

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E BALANCEAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
AR**

**Autor :**

**TIAGO RABELLO SPINELLI**

**Orientador :**

**ANTONIO LUIS DE CAMPOS MARIANI**

**SÃO PAULO**

**2001**

**Serviço de Bibliotecas**  
**Biblioteca de Engenharia Mecânica, Naval e Oceânica**

**“Mais importante que o conhecimento é a imaginação”**

**Albert Einstein**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Antonio Luis de Campos Mariani pela indicação do caminho a seguir, pelo material cedido e pelo empenho. Ao Prof. Raul Bollinger Jr. pelo curso e material e à SMACNA pelo suporte didático ao trabalho.

## ÍNDICE :

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Metodologia	4
4. Revisão Bibliográfica	7
5. Fundamentos e equações para análise de redes de distribuição de ar	9
5.1 Equação da Continuidade	9
5.2 Equação da Energia para sistemas com atrito	9
5.3 Sentido do escoamento	12
5.4 Analogia com a Lei de Kirchoff da eletricidade	14
5.5 A definição de componente de um sistema de distribuição de ar	17
5.6 O conceito de resistência e abertura fluido-dinâmicas	17
5.7 Relações entre resistências e aberturas fluido-dinâmicas com os coeficientes de perda de um componente do sistema	20
5.8 Resistências e aberturas equivalentes para sistemas onde o escoamento em cada componente é turbulento	22

5.9 Esquema elétrico equivalente de um sistema de condicionamento de ar	25
6. Cálculo das perdas de pressão	27
6.1 Perda distribuída	28
6.2 Perda localizada ou singular	33
6.3 Determinação da perda total	34
7. Dimensionamento e Balanceamento de dutos	36
7.1 O dimensionamento	36
7.2 O balanceamento	38
7.3 Procedimentos para balanceamento por computador	39
8. Programa de computador para redes de dutos	44
8.1. Caracterização da rede	44
8.2 Simular rede	45
8.3 Verificar resultados	46
8.4 Premissas do programa	46
9. Manual do usuário do programa de balanceamento	48
9.1 A instalação do programa	48
9.2 A entrada de dados – Caracterização da rede	48
9.3 Simular rede	52
9.4 Verificar resultados	54

10. Exemplo de aplicação do programa	59
11. Comentários finais e conclusões	64
12. Bibliografia	66

## **RESUMO**

Este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar redes de distribuição de ar e de, através da confecção de um programa de computador, balancear essas redes. O processo de balanceamento consiste em obter as vazões de projeto em cada uma das saídas de ar dessa rede. Os métodos utilizados para esse fim, bem como os conceitos apresentados são diferenciados com relação ao padrão utilizado por grande empresas e fabricantes do setor. Justamente, com base nisso pode-se dizer que este trabalho se mostra diferente das tentativas anteriores de desenvolvimento na área de Mecânica dos Fluidos aplicada à redes de condicionamento de ar.

## **ABSTRACT**

This work was done aiming at analysing air distribution nets and, through the manufacturing of a software, balancing these nets. The balancing process consists in obtaining the flows that were established in the project in each of the exits of this net. The used methods to reach this ultimate objective, as well as the presented concepts, are discriminated as they differ from the standard used by companies and produce makers. Based on this, it can be said that this work is different from previous development tries in Fluid Mechanics applied to air conditioning nets.



## 1. Introdução

Nos sistemas de tratamento e distribuição de ar podem ser utilizadas redes de dutos para movimentar esse ar e distribuí-lo de forma eficiente pelos ambientes de determinada edificação. Essas redes de dutos podem possuir diferentes características, em função dos parâmetros que definem a movimentação do ar: pressão, velocidade, vazão, etc. Devem ser projetadas considerando-se os aspectos arquitetônicos, viabilidade econômica, níveis de ruído, níveis de partículas no ar e outras características específicas da instalação. No campo da Mecânica dos Fluidos há diversas maneiras de se dimensionarem dutos para sistemas de ar condicionado e distribuição de ar. O presente trabalho preocupa-se com a etapa seguinte a esse dimensionamento, etapa essa que se mostra importante pois todo sistema foi feito para trabalhar em sua condição de máxima eficiência (eficácia), ou seja, atender as premissas (vazões) determinadas no projeto, o que não necessariamente acontece logo após o dimensionamento e instalação. Partindo de uma rede pré-dimensionada iremos, com a ajuda de um programa desenvolvido especialmente para esse fim, verificar se a rede se encontra balanceada ou não, entendendo que o balanceamento consiste em estabelecer os valores das vazões de projeto nos ambientes. Caso a resposta seja negativa o programa fornecerá dados para que o balanceamento possa ser efetuado, levando assim a rede à etapa final de projeto.

Este trabalho, portanto, participa do processo de garantia da qualidade ao ar tratado fornecido para os ambientes internos de uma rede de distribuição.

Colabora também com aspectos energéticos e econômicos, pois um sistema com melhor distribuição de ar possui um consumo de energia e custos operacionais mais reduzidos, fatores muito importantes no atual quadro energético e econômico do país.

## **2. Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é, à partir da fundamentação teórica baseada em conceitos diferenciados, como a analogia entre fluido-dinâmica e eletricidade, desenvolver um programa de simulação de redes de distribuição de ar capaz de apontar os trechos da rede que necessitam de intervenção do profissional que irá verificar o balanceamento e a intensidade dessa intervenção. Visa, portanto, facilitar o processo de balanceamento na fase de projeto de uma rede de distribuição e propicia, assim, menores gastos com tempo e recursos financeiros para sua execução. Apresenta, ainda, importante colaboração para as redes de distribuição de ar já instaladas que exigem a aplicação de procedimentos de balanceamento, pois através da aplicação dos resultados do programa define-se as alterações a serem introduzidas, descartando o uso de métodos iterativos de campo, muitas vezes imprecisos e dispendiosos.

### 3. Metodologia

A metodologia adotada no presente trabalho apresentou várias etapas e foi dividida em duas fases: a primeira de estudo do problema das redes de distribuição de ar e seus fundamentos e a segunda o desenvolvimento de um programa de computador que colaborasse para o balanceamento dessas redes.

#### ***3.1. Estudo do problema e fundamentos***

Nesta fase do trabalho foram realizadas as seguintes etapas :

- Conhecer o processo de distribuição de ar através de redes de dutos, sua finalidade e seus problemas.
- Levantar bibliografia, conforme descrito sucintamente no capítulo seguinte.
- Aprofundar os conceitos e modelos que equacionam as redes de dutos: teoria para o estudo do escoamento, cálculo das perdas de pressão e métodos de dimensionamento e balanceamento de redes de distribuição de ar.

Combinados os três grupos que formam a base teórica do trabalho observamos aí conceitos pouco utilizados atualmente e que são de grande utilidade principalmente pela sua aplicação prática.

Convém mencionar a participação no “Programa SMACNA de Educação Continuada em Tratamento de Ar” que contribuiu para o estabelecimento da metodologia e colaborou com a base para a teoria explicitada a seguir.

### **3.2. Desenvolvimento do programa**

O programa foi desenvolvido através das seguintes etapas :

- Escolher uma linguagem.
- Definir uma estrutura para aplicação do modelo selecionado na fase anterior
- Elaborar o programa
- Testar com o uso de redes características.
- Revisar e reelaborar o programa a partir desses testes.
- Realizar novas simulações
- Acertos finais e verificações de resultados

A escolha da linguagem de programação foi o maior desafio pois necessitava-se de uma linguagem de fácil aprendizado e boa interface, resultando no Visual Basic.

Na estruturação do programa dividiu-se em três partes (detalhadas no capítulo 8), que são : caracterização da rede, simulação e verificação. Foram avaliados dois procedimentos para a obtenção de parâmetros que definem o

balanceamento da rede. Um deles proposto por Robert Tsal (1993) e outro apresentado por Raul Bolliger Jr. (1997).

## 4. Revisão Bibliográfica

No início deste trabalho foi realizado o levantamento bibliográfico. Este capítulo consiste na descrição breve de cada uma das fontes adotadas e sua importância.

Foram exploradas no levantamento bibliográfico referências que tratavam da distribuição de ar condicionado, e aqui utilizou-se fontes originais das principais instituições ligadas ao setor, bem como estudos que discutem escoamentos de fluidos em redes.

O material do curso "Programa SMACNA de Educação Continuada em Tratamento de Ar" se mostrou o mais completo para o desenvolvimento do trabalho por apresentar toda a fundamentação teórica necessária à confecção do programa e também por introduzir o método computacional, apresentando o programa T-DUCT desenvolvido pelo Prof. Robert Tsal (1993), o que familiariza a teoria apresentada com a simulação com computadores.

A tese de livre docência do Prof. Tufi Mamed Assy (1959) se mostrou interessante pois apresenta uma simulação de redes de distribuição de água através da analogia elétrica de modo experimental, ou seja, a rede foi construída fisicamente com resistores e lâmpadas que indicavam as vazões nos trechos considerados.

Do manual *Fundamentals* da ASHRAE (1997) foram retirados trechos para solidificar os conceitos apresentados pelas referências anteriores, é portanto, uma bibliografia que complementa as outras. Entre os conceitos acrescentados está a

## 5. Fundamentos e equações para análise de redes de distribuição de ar

### 5.1. Equação da Continuidade

A equação da continuidade aplicada à sistemas de distribuição de ar propõe que em um trecho do sistema, definido entre duas seções 1 e 2, a vazão mássica ( $\dot{m}$ ) do fluido que escoar permanece constante, ou seja :

$$\rho * V_1 * S_1 = \rho * V_2 * S_2 \quad (1)$$

A Equação de Continuidade, também chamada de equação da conservação da massa pode ainda, mais genericamente, ser representada da seguinte forma :

$$\dot{m} = \rho * V * S = cte \quad (2)$$

### 5.2. Equação da Energia para sistemas com atrito

Supondo o escoamento de um fluido em movimento permanente, para um trecho do sistema definido por duas seções 1 e 2, sendo que entre elas há perdas por atrito e não há máquina nenhuma instalada (ventilador ou bomba), pode-se escrever a equação da energia entre as seções 1 e 2 como :



análise de redes através das perdas de pressão, como faz o Prof Raul Bolliger Jr (1997) no curso e ao contrário do Prof. Robert Tsal (1993) em seu programa que analisa a rede em termos da porcentagem da vazão de projeto. Além disso essa referência forneceu exemplos para verificação da veracidade do programa desenvolvido.

No manual do programa T-DUCT, Tsal (1993), obteve-se informações sobre o desenvolvimento de um programa de computador para simular o comportamento de uma rede de distribuição de ar. Este programa elaborado para ambiente MS-DOS utiliza também analogias elétricas e fluido-dinâmicas conforme explicitado em seu manual, contribuindo, portanto, para uma melhor estruturação do novo programa proposto.

Da literatura da SMACNA, além do material do curso citado, utilizou-se o manual DUCT DESIGN (1990). Esta referência também foi importante pois fornece muitas informações acerca do que chamamos de primeira fase de projeto, especialmente sobre o dimensionamento. São apresentados vários métodos de dimensionamento e exemplos de redes porém sem preocupações com o balanceamento. Os métodos e procedimentos de dimensionamento não foram muito aprofundados por não serem o principal objeto de estudo deste trabalho.

$$\frac{\rho V_1^2}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \frac{\rho V_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 + \Delta p_{1-2} \quad (3)$$

onde :

$$\frac{\rho V^2}{2} : \text{ é a pressão dinâmica } (p_d)$$

$$p : \text{ é a pressão estática } (p_{est})$$

$\rho g z$  : é a pressão correspondente à energia potencial em relação a um plano horizontal de referência qualquer

$\Delta p_{1-2}$  : é a perda de pressão entre as seções 1 e 2

logo,

$$p_T = \text{pressão total} = \frac{\rho V^2}{2} + p + \rho g z \quad (4)$$

Vale ressaltar que para sistemas onde o fluido que escoar é o ar a variação da parcela  $\rho g z$  é em geral desprezível entre as seções consideradas, nesse caso a pressão total resulta :

$$p_T = p_d + p_{est} = \frac{\rho V^2}{2} + p \quad (5)$$

Pode ser conveniente expressar a equação da energia em termos da altura do fluido. Para o caso do ar deve-se adotar uma massa específica de referência que pode ser  $\rho_A$  ou  $\rho_{PAD}$  ou ainda qualquer outro  $\rho_{REF}$ . Desta forma, utilizando  $\rho_{REF} * g = \gamma$  (peso específico) cada termo da equação da energia apresentará

dimensão de energia por unidade de peso (newton\*metro/metro) como visto abaixo :

$$\frac{\rho V_1^2}{2g\rho_{REF}} + \frac{p_1}{g\rho_{REF}} + \frac{\rho g z_1}{g\rho_{REF}} = \frac{\rho V_2^2}{2g\rho_{REF}} + \frac{p_2}{g\rho_{REF}} + \frac{\rho g z_2}{g\rho_{REF}} + \frac{\Delta p_{1-2}}{g\rho_{REF}} \quad (6)$$

ou ainda usando  $\gamma$  :

$$\frac{\rho V_1^2}{2\gamma} + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\rho g z_1}{\gamma} = \frac{\rho V_2^2}{2\gamma} + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\rho g z_2}{\gamma} + \frac{\Delta p_{1-2}}{\gamma} \quad (7)$$

Pode-se ainda representar os termos desta equação por alturas h :

$$h_D + h_{EST} + h_G = h_T \quad (8)$$

onde :

$h_D$  : altura dinâmica, ou pressão dinâmica em termos de coluna de fluido que escoar

$h_{EST}$  : altura estática, ou pressão estática em termos de coluna de fluido

$h_G$ : altura geométrica, que corresponde à energia potencial gravitacional em termos de coluna de fluido em relação a um nível horizontal de referência

É usual utilizar-se a denominação “carga” para esta altura citada. Neste caso o termo  $\frac{\Delta p_{1-2}}{\gamma}$  é chamado de perda de carga entre as seções 1 e 2.

A pressão total, ou carga total, representa a energia total que o fluido possui em determinada seção, sendo esta a soma de três termos relacionados a energia cinética (velocidade), energia de pressão (pressão estática) e energia potencial de posição (cota em relação à um nível de referência). Portanto :

$$h_T = h_D + h_{EST} + h_G = \frac{\rho V_1^2}{2\gamma} + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\rho g z_1}{\gamma} \quad (9)$$

### 5.3. Sentido de Escoamento

O fluido se movimenta no sentido decrescente das pressões totais, como pode ser verificado na Figura 1:

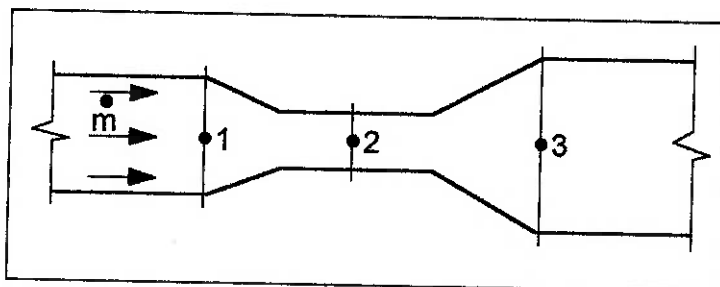


Figura 1 : Sentido do escoamento em duto com variação de seção transversal

As pressões totais em 1, 2 e 3 são dadas por  $p_{T1} > p_{T2} > p_{T3}$ , portanto o fluido se movimenta de 1 para 3. Vale lembrar que apesar da pressão total no ponto 2 ser maior que no ponto 3 a pressão estática em 2 é menor que em 3 devido ao aumento de área da seção (de 2 para 3) que causa um aumento na pressão estática às custas de uma redução de velocidade. Lembrando da equação da energia :

$$\frac{\rho V^2}{2} + p + \rho g z = cte \quad (10)$$

têm-se que um aumento na velocidade acarreta uma redução na pressão estática, desde que mantenha-se constante a cota da seção com relação a uma referência adotada, e consequentemente uma redução na velocidade acarretará num aumento da pressão estática, justificando assim a maior pressão estática na seção 3 com relação à seção 2. Esse princípio de conservação da energia total (ou carga total) pode ser relacionado ao modelo que justifica o desenvolvimento das aeronaves, já que no perfil da asa o ar deve passar ao mesmo tempo por cima e por baixo desta. Como o caminho a ser percorrido pela parte de cima da asa é mais extenso do que o caminho de baixo, devido a sua geometria, o ar na parte superior estará numa velocidade maior que na parte inferior, gerando assim pressões diferentes nas duas partes da asa, criando uma força (sustentação) que impulsionará o avião para cima.

Esse fenômeno citado tão importante para o desenvolvimento científico de conversão de energia cinética em energia de pressão recebe o nome de

recuperação de pressão. O comportamento da pressão total e da pressão estática aplicado ao duto da Figura 1 pode ser analisado através dos esboços das linhas de pressão total e estática da Figura 2.

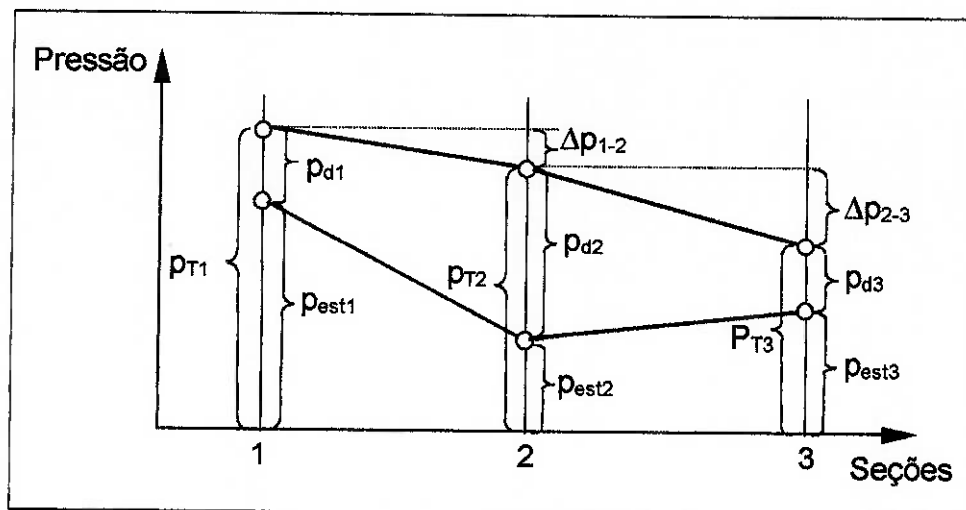


Figura 2: Linhas de pressão total e estática do duto da Figura 1

Observa-se que mesmo que  $p_{EST2} < p_{EST3}$  o fluido se movimenta de 2 para 3 pois

$$p_{T2} > p_{T3}.$$

É importante ressaltar que o princípio do movimento no sentido decrescente das pressões totais só é válido para trechos de sistemas que não apresentam máquinas que adicionem energia ao escoamento.

#### 5.4. Analogia com a Lei de Kirchoff da eletricidade

As analogias mecânico-elétricas são constantes no ambiente das análises de sistemas mecânicos. Para o caso de escoamentos (situações fluido-dinâmicas)

a analogia mais adotada é com a eletricidade e consequentemente valem as leis de Kirchhoff.

Analogia :

Tabela 1 : Analogia com a Eletricidade

Sistemas fluido dinâmicos	Sistemas elétricos
$\Delta p$	$\Delta V$
$\dot{m}$	$I$

onde :

$\Delta p$  : variação de pressão entre dois pontos

$\Delta V$  : variação de potencial elétrico entre dois pontos

$\dot{m}$  : vazão mássica

$I$  : intensidade de corrente elétrica

**1ª Lei de Kirchhoff** (apoiada no princípio da continuidade)

Em um nó a soma das vazões mássicas de entrada é igual a soma das vazões mássicas de saída.

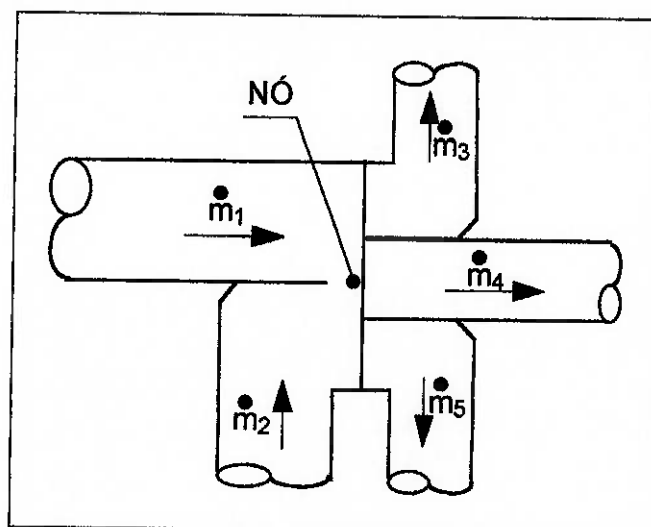


Figura 3: Vazões mássicas de entrada e saída de um nó da rede

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (11)$$

### 2ª Lei de Kirchoff

As perdas de pressão se igualam nos trechos em paralelo.

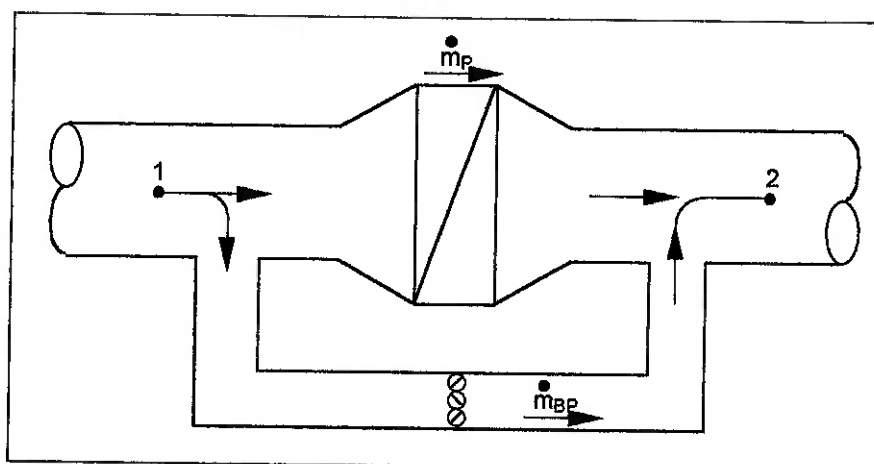


Figura 4 : Trechos da rede dispostos em paralelo



O  $\Delta p$  entre os pontos 1 e 2 da Figura 4 é o mesmo tanto através do trecho principal quanto através do circuito de by-pass.

### **5.5 A definição de componente de um sistema de distribuição de ar**

Chamaremos de componente todos os acessórios que podem ser utilizados em um sistema de distribuição de ar, como por exemplo: registros, junções, “Tês”, placas perfuradas e outros.

### **5.6. O conceito de resistência e abertura fluido-dinâmicas**

Considerando um trecho da rede de distribuição de ar representado na Figura 5, é comum classificar erroneamente o trecho (1) como sendo o de maior perda. Como o ponto P é comum a ambos os trechos e ambos insuflam no mesmo ambiente têm-se que eles estão em paralelo e pela 2ª Lei de Kirchhoff, portanto, têm a mesma perda de pressão dada por  $p_{TP} - p_{TAMB}$ . Já as vazões mássicas serão diferentes, pois os dois ramos apresentam resistências fluido-dinâmicas diferentes.

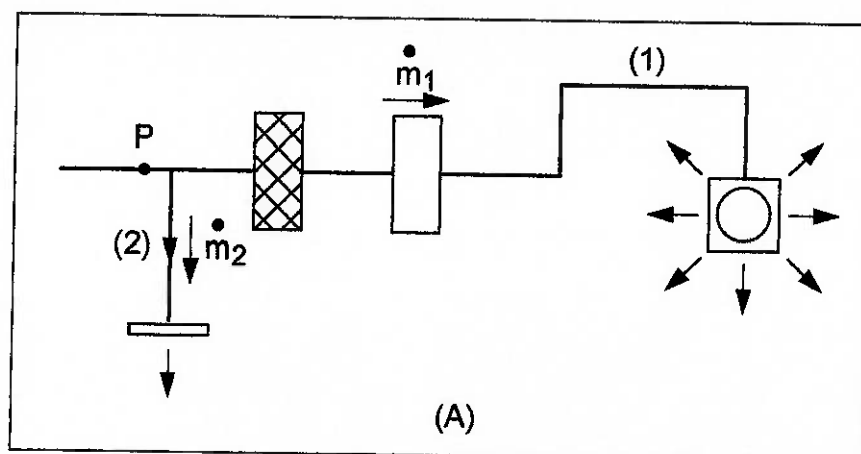


Figura 5 : Trecho da rede de distribuição de ar

O conceito de resistência fluido-dinâmica é análogo ao de resistência elétrica e é inerente às características geométricas do componente. Assim as vazões mássicas resultam das diferenças de pressão e das resistências fluido-dinâmicas, ou seja:

$$\dot{m} = f(\Delta p, R)$$

A relação entre a vazão mássica e a perda de pressão, em termos fluido-dinâmicos, para componentes de uma rede de distribuição de ar é dada por:

$$\Delta p = R * \dot{m}^2 + R_l * \dot{m} \quad (\text{forma geral}) \quad (12)$$

a) se o regime for totalmente turbulento :

$$\Delta p = R * \dot{m}^2 \quad (R_l = 0) \quad - \text{dependência quadrática}$$

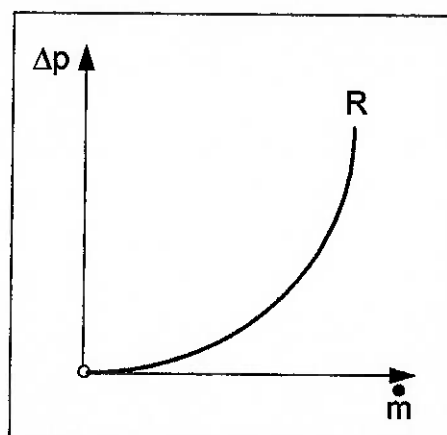


Figura 6: Dependência quadrática

b) se o regime for totalmente laminar :

$$\Delta p = R_1 * \dot{m} \quad - \text{dependência linear}$$

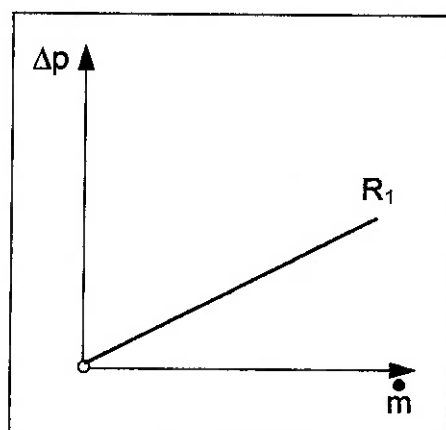


Figura 7: Dependência linear

Normalmente despreza-se a resistência referente ao regime laminar quando há predominância do regime turbulento no caso dos dois regimes coexistirem.

O conceito de abertura fluido-dinâmica de um componente corresponde à vazão mássica que passa através dele quando submetido a uma diferença unitária de pressão.

a) se o regime for totalmente turbulento

$$\Delta p = R * \dot{m}^2$$

pelo conceito de abertura :  $A = \dot{m}$  para  $\Delta p = 1$

com isso :

$$A = \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (13)$$

b) se o regime for totalmente laminar

$$\Delta p = R_1 * \dot{m}$$

e analogamente:

$$A_1 = \frac{1}{R_1} \quad (14)$$

### **5.7. Relações entre resistências e aberturas fluido-dinâmicas com os coeficientes de perda de um componente do sistema**

a) se o regime for totalmente turbulento

$$\Delta p = \frac{CV^2\rho}{2} = R * \dot{m}^2 \quad (15)$$

onde  $C$  é o coeficiente de perda de carga

$$\text{mas } V = \frac{Q}{S} = \frac{\dot{m}}{S\rho}$$

com isso :

$$R = \frac{C}{2S^2\rho} \quad (16)$$

$$\text{e } A = \frac{1}{\sqrt{R}} = \frac{S\sqrt{2\rho}}{\sqrt{C}} \quad (17)$$

ou seja, a resistência do componente aumenta com a redução da massa específica resultado de um possível aumento de temperatura ou da umidade específica.

b) se o regime for totalmente laminar

$$\Delta p = CV\rho = R_1 * \dot{m} \quad (18)$$

$$\text{e } V = \frac{Q}{S} = \frac{\dot{m}}{S\rho}$$

com isso :

$$R_1 = \frac{C}{S} \quad (19)$$

$$\text{e } A_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{S}{C} \quad (20)$$

### 5.8. Resistências e aberturas equivalentes para sistemas onde o escoamento em cada componente é turbulento

Na grande maioria das vezes as redes de distribuição apresentam o regime turbulento como predominante, por isso esse será o regime mais retratado neste estudo.

a) trecho de componentes em série (percorridos pela mesma vazão  $\dot{m}$ )

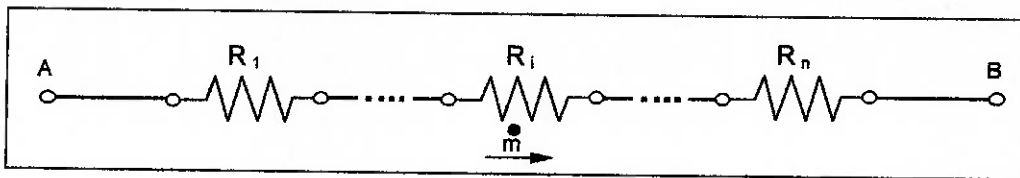


Figura 8 : Analogia elétrica para componentes em série

$$\Delta p_{AB} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_i + \dots + \Delta p_n$$

$$\Delta p_i = R_i * \dot{m}^2 \quad \text{e} \quad \Delta p_{AB} = R_{EQ} * \dot{m}^2$$

$$\Delta p_{AB} = \sum \Delta p_i = \dot{m}^2 \sum R_i$$

portanto :

$$R_{EQ} = \sum R_i = \sum \frac{C_i}{2S_i^2 \rho_i} \quad (21)$$

**Conclusão :** Nos trechos em série a resistência equivalente é a soma das resistências dos componentes.

Para a abertura tem-se :

$$A_{EQ} = \frac{1}{\sqrt{R_{EQ}}} \quad (22)$$

b) trecho de componentes em paralelo

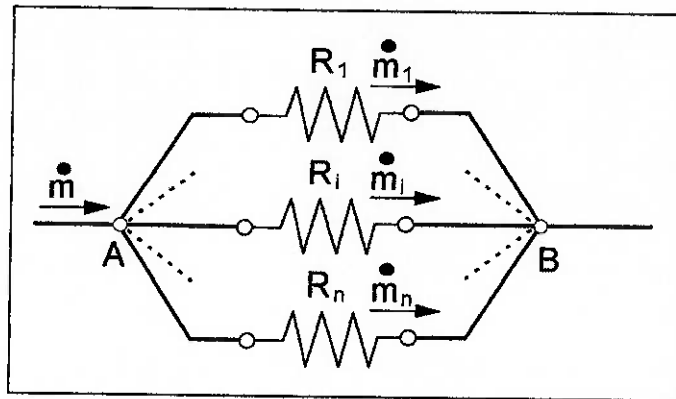


Figura 9 : Analogia elétrica para componentes em paralelo

$$\Delta p_{AB} = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_i = \dots = \Delta p_n$$

$$\Delta p_i = R_i * \dot{m}^2 = \frac{1}{A_i^2} * \dot{m}^2 \quad \text{logo} \quad \dot{m}_i = A_i \sqrt{\Delta p_i} = A_i \sqrt{\Delta p}$$

$$\Delta p_{AB} = R_{EQ} * \dot{m}^2 \quad \text{logo} \quad \dot{m} = \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{R_{EQ}}} = A_{EQ} \sqrt{\Delta p} \quad (23)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_i + \dots + \dot{m}_n$$

$$= A_1 \sqrt{\Delta p} + A_2 \sqrt{\Delta p} + \dots + A_i \sqrt{\Delta p} + \dots + A_n \sqrt{\Delta p} = \sqrt{\Delta p} * \sum A_i \quad (24)$$

igualando (23) e (24) têm-se :

$$A_{EQ} = \sum A_i \quad (25)$$

Conclusão : Nos trechos em paralelo a abertura equivalente é a soma das aberturas dos componentes.

Para a resistência :

$$R_{EQ} = \frac{1}{A_{EQ}^2} = \frac{1}{\left(\sum \frac{1}{\sqrt{R_i}}\right)^2} \quad (26)$$

Além disso,

$$\dot{m}_i = A_i \sqrt{\Delta p} \quad \text{e} \quad \dot{m} = A_{EQ} \sqrt{\Delta p}$$

ou seja,

$$\dot{m}_i = \dot{m} \frac{A_i}{A_{EQ}} = \dot{m} \frac{A_i}{\sum A_i} \quad (27)$$

logo a vazão mássica na associação em paralelo se distribui na proporção das aberturas fluido-dinâmicas dos componentes do circuito.



### 5.9. Esquema elétrico equivalente de um sistema de condicionamento de ar

Na Figura 10 está representado um esquema de um sistema de condicionamento de ar e sua respectiva analogia elétrica. A Figura 11 apresenta o circuito elétrico condensado que seria o equivalente ao da Figura 10.

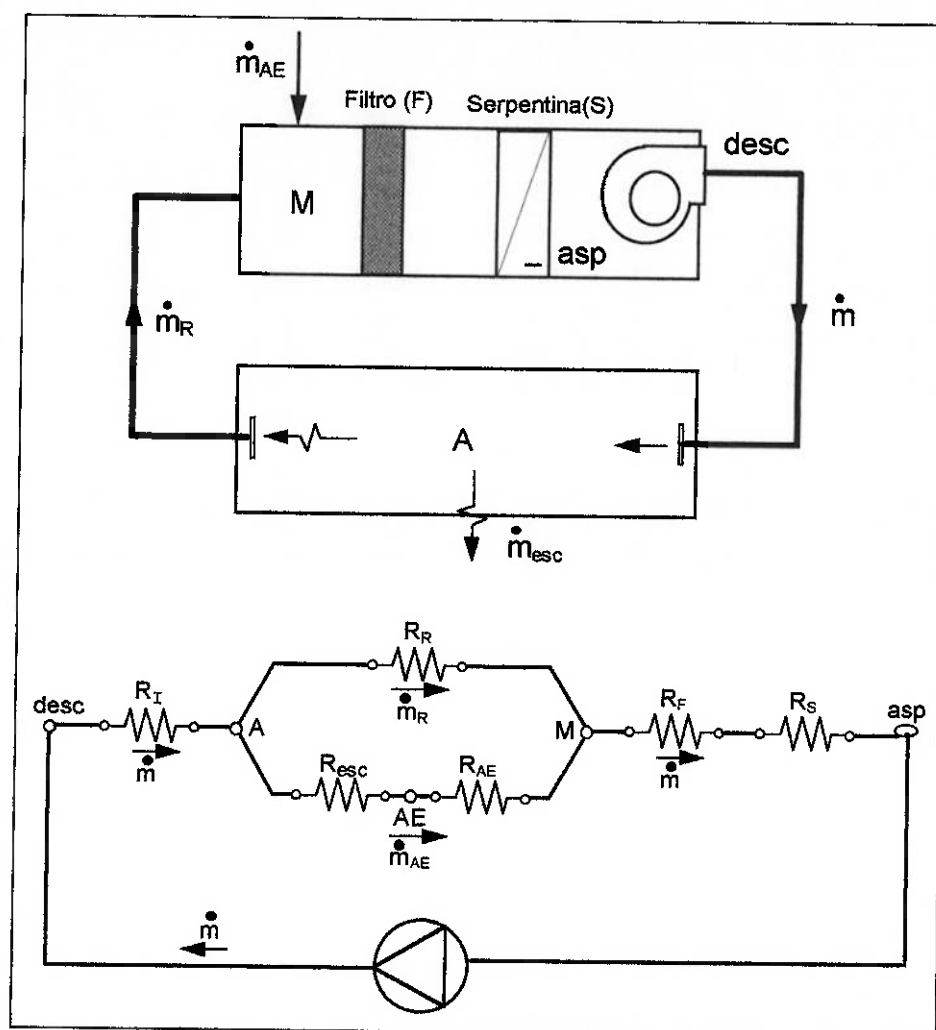


Figura 10 : Esquema elétrico de um sistema de condicionamento de ar

onde :  $A$  : ambiente

$R_F$  : resistência do filtro

$R_S$  : resistência da serpentina

$R_R$  : resistência de retorno do ar

$R_{AE}$  : resistência de entrada do ar externo

$R_{esc}$  : resistência de escape do ar

$R_I$  : resistência de entrada do ar no ambiente

$\dot{m}$  : vazão mássica que sai do ventilador

$\dot{m}_R$  : vazão mássica do ar que retorna

$\dot{m}_{esc}$  : vazão mássica do ar que escapa do ambiente

$\dot{m}_{AE}$  : vazão mássica do ar externo

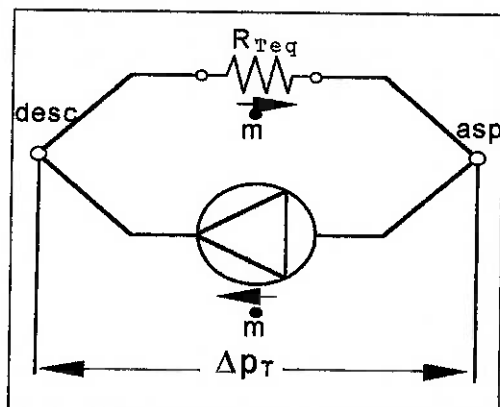


Figura 11 : Esquema equivalente condensado do sistema de distribuição de ar

onde :  $R_{Teq}$  : resistência total equivalente ao circuito da Figura 10

## 6. Cálculo das perdas de pressão

Nas redes de distribuição e circulação de ar sempre ocorrem perdas por atrito viscoso ou obstáculos impostos ao fluido quando existe movimentação deste. Essas perdas podem ser avaliadas através da variação da carga total do sistema ou através da variação da carga total entre dois pontos ou seções distintas do mesmo.

De forma geral as perdas em um trecho compreendido entre duas seções e percorrido por uma vazão mássica ( $\dot{m}$ ) podem ser classificadas em duas grandes categorias :

- Distribuída
- Localizada ou Singular

Em termos de pressão a equação geral é dada por :

- em termos da pressão dinâmica( $p_D$ ):

$$\Delta p = C * p_D \quad \text{ou} \quad \Delta p = C * \frac{V^2}{2} * \rho \quad (28)$$

onde  $C$  é o coeficiente de perda (ou de resistência)

- em termos de velocidade de massa ( $G$ ) :

$$\text{onde} \quad G = \frac{\dot{m}}{S} \quad (29)$$

mas como  $\dot{m} = \rho * V * S$

$$\text{portanto } G = \rho * V \quad (30)$$

$$\text{e } \Delta p = C \frac{\dot{m}^2}{2S^2\rho} \quad (31)$$

OBS : Em condições onde pode ocorrer variação da densidade, como em estações de tratamento de ar, torna-se conveniente realizar os cálculos com vazão mássica e velocidade de massa. Para os casos onde utiliza-se a massa específica o valor recomendado é  $\rho_{PAD} = 1,204 \frac{kg}{m^3}$ .

### 6.1. Perda Distribuída

A perda de pressão ou carga distribuída é aquela que ocorre em trechos de dutos retilíneos com seção transversal constante. Ela contabiliza os efeitos do atrito viscoso presente no escoamento do fluido durante aquele trecho e pode ser calculada pela expressão geral apresentada no item anterior, onde o coeficiente  $C$  pode ser substituído por :

$$C = f * \frac{L}{D_H} \quad (32)$$

e portanto

$$\Delta p = f * \frac{L}{D_H} * \rho * \frac{V^2}{2} \quad (\text{eq. de Darcy-Weisbach}) \quad (33)$$

ou em termos de velocidade de massa :

$$\Delta p = f * \frac{L}{D_H} * \frac{G^2}{2\rho} \quad (34)$$

onde :  $f$  : coeficiente de atrito ou perda de carga distribuída

$L$  : comprimento do trecho considerado

$$D_H : \text{diâmetro hidráulico ; } D_H = \frac{4S}{P_M} \quad (35)$$

com  $S$  : área

e  $P_M$  : perímetro molhado

Tabela 2: Exemplos de diâmetro hidráulico

Seção	Regime	$D_H$
Circular de diâmetro $D$	forçado	$D$
Retangular ( $A \times B$ )	forçado	$\frac{2AB}{A+B}$

**Considerações para se utilizar o equacionamento acima****a) hipóteses adotadas**

- escoamento de fluido incompressível ( $\rho = \text{cte}$  e  $Mach \leq 0,3$ )
- propriedades físicas do fluido constantes ao longo do trecho considerado (escoamento isotérmico).
- Trechos de dutos retos com seção constante, e consequentemente com mesma velocidade de massa.

**b) Determinação do coeficiente de atrito (f)**

O coeficiente de atrito  $f$  é um parâmetro adimensional, portanto independe do sistema de unidades utilizado, porém depende de dois outros adimensionais:

- rugosidade relativa :  $\frac{\varepsilon}{D_H}$  (36)

onde  $\varepsilon$  : é a rugosidade da superfície interna do duto (em m ou mm)  
e seu valor é obtido de tabelas de fabricantes em função do material e tempo de uso.

- Número de Reynolds :  $NRe = \frac{\rho V D_H}{\mu} = \frac{G D_H}{\mu}$  (37)

onde  $\mu$  : é a viscosidade dinâmica do fluido à temperatura do escoamento

$$\text{Outra forma: } \nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{logo} \quad NRe = \frac{V \cdot D_H}{\nu} \quad (38)$$

onde  $\nu$ : é a viscosidade cinemática do fluido.

Tanto a viscosidade cinemática quanto a dinâmica podem ser obtidas de tabelas de propriedades do fluido.

Geralmente é sugerido o valor  $\nu = 15,06 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$  para instalações de ar de conforto.

A determinação do valor de  $f$  pode ser feita através de gráficos, como o Diagrama de Moody, ou através de equações :

a) O Diagrama de Moody :

A partir dos parâmetros de entrada  $NRe$  e  $\frac{\varepsilon}{D_H}$  pode-se obter o valor de  $f$ .

b) As equações :

b1) para escoamento em regime laminar ( $NRe \leq 2400$ )

$$f = \frac{64}{NRe} \quad (\text{Eq. de Hagen-Poiseuille}) \quad (39)$$

b2) para escoamento em regime turbulento ( $NRe \geq 4000$  ou  $NRe \geq 2700$ )

Existem várias alternativas.

$$f = 0,11 * \left( \frac{\varepsilon}{D_H} + \frac{68}{NRe} \right)^{0,25} \quad (\text{Eq. de Altshul}) \quad (40)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{0,27\varepsilon}{D_H} + \frac{2,51}{NRe\sqrt{f}} \right) \quad (\text{Eq. de Colebrook}) \quad (41)$$

Uma equação que atende as duas condições de escoamento, laminar e turbulento, é a equação de Swamee :



$$f = \left\{ \left( \frac{64}{NRe} \right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,71D_H} + \frac{5,62}{NRe^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{NRe} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{\frac{1}{8}} \quad (42)$$

## 6.2. Perda Localizada ou Singular

A perda de pressão, ou carga, localizada ocorre sempre que algum dos três elementos está presente em um sistema onde há a movimentação de fluido.

- mudança de direção do escoamento (curvas, "Tês")
- mudança de área da seção transversal do duto (reduções, alargamentos)
- presença de elementos que interfiram no escoamento (registros, válvulas)

Sendo a perda de carga extraída do catálogo  $\Delta p_{CAT}$ , determinada experimentalmente pelo fabricante, devemos, para que esta possa ser utilizada como a perda localizada associada a uma determinada situação, referi-la à condição do ar nessa situação, já que esta está referida às condições padrão do ar e a velocidade média.

Com isso :

$$\Delta p = \Delta p_{CAT} \frac{\rho}{\rho_{PAD}} \quad (43)$$

Ou ainda utilizando o coeficiente de perda obtido de catálogos ou manuais :

$$\Delta p = C \frac{G^2}{2\rho} = \frac{C \dot{m}^2}{2S^2 \rho} \quad (44)$$

Nos casos onde o coeficiente  $C$  se refere a uma seção de área ( $S_c$ ) e há interesse em se determinar o mesmo em relação a outra seção de área ( $S_b$ ), como na figura 12, utiliza-se o seguinte equacionamento (baseado na Lei dos Nós) :

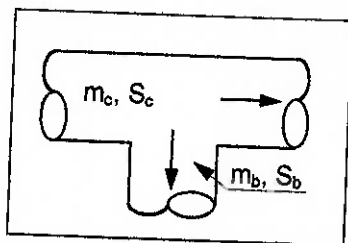


Figura 12 : Referências do coeficiente  $C$

$$\Delta p_{1-2} = \frac{C_1 \dot{m}_C^2}{2S_C^2 \rho} = \frac{C_2 \dot{m}_B^2}{2S_B^2 \rho} \quad (45)$$

$$C_2 = C_1 * \left( \frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_B} \right)^2 * \left( \frac{S_B}{S_C} \right)^2 \quad (46)$$

### 6.3. Determinação da Perda Total

O procedimento para se determinar a perda total de pressão de um sistema é o seguinte: a partir dos difusores, percorrer a rede de insuflação até a seção de

descarga do ventilador, definindo o nível máximo de pressão total em cada nó para a distribuição das vazões simuladas, passando ao nó seguinte através da aplicação da equação da energia :

$$p_{T_{N+1}} = p_{T_N} + \Delta p_{N,N+1} \quad (47)$$

Desta forma fica determinada a pressão total de insuflação (ou  $p_{T_{desc}}$  = pressão total de descarga)

Analogamente pode-se percorrer a rede no sentido contrário, definindo o nível mínimo de pressão e com isso determinar a pressão total de aspiração do ventilador ( $p_{T_{asp}}$ ).

Por fim, a perda de pressão total vale :

$$\Delta p_T = p_{T_{desc}} - p_{T_{asp}} \quad (48)$$

## 7. Dimensionamento e Balanceamento de Dutos

### 7.1. O Dimensionamento

O dimensionamento é considerado como a primeira fase de um projeto de redes de distribuição e consiste em encontrar suas características geométricas e construtivas de afim de propiciar uma vazão necessária em cada uma das saídas da rede.

Essa primeira etapa é tida como muito importante pois apresenta ao instalador da rede as características encontradas para que sejam satisfeitas as condições de conforto dadas como pré-requisitos de projeto.

Os métodos usualmente adotados para o dimensionamento são :

- Perda Unitária Constante
- Recuperação Estática de Pressão (*Static Regain*)
- Velocidade Constante
- Tronco de Seção Constante (*Duct Plenum*)
- Redução de Velocidade
- Método T

Os principais critérios de dimensionamento em redes de distribuição são :

- Economia de chapas
- Custo operacional (principalmente do ventilador)
- Balanceamento

Alguns outros critérios como o nível de ruído, nível de partículas no ar e exequibilidade não foram considerados inicialmente no processo de dimensionamento.

Como o presente trabalho não se preocupa com o método utilizado para o dimensionamento da rede, estes não serão descritos mais a fundo, mas sim classificados com relação ao critério balanceamento.

*Classificação decrescente dos métodos com relação ao critério balanceamento :*

- Método T
- Recuperação Elástica
- Perda Unitária Constante
- Redução de Velocidade
- Velocidade Constante
- Tronco de Seção Constante

Porém, tendo em vista que nenhum dos métodos se aplica definitivamente ao critério de balanceamento e que o método T é o que apresenta uma maior preocupação com relação à esse critério, foi escolhido esse método para a utilização neste trabalho e para a confecção do programa.

Após realizado o dimensionamento do sistema este não necessariamente estará balanceado, salvo algumas condições especiais de simetrias geométricas e simetrias em termos das distribuições das vazões. Portanto, na maioria dos casos,

necessitamos proceder a segunda fase do dimensionamento que é justamente o balanceamento da rede de distribuição.

### **7.2. O Balanceamento**

O balanceamento consiste num procedimento que visa estabelecer as vazões de projeto para a rede de distribuição de ar, vazões estas que podem variar dentro de uma faixa de  $\pm 5\%$  de acordo com a ASHRAE. Para ser realizado pode-se utilizar vários métodos, desde de os métodos tradicionais de campo, com auxílio de medidores de vazão, passando por planilhas de cálculo e até por programas computacionais que simulem a rede desejada. Esta última opção é a explorada neste trabalho através da confecção de um desses programas que simule uma rede e que apresente como resultados as modificações a serem realizadas nessa rede.

À partir dos comentários realizados no item anterior utilizaremos o método T como método de balanceamento neste trabalho, e este será implementado no programa a ser desenvolvido. Em parceria com esse método será utilizada a analogia elétrica apresentada em capítulos anteriores. Além da escolha do método necessitamos escolher entre dois procedimentos principais dentro desse método : o utilizado pelo Prof. Robert Tsal (1993), baseado em condensar o sistema em uma só resistência e estudar a rede em termos das vazões em cada trecho e o utilizado pelo Prof. Raul Bolliger Jr, que consiste em manter o sistema expandido e avaliar o balanceamento à partir das perdas de pressão ao longo dos trechos.

O procedimento escolhido foi o do Prof. Raul Bolliger Jr por apresentar melhor compreensão do sistema quando avaliado em termos das perdas de pressão, impondo-se as vazões de projeto.

### **7.3. Procedimentos para balanceamento por computador**

#### **Conceito de nó, trecho e caminho**

Trecho : componente do sistema no qual as seções transversais têm em comum:

- vazão mássica de ar
- massa específica do ar
- forma
- dimensões

Nó : pontos extremos de um trecho. De acordo com a 1ª Lei de Kirchoff, as vazões mássicas de entrada em um nó são iguais às de saída.

Caminho : Sequência de trechos em série a partir de um nó para o ambiente, nos sistemas de insuflação e a partir do ambiente para o nó em sistemas de exaustão. De acordo com a 2ª Lei de Kirchoff, a partir de um nó as perdas de pressão associadas a todos os caminhos são iguais.

### O que são os caminhos ?

Um caminho é composto de todos os trechos pelos quais deve passar o ar para ir de um ponto da rede até o ambiente. Os caminhos devem ser escolhidos dois a dois e comparados afim de se balancear aquele que necessita. O procedimento se baseia na explicação dada sobre a determinação da perda de pressão total do sistema em capítulos anteriores. As diferenças de pressão entre o referido nível definitivo de pressão total no nó e os que seriam necessários para distribuição das vazões de projeto para cada saída (insuflação) ou entrada (retorno) resultam nas respectivas diferenças de pressão de balanceamento. Essas diferenças devem ser absorvidas através do redimensionamento dos ramais, posicionamento de reguladores ou ambas as coisas. Na figura 13, a pressão no nó P, em relação à pressão ambiente (zero por referência), corresponde à pressão mais alta calculada na simulação das vazões de projeto, por aplicação da 2ª Lei de Kirchhoff, comparando os caminhos que o ar pode percorrer entre o nó P e os ambientes 0, ou seja :

(P-1-0) ou (P-2-0).

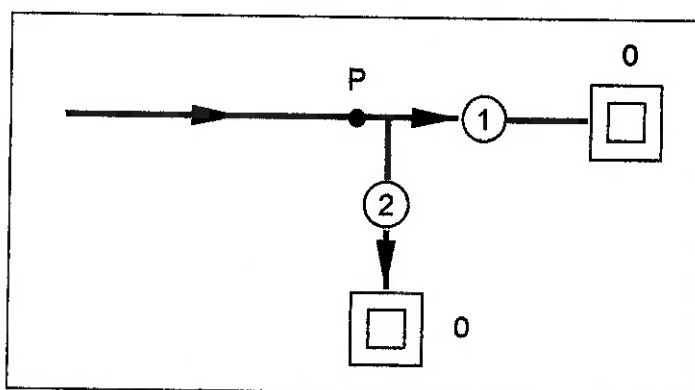


Figura 13 : Exemplo da esquematização de trechos, nós e caminhos



Supondo que  $\Delta p_{P-1-0}$  seja maior que  $\Delta p_{P-2-0}$ ,  $\Delta p_{BAL}$  será igual a  $(\Delta p_{P-1-0}) - (\Delta p_{P-2-0})$  que deverá ser absorvida por uma das seguintes alternativas :

- introdução de regulador no trecho 2
- perda no difusor correspondente
- redução na seção do trecho 2

Esse será basicamente o procedimento adotado, onde adicionando ou removendo resistências dos ramos da rede efetua-se o balanceamento. Vale lembrar que esse método vale tanto para o projeto quanto para uma instalação já existente, porém o preço a ser pago é muito menor quando o problema da falta de balanceamento é detectado ainda na fase inicial e pode ser contornado com mais facilidade.

### Numeração e Classificação dos trechos

Os trechos e nós da rede devem receber numeração especial seguindo as seguintes regras, de acordo com a figura 14.

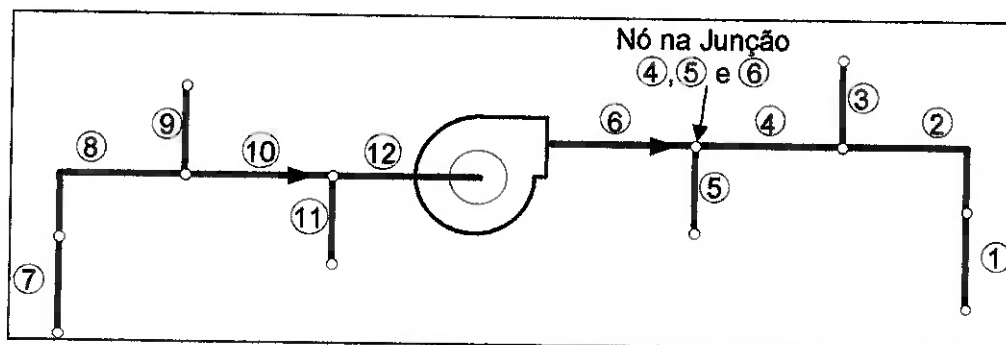


Figura 14 : Numeração e classificação dos trechos

As regras são :

- Os trechos recebem numeração ao invés dos nós
- A numeração e classificação dos trechos são ambas feitas no sentido do ambiente para o ventilador, independentemente do sentido de movimentação do ar.
- Os trechos de maior fluxo ("pais") correspondem à números maiores que os afluentes ou efluentes ("filhos") que tem menor fluxo.
- As junções são consideradas compostas por no máximo três trechos (um "pai" e dois "filhos")
- Nos nós, o trecho "filho" que tem a mesma direção do "pai" é chamado "reto" (Straight) e o outro é chamado "ramal" (Branch), como na figura 15.
- Os trechos "filhos" devem anteceder os trechos "pais" no preenchimento dos dados do programa.

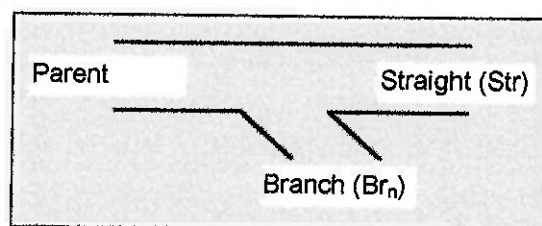


Figura 15 : Trechos "reto" e "ramal"

### ***Consideração sobre os acessórios***

Nas junções os acessórios pertencem aos trechos “filhos” e os coeficientes de perda são referidos aos mesmos (contrário à ASHRAE). Caso o coeficiente esteja referido ao trecho principal (“main”) deve-se efetuar a conversão com auxílio da equação (46) do capítulo 6.

A partir de todos os conceitos e procedimentos descritos acima foi confeccionado o programa de balanceamento de redes de distribuição de ar descrito nos capítulos seguintes.

## 8. Programa de computador para redes de dutos

O objetivo do programa desenvolvido neste trabalho é estudar redes de distribuição de ar em fase de projeto ou já instaladas, de modo a obter resultados que indiquem as modificações a serem realizadas para que estas fiquem balanceadas. A linguagem utilizada foi o Visual Basic com auxílio de bancos de dados em Access pois esta combinação apresentou o menor tempo de aprendizado e uma interface com o usuário mais satisfatória.

Para sua utilização é necessário, como pré-requisito termos a rede projetada ou instalada e seus parâmetros tanto geométricos quanto construtivos. As entradas do programa são as dimensões de cada trecho da rede, seus parâmetros  $\rho, v, rugosidade(\epsilon), Q_{PAD}, comprimento(L)$  e *coeficientes de perda*(C), e os caminhos possíveis para o ar. Como saídas o programa fornece a condição de cada caminho (balanceado ou não) e as perdas de pressão em cada caminho e trecho da rede.

O programa está estruturado em três partes principais, como na Figura 16 :  
Caracterização da rede, Simular rede e Verificar resultados.

### 8.1. Caracterização da Rede

Nesta opção são registrados todos os parâmetros necessários ao cálculo das perdas de pressão distribuídas e singulares de cada trecho da rede. O cálculo dessas perdas é feito utilizando-se o equacionamento proposto no capítulo 6.

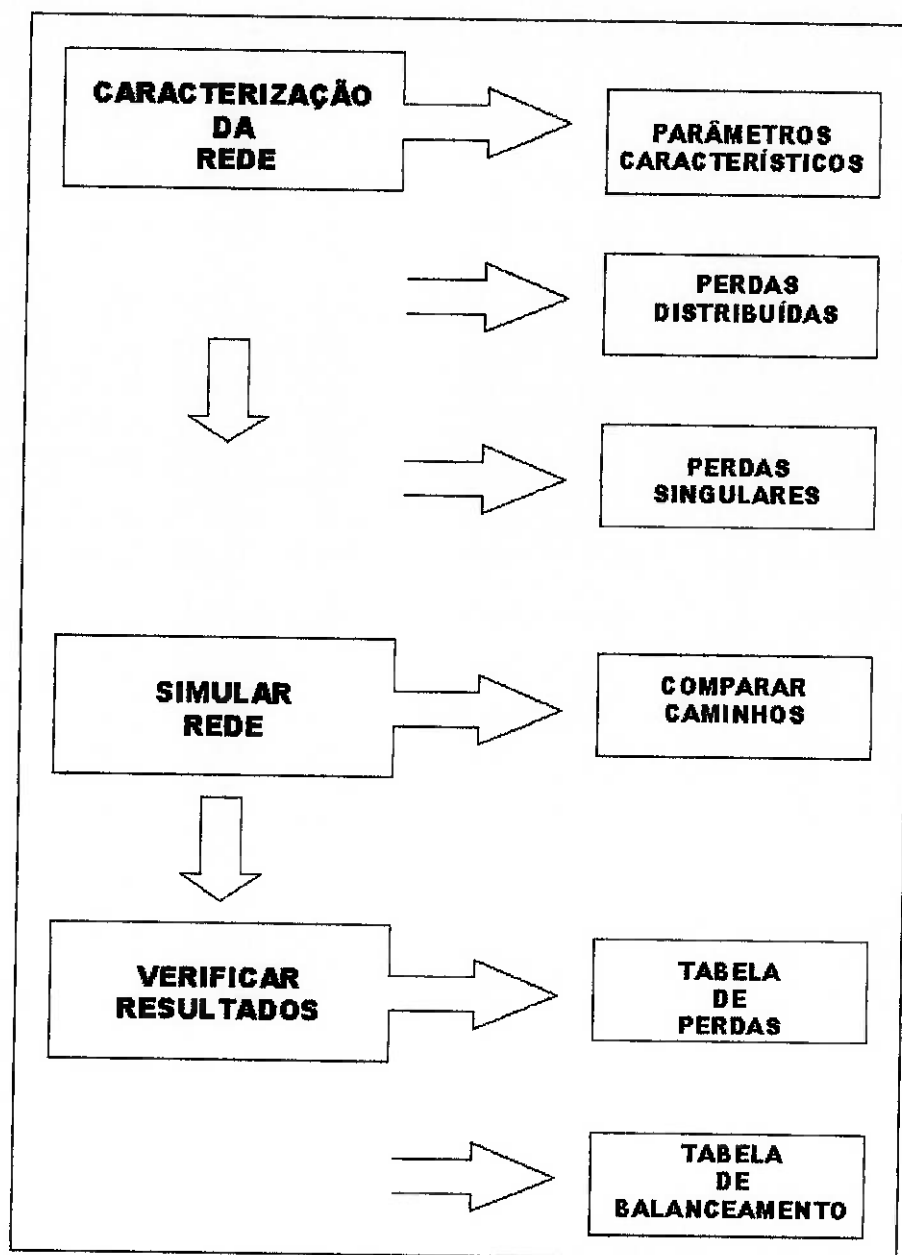


Figura 16 : Estruturação do programa

### 8.2. Simular rede

Na simulação da rede são registrados todos os caminhos possíveis para o ar e comparados dois a dois visando verificar qual deles necessita de intervenção

para operar na vazão de projeto adotada, de acordo com a analogia com as leis de Kirchoff que afirma que trechos que partem e terminam nos mesmos pontos devem ter mesmas perdas de pressão.

### **8.3 Verificação de Resultados**

Essa opção apresenta, no formato de tabelas, os resultados das perdas totais por trecho da rede e do balanceamento dos caminhos descritos. A Figura 18 mostra a tela de verificação com as opções de tabelas.

### **8.4. Premissas do programa**

Para a confecção do programa algumas hipóteses foram adotadas, a maioria delas coerente com o que ocorre em redes de distribuição de ar. As principais são:

- escoamento em regime forçado pelos dutos
- escoamento predominantemente turbulento
- massa específica do ar padrão :  $1,204 \frac{kg}{m^3}$
- propriedades físicas do fluido constantes ao longo do trecho  
(escoamento isotérmico)
- trechos de dutos com seções constantes
- dutos circulares ou quadrangulares

- coeficientes de perda ( $C$ ) referidos à vazão do próprio trecho ou do trecho seguinte ("downstream")

## **9. Manual do Usuário do programa de balanceamento**

### **9.1. A instalação do programa**

O programa deve ser instalado no computador à partir do arquivo setup.exe do CD de instalação. O computador precisa apresentar um mínimo de 20 mb de espaço em disco e um processador de 133MHz. Como configurações gerais deve apresentar claramente a distinção entre ponto e vírgula para que o programa funcione com coerência de cálculos. Dependendo dessa configuração o programa utilizará ponto ou vírgula para separar casas decimais, isso pode ser verificado facilmente inserindo-se os dados nas duas configurações e observando o resultado do cálculo da área com os dados da opção anterior. A inicialização do programa é feita clicando-se no arquivo balance.exe ou pelo caminho criado no menu Iniciar do Windows. A tela de abertura está representada na Figura 17. O programa está estruturado basicamente em três partes, mostradas no menu principal da Figura 18.

### **9.2. A entrada de dados – Caracterização da rede**

Na parte de caracterização da rede o usuário deve percorrer três opções : Parâmetros característicos, perdas distribuídas e perdas singulares como mostrado na Figura 19.



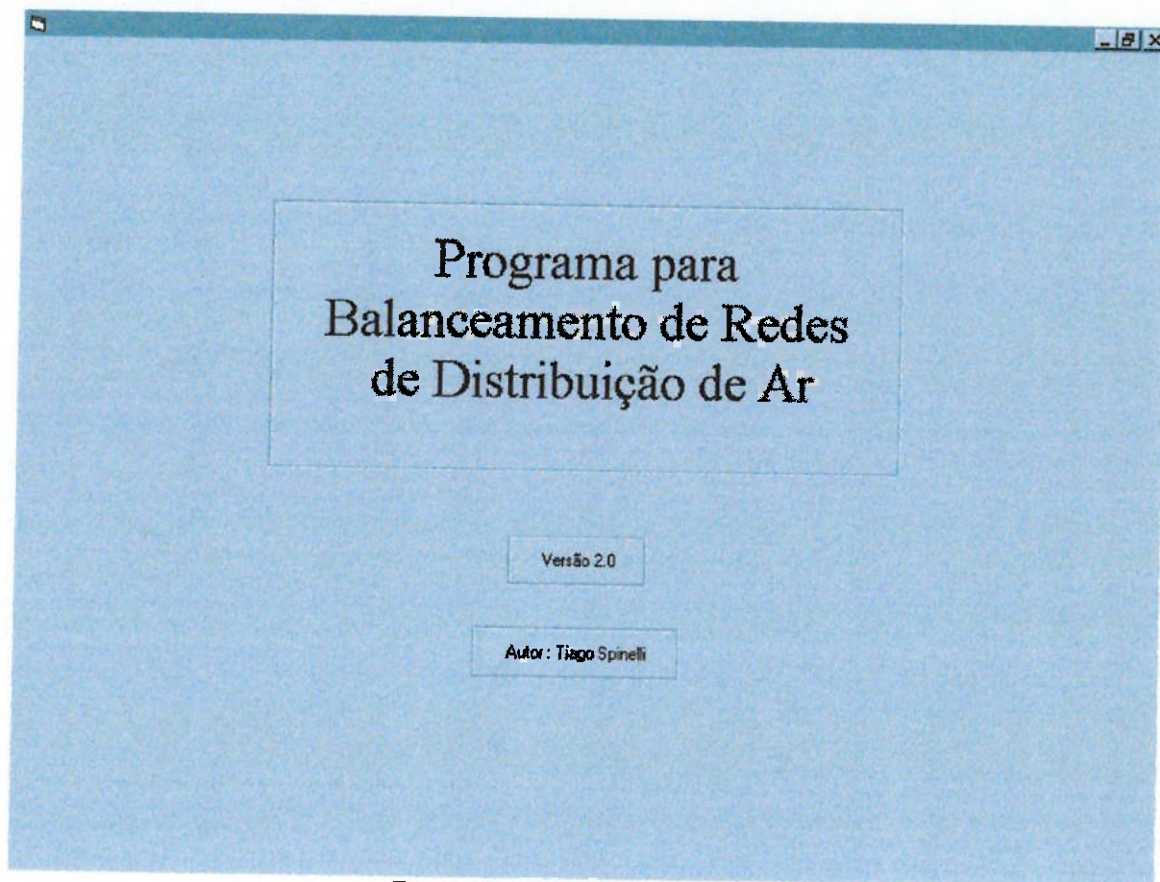


Figura 17 : Tela de abertura do programa

Na opção "Parâmetros Característicos" o usuário deve cadastrar os trechos da rede de acordo com sua disposição (trecho principal, ramal e reto de acordo com teoria apresentada em capítulos anteriores) e sua geometria. É importante perceber que todos os campos devem ser cadastrados, portanto se o duto não tiver ramal ou reto estes campos recebem 0, idem para o caso de dutos circulares que recebem 0 nos campos "A" e "B" e vice-versa. Após o preenchimento de todos os campos o usuário deve clicar no botão "Gravar" afim de validar esses dados. Para verificá-los poderá ser utilizado o botão "Mostrar Tabela" ou ainda o "Movimentar registros". Ao clicar no botão "Gravar" os dados somem e abrem os

campos para novos dados. O fato de sair desta tela pelo botão “Voltar” não anula os comandos efetuados, portanto enquanto o usuário não quiser excluir os registros permanecerão guardados. Para excluir dados basta posicionar o “Movimentar registros” no trecho escolhido e clicar no botão “Excluir”.

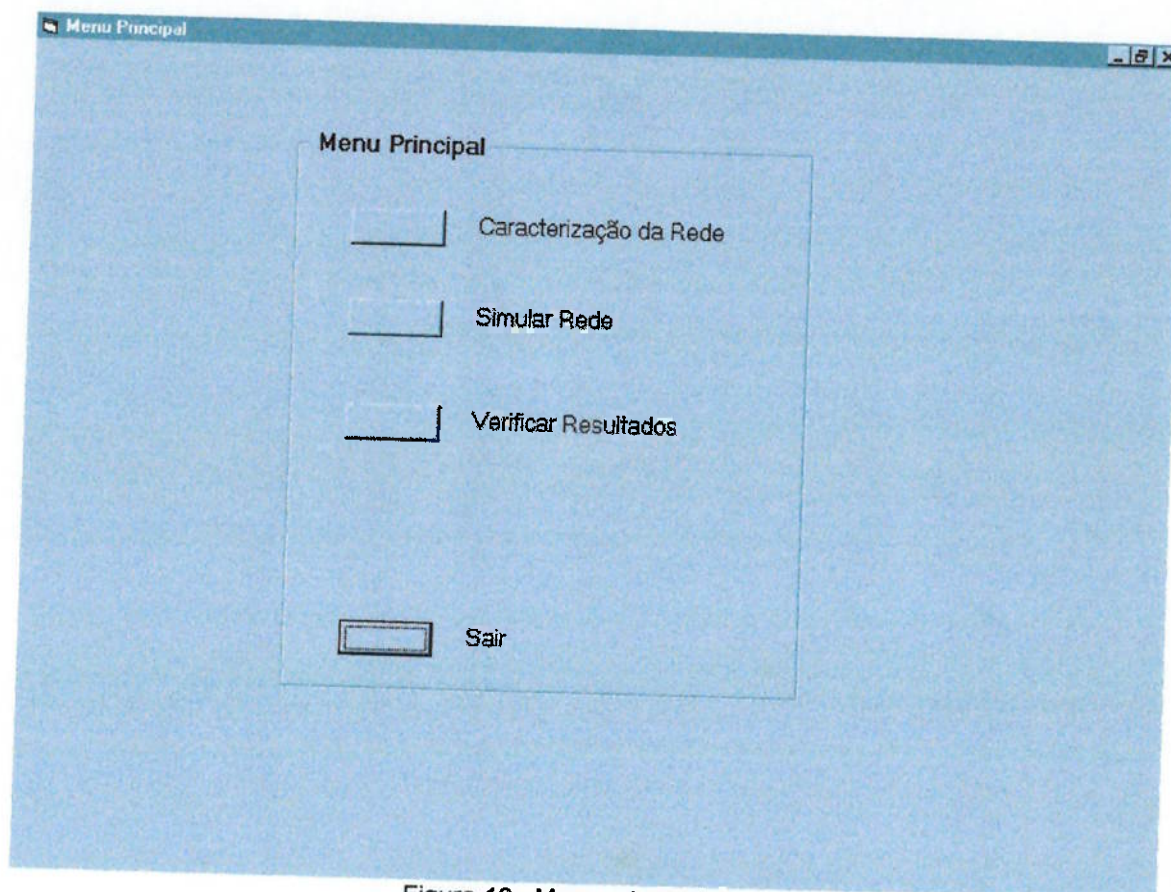
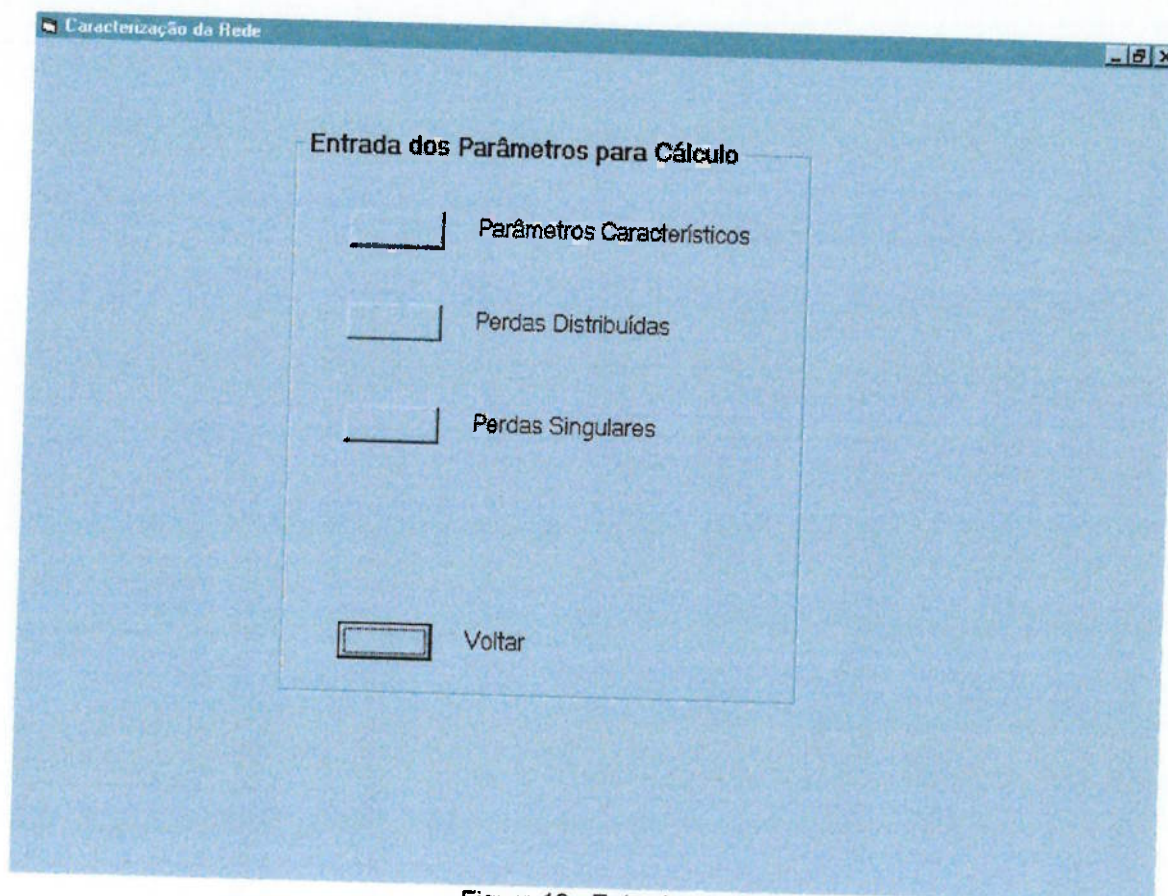


Figura 18 : Menu principal do programa

Na opção “Perdas Distribuídas” os comandos “Gravar”, “Excluir” e “Mostrar Tabela” funcionam do mesmo modo da opção anterior. Todos os campos devem ser preenchidos antes de gravar os dados. Os dados inseridos também permanecem guardados ao clicar no botão “Voltar”.





The screenshot shows a software window titled "Caracterização da Rede". Inside, there is a sub-window titled "Entrada dos Parâmetros para Cálculo". This sub-window contains three input fields, each with a label to its right: "Parâmetros Característicos", "Perdas Distribuídas", and "Perdas Singulares". Each input field is represented by a small rectangular box with a vertical line on its left side. At the bottom of the sub-window, there is a button labeled "Voltar".

Figura 19 : Entrada de dados

Como nas demais, na opção "Perdas Singulares" os botões têm a mesma função e todos os campos devem ser preenchidos, quer seja com valores ou com zeros. Os coeficientes C1, C2, C3, C4 e C5 correspondem a campos utilizados quando existem demais acessórios na rede além de junções, difusor e joelho. Os dados também ficam guardados até eu o usuário os exclua. É bom lembrar que os valores dos coeficientes de perda deverão estar referidos aos trechos onde se encontra o acessório ou ao trecho seguinte no caso de junções. Recomenda-se cadastrar os trechos em ordem crescente, respeitando a numeração descrita em capítulos anteriores para facilitar a interpretação dos resultados.

The screenshot shows a software window titled "Parâmetros Característicos". Inside, there is a section titled "Entrada de Parâmetros para Caracterização da Rede". This section is divided into two main areas: "Disposição dos trechos" and "Geometria".

**Disposição dos trechos:** This area contains three input fields labeled "Trecho:", "Ramal:", and "Reto:", each followed by a small rectangular box for data entry.

**Geometria:** This area is further divided into two sub-sections: "Retangular" and "Circular".

- Retangular:** Contains two input fields labeled "A (m):" and "B (m):", each followed by a small rectangular box.
- Circular:** Contains one input field labeled "D (m):" followed by a small rectangular box.

At the bottom of the "Entrada de Parâmetros para Caracterização da Rede" section, there is a "Movimentar Registros" button with left and right arrow icons.

On the right side of the window, there are three buttons: "Gravar Dados", "Excluir Dados", and "Mostrar Tabela", each preceded by a small rectangular box. At the bottom right, there is a "Voltar" button preceded by a small rectangular box.

Figura 20 : Entrada "Caracterização da rede"

### 9.3. Simular Rede

Nessa opção o usuário deve cadastrar todos os caminhos de acordo com a teoria apresentada anteriormente. Para isso cadastra-se um código para cada caminho de acordo com os exemplos 1 e 2.



Perdas Distribuídas

Entrada de Parâmetros para o Cálculo das Perdas Distribuídas

Trecho :

Parâmetros

$\rho$  local (kg/m³) :

$v$  local (m²/s) :

Rugosidade (m) :

Comprimento (m) :

Vazão de Projeto (m³/h) :

Figura 21 : Entrada "Perdas Distribuídas"

**Exemplo 1:** (de acordo com Figura 23)

Primeiro caminho possível : código A1

Descrição : Trechos : 1-0-0-0-0

Ponto : 0

Ponto de Partida: A

Segundo caminho possível : código A2

Descrição : Trechos : 2-0-0-0-0

Ponto : 0

Ponto de Partida: A

**Perdas Singulares**

Entrada de Parâmetros para o Cálculo das Perdas Singulares

Trecho:

**Junções**

Cdo Ramal:

Cdo Reto:

**Joelho**

Cdo joelho:

**Difusor**

Cdo Difusor:

**Demais Elementos**

C1:

C2:

C3:

C4:

C5:

Movimentar Registros

Figura 22 : Entrada "Perdas Singulares"

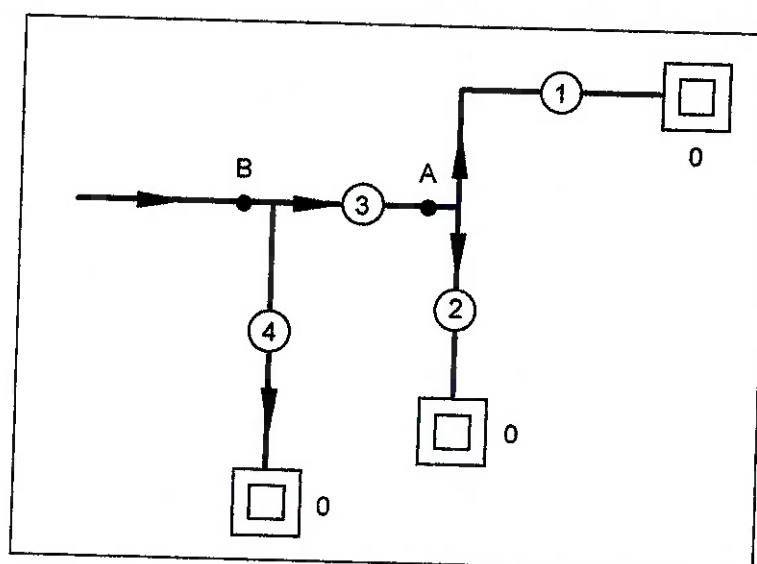


Figura 23 : Rede do Exemplo 1

Exemplo 2: (de acordo com Figura 23)

Primeiro caminho possível : código B1

Descrição : Trechos : 3-0-0-0-0

Ponto : A

Ponto de Partida: B

Segundo caminho possível : código B2

Descrição : Trechos : 4-0-0-0-0

Ponto : 0

Ponto de Partida: B

Após cadastrar todos os caminhos, sempre gravando após cada um deles, o usuário pode conferir na tabela clicando no botão "Mostrar Tabela".

Para efetuar o balanceamento deve-se clicar no botão "Comparar" e escolher os números dos caminhos que serão comparados, sempre fazendo essa comparação dois a dois e obedecendo códigos, ou seja, A1 x A2, B1 x B2 e assim por diante. Assim como nas demais telas todos os dados do cadastramento de caminhos devem ser preenchidos, aqueles que não serão utilizados recebem 0. Os dados também ficam guardados ao clicar no botão "Voltar".



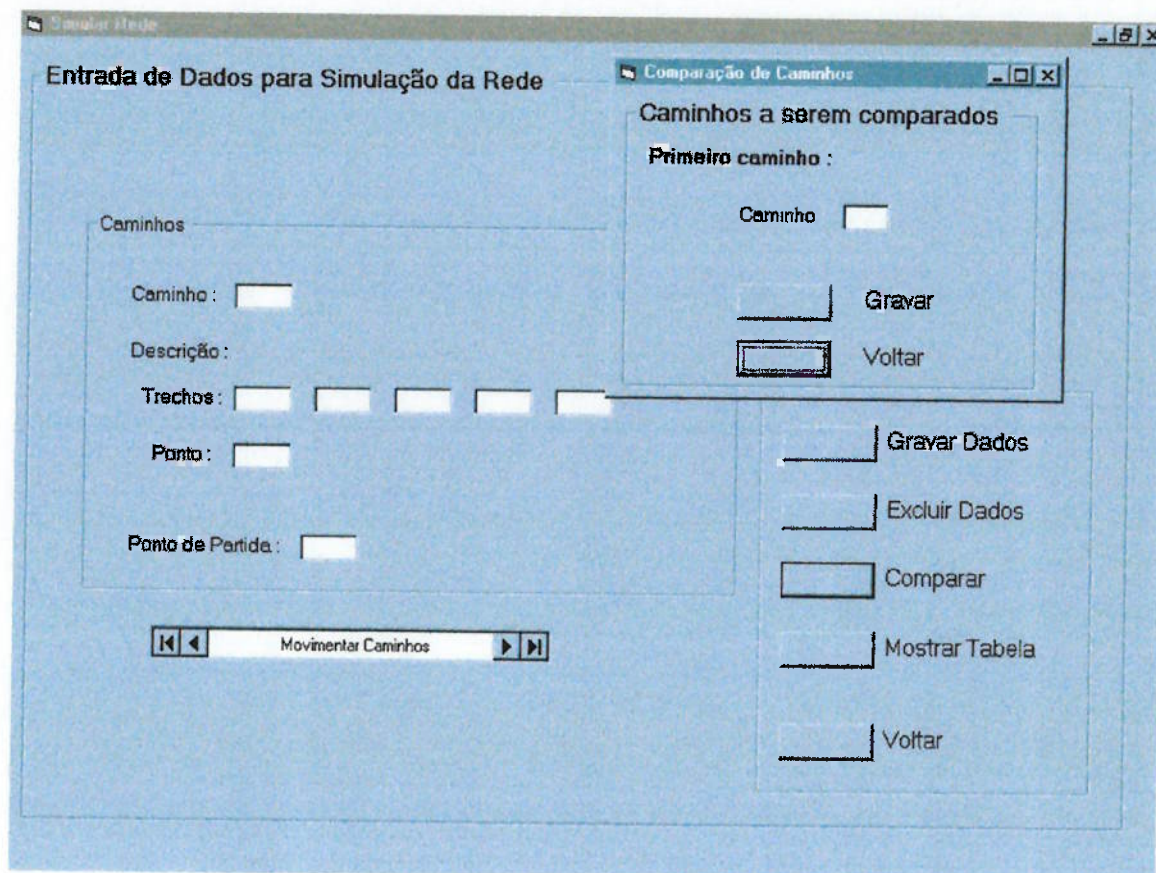


Figura 24 : Simulação da rede e comparação de caminhos

#### 9.4. Verificar Resultados

Nessa tela o usuário poderá verificar, em duas tabelas, os resultados de perdas totais e do balanceamento, verificando os trechos balanceados (recebem SIM ou NÃO) e os valores do coeficiente de perda a ser adicionado em cada trecho não balanceado. Por fim, todas as tabelas permanecem com seus dados mesmo após o fechamento do programa e podem ser abertas e impressas com o auxílio do aplicativo Microsoft Access.



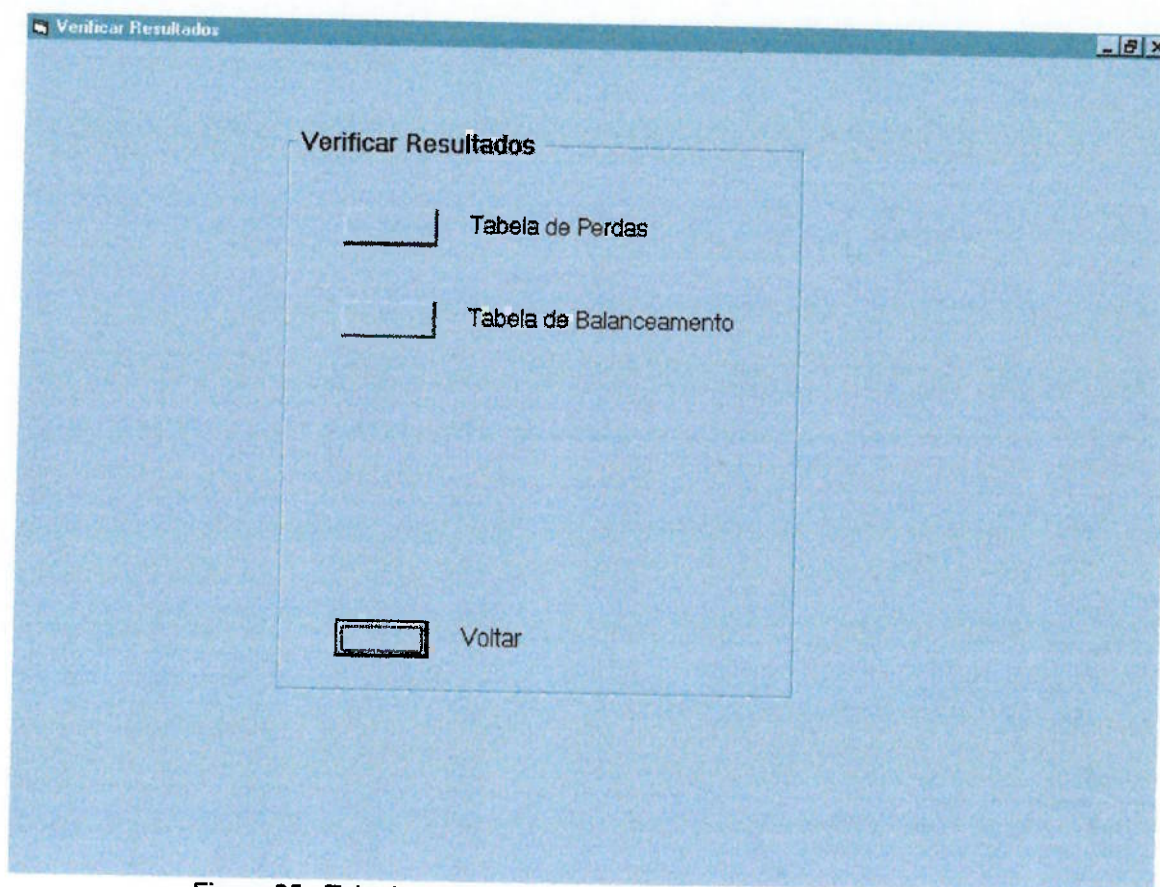
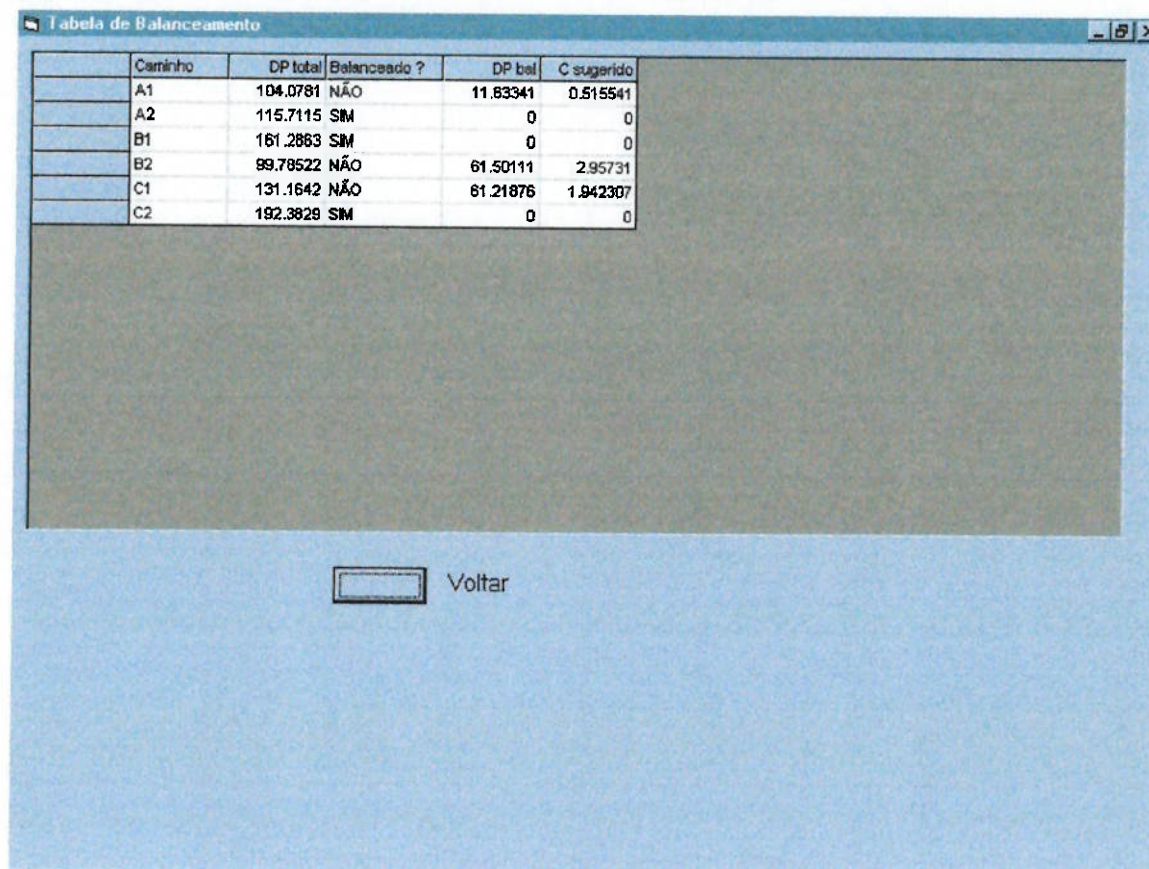


Figura 25 : Tela de opções para verificação dos resultados

Uma observação importante é que o programa sempre apresentará um trecho balanceado e outro não, pois compara numericamente a diferença de pressões entre eles, porém considera-se que os caminhos estarão ambos balanceados quando essa diferença for menor que 5% do valor da máxima pressão entre os dois trechos.



Caminho	DP total	Balanceado ?	DP bal	C sugerido
A1	104.0781	NÃO	11.83341	0.515541
A2	115.7115	SIM	0	0
B1	161.2863	SIM	0	0
B2	99.78522	NÃO	61.50111	2.95731
C1	131.1642	NÃO	61.21876	1.942307
C2	192.3829	SIM	0	0

Figura 26 : Tabela de verificação do balanceamento

## 10. Exemplo de aplicação do programa

Com o objetivo de avaliar o comportamento do programa desenvolvido foi utilizada a rede de distribuição de ar representada na Figura 27. A simulação foi realizada no programa de computador desenvolvido neste trabalho e no programa T-DUCT da empresa NETSAL & Associates (Prof. Robert Tsal), um programa tradicional para balanceamento de redes de condicionamento de ar. A seguir apresentam-se os resultados comparativos dessas duas situações.

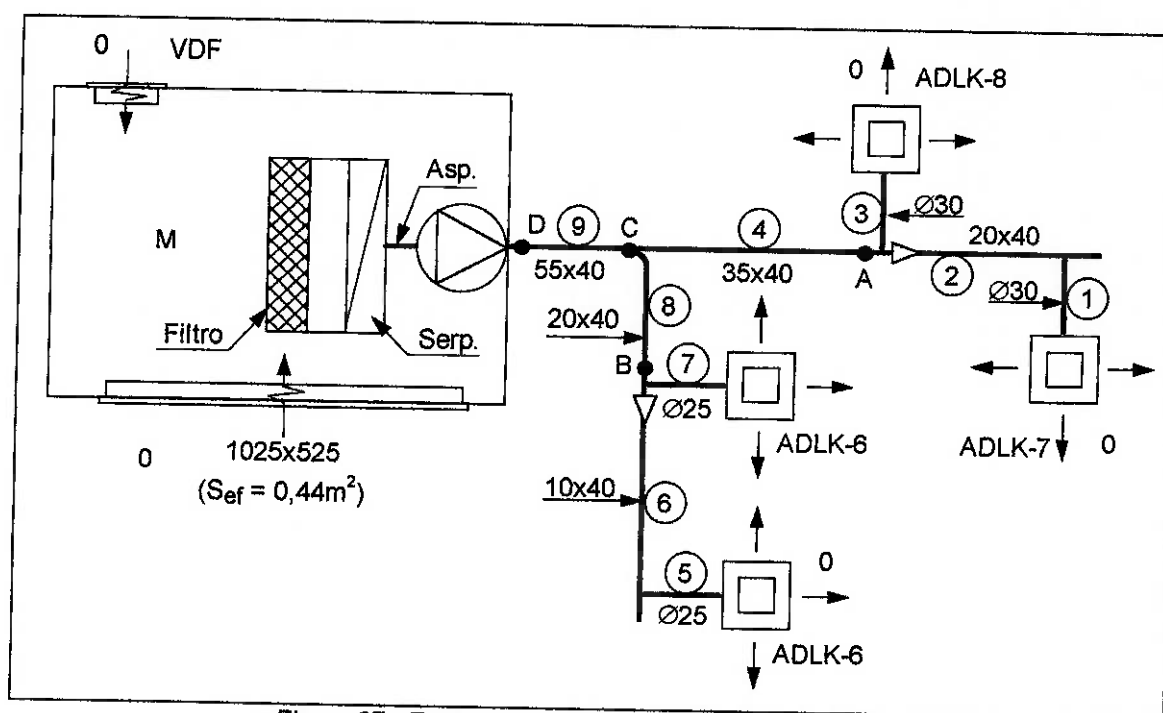


Figura 27 : Esquema da rede simulada para exemplo

Os parâmetros utilizados foram :

Trecho	Comprimento (m)
1	1
2	5
3	3
4	10
5	3
6	5
7	3
8	10
9	5

Difusores :

Descrição	C
ADLK-6	2.5490
ADLK-7	1.7890
ADLK-8	1.5453

Junções :

Trecho	C ramal	C reto
1	1.2102	0.7800
2	0.0000	0.5867
3	1.2102	0.0000
5	2.0029	1.5070
6	0.0000	0.2500
7	2.0029	0.0000

E ainda : (para todos os trechos)

$$\rho_{LOCAL} = 1.109 \frac{kg}{m^3}$$

$$\nu = 1.51 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\text{rugosidade } \varepsilon = 0.00015m$$

**Comparação dos resultados obtidos**

Para as perdas de pressão totais em cada trecho :

Trecho	Programa Desenvolvido	Programa T-Duct	% diferença
1	86.7639	87.36	0.68
2	17.2683	17.27	0.01
3	115.6393	116.33	0.59
4	15.45265	15.45	0.02
5	131.1855	131.96	0.59
6	30.16111	30.16	0.00
7	99.84552	100.45	0.60
8	31.09666	31.10	0.01
9	5.901092	5.90	0.02

Na figura 28 têm-se a saída das perdas de pressão totais simuladas no programa desenvolvido para cada trecho e na Figura 29 os resultados do balanceamento para os caminhos considerados.



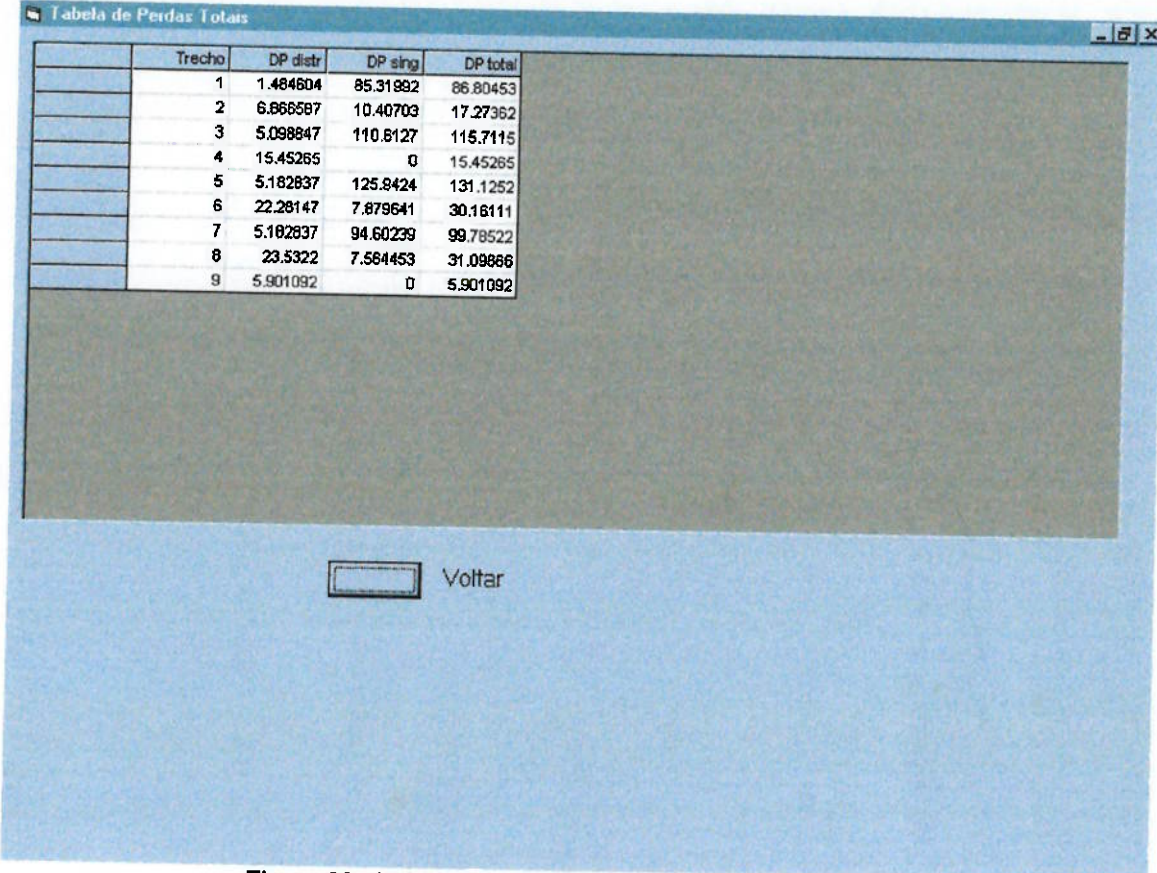
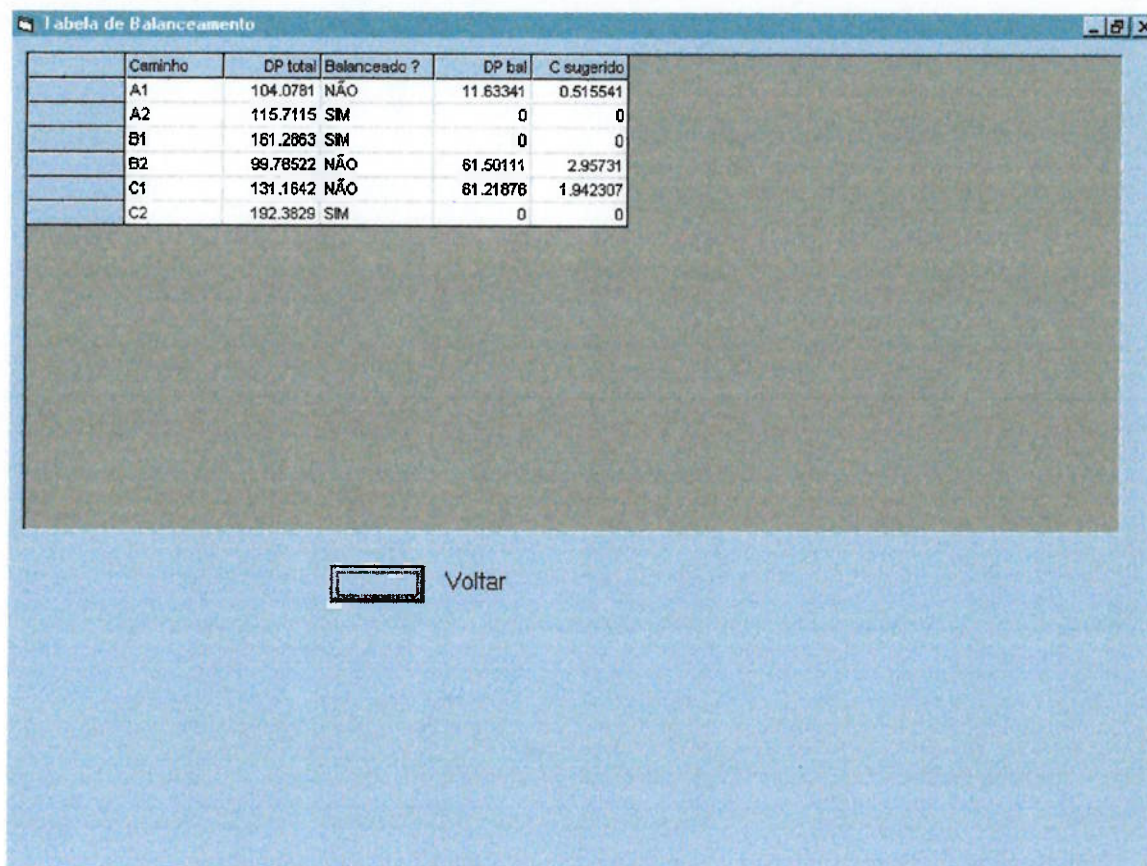


Tabela de Perdas Totais

Trecho	DP distr	DP sing	DP total
1	1.484604	85.31992	86.80453
2	6.666597	10.40703	17.27362
3	5.098847	110.6127	115.7115
4	15.45265	0	15.45265
5	5.182837	125.8424	131.1252
6	22.28147	7.879641	30.16111
7	5.182837	94.60239	99.78522
8	23.5322	7.584453	31.09866
9	5.901092	0	5.901092

Figura 28 : Tabela de perdas de pressão em cada trecho



Caminho	DP total	Balanceado ?	DP bal	C sugerido
A1	104.0781	NÃO	11.63341	0.515541
A2	115.7115	SIM	0	0
B1	161.2863	SIM	0	0
B2	99.78522	NÃO	61.50111	2.95731
C1	131.1642	NÃO	61.21876	1.942307
C2	192.3829	SIM	0	0

Figura 29 : Tabela com os resultados de balanceamento para os caminhos cadastrados

## **11. Comentários Finais e Conclusões**

Após a simulação da rede no programa desenvolvido deve-se perguntar o que faremos com os resultados obtidos. Para o profissional que utilizar o programa os resultados serão muito úteis, já que eles apresentam o trecho e o valor do coeficiente de perda do acessório que deve ser inserido naquele trecho, bastando somente a ele encontrar em catálogos de acessórios de redes de distribuição de ar aquele que se encaixa na situação descrita. Como uma limitação do programa temos o fato de nem todos os valores possuem um acessório correspondente, ou seja, em algumas situações teremos que lançar mão de outros recursos e não só introduzir um acessório em um trecho.

Em termos do modelo adotado pode-se verificar que foi satisfatório, tanto do ponto de vista de atender ao esperado pela teoria apresentada, quanto no que diz respeito à adequação desse modelo ao programa. Tudo aquilo que foi proposto nos capítulos 5, 6 e 7 pôde ser implementado no programa e com resultados muito bons quando comparado à um dos mais utilizados programas de balanceamento de redes atual : o T-DUCT do Prof. Robert Tsal (1993)

Cabem algumas críticas ao programa como o fato de não podermos imprimir as tabelas diretamente ou ainda não ser possível salvar uma rede já caracterizada. Com relação ao modelo não há críticas relevantes a serem feitas.



O trabalho se mostrou coerente com sua proposta, apresentou bons resultados e propiciou um aprendizado muito grande além de apresentar conceitos relativamente novos e diferenciados na área de Mecânica dos Fluidos.

## **12. Bibliografia**

**Bolliger Jr, R e Mariani, A. L. C. M. Programa SMACNA de Educação Continuada em Tratamento de Ar.** Editora SMACNA Brasil, São Paulo, 1997

**Assy, T. M. Mecânica dos Fluidos.** Editora Plêiade, São Paulo, 1996

**Assy, T. M. Redes de Distribuição de água : Cálculo numérico e Analógico.** Tese de livre docência apresentada à Escola Politécnica, São Paulo, 1959

**ASHRAE. Handbook – Fundamentals.** Editora ASHRAE , Atlanta, 1997

**SMACNA. HVAC Systems – Duct Design.** Editora SMACNA, Virginia, 1990

**NETSAL & Associates, T-METHOD DUCT SYSTEM SIMULATOR – User's Guide Version 2.0S. ,** Califórnia, 1993