4
		± 0,06	± 0,06	± 0,06	± 0,04	± 0,00	± 0,05	± 0,07	± 0,06	± 0,08	13,9	9,0	13,7
10	E	± 0,06	± 0,05	± 0,06	± 0,00	± 0,05	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	9,0	12,1	13,4
		± 0,06	± 0,07	± 0,06	± 0,05	± 0,04	± 0,05	± 0,08	± 0,08	± 0,08	13,7	13,4	13,7

#### 4.2.9 Incertezas para medidas indiretas nos brônquios segmentares

TABELA 4.16

Incertezas das medidas indiretas e grau de liberdade efetivo

Brônquio		u( $\Delta X$ )68%		u( $\Delta Y$ )68%		u( $\Delta Z$ )68%	
		mm	g. de lib. efetivo	mm	g. de lib. efetivo	mm	g. de lib. efetivo
1	D	0,19	47,93	0,18	89,42	0,16	76,25
2	D	0,19	46,32	0,18	89,42	0,16	75,05
3	D	0,19	46,32	0,17	82,43	0,17	82,78
4	D	0,18	88,31	0,18	80,45	0,18	89,42
5	D	0,18	88,31	0,18	80,45	0,16	108,48
6	D	0,18	63,59	0,20	59,12	0,18	84,64
7	D	0,18	88,31	0,44	82,41	0,14	100,89
8	D	0,18	88,31	0,44	82,41	0,14	100,89
9	D	0,17	82,43	0,44	82,41	0,15	102,62
10	D	0,19	87,38	0,18	88,31	0,14	49,70
1-2	E	0,12	83,91	0,14	108,93	0,21	42,72
3	E	0,14	105,88	0,15	109,12	0,21	40,13
4	E	0,15	109,12	0,14	84,84	0,17	108,98
5	E	0,14	87,18	0,16	60,94	0,20	89,26
6	E	0,13	89,91	0,15	88,33	0,16	108,22
7-8	E	0,14	87,18	0,14	98,87	0,15	88,56
9	E	0,13	89,91	0,13	82,34	0,16	108,48
10	E	0,14	87,18	0,16	101,46	0,16	108,48

TABELA 4.17

Incertezas das medidas indiretas adimensionais e grau de liberdade efetivo

Brônquio		u( $\Delta Y/\Delta X$ ) 68%		u (HipXY)68%		u( $\Delta Z/\text{HipXY}$ ) 68%	
			g. de lib.efetivo		g. de lib.efetivo		g. de lib.efetivo
1	D	0,02	0,00	0,19	36,27	0,03	0,01
2	D	0,06	0,28	0,25	109,28	0,05	0,14
3	D	0,25	111,73	0,23	81,20	0,15	9,74
4	D	0,16	30,50	0,24	130,10	0,05	0,13
5	D	0,03	0,03	0,24	129,96	0,04	0,12
6	D	0,16	14,98	0,24	73,11	0,01	0,00
7	D	0,17	2,06	0,46	101,91	0,13	0,66
8	D	0,09	0,13	0,39	52,65	0,04	0,00
9	D	0,11	0,28	0,44	87,76	0,04	0,01
10	D	0,01	0,00	0,23	99,79	0,01	0,00
1-2	E	0,01	0,00	0,16	121,32	0,01	0,00
3	E	0,02	0,01	0,20	163,12	0,02	0,00
4	E	0,03	0,09	0,21	193,06	0,03	0,07
5	E	0,03	0,09	0,20	101,42	0,03	0,04
6	E	0,02	0,01	0,16	73,17	0,02	0,02
7-8	E	0,07	3,27	0,20	184,09	0,08	2,83
9	E	0,01	0,00	0,19	166,84	0,01	0,00
10	E	0,01	0,00	0,14	40,07	0,01	0,00

TABELA 4.18

Incertezas padrão  $u(\text{tg}(\alpha))$  e  $u(\alpha)$  a 68%

Brônquio		$u(\text{tg}(\alpha))$	$\text{tg}(\alpha) - u(\text{tg}(\alpha))$ 68%	$\text{tg}(\alpha) + u(\text{tg}(\alpha))$ 68%	$\alpha - u(\alpha)$ 68%	$\alpha + u(\alpha)$ 68%	$- u(\alpha)$ 68%	$+ u(\alpha)$ 68%
1	D	0,02	0,00	0,03	180,01 °	181,91 °	-0,95 °	0,95 °
2	D	0,06	0,58	0,70	210,17 °	214,83 °	-2,39 °	2,27 °
3	D	0,25	1,81	2,32	241,11 °	246,67 °	-3,06 °	2,50 °
4	D	0,16	-2,41	-2,09	292,50 °	295,62 °	-1,46 °	1,65 °
5	D	0,03	-0,51	-0,45	333,08 °	335,85 °	-1,37 °	1,40 °
6	D	0,16	3,89	4,21	255,59 °	256,64 °	-0,55 °	0,51 °
7	D	0,17	-1,76	-1,42	299,54 °	305,22 °	-2,62 °	3,07 °
8	D	0,09	-0,78	-0,60	322,15 °	328,90 °	-3,24 °	3,51 °
9	D	0,11	-1,34	-1,13	306,65 °	311,44 °	-2,27 °	2,52 °
10	D	0,01	-0,24	-0,21	346,47 °	347,89 °	-0,70 °	0,71 °
1-2	E	0,01	-0,40	-0,38	158,31 °	159,37 °	-0,53 °	0,53 °
3	E	0,02	-0,49	-0,46	153,87 °	155,32 °	-0,72 °	0,73 °
4	E	0,03	-0,90	-0,84	137,88 °	139,83 °	-0,96 °	0,99 °
5	E	0,03	0,49	0,56	26,32 °	29,36 °	-1,54 °	1,50 °
6	E	0,02	0,20	0,23	11,29 °	13,22 °	-0,97 °	0,96 °
7-8	E	0,07	1,04	1,19	46,19 °	49,85 °	-1,90 °	1,77 °
9	E	0,01	0,78	0,81	38,06 °	38,88 °	-0,41 °	0,41 °
10	E	0,01	-0,02	-0,01	358,70 °	359,53 °	-0,42 °	0,42 °

TABELA 4.19

Incertezas padrão  $u(\text{tg}(\alpha))$  e  $u(\alpha)$  a 95%

Brônquio		$u(\text{tg}(\alpha))$ 95%	$\text{tg}(\alpha) - u(\text{tg}(\alpha))$ 95%	$\text{tg}(\alpha) + u(\text{tg}(\alpha))$ 95%	$\alpha - u(\alpha)$ 95%	$\alpha + u(\alpha)$ 95%	$- u(\alpha)$ 95%	$+ u(\alpha)$ 95%
1	D	0,23	-0,21	0,25	167,87 °	193,94 °	-13,08 °	12,99 °
2	D	0,80	-0,16	1,44	170,86 °	235,18 °	-41,70 °	22,63 °
3	D	0,51	1,56	2,57	237,32 °	248,76 °	-6,85 °	4,59 °
4	D	0,34	-2,59	-1,91	291,09 °	297,68 °	-2,88 °	3,72 °
5	D	0,41	-0,89	-0,06	318,24 °	356,39 °	-16,21 °	21,94 °
6	D	0,35	3,70	4,40	254,87 °	257,21 °	-1,26 °	1,07 °
7	D	0,79	-2,38	-0,80	292,79 °	321,30 °	-9,37 °	19,15 °
8	D	1,22	-1,91	0,52	297,69 °	387,70 °	-27,70 °	62,31 °
9	D	1,48	-2,71	0,24	290,22 °	373,39 °	-18,70 °	64,47 °
10	D	0,18	-0,41	-0,05	337,76 °	357,35 °	-9,41 °	10,17 °
1-2	E	0,15	-0,54	-0,24	151,80 °	166,61 °	-7,04 °	7,77 °
3	E	0,22	-0,69	-0,26	145,33 °	165,52 °	-9,27 °	10,93 °
4	E	0,42	-1,29	-0,45	127,69 °	155,58 °	-11,15 °	16,74 °
5	E	0,47	0,06	1,00	3,15 °	45,06 °	-24,71 °	17,20 °
6	E	0,25	-0,03	0,46	-1,66 °	24,88 °	-13,92 °	12,61 °
7-8	E	0,24	0,88	1,35	41,25 °	53,49 °	-6,84 °	5,41 °
9	E	0,16	0,63	0,96	32,30 °	43,74 °	-6,17 °	5,27 °
10	E	0,10	-0,12	0,09	353,34 °	364,90 °	-5,77 °	5,79 °

TABELA 4.20

Incertezas padrão  $u(\text{tg}(\beta))$  e  $u(\beta)$  a 68%

Brônquio		$u(\text{tg}(\beta))$ 68%	$\text{tg}(\beta) - u(\text{tg}(\beta))$ 68%	$\text{tg}(\beta) + u(\text{tg}(\beta))$ 68%	$\beta - u(\beta)$ 68%	$\beta + u(\beta)$ 68%	$-u(\beta)$ 68%	$+u(\beta)$ 68%
1	D	0,03	0,66	0,72	33,51 <sup>º</sup>	35,63 <sup>º</sup>	-1,07 <sup>º</sup>	1,05 <sup>º</sup>
2	D	0,05	-0,64	-0,54	-32,70 <sup>º</sup>	-28,40 <sup>º</sup>	-2,10 <sup>º</sup>	2,20 <sup>º</sup>
3	D	0,15	2,28	2,58	66,36 <sup>º</sup>	68,79 <sup>º</sup>	-1,28 <sup>º</sup>	1,15 <sup>º</sup>
4	D	0,05	0,89	0,98	41,57 <sup>º</sup>	44,39 <sup>º</sup>	-1,45 <sup>º</sup>	1,38 <sup>º</sup>
5	D	0,04	1,09	1,18	47,44 <sup>º</sup>	49,61 <sup>º</sup>	-1,11 <sup>º</sup>	1,07 <sup>º</sup>
6	D	0,01	-0,30	-0,28	-16,89 <sup>º</sup>	-15,81 <sup>º</sup>	-0,54 <sup>º</sup>	0,54 <sup>º</sup>
7	D	0,13	-2,01	-1,75	-63,60 <sup>º</sup>	-60,27 <sup>º</sup>	-1,57 <sup>º</sup>	1,75 <sup>º</sup>
8	D	0,04	-0,36	-0,29	-19,95 <sup>º</sup>	-16,33 <sup>º</sup>	-1,79 <sup>º</sup>	1,83 <sup>º</sup>
9	D	0,04	0,54	0,63	28,49 <sup>º</sup>	32,13 <sup>º</sup>	-1,85 <sup>º</sup>	1,78 <sup>º</sup>
10	D	0,01	0,33	0,35	18,04 <sup>º</sup>	19,33 <sup>º</sup>	-0,65 <sup>º</sup>	0,64 <sup>º</sup>
1-2	E	0,01	-0,32	-0,29	-17,54 <sup>º</sup>	-16,06 <sup>º</sup>	-0,74 <sup>º</sup>	0,74 <sup>º</sup>
3	E	0,02	0,38	0,42	20,99 <sup>º</sup>	22,80 <sup>º</sup>	-0,91 <sup>º</sup>	0,90 <sup>º</sup>
4	E	0,03	1,05	1,11	46,26 <sup>º</sup>	47,98 <sup>º</sup>	-0,87 <sup>º</sup>	0,84 <sup>º</sup>
5	E	0,03	0,31	0,38	17,22 <sup>º</sup>	20,69 <sup>º</sup>	-1,75 <sup>º</sup>	1,72 <sup>º</sup>
6	E	0,02	-0,49	-0,44	-25,93 <sup>º</sup>	-23,80 <sup>º</sup>	-1,05 <sup>º</sup>	1,07 <sup>º</sup>
7-8	E	0,08	1,63	1,79	58,47 <sup>º</sup>	60,79 <sup>º</sup>	-1,20 <sup>º</sup>	1,12 <sup>º</sup>
9	E	0,01	0,12	0,14	7,07 <sup>º</sup>	7,86 <sup>º</sup>	-0,40 <sup>º</sup>	0,40 <sup>º</sup>
10	E	0,01	-0,51	-0,49	-26,98 <sup>º</sup>	-26,00 <sup>º</sup>	-0,49 <sup>º</sup>	0,49 <sup>º</sup>

TABELA 4.21

Incertezas padrão  $u(\text{tg}(\beta))$  e  $u(\beta)$  a 95%

Brônquio		$u(\text{tg}(\beta))$ 95%	$\text{tg}(\beta) - u(\text{tg}(\beta))$ 95%	$\text{tg}(\beta) + u(\text{tg}(\beta))$ 95%	$\beta - u(\beta)$ 95%	$\beta + u(\beta)$ 95%	$-u(\beta)$ 95%	$+u(\beta)$ 95%
1	D	0,38	0,31	0,97	17,11 <sup>º</sup>	44,13 <sup>º</sup>	-17,47 <sup>º</sup>	9,54 <sup>º</sup>
2	D	0,71	-1,30	-1,94	-52,41 <sup>º</sup>	-62,74 <sup>º</sup>	-21,81 <sup>º</sup>	-32,14 <sup>º</sup>
3	D	0,35	2,08	4,37	64,37 <sup>º</sup>	77,11 <sup>º</sup>	-3,27 <sup>º</sup>	9,47 <sup>º</sup>
4	D	0,64	0,29	1,17	16,07 <sup>º</sup>	49,59 <sup>º</sup>	-26,95 <sup>º</sup>	6,58 <sup>º</sup>
5	D	0,61	0,53	1,62	27,77 <sup>º</sup>	58,24 <sup>º</sup>	-20,78 <sup>º</sup>	9,69 <sup>º</sup>
6	D	0,14	-0,44	-0,74	-23,55 <sup>º</sup>	-36,48 <sup>º</sup>	-7,20 <sup>º</sup>	-20,13 <sup>º</sup>
7	D	1,84	-3,72	-5,74	-74,96 <sup>º</sup>	-80,11 <sup>º</sup>	-12,93 <sup>º</sup>	-18,08 <sup>º</sup>
8	D	0,49	-0,82	-1,18	-39,25 <sup>º</sup>	-49,72 <sup>º</sup>	-21,09 <sup>º</sup>	-31,56 <sup>º</sup>
9	D	0,60	-0,01	0,53	-0,55 <sup>º</sup>	28,07 <sup>º</sup>	-30,90 <sup>º</sup>	-2,28 <sup>º</sup>
10	D	0,17	0,16	0,49	9,27 <sup>º</sup>	26,06 <sup>º</sup>	-9,41 <sup>º</sup>	7,37 <sup>º</sup>
1-2	E	0,20	-0,50	-0,82	-26,53 <sup>º</sup>	-39,19 <sup>º</sup>	-9,73 <sup>º</sup>	-22,39 <sup>º</sup>
3	E	0,26	0,15	0,53	8,28 <sup>º</sup>	27,89 <sup>º</sup>	-13,61 <sup>º</sup>	5,99 <sup>º</sup>
4	E	0,45	0,63	1,67	32,02 <sup>º</sup>	59,09 <sup>º</sup>	-15,11 <sup>º</sup>	11,96 <sup>º</sup>
5	E	0,47	-0,13	0,18	-7,35 <sup>º</sup>	10,26 <sup>º</sup>	-26,32 <sup>º</sup>	-8,72 <sup>º</sup>
6	E	0,31	-0,78	-1,26	-37,90 <sup>º</sup>	-51,66 <sup>º</sup>	-13,02 <sup>º</sup>	-26,79 <sup>º</sup>
7-8	E	0,36	1,35	2,98	53,47 <sup>º</sup>	71,45 <sup>º</sup>	-6,20 <sup>º</sup>	11,78 <sup>º</sup>
9	E	0,10	0,03	0,16	1,88 <sup>º</sup>	8,91 <sup>º</sup>	-5,58 <sup>º</sup>	1,45 <sup>º</sup>
10	E	0,15	-0,65	-1,16	-32,91 <sup>º</sup>	-49,14 <sup>º</sup>	-6,41 <sup>º</sup>	-22,65 <sup>º</sup>

TABELA 4.22

Incerteza padrão  $u(\cos(\omega))$  68%, grau de liberdade efetivo e a faixa de variação do co-seno

Brônquio		$u(\cos(\omega))$ 68%	g. de lib. Ef.	$\cos(\omega) - u(\cos(\omega))$ 68%	$\cos(\omega) + u(\cos(\omega))$ 68%
1	D	0,01	0,00	-0,03	0,00
2	D	0,03	787,68	-0,49	-0,44
3	D	0,02	242,64	-0,36	-0,33
4	D	0,02	4134,69	-0,69	-0,65
5	D	0,01	153,79	-0,30	-0,27
6	D	0,01	9095,57	-0,94	-0,92
7	D	0,03	27,99	-0,43	-0,37
8	D	0,06	95,49	-0,60	-0,48
9	D	0,04	228,65	-0,71	-0,63
10	D	0,01	43,42	-0,22	-0,20
1- 2	E	0,01	250,98	0,34	0,35
3	E	0,01	403,75	0,39	0,41
4	E	0,01	1869,31	0,44	0,46
5	E	0,02	896,83	0,42	0,46
6	E	0,01	64,71	0,18	0,21
7-8	E	0,01	1127,27	0,36	0,39
9	E	0,01	8318,66	0,61	0,62
10	E	0,01	0,00	-0,02	-0,01

TABELA 4.23  
 Incerteza padrão  $u(\omega)68\%$

Brônquio		$\omega-u(\omega)68\%$	$\omega+u(\omega)68\%$	$-u(\omega)68\%$	$+u(\omega)68\%$
1	D	91,56	90,02 <sup>º</sup>	0,77 <sup>º</sup>	-0,77 <sup>º</sup>
2	D	119,42	115,80 <sup>º</sup>	1,83 <sup>º</sup>	-1,80 <sup>º</sup>
3	D	111,04	109,03 <sup>º</sup>	1,01 <sup>º</sup>	-1,00 <sup>º</sup>
4	D	133,32	130,56 <sup>º</sup>	1,40 <sup>º</sup>	-1,37 <sup>º</sup>
5	D	107,36	105,82 <sup>º</sup>	0,78 <sup>º</sup>	-0,77 <sup>º</sup>
6	D	160,04	157,41 <sup>º</sup>	1,35 <sup>º</sup>	-1,28 <sup>º</sup>
7	D	115,27	111,56 <sup>º</sup>	1,87 <sup>º</sup>	-1,84 <sup>º</sup>
8	D	126,53	118,96 <sup>º</sup>	3,87 <sup>º</sup>	-3,71 <sup>º</sup>
9	D	135,45	129,06 <sup>º</sup>	3,28 <sup>º</sup>	-3,11 <sup>º</sup>
10	D	102,71	101,57 <sup>º</sup>	0,57 <sup>º</sup>	-0,57 <sup>º</sup>
1-2	E	70,23	69,33 <sup>º</sup>	0,45 <sup>º</sup>	-0,45 <sup>º</sup>
3	E	67,13	65,96 <sup>º</sup>	0,58 <sup>º</sup>	-0,59 <sup>º</sup>
4	E	63,96	62,84 <sup>º</sup>	0,56 <sup>º</sup>	-0,56 <sup>º</sup>
5	E	65,12	62,41 <sup>º</sup>	1,35 <sup>º</sup>	-1,36 <sup>º</sup>
6	E	79,68	78,10 <sup>º</sup>	0,79 <sup>º</sup>	-0,79 <sup>º</sup>
7-8	E	68,78	67,06 <sup>º</sup>	0,85 <sup>º</sup>	-0,86 <sup>º</sup>
9	E	52,29	51,53 <sup>º</sup>	0,38 <sup>º</sup>	-0,38 <sup>º</sup>
10	E	91,16	90,43 <sup>º</sup>	0,37 <sup>º</sup>	-0,37 <sup>º</sup>

TABELA 4.24

Incerteza padrão  $u(\cos(\omega))95\%$  e a faixa de variação do co-seno

Brônquio		$u(\cos(\omega))95\%$	$\cos(\omega)-u(\cos(\omega))95\%$	$\cos(\omega)+u(\cos(\omega))95\%$
1	D	0,19	-0,20	0,17
2	D	0,39	-0,85	-0,07
3	D	0,03	-0,38	-0,31
4	D	0,04	-0,70	-0,63
5	D	0,03	-0,31	-0,26
6	D	0,02	-0,95	-0,91
7	D	0,06	-0,46	-0,33
8	D	0,11	-0,65	-0,43
9	D	0,08	-0,75	-0,59
10	D	0,02	-0,23	-0,19
1-2	E	0,01	0,33	0,36
3	E	0,02	0,38	0,42
4	E	0,02	0,43	0,47
5	E	0,04	0,40	0,48
6	E	0,03	0,17	0,22
7-8	E	0,03	0,35	0,40
9	E	0,01	0,61	0,63
10	E	0,09	-0,10	0,08



TABELA 4.25  
 Incerteza padrão  $u(\omega)$ 95%

Brônquio		$\omega - u(\omega)$ 95%	$\omega + u(\omega)$ 95%	$-u(\omega)$ 95%	$+u(\omega)$ 95%
1	D	101,62 <sup>o</sup>	79,99 <sup>o</sup>	10,83 <sup>o</sup>	-10,80 <sup>o</sup>
2	D	148,75 <sup>o</sup>	94,10 <sup>o</sup>	31,15 <sup>o</sup>	-23,49 <sup>o</sup>
3	D	112,05 <sup>o</sup>	108,03 <sup>o</sup>	2,03 <sup>o</sup>	-2,00 <sup>o</sup>
4	D	134,75 <sup>o</sup>	129,22 <sup>o</sup>	2,83 <sup>o</sup>	-2,71 <sup>o</sup>
5	D	108,14 <sup>o</sup>	105,05 <sup>o</sup>	1,55 <sup>o</sup>	-1,54 <sup>o</sup>
6	D	161,49 <sup>o</sup>	156,20 <sup>o</sup>	2,80 <sup>o</sup>	-2,49 <sup>o</sup>
7	D	117,37 <sup>o</sup>	109,54 <sup>o</sup>	3,98 <sup>o</sup>	-3,86 <sup>o</sup>
8	D	130,73 <sup>o</sup>	115,28 <sup>o</sup>	8,06 <sup>o</sup>	-7,39 <sup>o</sup>
9	D	138,93 <sup>o</sup>	126,08 <sup>o</sup>	6,76 <sup>o</sup>	-6,10 <sup>o</sup>
10	D	103,31 <sup>o</sup>	100,96 <sup>o</sup>	1,18 <sup>o</sup>	-1,17 <sup>o</sup>
1- 2	E	70,67 <sup>o</sup>	68,88 <sup>o</sup>	0,89 <sup>o</sup>	-0,90 <sup>o</sup>
3	E	67,71 <sup>o</sup>	65,36 <sup>o</sup>	1,17 <sup>o</sup>	-1,18 <sup>o</sup>
4	E	64,52 <sup>o</sup>	62,27 <sup>o</sup>	1,12 <sup>o</sup>	-1,13 <sup>o</sup>
5	E	66,46 <sup>o</sup>	61,03 <sup>o</sup>	2,68 <sup>o</sup>	-2,75 <sup>o</sup>
6	E	80,49 <sup>o</sup>	77,28 <sup>o</sup>	1,60 <sup>o</sup>	-1,61 <sup>o</sup>
7-8	E	69,63 <sup>o</sup>	66,20 <sup>o</sup>	1,70 <sup>o</sup>	-1,73 <sup>o</sup>
9	E	52,67 <sup>o</sup>	51,15 <sup>o</sup>	0,76 <sup>o</sup>	-0,76 <sup>o</sup>
10	E	95,93 <sup>o</sup>	85,66 <sup>o</sup>	5,14 <sup>o</sup>	-5,13 <sup>o</sup>

TABELA 4.26

Incerteza padrão  $u(\text{tg}(\lambda))68\%$ , grau de liberdade efetivo e a faixa de variação da tangente

Brônquio		$\text{tg}(\lambda)$	$u(\text{tg}(\lambda))68\%$	g. de lib. Ef.	$\text{tg}(\lambda)-u(\text{tg}(\lambda))68\%$	$\text{tg}(\lambda)+u(\text{tg}(\lambda))68\%$
1	D	-0,69	0,03	0,01	-0,72	-0,66
2	D	0,70	0,06	0,28	0,65	0,76
3	D	-5,58	0,55	2544,81	-6,13	-5,02
4	D	2,30	0,17	34,66	2,13	2,46
5	D	1,25	0,04	0,20	1,21	1,30
6	D	1,22	0,07	0,78	1,16	1,29
7	D	-3,54	0,19	80,75	-3,72	-3,35
8	D	-0,40	0,03	0,08	-0,43	-0,37
9	D	0,93	0,05	0,44	0,88	0,98
10	D	0,35	0,01	0,00	0,33	0,36
1-2	E	0,32	0,01	0,00	0,31	0,34
3	E	-0,44	0,02	0,00	-0,46	-0,43
4	E	-1,43	0,04	0,26	-1,47	-1,39
5	E	0,39	0,04	0,08	0,35	0,43
6	E	-0,47	0,02	0,02	-0,50	-0,45
7-8	E	2,56	0,12	22,95	2,43	2,68
9	E	0,17	0,01	0,00	0,16	0,18
10	E	-0,50	0,01	0,00	-0,51	-0,49

TABELA 4.27  
 Incerteza padrão  $u(\lambda)$ 68%

Brônquio		$\lambda-u(\lambda)68\%$	$\lambda+u(\lambda)68\%$	$-u(\lambda)68\%$	$+u(\lambda)68\%$
1	D	144,37 <sup>o</sup>	146,48 <sup>o</sup>	-1,04 <sup>o</sup>	1,07 <sup>o</sup>
2	D	212,83 <sup>o</sup>	217,17 <sup>o</sup>	-2,23 <sup>o</sup>	2,11 <sup>o</sup>
3	D	99,26 <sup>o</sup>	101,26 <sup>o</sup>	-0,90 <sup>o</sup>	1,09 <sup>o</sup>
4	D	64,86 <sup>o</sup>	67,90 <sup>o</sup>	-1,61 <sup>o</sup>	1,43 <sup>o</sup>
5	D	50,48 <sup>o</sup>	52,38 <sup>o</sup>	-0,97 <sup>o</sup>	0,93 <sup>o</sup>
6	D	229,13 <sup>o</sup>	232,27 <sup>o</sup>	-1,62 <sup>o</sup>	1,52 <sup>o</sup>
7	D	285,03 <sup>o</sup>	286,62 <sup>o</sup>	-0,75 <sup>o</sup>	0,83 <sup>o</sup>
8	D	336,64 <sup>o</sup>	339,95 <sup>o</sup>	-1,63 <sup>o</sup>	1,67 <sup>o</sup>
9	D	41,38 <sup>o</sup>	44,50 <sup>o</sup>	-1,60 <sup>o</sup>	1,52 <sup>o</sup>
10	D	18,50 <sup>o</sup>	19,75 <sup>o</sup>	-0,63 <sup>o</sup>	0,62 <sup>o</sup>
1- 2	E	197,18 <sup>o</sup>	198,69 <sup>o</sup>	-0,76 <sup>o</sup>	0,75 <sup>o</sup>
3	E	155,10 <sup>o</sup>	156,94 <sup>o</sup>	-0,92 <sup>o</sup>	0,93 <sup>o</sup>
4	E	124,17 <sup>o</sup>	125,76 <sup>o</sup>	-0,78 <sup>o</sup>	0,81 <sup>o</sup>
5	E	19,42 <sup>o</sup>	23,03 <sup>o</sup>	-1,83 <sup>o</sup>	1,78 <sup>o</sup>
6	E	333,60 <sup>o</sup>	335,65 <sup>o</sup>	-1,01 <sup>o</sup>	1,03 <sup>o</sup>
7-8	E	67,67 <sup>o</sup>	69,55 <sup>o</sup>	-0,98 <sup>o</sup>	0,90 <sup>o</sup>
9	E	9,00 <sup>o</sup>	9,99 <sup>o</sup>	-0,49 <sup>o</sup>	0,49 <sup>o</sup>
10	E	333,02 <sup>o</sup>	333,99 <sup>o</sup>	-0,48 <sup>o</sup>	0,49 <sup>o</sup>

TABELA 4.28

Incerteza padrão  $u(\text{tg}(\lambda))95\%$  e a faixa de variação da tangente

Brônquio		$u(\text{tg}(\lambda))95\%$	$\text{tg}(\lambda)-u(\text{tg}(\lambda))95\%$	$\text{tg}(\lambda)+u(\text{tg}(\lambda))95\%$
1	D	0,38	-1,07	-0,31
2	D	0,79	-0,09	1,49
3	D	1,11	-6,69	-4,47
4	D	0,35	1,95	2,64
5	D	0,60	0,66	1,85
6	D	0,96	0,27	2,18
7	D	0,38	-3,92	-3,16
8	D	0,47	-0,86	0,07
9	D	0,71	0,22	1,64
10	D	0,17	0,18	0,52
1-2	E	0,20	0,12	0,53
3	E	0,27	-0,71	-0,18
4	E	0,59	-2,02	-0,84
5	E	0,51	-0,12	0,90
6	E	0,31	-0,78	-0,17
7-8	E	0,26	2,29	2,82
9	E	0,12	0,04	0,29
10	E	0,15	-0,65	-0,35

TABELA 4.29  
Incerteza padrão  $u(\lambda)$ 95%

Brônquio		$\lambda-u(\lambda)95\%$	$\lambda+u(\lambda)95\%$	$-u(\lambda)95\%$	$+u(\lambda)95\%$
1	D	133,10 °	162,75 °	-12,31 °	17,34 °
2	D	174,93 °	236,17 °	-40,13 °	21,11 °
3	D	98,51 °	102,61 °	-1,66 °	2,45 °
4	D	62,86 °	69,28 °	-3,62 °	2,81 °
5	D	33,33 °	61,64 °	-18,12 °	10,19 °
6	D	195,03 °	245,36 °	-35,73 °	14,60 °
7	D	284,32 °	287,56 °	-1,46 °	1,78 °
8	D	319,15 °	363,89 °	-19,13 °	25,61 °
9	D	12,46 °	58,67 °	-30,52 °	15,69 °
10	D	9,96 °	27,39 °	-9,17 °	8,26 °
1-2	E	186,85 °	207,81 °	-11,09 °	9,87 °
3	E	144,45 °	170,06 °	-11,57 °	14,05 °
4	E	116,31 °	139,98 °	-8,63 °	15,03 °
5	E	-6,71 °	41,84 °	-27,96 °	20,59 °
6	E	322,04 °	350,41 °	-12,57 °	15,80 °
7-8	E	66,45 °	70,49 °	-2,20 °	1,84 °
9	E	2,49 °	16,23 °	-7,01 °	6,73 °
10	E	327,12 °	340,68 °	-6,38 °	7,18 °

Como os ângulos calculados resultaram de medidas feitas em um medidor de coordenadas de pouca precisão, embora sirvam perfeitamente ao propósito deste trabalho, não podem nem devem ser usados como referência.

#### 4.2.10 Simulação do giro da árvore brônquica no AutoCAD release 2000®

Com a árvore brônquica, gerada pelo AutoCAD release 2000®, e os ângulos calculados na TAB. 4.10, foi simulado o giro de cada brônquio - FIG 4.4, FIG 4.5, FIG 4.6,

FIG 4.7, FIG 4.8, FIG 4.9, FIG 4.10, FIG 4.11, FIG 4.12, FIG 4.13, FIG 4.14, FIG 4.15, FIG 4.16, FIG 4.17, FIG 4.18, FIG 4.19, FIG 4.20, FIG 4.21 e FIG 4.22.

Para rotações em torno do eixo Y, menores do que  $90^\circ$ , a simulação correspondia a uma pessoa deitada em decúbito dorsal. Para valores maiores do que  $90^\circ$ , a posição correspondente era a de decúbito ventral.

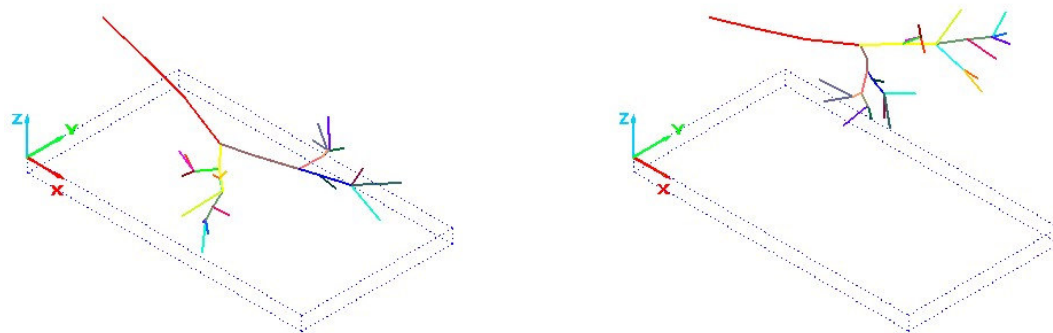


FIGURA 4.4 - Desenho unifilar da árvore brônquica na posição de decúbito dorsal (figura à direita) e decúbito ventral (figura à esquerda)

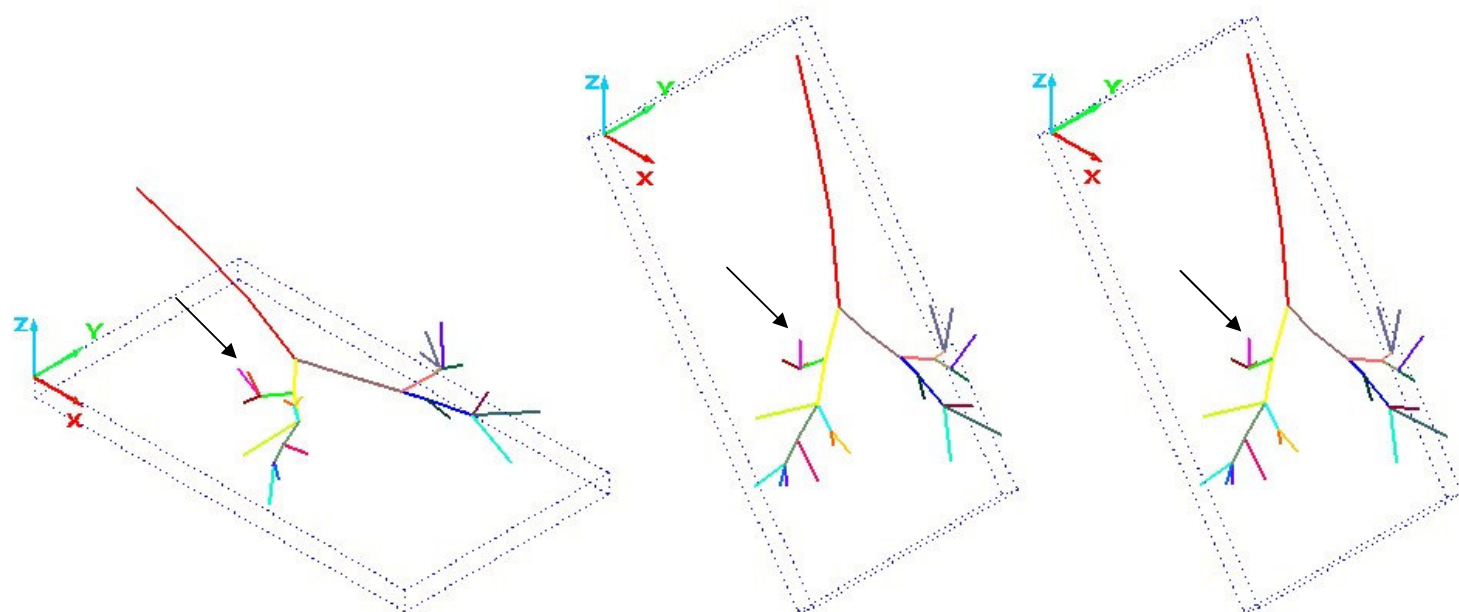


FIGURA 4.5 - Rotação do brônquio segmentar 1D em Y de (+)55° e em X de (-)1°

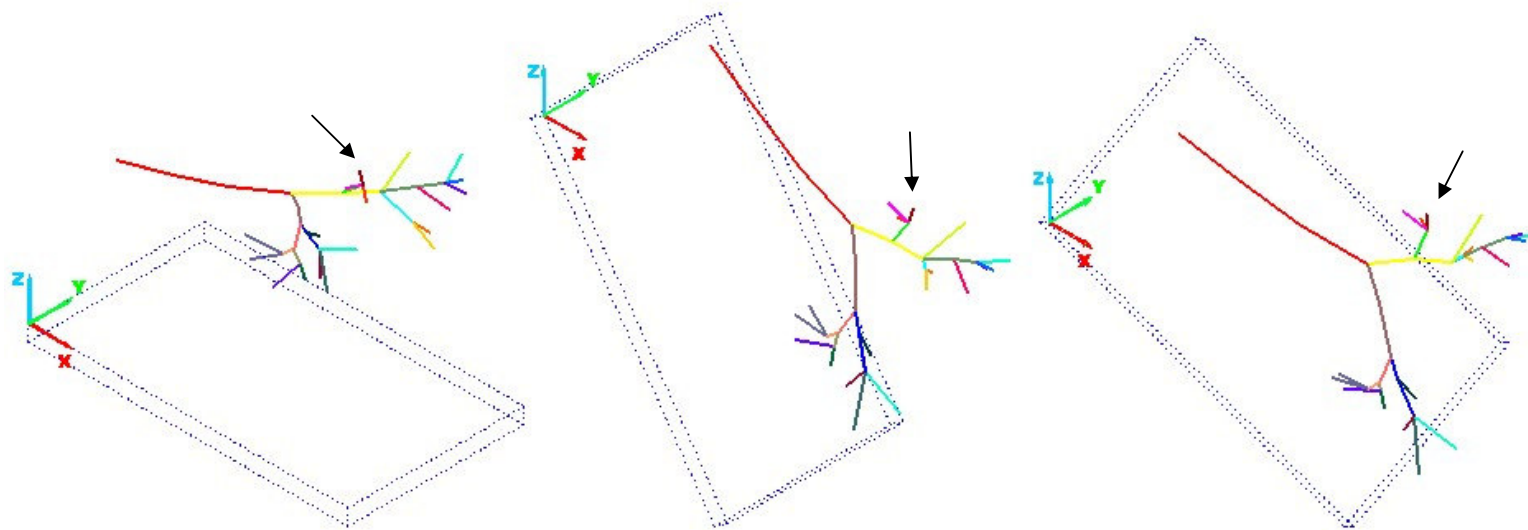


FIGURA 4.6 - Rotação do brônquio segmentar 2D em Y de (+)55° e em X de (+)28°



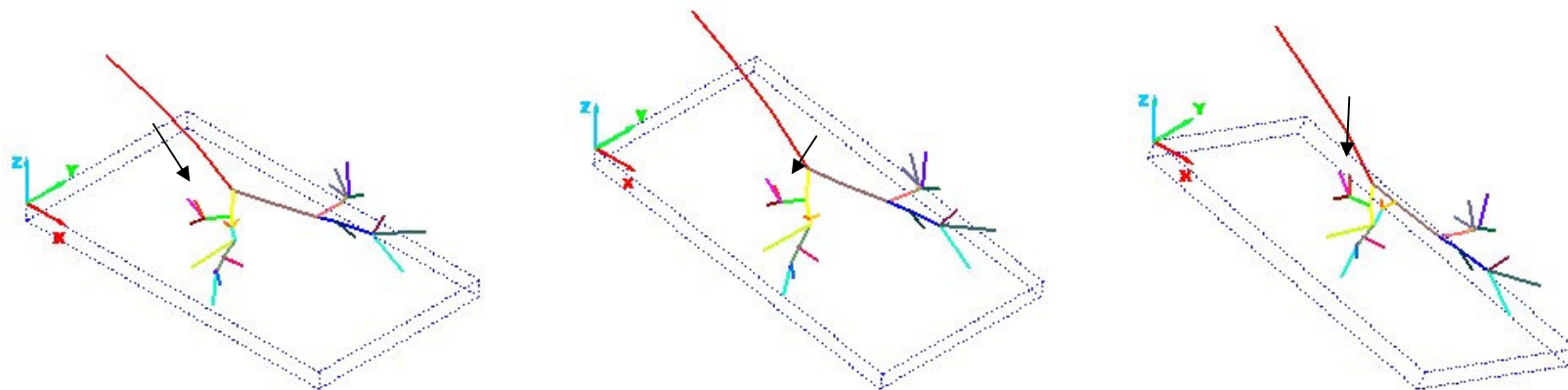


FIGURA 4.7 - Rotação do brônquio segmentar 3D em Y de (+)10° e em X de (-)20°

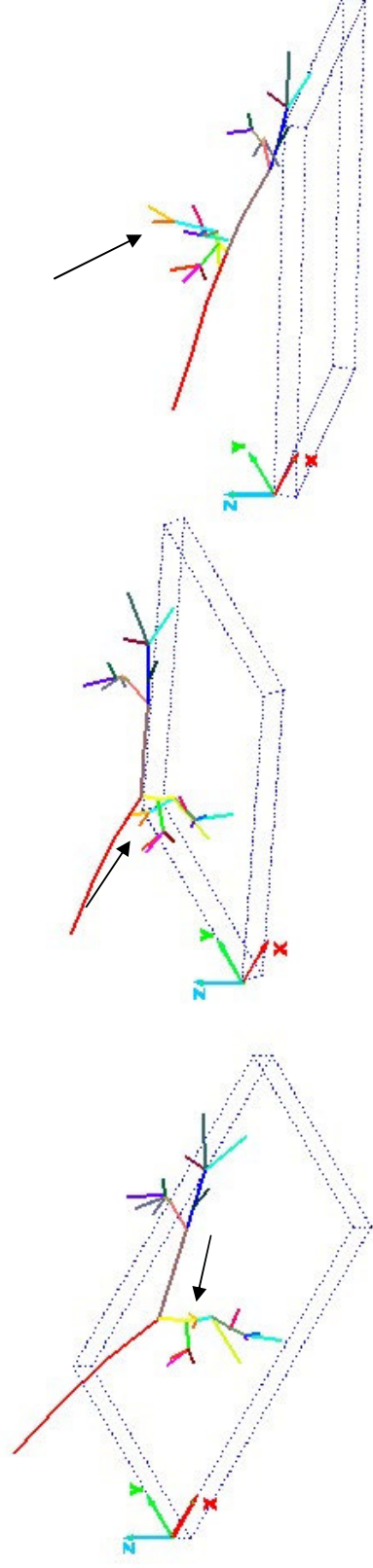


FIGURA 4.8 - Rotação do brônquio segmentar 4D em Y de (-)24° e em X de (-)42°

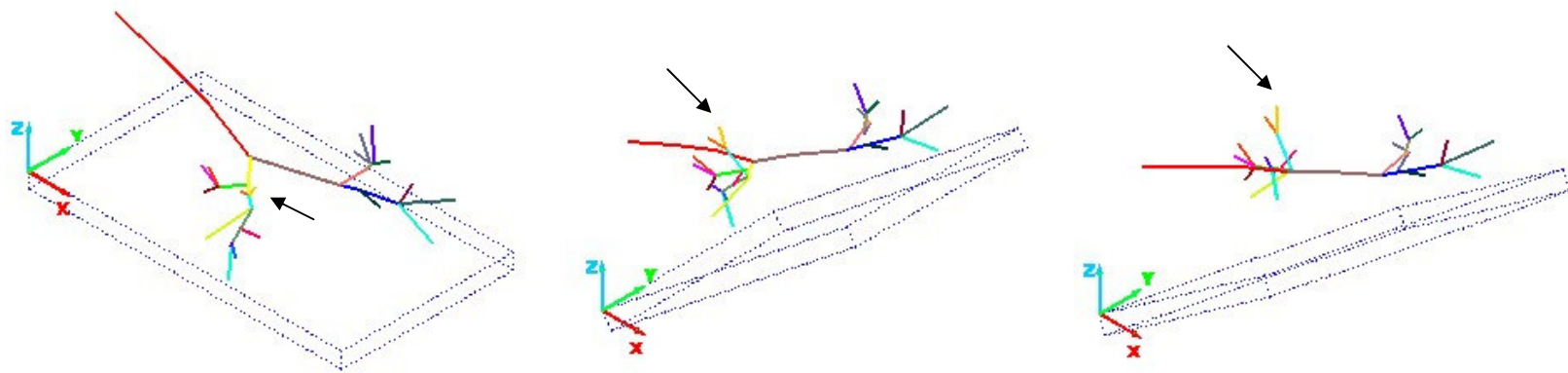


FIGURA 4.9 - Rotação do brônquio segmentar 5D em Y de (-)39° e em X de (-)17°

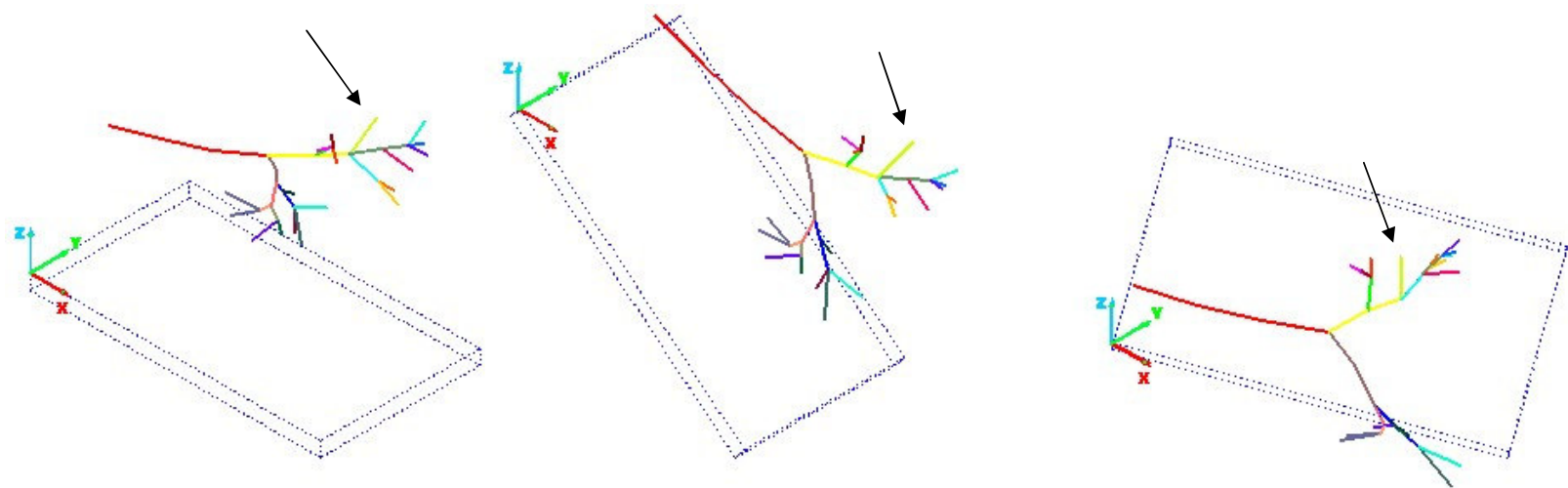


FIGURA 4.10 - Rotação do brônquio segmentar 6D em Y de (+)39° e em X de (+)69°

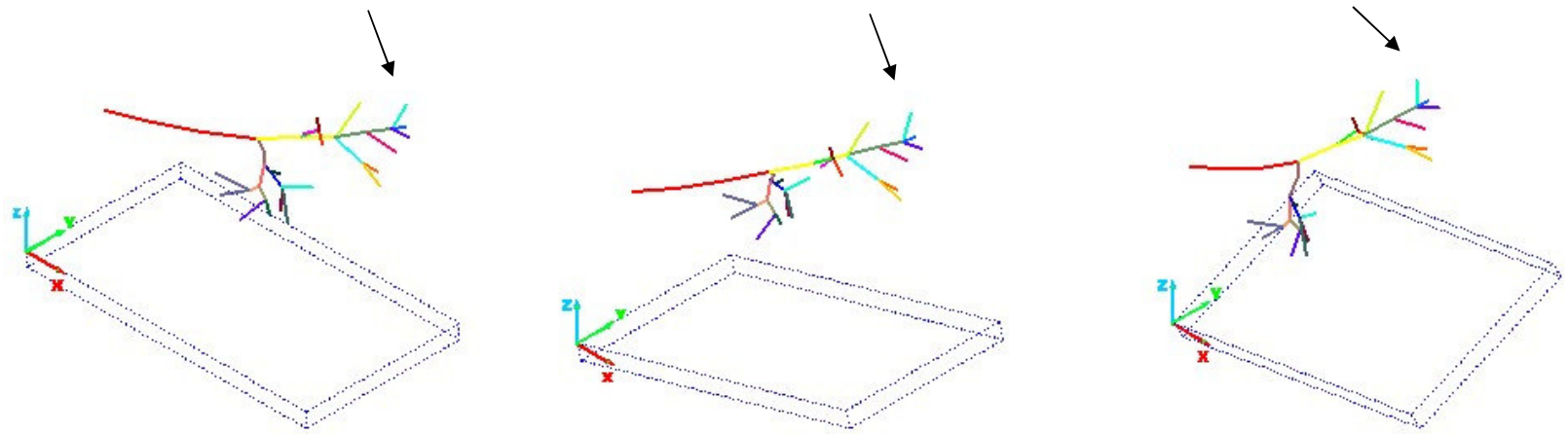


FIGURA 4.11 - Rotação do brônquio segmentar 7D em Y de (-)16° e em X de (+) 23°

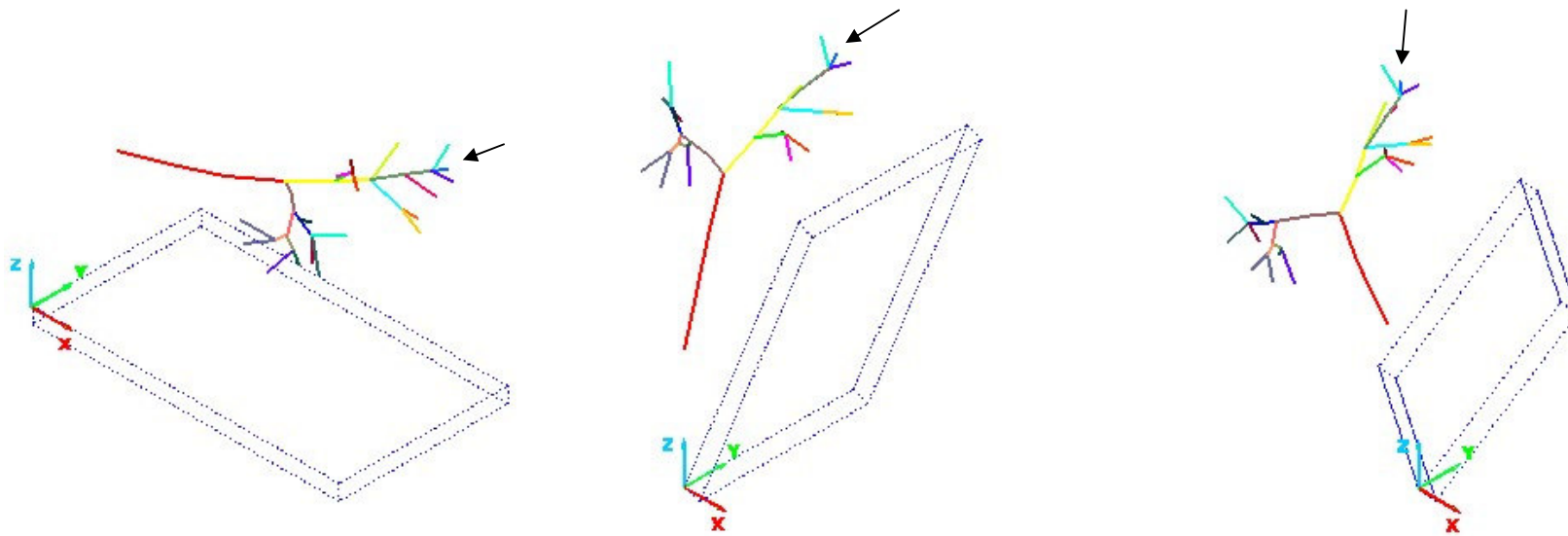


FIGURA 4.12 - Rotação do brônquio segmentar 8D em Y de  $(-)$  $68^\circ$  e em X de  $(+)$  $33^\circ$

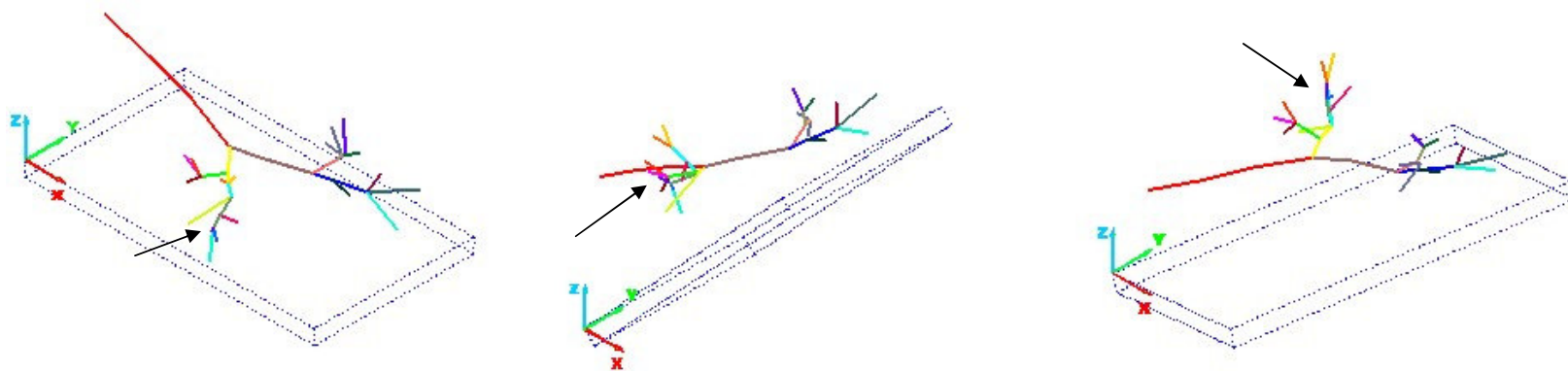


FIGURA 4.13 - Rotação do brônquio segmentar 9D em Y de (-)47° e em X de (-)42°

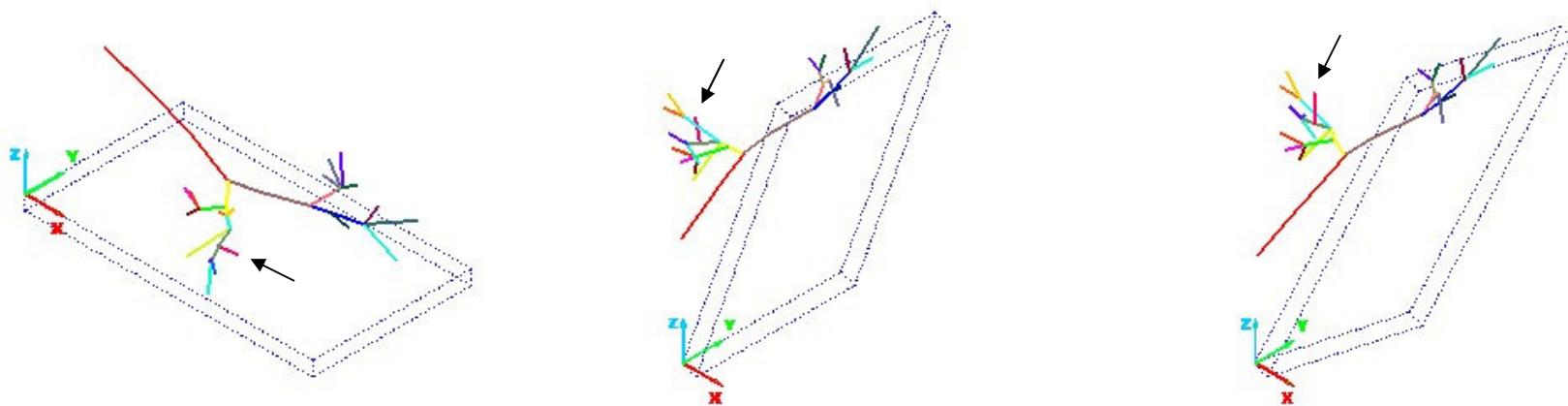


FIGURA 4.14 - Rotação do brônquio segmentar 10D em Y de (-)71° e em X de (-)12°



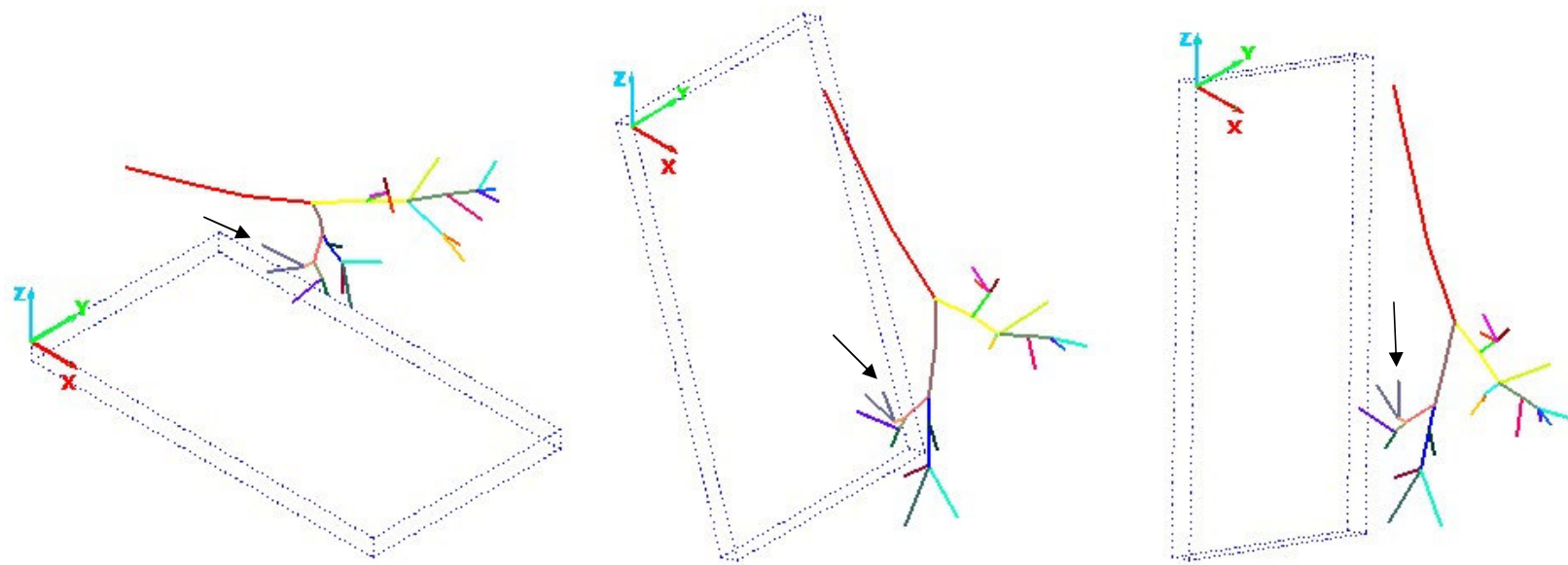


FIGURA 4.15 - Rotação do brônquio segmentar 1-2E em Y de (+)72° e em X de (-)20°

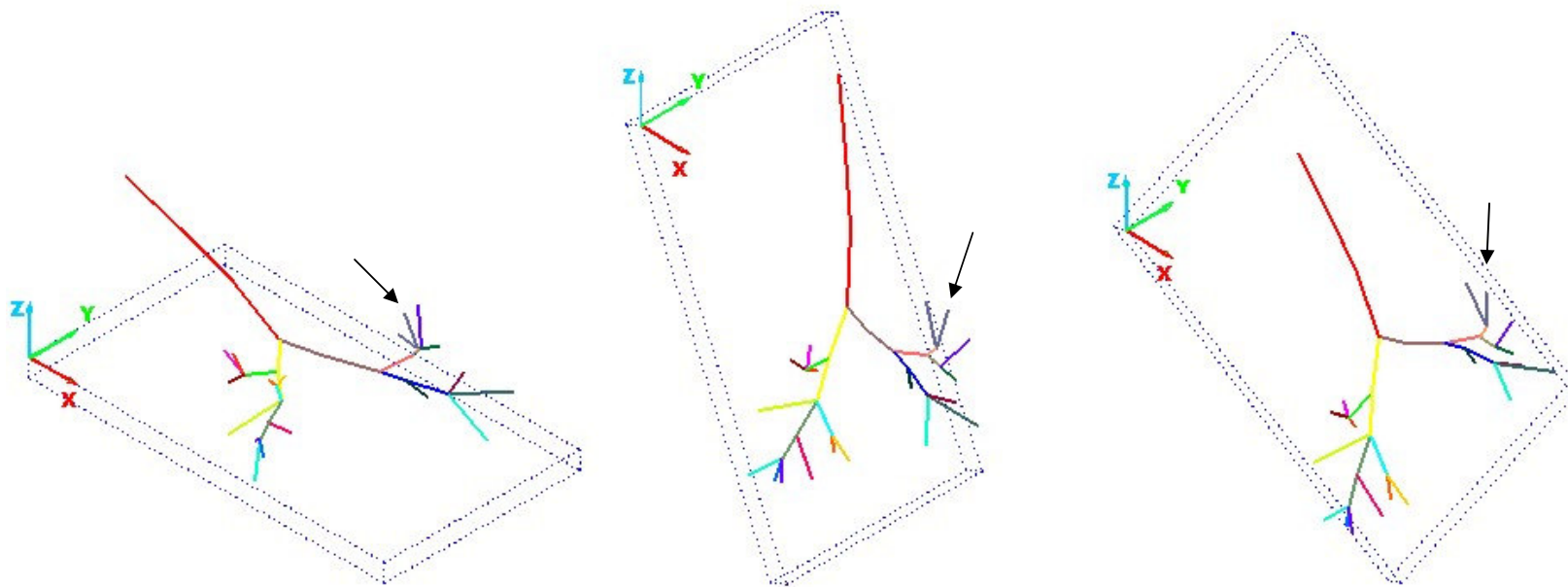


FIGURA 4.16 - Rotação do brônquio segmentar 3E em Y de (+)66° e em X de (+)23°

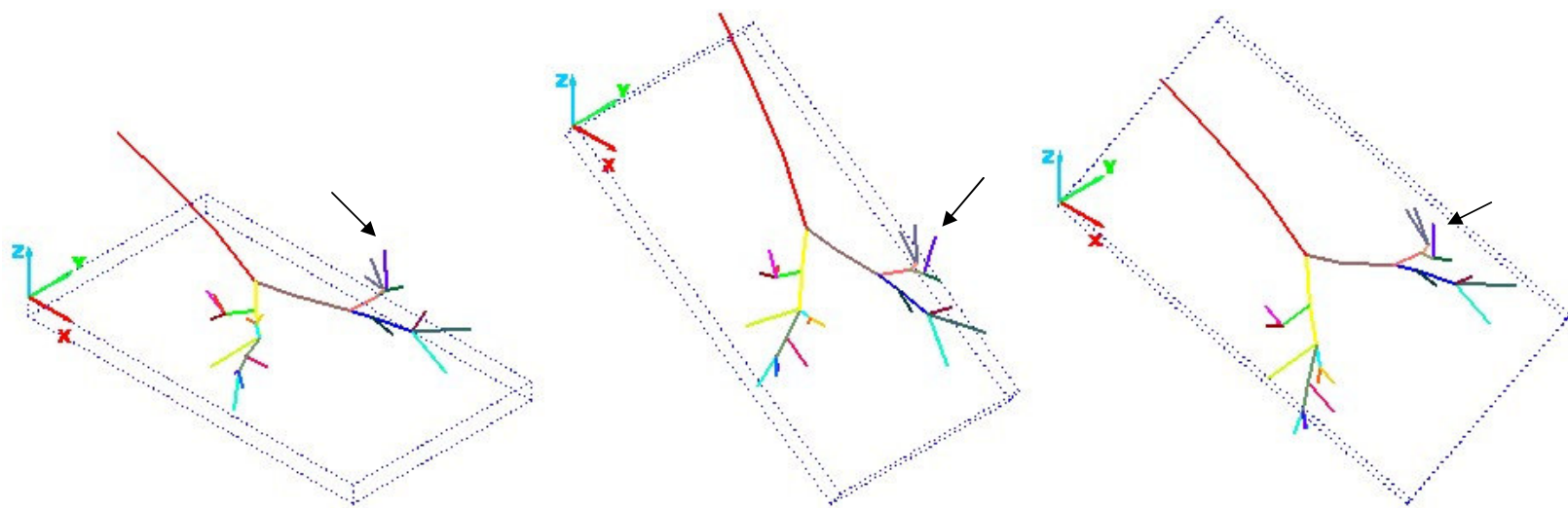


FIGURA 4.17 - Rotação do brônquio segmentar 4E em Y de (+)35° e em X de (+)27°

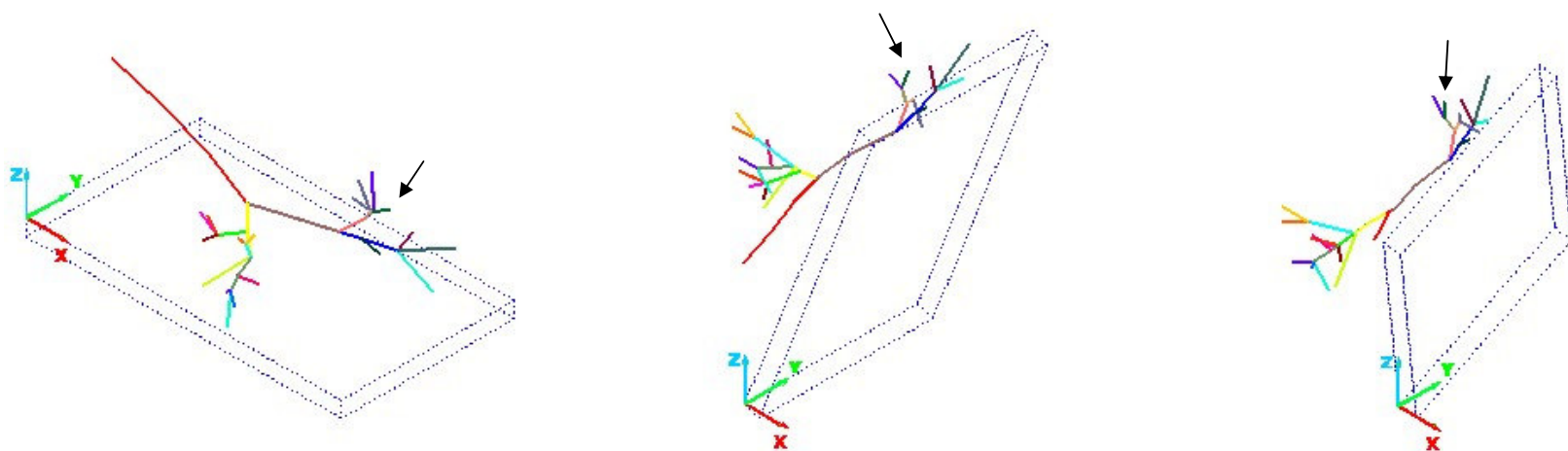


FIGURA 4.18 - Rotação do brônquio segmentar 5E em Y de (-)69° e em X de (+)26°

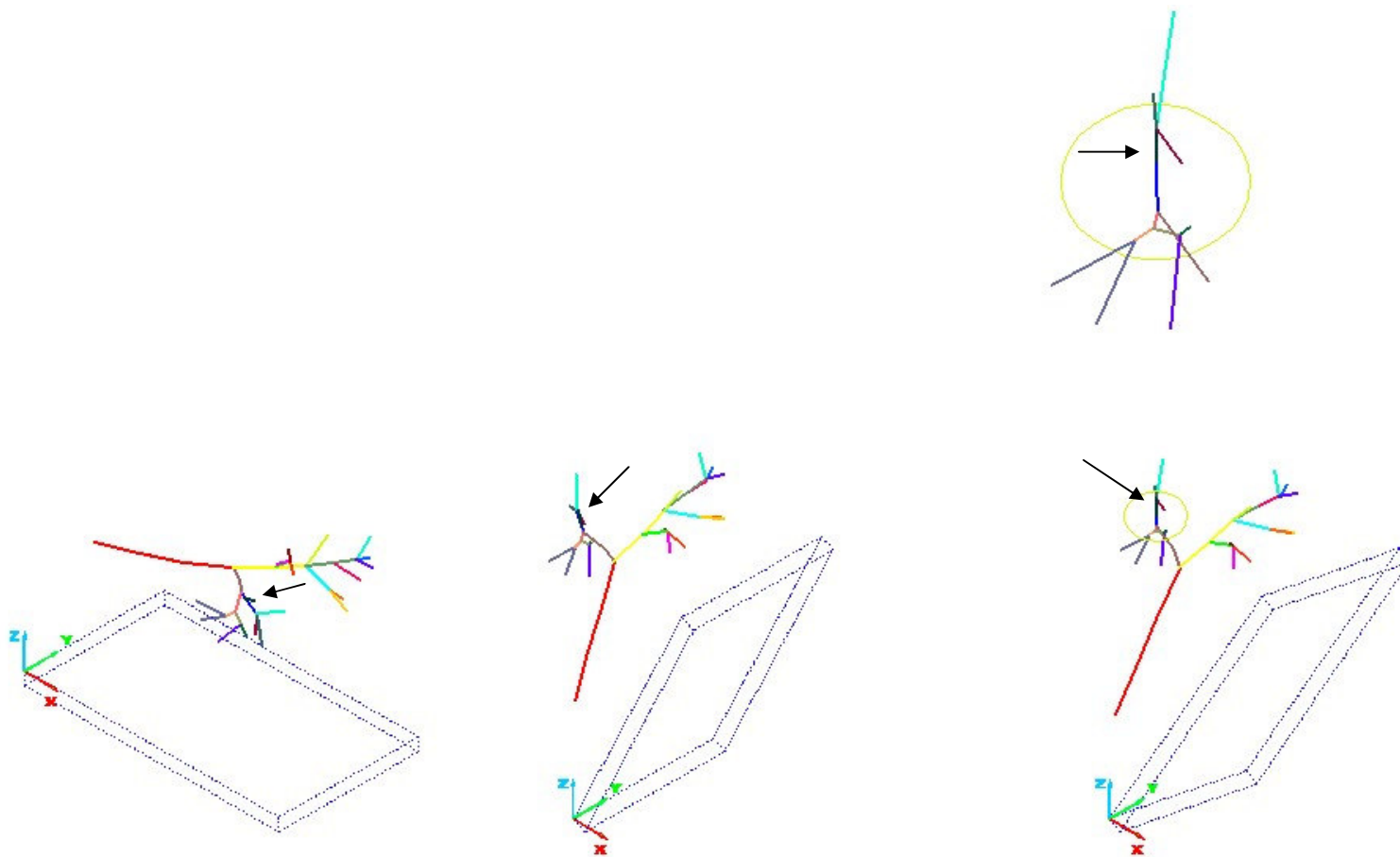


FIGURA 4.19 - Rotação do brônquio segmentar 6E em Y de (-)65° e em X de (-)11°

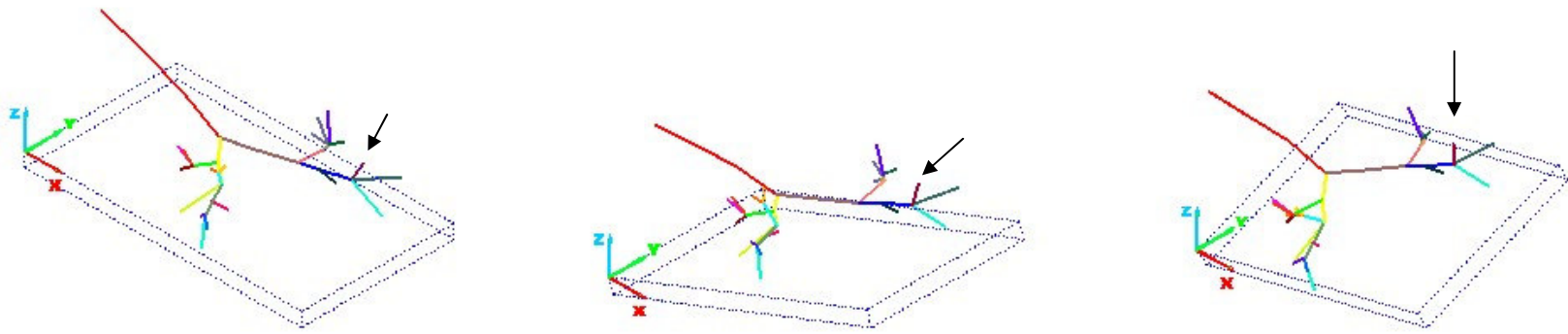


FIGURA 4.20 - Rotação do brônquio segmentar 7-8E em Y de (-)21° e em X de (+)22°

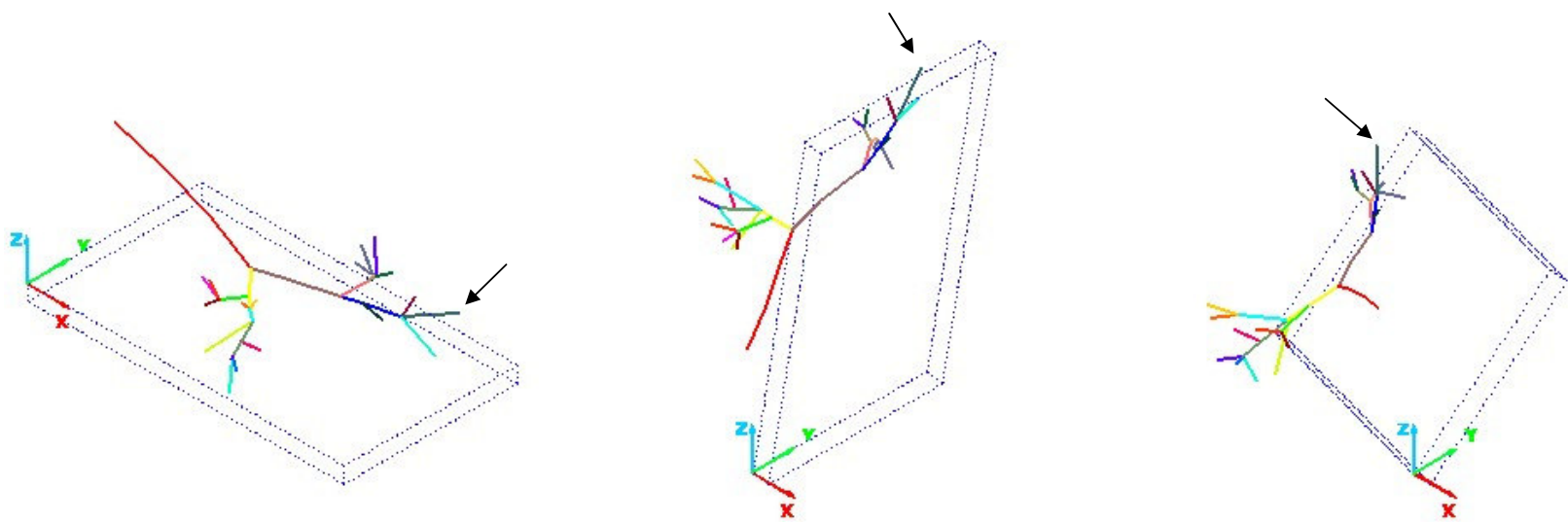


FIGURA 4.21 - Rotação do brônquio segmentar 9E em Y de (-)81°e em X de (+)38°

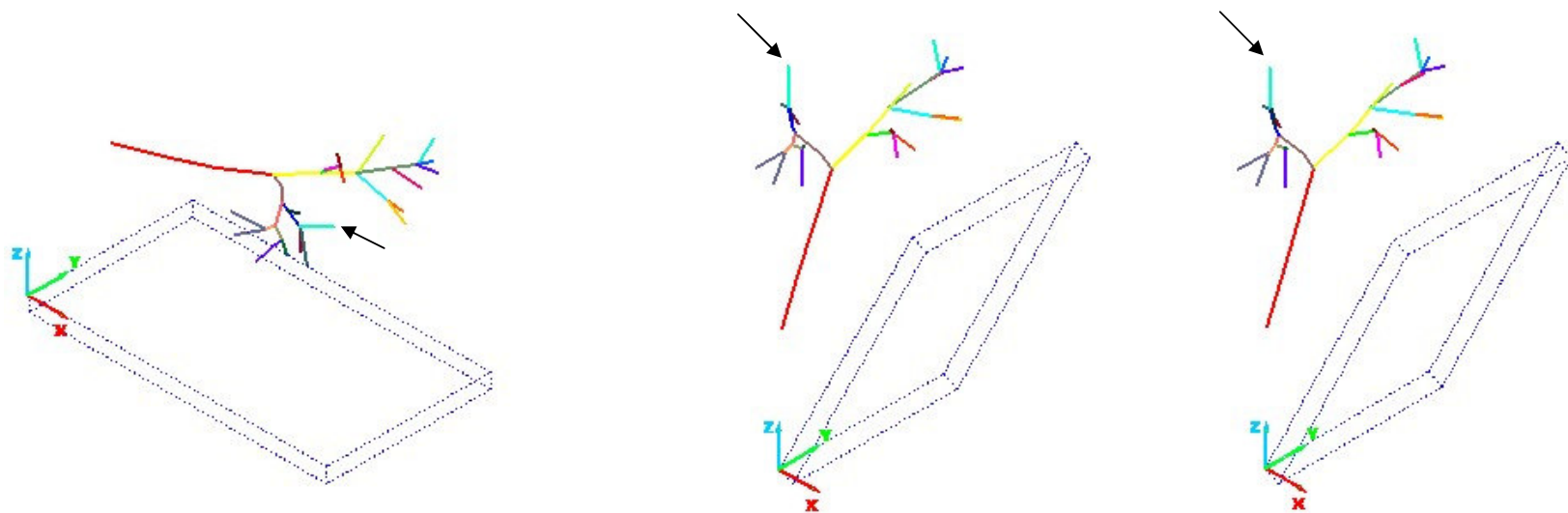


FIGURA 4.22 - Rotação do brônquio segmentar 10E em Y de  $(-64^\circ)$  e em X de  $(+0,8^\circ)$



### 4.3 Protótipo do dispositivo de drenagem postural

Partindo-se dos conceitos pré-definidos e do desenho da integração dos mecanismos estudados - FIG 3.28, construiu-se o protótipo, em escala real - FIG 4.23.



FIGURA 4.23 - Protótipo do dispositivo de drenagem postural

#### 4.3.1 Mecanismo para girar o dispositivo de drenagem postural em relação ao eixo X

Optou-se pelo mecanismo constituído por um eixo roscado e uma porca, na qual foi fixado um eixo confinado entre duas cantoneiras de aço que, ao se deslocar, fazia com que o conjunto, que estava preso às cantoneiras, girasse - FIG 4.24.



FIGURA 4.24 - Mecanismo para girar o protótipo em torno do eixo X

#### 4.3.2 Mecanismo para girar o dispositivo de drenagem postural em relação ao eixo Y

Para girar o dispositivo em torno do eixo Y, optou-se pelo uso de um macaco automotivo - FIG. 4.25.

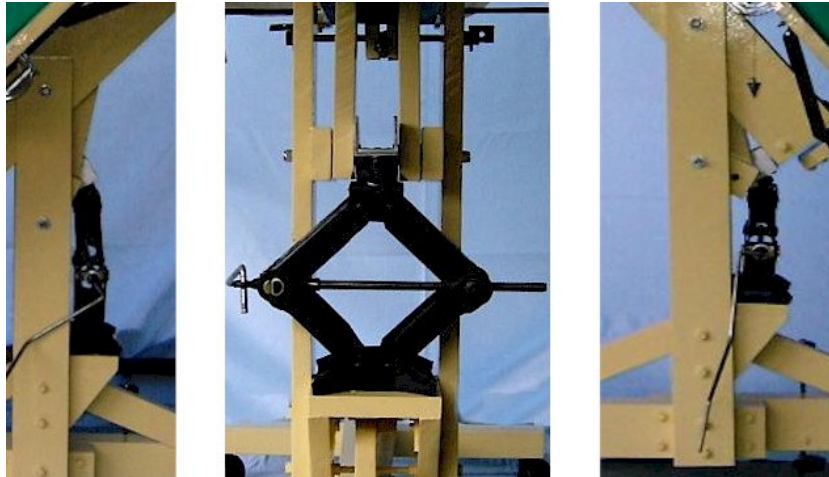


FIGURA 4.25 - Mecanismo para girar o protótipo em torno do eixo Y

#### 4.3.3 Dispositivo extra para alteração dos ângulos segundo um eixo paralelo a Y

Para efetuar o pivotamento das duas pontas da mesa, utilizou-se o mecanismo de inclinação de uma prancheta de desenho - FIG 4.26.

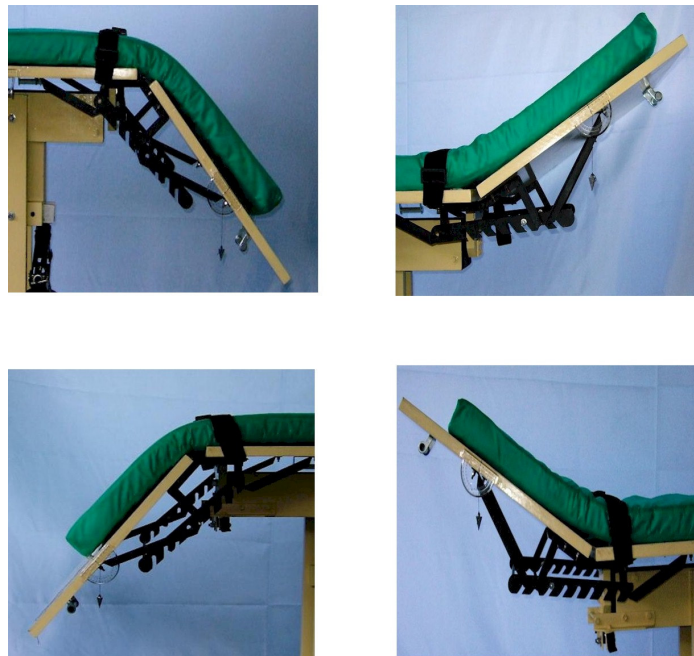


FIGURA 4.26 - Mecanismo para girar as extremidades do protótipo em torno de um eixo paralelo a Y

#### 4.3.4 Testes do protótipo

Foram feitos vários testes para se verificar os ângulos máximos que podiam ser alcançados em cada mecanismo do protótipo. Verificou-se, também, o paralelismo entre as três seções que compunham a mesa e, finalmente, testou-se o dispositivo numa das posturas de drenagem, para as situações em que o mesmo foi usado na maneira convencional, com adaptações e, por fim, com os ângulos calculados.

##### 4.3.4.1 Ângulos de rotação máximos atingidos em torno do eixo Y

No sentido negativo de rotação em torno do eixo Y, alcançou-se  $(-45^\circ)$  - FIG 4.27.

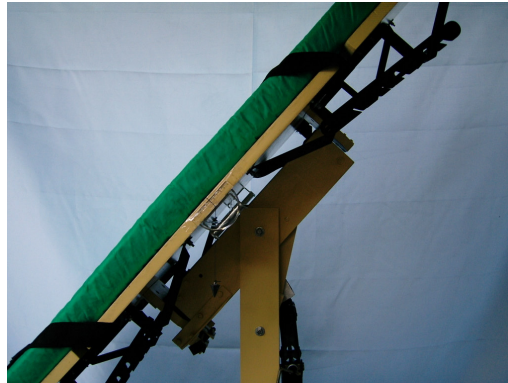


FIGURA 4.27 - Rotação de  $(-45^\circ)$  em relação ao eixo Y

No sentido positivo de rotação em torno do eixo Y, alcançou-se  $(+50^\circ)$  - FIG 4.28.



FIGURA 4.28 - Rotação de  $50^\circ$  em relação ao eixo Y

#### 4.3.4.2 Ângulos de rotação máximos atingidos em torno do eixo X

No sentido negativo de rotação em torno do eixo X, alcançou-se  $(-23^\circ)$  - FIG 4.29.



FIGURA 4.29 - Rotação de  $(-23^\circ)$  em relação ao eixo Y

No sentido positivo de rotação em torno do eixo X, alcançou-se  $(+21^\circ)$  - FIG 4.30.



FIGURA 4.30 - Rotação de  $(+21^\circ)$  em relação ao eixo Y

#### 4.3.4.3 Paralelismo entre as três seções da mesa

A seção à esquerda estava a  $1^\circ$  (um grau) de desnível em relação à parte central da mesa. Já a seção à direita estava a  $(-2^\circ)$  (dois graus) de desnível - FIG 4.31.



FIGURA 4.31 - Paralelismo das seções da mesa

#### 4.3.4.4 Valores extremos dos dispositivos extra de rotação

Na mesa lateral direita, atingiram-se os ângulos  $(-)$ 29° e  $(+)$ 61°. Na lateral esquerda, foram atingidos  $(-)$ 48° e  $(+)$ 29° - FIG 4.44.

#### 4.3.4.5 Teste para a postura de drenagem para o segmento apical

O dispositivo de drenagem postural foi utilizado de três maneiras distintas para a postura de drenagem do segmento apical anterior - FIG 4.32. No primeiro teste, o dispositivo foi utilizado de maneira mista, em que se combinaram os ângulos de giro do dispositivo de giro  $(-)$ 16° e do dispositivo extra  $(-)$ 29°, para se atingir  $(-)$ 45° - FIG 4.33.

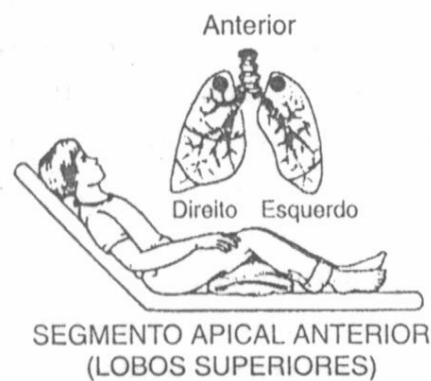


FIGURA 4.32 - Postura de drenagem para os lobos superiores  
FONTE – PRYOR E WEBBER, 2002.

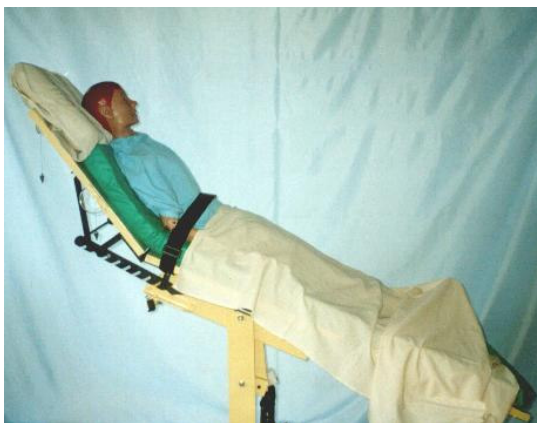


FIGURA 4.33 - Combinação dos ângulos de giro do dispositivo e do sistema extra

No segundo teste, o ângulo para a postura de drenagem foi atingido utilizando-se somente o ângulo de giro do dispositivo ( $-45^{\circ}$ ) - FIG 4.34.



FIGURA 4.34 - Somente o giro do dispositivo

No terceiro teste, o ângulo para a postura de drenagem foi atingido, utilizando-se a combinação do giro ( $+29^{\circ}$ ) para o sistema extra e ( $+26^{\circ}$ ) para o giro do dispositivo, para o ângulo calculado de ( $+55^{\circ}$ ) - FIG 4.35.

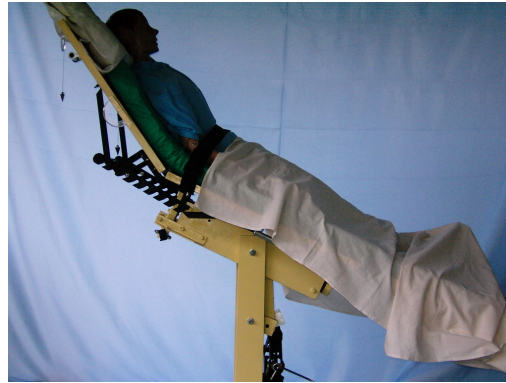


FIGURA 4.35 - Ângulo de giro calculado (+)55°

Foram feitos testes, utilizando-se uma única configuração do dispositivo de drenagem para: segmentos posteriores - FIG 4.36 e FIG 4.37; segmentos anteriores - FIG 4.38 e FIG 4.39, e lobo médio direito - FIG 4.40 e FIG 4.41.

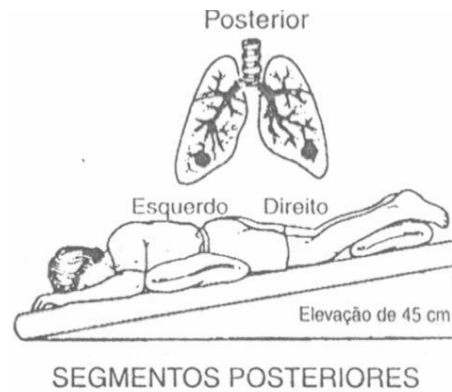


FIGURA 4.36 - Postura de drenagem para os segmentos posteriores

FONTE – PRYOR E WEBBER, 2002.

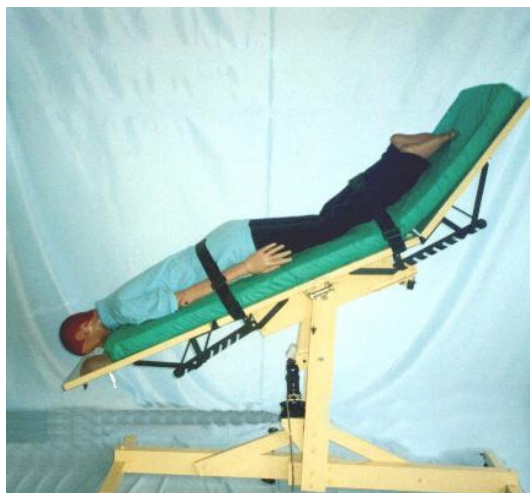


FIGURA 4.37 - Configuração mista



FIGURA 4.38 - Postura de drenagem para os segmentos anteriores  
FONTE – PRYOR E WEBBER, 2002.



FIGURA 4.39 - Configuração simples





FIGURA 4.40 - Postura de drenagem para o lobo médio direito  
FONTE – PRYOR E WEBBER, 2002.



FIGURA 4.41 - Configuração simples

## 5 CONCLUSÕES

A metodologia criada permitiu orientar os brônquios nos ângulos designados na pesquisa; o que possibilitará a avaliação dos procedimentos de drenagem postural atualmente utilizados, bem como o estudo de novas linhas fisioterápicas para esta drenagem postural.

As coordenadas espaciais da árvore brônquica e, por conseguinte, dos respectivos ângulos não apresentam resultados conclusivos do ponto de vista morfológico.

O protótipo criado demonstrou que as soluções mecânicas apresentadas são capazes de atingir a orientação angular requerida. Ele permitirá que os profissionais da área da saúde possam não apenas posicionar os pacientes nas posturas de drenagem existentes como também avaliá-las e, ainda, pesquisar novos ângulos.

## 6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Os estudos mais recentes apontam para a utilização de imagens de tomografia computadorizada, para obtenção das coordenadas da árvore brônquica. Embora ainda não se tenha atingido o nível de incertezas necessário para sua utilização, esse parece ser o caminho. Pois, diferente do método que utiliza o modelo físico, as medições podem ser feitas em seres vivos e em quantidade suficiente para que se façam as análises estatísticas necessárias.

No que tange ao dispositivo mecânico de drenagem, muito se pode fazer para melhorá-lo, com a introdução de motores elétricos para produzir as rotações e, também, com a adição de sensores e dispositivos eletrônicos para posicioná-lo nas orientações angulares desejadas.

O dispositivo também permitirá que se façam estudos sobre o escoamento das secreções, facilitando, assim, a determinação do tempo necessário em cada orientação.

## ABSTRACT

The postural drainage or bronchial drainage consists of an applied technique by respiratory physiotherapy to drain lung secretions of the bronchial tree, through the action of the gravity force. Anatomically, the bronchus subdivide themselves in approximately 25 generations, having a structural disposition resembled to the configuration of a tree in inverted position. The postural drainage is a technique that consists of positioning the patient to displace the lung secretions, for the action of the gravitational force, from more peripheral regions in direction to the most superior regions of the bronchial tree, helping its elimination. This procedure is usually made being considered the bronchi of the third generation for drainage of the lung segments. The present study proposed the development and evaluation of a mechanical prototype capable to position the patient in the favorable several angles to the postural drainage. For such, it was created a methodology, through the development of a group of equations, to relate the angles of the bronchial tree to the angles of turn of the device, being used a system of global coordinates positioned in the axis of turn of the prototype and 18 systems of local coordinates parallel to the global system, whose origins were the base of each segmental bronchus. The prototype was built through the using of wood structures, boards of MDF, profiles of steel and aluminum, and pieces adapted from other equipments. Once it was not found specific information about the space position of the several bronchial segments and of the angles of the bronchial tree, it was opted for the survey of these data through two techniques. At the first technique, simplifications of mathematical models were used, obtained in the literature, based in the studies of lung secretion flow visualization, starting from which was arbitrated a bronchial tree and generated a virtual three-dimensional model with the use of the software AutoCAD release 2000®. At the second technique, the data of the bronchial space positions were obtained starting from the direct measurement of a physical model, generated in a similar form to the virtual three-dimensional model. With the purpose to evaluate the methodology developed to relate the angles of the bronchial tree to the angles of turn of the device, it was made a simulation of the positions of segmental bronchi drainage, through the angular positioning of the three-dimensional drawing of the bronchial tree, whose coordinates were obtained from the physical model, being the results considered satisfactory.

For the mechanical prototype, initially, it was evaluated the possibility of the equipment to assist a sequence of conventional positions, used in the physiotherapy procedures of postural drainage, recommended by the literature (Pryor and Webber, 2002). Later, it was made the simulation by the physiotherapists, being used the angular positions obtained through the developed methodology, considering the obtained data of the physical model of the bronchial tree. In this case, nor all the angular positions were reached due to course limitations. It is believed that, starting from adjustments in the mechanical prototype, these positions can be reached. Therefore, is verified that is possible the use of the methodology developed to relate the angles of the bronchial tree to the angles of turn of the device and the use of the mechanical prototype to facilitate and to improve the procedures of the postural drainage.

**Keys-words:** postural drainage, lung secretion, mechanical prototype, equipment.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas: Projeto de Estruturas de Madeira. NBR 7190/97. São Paulo: ABNT, 1997.
2. BENADUCE, C. *Fabricação de painéis de média densidade (MDF) a partir de fibras de Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden e Pinus caribaea Morelet var. hondurensis Barret e Golfari*. Dissertação (M.S.) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba: 1998.
3. BERGER, A. J.; MITCHELL, R. A.; SEVERINGHAUS, J. W. *Regulation of respiration*. N Engl J Med, 1977. Part II, p. 297, 138–143.
4. BERROCAL T.; MADRID C.; NOVO S.; GUTIÉRREZ, J.; ARJONILLA, A.; GÓMEZ-LEÓN, N. *Congenital Anomalies of the Tracheobronchial Tree, Lung, and Mediastinum: Embryology, Radiology, and Pathology*. Radiographics, 2003. p. 24, 17.
5. BRUCE, E. N.; CHERNIAK, N. S. Central chemoreceptors. *Journal Apply Physiology* 1987, p. 62, 389-402.
6. CARTER, J. STEIN. Respiratory System In: Homepage of University of Cincinnati Clermont College – Biology Course. Disponível em <<http://www.biology.clc.uc.edu/courses/bio105/respirat.htm>>. Acesso em dez.2005. Documento disponível desde 1996.
7. CARUANA-MONTALDO, Gleeson K; ZWILLICH, C. W. *The control of breathing in clinical practice*. Chest, 2000. p. 117, 205-225.
8. CIESLA, N.; *Drenagem postural, posicionamento e exercícios respiratórios*. In: MACKENZIE, C. F; CIESLA, N.; IMLE, P. C. e col. *Fisioterapia Respiratória em Unidade de Terapia Intensiva*. São Paulo: Panamericana, 1988. Cap.3, p.61-88.
9. CIVITA, V. *Ciência Ilustrada*. São Paulo: Abril Cultural, v.11, p. 4373, 1971. In: CLÁUDIO, C. S.; FACHINI, G.; RAMOS, V. G. *Laser na medicina*. Disponível em <[www.cdcc.sc.usp.br/escolas/juliano/laser/laser.html](http://www.cdcc.sc.usp.br/escolas/juliano/laser/laser.html)>. Acesso em dez.2005.
10. COLERIDGE, J. C. G.; COLERIDGE, H. M. Afferent vagal C fiber innervation of the lungs and airways and its significance. *Rev Physiol Biochem Pharmacol*. 1984. 99, p. 1–110.
11. COSTA, D. *Fisioterapia respiratória básica*. 1. ed. São Paulo: Atheneu, 1999. Cap. 4, p. 61-69.
12. DURAN, J. E. R. *Biofísica: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

13. ELEOTÉRIO, J. R. *Propriedades Físicas e Mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina*. Piracicaba: 2000. Dissertação de Mestrado defendida em fevereiro de 2000, sob orientação de Mario Tomazello Filho, pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP).
14. GESUALTDO, F. A. R. *Estruturas de Madeira: notas de aula*. Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Civil (FECIV). Uberlândia: 2003. Disponível em [www.feciv.ufu.br/docentes/francisco/francisco.html](http://www.feciv.ufu.br/docentes/francisco/francisco.html). Acesso em dez.2005.
15. GONÇALVES JR, A. A. *Metrologia*. 2002. Laboratório de Metrologia e Automatização – LABMETRO, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.
16. GONZALES, C.; ALMARA L.; OBESO, A. et al. *Oxygem and acid chemoreception in the carotid body receptors*. Trends Neurosci: 1992, 15, 146-153.
17. GOSLING, J. A.; HARRIS, P. F.; HUMPHERSON, J. R. e col. *Anatomia humana*. 2. ed. São Paulo: Manole, 1992.
18. HORSFIELD, K. e CUMMING, G. Morphology of the bronchial tree in man. *Journal of Applied Physiology*. 1968. v. 24, N. 3, p. 373-383.
19. HUMBERSTONE, N. Avaliação respiratória e tratamento. In: IRWIN, S; TECKLIN, J. S. *Fisioterapia Cardiopulmonar*. 2. ed. São Paulo: Manole, 1994. Cap. 15, p. 300-303.
20. KIM, W. D. *Lung mucus*. A clinician's view. Eur Respir J, 1997. p. 1914-1917.
21. KISNER, C.; COLBY, L. A. *Exercícios Terapêuticos - Fundamentos e Técnicas*. 4. ed. Rio de Janeiro: Manole, 2004.
22. KITAOKA, H.; TAKAKI, R. e SUKI, B. A three-dimensional model of the human airway tree. American Physiological Society, 1999, p. 2207-2217.
23. KITCHEN, S.; BAZIM, S. *Eletroterapia de Clayton*. São Paulo: Manole, 1998.
24. KOCH, P. Wood versus nonwood materials in U.S. residential construction some energy - related global implications. *Forest Products Journal*. 1992. v. 42, n. 5, p. 31-42.
25. LABOSKY JR., P. et al. Effect of steam pressure refining and resin levels on the properties of UF-bonded red maple MDF. *Forest Products Journal*. 1993. v.43, n. 11/12, p. 82-88.
26. MACCAGNO, A. L. KINESIOLOGIA Respiratória. Barcelona, JMS: 1973. p. 53-60, Apud COSTA, D. *Fisioterapia respiratória básica*. 1. ed. São Paulo: Atheneu, 1999. p. 61-69.

27. MACKENZIE, C. F. História da fisioterapia respiratória e resenha da literatura, programa de fisioterapia respiratória, população de pacientes e terapia respiratória no IMSSMU. In: MACKENZIE, C. F; CIESLA, N.; IMLE, P. C. e col. *Fisioterapia Respiratória em Unidade de Terapia Intensiva*. São Paulo: Panamericana, 1988. Cap.1, p.1-30.
28. MALONEY, T. M. *Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing*. San Francisco: Miller Freeman, 1989.
29. MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*. 1996. v.46, n. 2, p. 19-26,
30. MARTIN, J.; AUBIER, M.; ENGEL, L. A. Effects of inspiratory loading on respiratory muscle activity during expiration. *Am Rev Respir Dis*. 1982. p. 125, 352–358.
31. MATZNER, Helvio. Laser: a ferramenta que é pura energia - I, *Nova Eletrônica*. SP: Artes Gráficas Guarú S.A., Ano VI, Nº 74, 1983. p. 22 – 29.
32. MITCHELL, R. A.; BERGER, A. J. Neural regulation of respiration. In: Hornbein TF, *Regulation of breathing*. New York, NY: Marcel Dekker, 1981. part I, p. 541–620.
33. MITHOEFFER, J. C. Breath holding. In: *Handbook of physiology: respiration*. Washington, DC: American Physiology Society, 1964. section 3, v. II, 38, 1011–1025
34. NETTER, F. H. Atlas de Anatomia Humana. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996. p. 190.
35. NIEMZ, P.; POBLETE, H. Investigations on the dimensional stability of MDF and particleboards. *Holz als Roh und Werkstoff*, 1996. v. 54, n.2, p. 141-144.
36. OKUNO, E. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1996.
37. POSTIAUX, G. Fisioterapia Respiratória Pediátrica. São Paulo: Artmed, 2004.
38. PRYOR, J. A.; WEBBER, B. A. *Fisioterapia para problemas respiratórios e cardíacos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2002. Cap.8, p.107-111.
39. RUBIN, B. K. *Physiology of Airway Mucus Clearance*. *Respiratory Care*, 2002. vol.47, N. 7, p. 761-768.
40. RUPPED, G. O Sistema Respiratório. In: SCALAN, C., WILKINS, R. L., STOLLER, J. K. *Fundamentos da Terapia Respiratória de Egan*. 7. ed. São Paulo: Manole, 2000.
41. SALATHE, M.; O'RIORDAM, T. G.; WANNER, A. *Treatment of mucociliary dysfunction*. *Chest*: 1996. 110, p. 1048-1057.
42. SAURET, V.; HALSON, P. M. ; BROWN, I. W. et al. *Study of the three-dimensional geometry of the central conducting airways in man using computed tomographic (CT) images* *J. Anat.* 2002. v.200, p. 123–134.

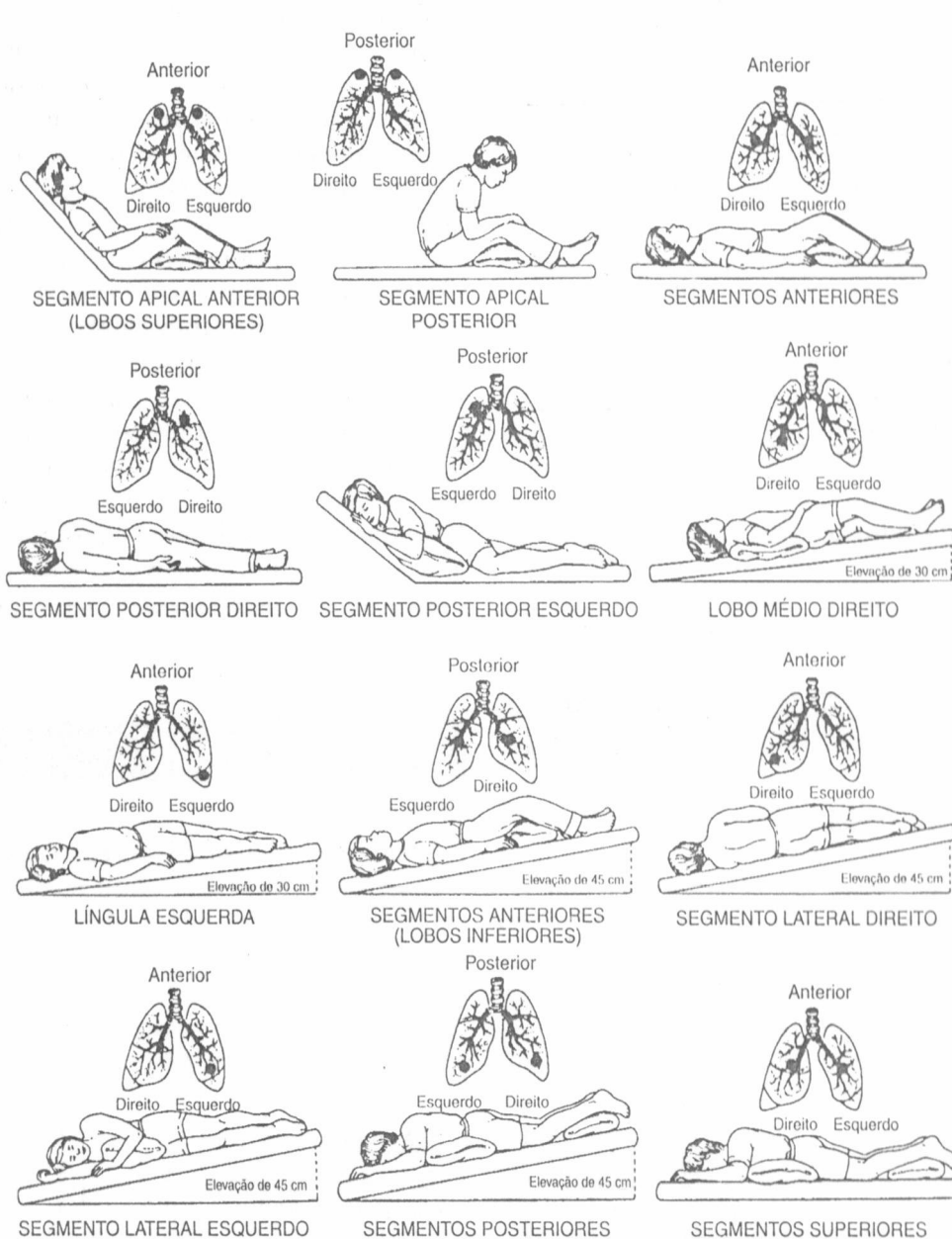


43. SCANLAN, G. L.; WILKINS, R. L.; STOLLER, J. K. *Fundamentos da terapia respiratória de Egan*. 7. ed. São Paulo: Manole, 2000.
44. SELICK, H.; WIDDICOMBE, J. G. Vagal deflation and inflation reflexes mediated by lung irritant receptors. *Q J Exp Physiol*. 1970. 55, p.153–163.
45. SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY. *Environmental implications of the use of wood-based products*. Disponível em <[www.1.fpl.fs.fed.us/swst/environ.html](http://www.1.fpl.fs.fed.us/swst/environ.html)> Acesso em set.1997.
46. TAKAHASHI, N.; MURAKAMI, G.; ISHIKAWA, A.; SATO, T. J.; ITO, T. Anatomic evaluation of postural bronchial drainage of the lung with special reference to patients with tracheal intubation. Which combination of postures provides the best simplification? *Chest*: 2004. 125, p. 935–944.
47. THOMAS, J.; COOK D. J.; BROOKS D. *Chest physical therapy management of patients with cystic fibrosis*. A meta-analysis. *Am J Respir Crit Care Med*. 1995. 151 (3 Pt 1), p. 846-850.
48. VAN DER SCHANS, C. P. *Physiotherapy and Bronchial mucus transport*. Proceedings of thesis. 1957. p. 45 e 63.
49. WANNER, A; SALATHÉ, M; O'RIORDAN, G. T. Mucociliary clearance in the airways. *Am Resp Crit Care Med*.1996, 154, p. 1868-1902.
50. WEST, J. B. *Fisiologia respiratória*. 6. ed. São Paulo: Manole, 2002.
51. WONG, J. W.; KEENS, T.G.; WANNAMAKER, E. M.; CROZIER, D.N.; LEVISON, H. & ASPIN, N. *Effects of gravity on tracheal mucus transport rates in normal subjects and in patients with cystic fibrosis*. *Pediatr*: 1997. 60 (2), p. 146-152, 1977.

## ANEXO A

### A.1 POSTURAS DE DRENAGEM

Posturas de drenagem utilizadas pela fisioterapia respiratória (PRYOR e WEBBER, 2002).



## ANEXO B

### B.1 METROLOGIA

#### 1 O processo de medição

Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão, e reconhecida internacionalmente. A operação de medição é realizada por um instrumento de medição ou, de uma forma mais genérica, por um sistema de medição (SM), podendo este último ser composto por vários módulos. Obtém-se, dessa operação instrumentada, a chamada indicação direta, que é o número lido pelo operador, diretamente no dispositivo mostrador, acompanhado da respectiva unidade indicada neste dispositivo. Para que a medição tenha sentido, é necessário determinar a chamada indicação. A indicação corresponde ao valor momentâneo do mensurando no instante da medição, e é composta de um número acompanhado da mesma unidade do mensurando. A indicação é obtida pela aplicação da chamada constante do instrumento à indicação direta.

#### 2 O resultado de uma medição

A indicação, obtida de um SM, é sempre expressa por meio de um número e da unidade do mensurando. O trabalho de medição não termina com a obtenção da indicação. Neste ponto, na verdade, inicia o trabalho do experimentalista. Ele deverá chegar à informação denominada “resultado de uma medição”. O resultado de uma medição (RM) expressa propriamente o que se pode determinar com segurança sobre o valor do mensurando, a partir da aplicação do SM sobre esta. É composto de duas parcelas: a) o chamado resultado base (RB), que corresponde ao valor central da faixa, onde deve situar-se o valor verdadeiro do mensurando; b) é a incerteza da medição (IM), que exprime a faixa de dúvida ainda presente no resultado, provocada pelos erros presentes no SM e/ou variações do mensurando, e deve sempre ser acompanhado da unidade do mensurando. Assim, o resultado de uma medição (RM) deve ser sempre expresso pela EQ. (1).

$$RM = (RB \pm IM) [unidade] \quad (1)$$

O procedimento de determinação do RM deverá ser realizado com base em: a) conhecimento aprofundado do processo que define o mensurando (o fenômeno físico e suas características); b) conhecimento do sistema de medição (características metrológicas e operacionais); c) bom senso.

### 3 O sistema de medição

A análise sistêmica de diversos SM revela a existência de três elementos funcionais bem definidos, que se repetem com grande frequência na maioria dos sistemas de medição em uso. Em termos genéricos, um SM pode ser dividido em três módulos funcionais: o sensor/transdutor, a unidade de tratamento do sinal e o dispositivo mostrador. Cada módulo pode constituir uma unidade independente ou pode estar fisicamente integrado ao SM. A FIG 1 mostra genericamente esse SM.

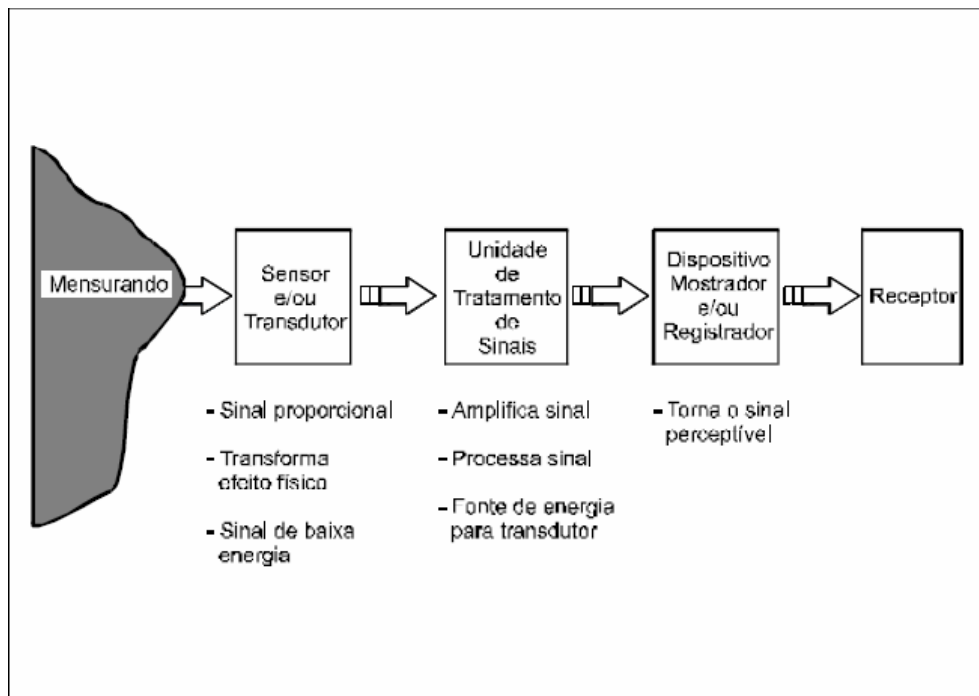


FIGURA 1 – Sistema generalizado de medição

FONTE – GONÇALVES JR, 2002, p.21

## 4 Parâmetros característicos de sistemas de medição

Alguns parâmetros metrológicos são aqui definidos para melhor caracterizar o comportamento metrológico de sistemas de medição. Esses parâmetros podem ser expressos na forma de um simples número (que define o valor máximo assumido pelo SM em toda a sua faixa de medição), de uma faixa de valores, de uma tabela ou na forma de um gráfico. A apresentação do parâmetro na forma de um simples número, também chamado de parâmetro reduzido, traz menos informações sobre o comportamento do SM, porém, é uma forma simplificada de representar o parâmetro e é facilmente aplicável em uma comparação.

### 4.1 Faixa de indicação (FI)

A faixa de indicação (FI) é o intervalo entre o menor e o maior valor, que o dispositivo mostrador do SM teria condições de apresentar como indicação direta (ou indicação). Nos medidores de indicação analógica, a FI corresponde ao intervalo limitado pelos valores extremos da escala. É comum especificar a capacidade dos indicadores digitais como sendo, por exemplo, de 3 ½ dígitos, quando o valor máximo é  $\pm 1999$ , ou de 4 dígitos, quando valor máximo é  $\pm 9999$ .

### 4.2 Faixa de medição

É o conjunto de valores de um mensurando, para o qual se admite que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro de limites especificados. Exemplos: Termômetro: FM = - 50 a 280 °C; Medidor de deslocamento: FM =  $\pm 50$  mm (ou FM = - 50 a + 50 mm). A faixa de medição é menor ou, no máximo, igual à faixa de indicação. O valor da FM é obtido através: do manual de utilização do SM; de sinais gravados sobre a escala; das especificações de normas técnicas e dos relatórios de calibração.

### 4.3 Valor de uma divisão de escala (VD)

Nos instrumentos com mostradores analógicos, o valor de uma divisão de escala (VD) corresponde à diferença entre os valores da escala correspondentes a duas marcas sucessivas. O valor de uma divisão é expresso na unidade marcada sobre a escala, qualquer

que seja a unidade do mensurando.

#### 4.4 Resolução

Segundo GONÇALVES JR. (2002), a resolução é a menor diferença entre indicações, que pode ser significativamente percebida. A avaliação da resolução é feita em função do tipo de instrumento: a) Nos sistemas com mostradores digitais, a resolução corresponde ao incremento digital; b) Nos sistemas com mostradores analógicos, a resolução teórica é zero. No entanto, em função das limitações do operador, da qualidade do dispositivo indicador e da própria necessidade de leituras mais ou menos criteriosas, a resolução a ser adotada poderá ser:  $R = VD$ , quando o mensurando apresenta flutuações superiores ao próprio VD, ou no caso de se tratar de uma escala grosseira, de má qualidade;  $R = VD/2$ , quando se tratar de SM de qualidade regular ou inferior e/ou o mensurando apresentar flutuações significativas e/ou quando o erro de indicação direta não for crítico;  $R = VD/5$ , quando se tratar de SM de boa qualidade (traços e ponteiros finos, etc.) e a medição em questão tiver de ser feita criteriosamente;  $R = VD/10$ , quando o SM for de qualidade, o mensurando estável e a medição for altamente crítica quanto a erros de indicação direta, e a incerteza do SM foi inferior ao VD.

#### 4.5 Erro sistemático (Es)

É a parcela do erro que se repete quando uma série de medições é efetuada nas mesmas condições. Numericamente, corresponde à média de um número infinito de medições do mesmo mensurando, efetuadas sobre condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando. Em termos práticos, adota-se a tendência como estimativa do erro sistemático - EQ. (2).

$$Td = MI - VVC \quad (2)$$

onde: MI é a media de um número finito de medições;

VVC é o valor verdadeiro convencional.

#### 4.6 Repetitividade (Re) de um SM

Especifica a faixa de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, situar-se-á o valor do erro aleatório da indicação de um SM, para as condições em que a medição é efetuada. Normalmente, especifica-se a Re com uma confiabilidade de 95%. A utilização de outros níveis de confiabilidade, 99% ( $\pm 3s$ ), depende da aplicação e obedece a tradições, determinações de norma ou desejo do usuário - EQ (3).

$$Re = \pm t.s \quad (3)$$

#### 4.7 Característica de resposta nominal (CRn)

Todo sistema de medição tem o seu comportamento ideal (nominal) regido por um princípio físico bem definido. A equação que exprime o relacionamento ideal entre o estímulo (grandeza de entrada no SM) e a sua resposta (saída) é denominada de Característica de Resposta Nominal (CRn).

#### 4.8 Característica de resposta real (CRr)

Na prática, o ideal não acontece. A resposta de um SM ao estímulo (mensurando) não segue exatamente o comportamento previsto pela CRn em decorrência de imperfeições que se manifestam de forma sistemática e/ou aleatória.

Define-se, então, a Característica de Resposta Real (CRr) como a relação que realmente ocorre entre o estímulo e a resposta do SM, seja em termos da indicação direta ou indicação. A característica de resposta real difere da nominal, em função do SM apresentar erros sistemáticos e erros aleatórios, sendo, portanto, melhor caracterizada por uma linha média (indicação média) e uma faixa de dispersão associada, geralmente estimada pela repetitividade. Normalmente, não é fácil prever o como e o quanto a CRr se afastará da CRn. A forma construtiva, as características individuais de cada elemento, o grau de desgaste, as propriedades dos materiais, influenciam essa diferença.

#### 4.9 Curva de erro (CE)

O comportamento ideal (nominal) de um SM de boa qualidade não difere muito do comportamento real. Na prática, a representação da CRr em um gráfico que relacione o estímulo e a resposta será visualizado como se fosse praticamente uma reta, já que as diferenças entre a CRn e a CRr são muito pequenas. Para tornar claramente perceptível o como e o quanto o comportamento real de um SM se afasta do ideal, emprega-se o gráfico conhecido como curva de erros (CE). A indicação apresentada pelo SM é comparada com um valor padrão ao qual o SM é repetidamente submetido. São estimadas a tendência (erros sistemáticos) e a repetitividade do SM para aquele ponto. O processo é repetido para certo número de pontos dentro da faixa de medição, sendo usados diferentes valores padrão. Como resultado, obtém-se a curva de erros que descreve a forma como os erros sistemáticos (tendência) são representados pela linha central e os erros aleatórios (faixa de  $\pm Re$  em torno da Td) se distribuem ao longo da faixa de medição. Na curva de erros, os erros são apresentados em função da indicação, ou, às vezes, da indicação direta. Este gráfico é bastante explícito sobre o comportamento do SM em toda a faixa de medição - FIG 2.

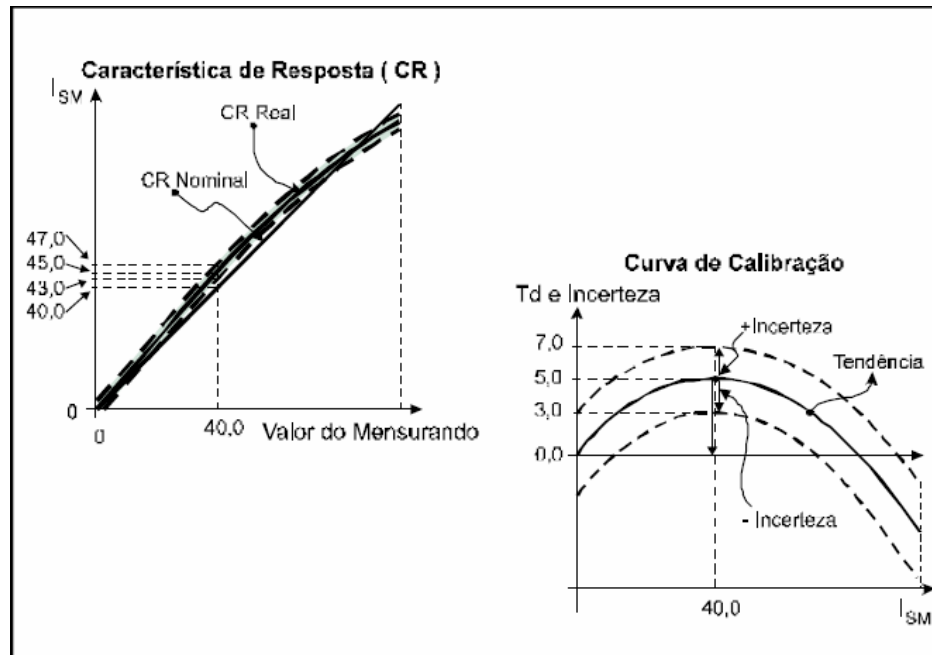


FIGURA 2 - Característica de resposta e curva de calibração

FONTE - GONÇALVES JR, 2002, p. 28



#### 4.10 Correção

A correção corresponde à tendência com sinal trocado. Esse termo é, às vezes, empregado em substituição à  $T_d$ , quando é efetuada a sua compensação. Seu uso é predominante nos certificados de calibração em lugar da tendência. A correção deve ser somada ao valor das indicações para "corrigir" os erros sistemáticos.

#### 4.11 Erro máximo (E<sub>max</sub>)

O Erro Máximo (E<sub>max</sub>) expressa a faixa na qual se espera que esteja contido o erro máximo (em termos absolutos) do SM, considerando toda a sua faixa de medição e as condições operacionais fixadas pelo seu fabricante. O termo *precisão*, embora não recomendado, tem sido usado como sinônimo de incerteza do sistema de medição. O erro máximo define uma faixa simétrica em relação ao zero, que inscreve totalmente a curva de erros de um SM. O erro máximo de um SM é o parâmetro reduzido que melhor descreve a qualidade do instrumento.

### **5 Calibração de um sistema de medição**

Um sistema de medição (SM) de boa qualidade deve ser capaz de operar com pequenos erros. Seus princípios construtivos e operacionais devem ser projetados para minimizar erros sistemáticos e aleatórios ao longo da sua faixa de medição, nas suas condições de operação nominais. Entretanto, por melhores que sejam as características de um SM, este sempre apresentará erros, seja por fatores internos, seja por ação das grandezas de influências externas. A perfeita caracterização das incertezas associadas a esses erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser estimado de maneira segura.

Embora, em alguns casos, os erros de um sistema de medição possam ser analítica ou numericamente estimados, na prática são utilizados procedimentos experimentais quase que exclusivamente. Através do procedimento experimental denominado calibração, é possível correlacionar os valores indicados pelo sistema de medição e sua correspondência com a grandeza sendo medida. Essa operação é extremamente importante e é realizada por um grande número de entidades credenciadas espalhadas pelo país.

## 6 Classificação dos mensurandos

Para formular um modelo adequado para determinar o resultado da medição, o mensurando é aqui classificado como variável ou invariável. Será invariável se o seu valor permanecer constante durante o período que há interesse no seu valor. A massa de uma peça metálica isolada do meio ambiente é um exemplo. A temperatura de uma sala ao longo de um dia, ou em diferentes posições, é um exemplo de mensurando variável, isto é, seu valor muda em função do tempo e/ou da posição ao longo da sala.

A rigor, em termos precisistas, não existem mensurandos invariáveis. Mesmo a massa de uma peça de platina no vácuo sofre variações ínfimas se forem considerados aspectos relativísticos, uma vez que a velocidade com que as galáxias se afastam aumenta com a expansão do universo... Fugindo das discussões filosóficas, em termos práticos, o mensurando será aqui considerado invariável quando suas variações não podem ser detectadas pelo SM em uso. Ou seja, o SM não consegue "enxergar" essas variações, por serem inferiores à sua resolução.

O diâmetro de uma peça cilíndrica pode ser considerado como um mensurando variável ou invariável, dependendo do SM utilizado. Imperfeições geométricas na forma cilíndrica fatalmente vão levar a diferentes valores do diâmetro quando medidos em diferentes posições, o que é uma característica de um mensurando variável. Entretanto, se essas variações forem inferiores à menor variação detectável pelo SM em uso – a sua resolução – esta peça será "enxergada" pelo SM como invariável. O uso de um outro SM de melhores características poderia levar a uma interpretação diferente. Portanto, a classificação de variável ou invariável não depende somente do mensurando em si, mas da relação das suas características com as do SM:

- variável: as variações do mensurando são maiores que a resolução do SM;
- invariável: as variações do mensurando são inferiores à resolução do SM.

Para estimar o resultado da medição de um mensurando invariável, além das indicações obtidas, devem ser consideradas as características do sistema de medição. No caso do mensurando variável, além das considerações acima, devem também ser consideradas as variações do mensurando. Se o mensurando varia, o resultado da medição deve registrar essa variação.

## 7 Quadro geral para se determinar o resultado de medição

À vista dos conceitos supracitados, construímos o QUADRO 1, para a determinação do resultado da medição (RM), em que: RM é o resultado da medição; I é a indicação; MI é a média das indicações; C é a correção do SM ( $C = -Td = -$  estimativa do Es);  $\Delta I_{\text{máx}}$  é o valor absoluto da variação máxima de uma indicação em relação a seu valor médio;  $E_{\text{max}}$  é o erro máximo do SM nas condições em que a (s) medição (ões) foi (ram) efetuada (s).

QUADRO 1

Quadro geral para se determinar o resultado de medição

Tipo de mensurando	Dados Conhecidos do SM	Número de medições efetuadas	
		n = 1	n > 1
Invariável	$E_{\text{max}}$	$RM = I \pm E_{\text{max}}$	$RM = MI \pm E_{\text{max}}$
	C e Re	$RM = I + C \pm Re$	$RM = MI + C \pm Re/\sqrt{n}$
Variável	$E_{\text{máx}}$	não se aplica	$RM = MI \pm (\Delta I_{\text{máx}} + E_{\text{max}})$
	C e Re	não se aplica	$RM = MI + C_c \pm (\Delta I_{\text{máx}} + E_{\text{max}})$

FONTE: GONÇALVES JR, (2002), p. 54

## 8 Fontes de incertezas

Para se identificar as várias fontes de incertezas que agem sobre um processo de medição, é necessário se conhecer muito bem esse processo. O próximo passo é fazer uma análise crítica, procurando identificar tudo que pode trazer influências sobre o resultado da medição. Normalmente, as fontes de incertezas estão contidas nos meios e métodos de medição, no ambiente e na definição do mensurando. Por meios de medição entende-se, além do próprio SM, acessórios, dispositivos e módulos complementares, e, também, o operador deve ser incluído. O método de medição refere-se ao procedimento segundo o qual a medição é efetuada, por exemplo, o número de medições repetitivas, a forma de repetir, a maneira de zerar um SM, o sentido de medição, o tempo entre medições, etc.

Os fatores relacionados ao ambiente referem-se principalmente à influência da temperatura (sobre o SM e sobre o mensurando), porém, outros fatores como variações da tensão da rede elétrica, alterações de umidade relativa do ar e pressão atmosférica podem

também ser significantes. A definição do mensurando pode afetar o resultado da medição, por exemplo, se a sua definição não for clara ou precisa, ou mesmo, se o mensurando for variável, o resultado da medição será afetado. A medição da temperatura no interior de um refrigerador (variável), o diâmetro de um eixo com geometria imperfeita (varia de ponto para ponto), a distância entre duas cidades (marcos não muito bem definidos), são exemplos de situações onde o mensurando não está bem definido.

Para que a influência de cada fonte de incertezas seja corretamente considerada, é necessário caracterizar as respectivas componentes aleatórias e, quando for o caso, sistemáticas, que estas trazem sobre o processo de medição. Fundamentalmente, dois parâmetros numéricos devem ser estimados para cada fonte de incertezas: a incerteza padrão ( $u$ ), e a correção ( $C$ ).

A incerteza padrão é uma medida relacionada aos erros aleatórios trazidos pela fonte de incertezas. A correção é o parâmetro que deve ser adicionado à indicação para corrigir os efeitos sistemáticos da fonte de incertezas. Se fossem perfeitamente determinadas, as influências dos efeitos sistemáticos poderiam ser exatamente compensadas por sua correção.

Entretanto, como o valor da correção nunca pode ser perfeitamente conhecido, a correção dos efeitos sistemáticos não pode ser perfeita, o que dá origem a uma incerteza residual. No conjunto, as diversas componentes de incerteza, residuais ou não, devem ser levadas em conta e combinadas para que a incerteza expandida seja corretamente estimada.

## **9 Incerteza padrão**

A incerteza padrão ( $u$ ) de uma fonte de incertezas é definida como a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão. Portanto, corresponde ao desvio padrão do erro aleatório associado à fonte de incertezas. A estimativa da incerteza padrão associada a uma fonte de incertezas pode ser efetuada através de procedimentos estatísticos ou por outros meios

### **9.1 Estimativa da incerteza padrão por meios estatísticos (avaliação tipo “A”)**

Há várias situações em que o desvio padrão experimental associado a uma fonte de incertezas pode ser estimado a partir de valores de observações repetitivas do mensurando. A incerteza padrão coincide então com o valor estimado do desvio padrão.

O “guia” denomina os procedimentos estatísticos como procedimentos “tipo A”. Suponha que a variável aleatória “q” represente os efeitos de uma fonte de incertezas sobre o resultado da medição. O desvio padrão experimental dessa variável “q” é determinado a partir de "n" valores independentemente obtidos para a variável “q”, isto é,  $q_k$  (para  $k = 1, 2, \dots, n$ ). A média de “q” pode ser estimada pela EQ. (4).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (4)$$

O desvio padrão experimental de  $q$ , representado por “s”, é estimado pela EQ. (5).

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (5)$$

Uma vez estimado o  $s(q)$ , a incerteza padrão a ser associada à fonte de incerteza avaliada depende apenas do procedimento de medição utilizado. Se apenas uma medição é efetuada, a incerteza padrão é dada pela EQ. (6).

$$u(q) = s(q) \quad (6)$$

Entretanto, se "m" medições são efetuadas e o seu valor médio é usado para calcular o resultado da medição, a incerteza padrão corresponde ao desvio padrão da média de "m" medições - EQ. (7).

$$u(q) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{m}} \quad (7)$$

O “guia” denota por “n” o número de *graus de liberdade* associado à determinação da incerteza padrão. O número de graus de liberdade ( $\nu$ ) é calculado como o número de dados usados para estimar o desvio padrão experimental ( $\nu$ ) menos um - EQ. (8).

$$\nu = n - 1 \quad (8)$$

## 9.2 Estimativa da incerteza padrão por meios não estatísticos (avaliação tipo “B”)

Há várias situações em que não é prático, ou mesmo possível, usar procedimentos estatísticos para estimar o desvio padrão experimental associado a uma fonte de incertezas.

Outras informações devem ser usadas para estimar o desvio padrão associado aos efeitos da fonte de incertezas sobre o processo de medição. A nomenclatura adotada no “guia” denomina os procedimentos não estatísticos como procedimentos de avaliação “tipo B”. Informações conhecidas a priori sobre o comportamento da fonte de incertezas ou deduzidas por observação das suas características, são consideradas. Informações obtidas de medições anteriores, certificados de calibração, especificações do instrumento, manuais técnicos e mesmo estimativas baseadas em conhecimentos e experiências anteriores do experimentalista, são exemplos de conhecimento a priori que podem ser levados em conta. Os limites, dentro dos quais, uma fonte de incertezas naturalmente se encontra, e o tipo de distribuição de probabilidade, tipicamente atribuída a esta, podem ser deduzidos em alguns casos.

#### 9.4 Estimativa baseada em levantamentos estatísticos conhecidos a priori

É o caso em que existem levantamentos estatísticos anteriores, realizados em um tempo passado, que fornecem dados quantitativos confiáveis sobre os efeitos da fonte de incertezas, considerada sobre a medição. Certificados ou relatórios de calibração de padrões ou módulos do sistema de medição normalmente trazem este tipo de informação. Registros históricos das características metrológicas ou operacionais, de elementos utilizados na medição ou das próprias grandezas de influência, podem também ser utilizados.

Deve-se procurar extrair da documentação disponível estimativas da influência das parcelas sistemáticas e da incerteza padrão associadas à fonte de incertezas e seus efeitos sobre o valor indicado pelo sistema de medição. Muitas vezes, encontra-se na documentação disponível o parâmetro denominado incerteza expandida. É possível calcular a incerteza padrão a partir da incerteza expandida, dividindo esta última por um parâmetro conhecido como fator de abrangência.

#### 9.5 Estimativa baseada em limites máximos de variação

Não é rara a situação em que o conjunto de informações disponíveis sobre a fonte de incertezas considerada seja muito limitado. Mesmo na ausência de levantamentos estatísticos anteriores é ainda válida a busca por outros elementos que levem a uma estimativa segura para os limites de influências da fonte de incertezas. Em algumas situações, dispõe-se de informações que permitem estimar os limites máximos dentro dos quais espera-se que os efeitos da fonte de incertezas sobre o mensurando estejam contidos.

São exemplos: registros históricos de valores típicos de grandezas de influência; informações extraídas de folhas de especificações técnicas de sistemas ou padrões; normas que regulamentam limites máximos admissíveis para a grandeza de influência ou classe de padrões ou instrumentos de referência utilizados; informações extraídas de curvas de calibração na forma de limites máximos de erros; deduções ou análises acerca dos efeitos da fonte de incertezas, baseados em suas propriedades e características naturais.

## 9.6 Combinação de efeitos em medições diretas

Uma vez estimadas a correção e a incerteza padrão para cada fonte de incertezas, estas devem ser consideradas em conjunto para que, tanto a correção combinada, quanto a incerteza padrão combinada, possam ser determinadas para o processo de medição.

### 9.6.1 Correção combinada

As componentes sistemáticas de cada fonte de incertezas devem ser combinadas por soma algébrica simples. Os valores das correções associadas a cada fonte de incertezas devem estar expressos na mesma unidade, que deve ser a unidade do mensurando. Por exemplo, se a temperatura afeta o valor medido de um comprimento, o efeito da temperatura média sobre a medição do comprimento deve ser expresso em unidades de comprimento e não em unidades de temperatura.

Assim, a correção combinada para “p” fontes de incertezas deve ser estimada pela EQ. (9).

$$C_c = \sum_{k=1}^p C_k \quad (9)$$

onde:

$C_k$  representa a correção associada à k-ésima fonte de incerteza;

p é o número de fontes de incertezas considerado;

CC representa a correção combinada das “p” fontes de incertezas.

### 9.6.2 Incerteza padrão combinada

Os efeitos aleatórios de cada fonte de incertezas devem ser considerados para compor a chamada incerteza padrão combinada. Para que a estimativa da incerteza padrão

combinada seja efetuada de forma correta, algumas propriedades das variáveis aleatórias devem ser consideradas. Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculadas, isto é, não há nenhuma relação entre o crescimento aleatório de uma e o crescimento (ou decréscimo) aleatório da outra. Um exemplo é a relação entre a temperatura do mar na praia da Joaquina e a cotação do *dollar*. São completamente desvinculadas. Do ponto de vista estatístico, duas variáveis são ditas independentes ou não correlacionadas, se o seu coeficiente de correlação é zero. É a relação mais comumente observada entre as fontes de incertezas nas medições diretas.

Por outro lado, duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente dependentes se suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra, de forma proporcional à primeira. Do ponto de vista estatístico, essas variáveis são ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é unitário e positivo (+1). Há, ainda, o caso em que o crescimento da primeira está nitidamente atrelado ao decréscimo proporcional da segunda. Nesse caso, essas variáveis possuem correlação inversa, e seu coeficiente de correlação é -1. São raros os casos em que fontes de incertezas estatisticamente dependentes estão presentes em medições diretas.

Sejam “X1” e “X2” duas variáveis aleatórias estatisticamente independentes. Seja “Y” calculado pela soma:  $Y = X1 + X2$  e “Z”, pela diferença:  $Z = X1 - X2$ . “Y” e “Z” também serão variáveis aleatórias. É possível demonstrar que as médias de “Y” e “Z” podem ser estimadas pela EQ. (10) e EQ. (11).

$$\mu_Y = \mu_{X1} + \mu_{X2} \quad (10)$$

$$\mu_Z = \mu_{X1} - \mu_{X2} \quad (11)$$

Sendo “X1” e “X2” estatisticamente independentes, é possível demonstrar que os desvios padrões de “Y” e “Z” podem ser calculados a partir dos desvios padrões de “X1” e “X2”, pela EQ. (12) e EQ. (13).

$$\sigma_Y = \sqrt{\sigma_{X1}^2 + \sigma_{X2}^2} \quad (12)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{X1}^2 + \sigma_{X2}^2} \quad (13)$$

A EQ. (12) e a EQ. (13) mostram que, se X1 e X2 são variáveis estatisticamente independentes, o desvio padrão da sua soma e da sua diferença coincidem e são obtidos pela



raiz quadrada da soma dos quadrados de ambos. É possível mostrar que a expressão formada pela EQ. (12) e EQ. (13) pode ser generalizada para estimar a soma (ou subtração ou combinações de somas e subtrações) de um número ilimitado de termos - EQ. (14).

$$\sigma_{(X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_p)} = \sqrt{\sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2 + \dots + \sigma_{X_p}^2} \quad (14)$$

Freqüentemente na medição direta, os efeitos associados às várias fontes de incertezas se refletem sobre a indicação do sistema de medição como parcelas aditivas, isto é, cada fonte de incertezas soma (ou subtrai) sua contribuição sobre a indicação. É como se houvesse uma soma dos efeitos de inúmeras variáveis aleatórias.

Ao desvio padrão resultante da ação conjunta das várias fontes de incertezas, agindo simultaneamente sobre o processo de medição, denomina-se de incerteza padrão combinada. A incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) das várias fontes de incertezas pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de incertezas pela EQ. (15).

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2} \quad (15)$$

onde:

$u_1, u_2, \dots, u_p$  representam as incertezas padrão de cada uma das “p” fontes de incertezas;  
 $u_c$  representa a incerteza padrão combinada.

Também, aqui, é necessário que as incertezas padrão de cada fonte de incertezas sejam expressas na mesma unidade do mensurando.

A EQUAÇÃO (15) só é válida para estimar a incerteza padrão combinada se os efeitos de cada fonte de incertezas manifestarem-se de forma aditiva sobre a indicação e no caso de estas estarem mútua e estatisticamente independentes.

### 9.6.3 Número de graus de liberdade efetivo

Quando as incertezas padrão de várias fontes de incertezas são consideradas para estimar a incerteza padrão combinada, o número de graus de liberdade resultante da incerteza padrão combinada deve ser estimado.

O “guia” denomina por número de graus de liberdade efetivos ( $\nu_{ef}$ ) o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada. O “guia” recomenda a utilização da equação de Welch-Satterthwaite para estimar o número de graus de liberdade efetivos - EQ. (16).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (16)$$

onde:

$u_c$  é a incerteza padrão combinada;

$u_1, u_2, \dots, u_p$  são as incertezas padrão de cada uma das “p” fontes de incerteza;

$n_1, n_2, \dots, n_p$  são os números de graus de liberdade de cada uma das “p” fontes de incerteza;

$v_{ef}$  é o número de graus de liberdade efetivo, associado à incerteza padrão combinada.

#### 9.6.4 Incerteza expandida

A incerteza padrão combinada, estimada através da EQ. (15), corresponde ao desvio padrão resultante da ação combinada das várias fontes de incertezas consideradas.

Em aplicações nas áreas da Engenharia, é comum trabalhar com níveis de confiança de 95%. Para atingir esse nível de confiança, a incerteza padrão combinada ( $u_c$ ), que corresponde a apenas um desvio padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de Student. No “guia”, este coeficiente é denominado de fator de abrangência, comumente representado pelo símbolo “ $k_{95}$ ” quando o nível de confiança 95% é usado. A denominada incerteza expandida ( $U_{95\%}$ ) corresponde à faixa de valores que enquadra a incerteza com nível de confiança de aproximadamente 95%. É estimada pela EQ. (17).

$$U_{95\%} = k_{95\%} \cdot u_c \quad (17)$$

onde:

$u_c$  é a incerteza padrão combinada;

$k_{95\%}$  é o fator de abrangência para o nível de confiança de 95%;

$U_{95\%}$  representa a incerteza expandida para o nível de confiança de 95%.

O fator de abrangência  $k_{95\%}$  equivale ao coeficiente de Student para dois desvios padrão (o que corresponde ao nível de confiança de 95,45%). O “guia” recomenda que se use a TABELA (1):

TABELA 1

Valores para o fator de abrangência ( $k_{95\%}$ ) para nível de confiança de 95%, em função do número de graus de liberdade efetivo ( $\nu_{ef}$ )

$\nu_{ef}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
$k_{95}$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
$\nu_{ef}$	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	$\infty$
$k_{95}$	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

FONTE: GONÇALVES JR, 2002, p. 73

Para valores fracionários de  $\nu_{ef}$ , interpolação linear pode ser usada se  $\nu_{ef} > 3$ . Alternativamente, o valor de  $k_{95}$  correspondente ao valor de  $\nu_{ef}$ , imediatamente inferior na tabela, pode ser adotado.

### 9.7 Estimativa das incertezas em medições indiretas

Na medição direta, o valor associado ao mensurando resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre este. Há interesse focado apenas em uma grandeza. A medição de um diâmetro por um paquímetro, e da temperatura de uma sala, por um termômetro, são exemplos de medição direta.

A medição indireta envolve a determinação do valor associado ao mensurando, a partir da combinação de duas ou mais grandezas por meio de expressões matemáticas. São exemplos de medição indireta: a) a determinação da área de um terreno a partir da multiplicação dos valores medidos para sua largura e comprimento; b) a determinação da massa específica de um material, calculada a partir da razão entre sua massa e seu volume; e c) a medição da corrente que passa por um condutor a partir da divisão da queda de tensão medida sobre um resistor de precisão em série com o condutor, pelo valor da sua resistência elétrica.

Embora menos prática que a medição direta, a medição indireta é utilizada com muita frequência, principalmente em casos onde: a) por impossibilidade física, não é viável fazer medições diretas; e b) do ponto de vista econômico, ou, no que diz respeito ao nível de incerteza possível de ser obtido, é mais vantajoso efetuar medições indiretas.

De uma forma simplificada, em medições indiretas, é comum tratar como estatisticamente dependentes as medições de diferentes parâmetros efetuadas pelo mesmo instrumento. Por exemplo, se um mesmo paquímetro é usado para medir os comprimentos dos três lados de um paralelepípedo, cujo volume deseja-se calcular, essas três medições são

tratadas como estatisticamente dependentes (ou correlacionadas). Essa prática justifica-se quando se considera que, nos três casos, o SM pode trazer um erro muito similar para as três medições (por exemplo, uma parcela sistemática desconhecida, provocada pelo desgaste), o que caracterizaria um a situação de "sincronismo" do erro, ou, em outras palavras, dependência estatística.

Por outro lado, medições efetuadas por diferentes SM são tratadas como estatisticamente independentes (ou não correlacionadas). No exemplo anterior, se o comprimento de cada lado do paralelepípedo fosse medido por um SM diferente, os erros de medição de cada SM seriam independentes, gerando a situação de independência estatística.

### 9.7.1 Grandezas de entrada estatisticamente dependentes

No caso em que há dependência estatística entre as variáveis de entrada, a variação aleatória associada a cada grandeza de entrada poderá agir de forma sincronizada sobre as respectivas indicações. Para estimar a incerteza da combinação de duas ou mais grandezas de entrada estatisticamente dependentes, deve ser levado em conta que essas podem assumir, ao mesmo tempo, valores extremos dentro de suas respectivas faixas de incerteza. O valor estimado geralmente representa os limites da variação máxima possível. Embora exista uma expressão geral para a estimativa da incerteza associada à combinação de grandezas de entrada estatisticamente dependentes, há casos particulares, freqüentemente presentes na prática, onde as equações são drasticamente simplificadas. A soma e subtração e a multiplicação e divisão são grupos de operações onde são possíveis simplificações consideráveis e serão inicialmente tratados.

#### 9.7.1.1 Soma e subtração

Na soma ou subtração de qualquer número de grandezas de entrada estatisticamente dependentes, a incerteza padrão combinada do resultado pode ser estimada pela soma algébrica das incertezas padrão individuais de cada grandeza envolvida - EQ. (18).

$$u(x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm \dots) = u(x_1) + u(x_2) + u(x_3) + \dots \quad (18)$$

### 9.7.1.2 Multiplicação e divisão

Na multiplicação e/ou divisão de várias grandezas de entrada estatisticamente dependentes, a incerteza padrão relativa combinada é obtida pela soma das incertezas padrão relativas de cada grandeza de entrada envolvida - EQ. (19) e EQ. (20).

$$\frac{u(x1.x2.x3...)}{x1.x2.x3...} = \frac{u(x1)}{x1} + \frac{u(x2)}{x2} + \frac{u(x3)}{x3} + \dots \quad (19)$$

$$\frac{u(x1/x2/x3/...)}{x1/x2/x3/...} = \frac{u(x1)}{x1} + \frac{u(x2)}{x2} + \frac{u(x3)}{x3} + \dots \quad (20)$$

### 9.7.1.3 Caso geral

A estimativa da incerteza combinada para o caso geral, onde as grandezas de entrada se relacionam através de uma expressão matemática qualquer, pode ser efetuada através da aplicação de uma expressão genérica. Sua demonstração matemática é baseada na expansão da expressão em termos de série de Taylor e não será tratada neste texto. Seja, por exemplo, uma grandeza  $G$  calculada em função de diversas grandezas de entrada relacionadas pela EQ. (2.21).

$$G = f(x1, x2, x3, x4, \dots) \quad (21)$$

Após a expansão em série de Taylor, eliminação de termos de ordens mais altas e redução de termos semelhantes, chega-se à EQ. (22).

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x1} \right| u(x1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x2} \right| u(x2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x3} \right| u(x3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x4} \right| u(x4) + \dots \quad (22)$$

onde:

$u(G)$  representa a incerteza padrão da grandeza  $G$ ;

$u(x1)$ ,  $u(x2)$ ,  $u(x3)$ ,  $u(x4)$ , ... representam as incertezas padrão associadas às grandezas de entrada  $x1$ ,  $x2$ ,  $x3$ ,  $x4$ , ... , respectivamente, e

$| |$  representa o módulo (valor absoluto) da expressão do seu interior.

### 9.7.2 Grandezas de entrada estatisticamente independentes

No caso em que as grandezas de entrada são estatisticamente independentes entre si, isto é, não guardam nenhuma forma de sincronismo, são remotas as chances que as variações aleatórias, associadas a cada grandeza de entrada, levem a uma combinação em que todos os valores extremos sejam atingidos ao mesmo tempo. Para esse caso, é possível demonstrar que a forma mais apropriada para combinar tais efeitos é através da soma das variâncias. A estimativa para a incerteza padrão combinada, nessas condições, resulta em um número menor do que seria obtido se as grandezas de entrada fossem tratadas como estatisticamente dependentes.

Há uma expressão genérica que permite estimar a incerteza padrão combinada para o caso geral, em que apenas grandezas de entrada estatisticamente independentes se relacionam através de uma expressão matemática. Seja, por exemplo, uma grandeza  $G$  calculada em função de diversas grandezas de entrada relacionadas pela EQ. (21).

A incerteza combinada da grandeza  $G$  pode ser estimada pela EQ. (23).

$$u^2(G) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_3} u(x_3) \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_4} u(x_4) \right)^2 \dots \quad (23)$$

onde:

$u(G)$  representa a incerteza padrão da grandeza  $G$ ;

$u(x_1)$ ,  $u(x_2)$ ,  $u(x_3)$ ,  $u(x_4)$ , ... representam as incertezas padrão associadas às grandezas de entrada  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ , ... , respectivamente.

### 9.7.3 Grandezas de entrada com dependência estatística parcial

Há casos mais complexos, em que as interações entre grandezas de entrada que compõem uma medição direta não podem ser realisticamente modeladas como sendo perfeitamente dependentes e nem independentes do ponto de vista estatístico. São os casos onde há dependência estatística parcial.

A expressão usada para estimar a incerteza padrão combinada de uma grandeza  $G$ , dada pela EQ. (24),

$$G = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) \quad (24)$$

considerando que pode haver dependência estatística parcial entre cada par das grandezas de entrada  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , é dada pela EQ. (25).

$$u^2(G) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) r(x_i, x_j) \quad (25)$$

onde:

$r(x_i, x_j)$  é o coeficiente de correlação entre as grandezas de entrada  $x_i$  e  $x_j$ .

#### 9.7.3.1 Incerteza padrão e incerteza expandida

Recomenda-se que a incerteza associada à medição indireta seja apreciada através das estimativas das incertezas padrão de cada grandeza de entrada. Somente após a obtenção da incerteza padrão combinada da medição indireta, determina-se a correspondente incerteza expandida.

Também neste caso, a incerteza expandida é estimada pela multiplicação da incerteza padrão combinada pelo respectivo fator de abrangência. O fator de abrangência é determinado em função do número de graus de liberdade efetivo, obtido a partir da equação de Welch-Satterthwaite - EQ. (16). O fator de abrangência é obtido da TABELA (1).

O número de graus de liberdade de cada grandeza de entrada corresponde ao número de graus de liberdade efetivo encontrado por ocasião da sua estimativa. Se esta informação não é disponível, deve ser aproximadamente estimado em função das condições de medição. Após o cálculo de  $u_{\text{ef}}$ , determina-se  $k_{95\%}$  e, finalmente,  $U_{95\%}$  pela EQ. (16) (GONÇALVES JR, 2002).

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)