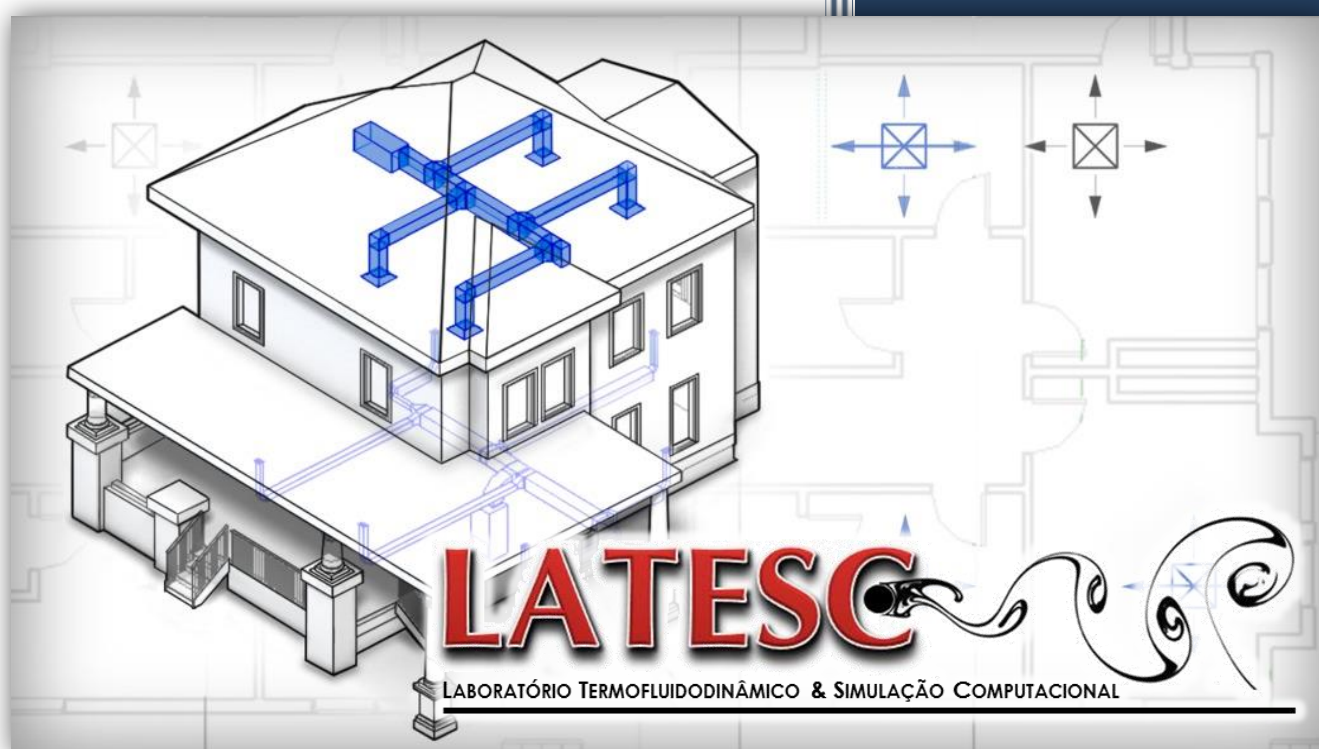


2017

Guia de Utilização: DIMduct v.11-17



Elaboração:

Helen Bastos Leal
Lucas Osório Corrêa
Raquel Barros Paes
Vitória Gonçalves Souza

Programação:

Prof. Dr. Marcelo M. Galarça
Eliézer Lopes

Colaboração:

Eng.MSc. João Américo Aguirre O. Jr.

Contato:

marcelo.galarca@riogrande.ifrs.edu.br

Sumário

1. Introdução	1
2. Perda de Carga	1
2.1 Equação de Bernoulli	1
2.2 Pressões	2
2.2.1 Perdas nos trechos lineares	2
2.2.2 Perdas em escoamentos laminares	2
2.2.3 Perdas em escoamentos turbulentos.....	3
2.3 Fator de Atrito	3
2.3.1 Correlações para o Fator de Atrito.....	4
3. Métodos de Dimensionamento	5
3.1. Velocidade Arbitrária ou Constante	5
3.2. Perda de Carga Constante	6
3.3. Recuperação da Pressão Estática	6
4. Programa.....	7
4.1. Velocidade Arbitrária	8
4.2 Perda de Carga Constante (Método ASHRAE)	11
4.3 Perda de Carga Constante (Método Clássico)	13
4.4 Recuperação da Pressão Estática	15
5. Considerações Finais.....	18
6. Bibliografia Consultada	19

Lista de Símbolos $A = \text{Área} \quad [\text{m}^2]$ $D = \text{Diâmetro} \quad [\text{m}]$ $g = \text{gravidade} \quad [\text{m/s}^2]$ $h_l = \text{Perda de carga principal} \quad [\text{m}]$ $h_{lm} = \text{Perda de Carga secundária} \quad [\text{m}]$ $K = \text{Coeficiente de Perda de carga} \quad [\quad]$ $L = \text{Comprimento} \quad [\text{m}]$ $L_{eq} = \text{Comprimento Equivalente} \quad [\text{m}]$ $P = \text{Pressão} \quad [\text{Pa}; \text{ou } \textit{altura de coluna de líquido}]$ $P_d = \text{Pressão dinâmica} \quad [\text{Pa}; \text{ou } \textit{altura de coluna de líquido}]$ $P_e = \text{Pressão Estática} \quad [\text{Pa}; \text{ou } \textit{altura de coluna de líquido}]$ $Q = \text{Vazão volumétrica} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$ $R = \text{constante de recuperação} \quad [\quad]$ $Re = \text{Número de Reynolds} \quad [\quad]$ $u = \text{Velocidade} \quad [\text{m/s}]$ $z = \text{Altura} \quad [\text{m}]$ $\rho = \text{Massa específica} \quad [\text{kg/s}]$ $f = \text{Fator de Atrito} \quad [\quad]$ $\varepsilon = \text{Rugosidade absoluta} \quad [\text{m}]$

1. Introdução

O sistema de distribuição de ar é responsável por levar o ar desde o equipamento de ar condicionado (ou ventilador) para o espaço climatizado, e retomá-lo novamente ao equipamento. O melhor sistema é o resultante de um projeto simples com ventilador (ou unidade *self contained*), dutos e acessórios (difusores, filtros, bocais, grelhas, etc.) que seja o mais simétrico e retilíneo possível (tentar evitar utilizar muitas curvas).

O sistema tem como propósito principal, distribuir da melhor forma o ar (condicionado ou não) para a região de interesse. A região ou espaço controlado por um único termostato é denominado de zona. Conhecidas as cargas térmicas individuais, os recintos devem ser zoneados termicamente de forma que cada zona térmica seja constituída de recintos que apresentem as suas variações evoluindo de maneira semelhante. No zoneamento, devem ainda ser considerados os períodos de utilização dos recintos e, sobretudo, a possibilidade de poluição do ar nos mesmos. Recintos que apenas eventualmente sejam utilizados ou nos quais haja produção de tóxicos, odores, poeiras, fumaça, etc., devem sempre constituir zona em separado.

Para o projeto de sistemas utilizados na distribuição de ar são utilizados três métodos de dimensionamento: o método da **velocidade arbitrária**, que consiste em adotar as velocidades recomendadas, não prevendo o equilíbrio das pressões dinâmicas nas bocas de insuflamento; o método da **perda de carga constante**, que consiste em calcular os condutos de forma que tenham a mesma perda de carga por unidade de comprimento ao longo do sistema e; o método da **recuperação da pressão estática**, o qual consiste em dimensionar o duto de forma que o aumento da pressão estática em cada ramo ou boca de insuflamento compense as perdas por atrito na seção seguinte do duto, assim a pressão estática será a mesma em cada boca e no começo de cada ramo.

Este manual tem por objetivo servir como tutorial para as rotinas de cálculo apresentadas em capítulo posterior, demonstrando a utilização das mesmas para auxiliar no dimensionamento de dutos.

2. Perda de Carga

Em suma, perda de carga é a energia perdida pela unidade de massa do fluido quando este escoar, devido ao atrito com as paredes internas da tubulação, e também da turbulência do escoamento (gerando a viscosidade aparente).

As perdas em tubulações podem ser divididas em dois grupos: as perdas que ocorrem nos trechos lineares, ou **perdas distribuídas**, e as perdas localizadas em elementos individuais, também chamadas **perdas singulares**. As perdas do primeiro grupo constituem a maior parte do total, pois normalmente as tubulações de interesse possuem grande extensão, e por isso são também chamadas **perdas principais**; as demais são, por sua vez, chamadas **perdas secundárias**.

Perda de carga, nada mais é do que uma variação de pressão entre pontos de uma tubulação. Por sua vez, as unidades devem relacionar pressão: Bar, psi, Pa, mmH₂O (ou mmca), etc..

2.1 Equação de Bernoulli

Relaciona a variação da pressão com a velocidade.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (01)$$

Aplicando em dois pontos

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 \quad (02)$$

A equação de Bernoulli é uma equação útil, entretanto, ela fornece resultados corretos apenas quando aplicada a uma situação de escoamento onde todas as quatro restrições são razoáveis. São elas: escoamento permanente, incompressível, sem atrito e ao longo de uma linha de corrente.

2.2 Pressões

Pressão estática: é a pressão termodinâmica; que é comumente chamada de pressão estática. É a pressão que a partícula do fluido “sente” ao escoar. É medida usando a tomada de pressão tangente ao escoamento. A tomada de pressão é um pequeno orifício cuidadosamente perfurado na parede, de modo a ter o seu eixo perpendicular á superfície.

Pressão Estagnação: É obtida quando um fluido em escoamento é desacelerado até a velocidade zero, por um processo de atrito. Também é chamada de **pressão total**.

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (03)$$

Pressão Dinâmica: É a pressão verificada quando o fluido está em movimento. Depende diretamente da velocidade no interior do sistema de dutos.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (04)$$

2.2.1 Perdas nos trechos lineares

Nesses trechos, a seção do duto é constante. Para saber a perda referente ao duto, é necessário desconsiderar o fator correspondente à mudança de altura, ou seja, $z_1 - z_2 = 0$, na Eq.(02). Assim, a perda de carga deve ser calculada como:

$$hl = \frac{\Delta p}{\rho} \quad (05)$$

onde hl são as **perdas principais**, mencionadas anteriormente.

2.2.2 Perdas em escoamentos laminares

No escoamento laminar, a queda de pressão pode ser calculada analiticamente para o escoamento completamente desenvolvido em um tubo horizontal.

$$hl = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{u^2}{2} \quad (06)$$

2.2.3 Perdas em escoamentos turbulentos

No caso de escoamentos turbulentos, não é possível determinar analiticamente a expressão para a variação de pressão; devemos recorrer a resultados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los. A variação da queda de pressão em relação ao atrito não é linear, de forma que o *fator de atrito*, f , é obtido através de correlações e/ou gráficos provenientes de dados experimentais.

$$hl = f \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g} \quad (07)$$

2.3 Fator de Atrito

Em geral, ele é uma função do diâmetro, da rugosidade e do Número de Reynolds do escoamento:

$$f = \phi \left[Re, \frac{\epsilon}{D} \right] \quad (08)$$

As equações para escoamento laminar e turbulento, escritas na forma indicada, permitem afirmar que o fator de atrito para **escoamento laminar** é igual a:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (09)$$

O valor do fator de atrito para **escoamento turbulento** foi obtido por Lewis Ferry Moody e tabulado no que se chama Diagrama de Moody (Fig.01).

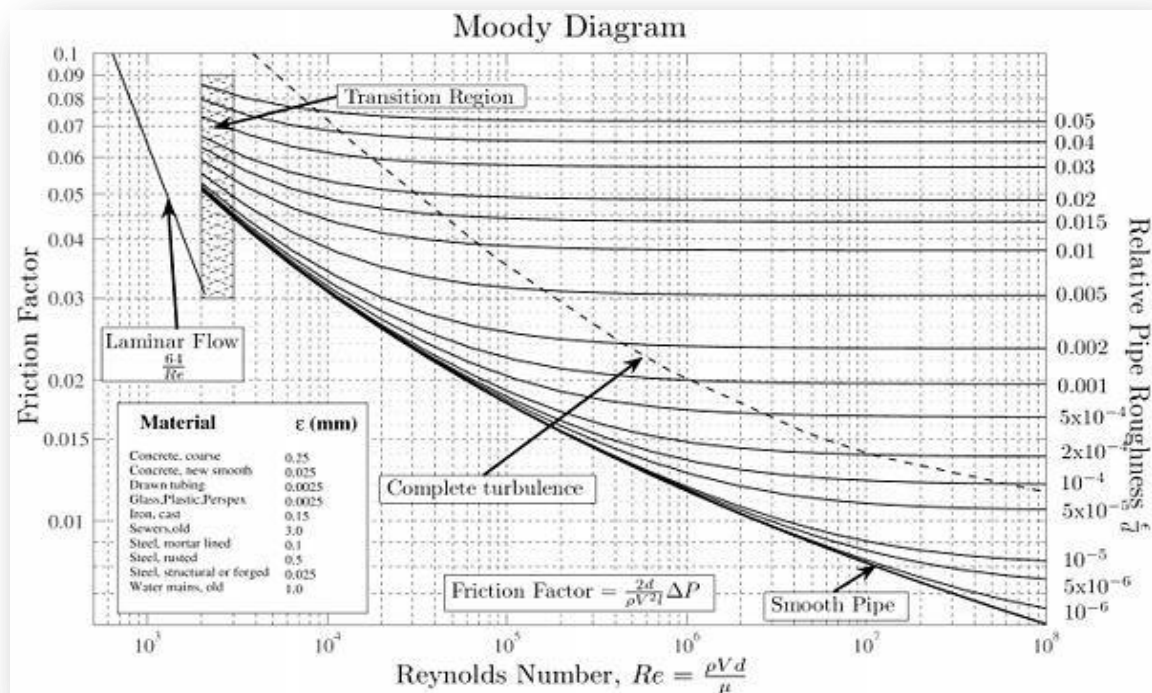


Figura 1- Diagrama de Moody

O Diagrama de Moody mostra que o fator de atrito diminui com o Número de Reynolds. Em uma tubulação horizontal de diâmetro constante, isso significa que o fator de atrito diminui com o aumento da velocidade, tanto para escoamento laminar quanto para escoamento turbulento. No primeiro caso, entretanto, o fator de atrito independe da rugosidade do material; no segundo caso, o fator de atrito depende tanto da rugosidade quanto do Número de Reynolds. Para valores muito grandes da velocidade, a tendência é que o fator de atrito dependa quase que apenas da rugosidade.

2.3.1 Correlações para o Fator de Atrito

Equação de Colebrook: É uma solução iterativa, comumente utilizada em programas computacionais.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

Como qualquer problema iterativo, a Eq.(10) necessita de um “chute” (estimativa) inicial para o fator de atrito. De forma a não consumir tempo computacional, quanto mais próxima do valor final for esta estimativa, mais rápida a solução será encontrada. Para tanto, uma correlação que fornece esta estimativa inicial é usual.

Estimativa inicial pra utilizar Colebrook

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,7}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

Correlação de Blasius: Esta correlação apenas pode ser aplicada para tubos lisos e $2300 \leq Re \leq 10^5$

$$f = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad (12)$$

Equação de Wood: A correlação de Wood é aplicável para ampla faixa de números de Reynolds e rugosidades relativas. Cobre toda a faixa do Diagrama de Wood, do laminar ao turbulento.

$$f = a + b \cdot Re^{-c} \quad (13a)$$

$$a = 0,53 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + 0,094 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,225} \quad (13b)$$

$$b = 88 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,44} \quad (13c)$$

$$c = 1,62 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0,134} \quad (13d)$$

Perda de Carga Secundaria

A queda de pressão (ou perda de carga) secundária, h_{lm} , pode ser calculada de duas formas, dependendo dos dados conhecidos: ou o *comprimento equivalente*, L_{eq} , ou o *coeficiente de perda*, K .

Método do comprimento equivalente: Comprimento equivalente em metros de canalização retilínea. Tabela de acordo com o acessório

$$hl_m = f \frac{L_{eq}}{D} \frac{u^2}{2g} \quad (17)$$

Método do coeficiente de perda: tabelado de acordo com o acessório.

$$hl_m = K \frac{u^2}{2g} \quad (18)$$

3. Métodos de Dimensionamento

Para ilustrar um sistema qualquer de dutos, adota-se o esquema apresentado na Fig. (02). Toma-se como *trecho a ser dimensionado* aquele entre os difusores 2 e 3, pois sempre temos conhecimento dos dados do trecho anterior, para qualquer caso.

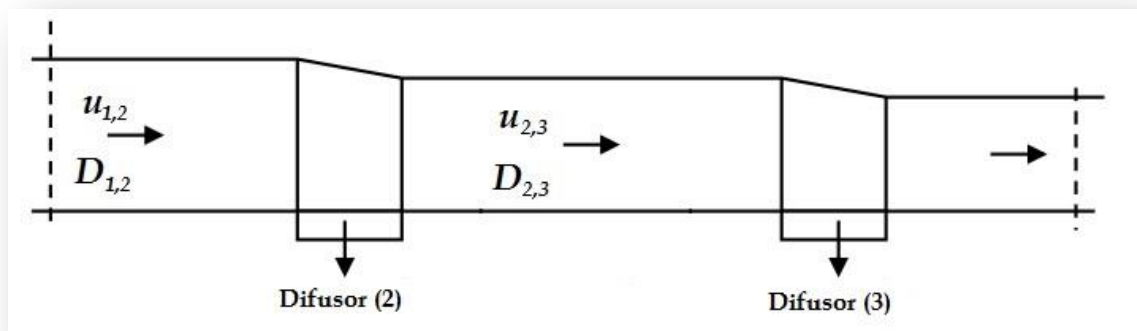


Figura 2 – Esquema genérico de dutos

3.1. Velocidade Arbitrária ou Constante

Primeiramente, adota-se uma velocidade com base em uma tabela de velocidades recomendadas por norma (ASHRAE, por exemplo). Conhecendo a velocidade e a vazão (proveniente dos cálculos de carga térmica) determina-se a área da seção:

$$A = \frac{Q}{u} \quad (19)$$

Com a área encontram-se as dimensões da tubulação com auxílio de tabelas ou ábacos, ou mesmo por determinação arbitrária das dimensões, respeitando sugestões de projeto.

3.2. Perda de Carga Constante

O objetivo é dimensionar os dutos mantendo a perda de carga constante por metro de tubulação. Isto pode ser feito de duas formas.

$$\frac{\Delta P_F}{\text{metro}} = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} = \text{constante} \quad (20)$$

Método ASHRAE: A ASHRAE, com base em dados empíricos fornece algumas correlações de aplicação direta, as quais garantem que a exigência do método seja atendida (perda de carga constante para cada metro de tubulação). Neste sentido, divide a aplicação em *dois tipos de sistemas* a serem escolhidos no momento do dimensionamento. Conforme apresentado a seguir:

(1) Baixa velocidade (conforto):

- Perda de carga unitária em torno de 1.2 - 2.2 Pa/m
- Velocidade máx.: 12 m/s

$$D = 32Q^{0,38} \quad (21)$$

(2) Alta velocidade (industrial):

- Perda de carga unitária em torno de 4.0 - 6.0 Pa/m
- Velocidade máx.: 20 m/s

$$D = 25Q^{0,38} \quad (22)$$

Método Clássico: diferentemente do anterior, é baseado na solução da Eq.(20). Igualando as parcelas de pressão para dois trechos consecutivos de uma tubulação. Uma vez que não se sabe a velocidade do trecho “futuro”, o processo torna-se iterativo. Desta forma, um método de solução iterativa é utilizado.

3.3. Recuperação da Pressão Estática

O método propõe que a redução de velocidade (no sentido do escoamento) de um trecho para outro provoque um “ganho” de pressão estática no trecho seguinte igual à perda de pressão estática no mesmo trecho, de modo a manter aproximadamente constante, o nível estático em todos os “nós” da rede. A análise a seguir toma como base o esquema apresentado na Figura 2.

$$P_{e2} + P_{D1-2} = P_{e3} + P_{D2-3} + \Delta P_{F2-3} \quad (23)$$

Para P_e ser recuperado P_{e2} e P_{e3} devem iguais, logo:

$$P_{D1-2} = P_{D2-3} + \Delta P_{F2-3} \quad (24)$$

$$\Delta P_{F2-3} = P_{D1-2} - P_{D2-3} \quad (25)$$

Assim,

$$f \frac{L_{2-3}}{D_{2-3}} \rho \frac{(u_{2-3})^2}{2} + 0,1 \frac{\theta}{90} = \rho \frac{(u_{1-2})^2}{2} - \rho \frac{(u_{2-3})^2}{2} \quad (26)$$

Como não é possível recuperar 100% da perda, é acrescentada na Eq.(26) a constante de recuperação, R , que pode variar de 75% a 100% (0,75 até 1), sendo o valor maior o caso *ideal*, porém não real. Reescrevendo a Eq.(26), tem-se:

$$Ru_{1-2}^2 = \left(f \frac{L_{2-3}}{D_{2-3}} + 0,1 \frac{\theta}{90} + R \right) u_{2-3}^2 \quad (27)$$

4. Programa

A seguir segue um tutorial do programa para dimensionamento de dutos, utilizado na plataforma de compilação Python (pacote Spyder). Este auxilia na resolução de todos os métodos de dimensionamento já apresentados. Para melhor apresentação da utilização do programa, o exemplo da Fig. 3 é adotado. Não se devendo esquecer de que o equacionamento é baseado no esquema da Fig. 2. Por questões de simplicidade e não deixar o texto longo, somente os primeiros trechos serão dimensionados. Os demais seguem a lógica análoga.

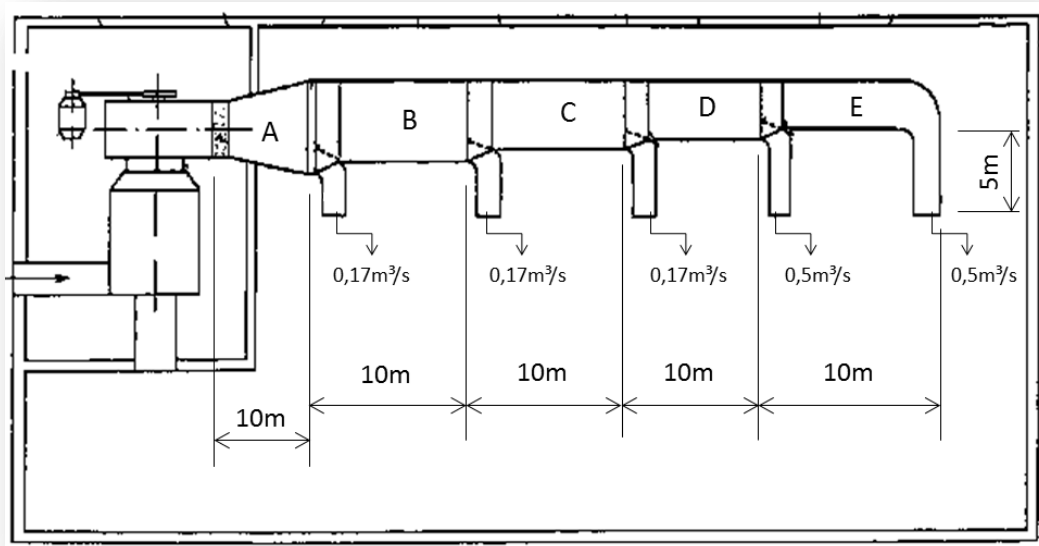


Figura 3 – Exemplo de sistema a ser dimensionado.

Dados do exemplo:

- Vazão total, $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Velocidade, $u = 6 \text{ m/s}$, adotada conforme aplicação;

4.1. Velocidade Arbitrária

Será dimensionada a tubulação do trecho A e B do problema pelo Método de Dimensionamento Velocidade Arbitrária através do programa;

Primeiro Passo

Executar o arquivo Spyder.exe

Abrir o arquivo referente ao método de dimensionamento: *V2-arbitraria.py*, conforme apresentam as Figs 4 e

5.

File → Open → Selecionar a pasta onde está o arquivo

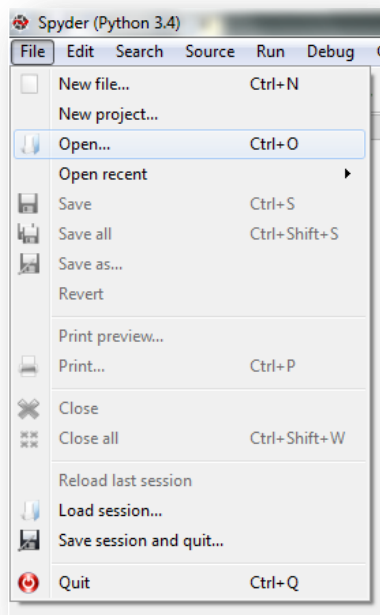


Figura 4 – Abertura de arquivo

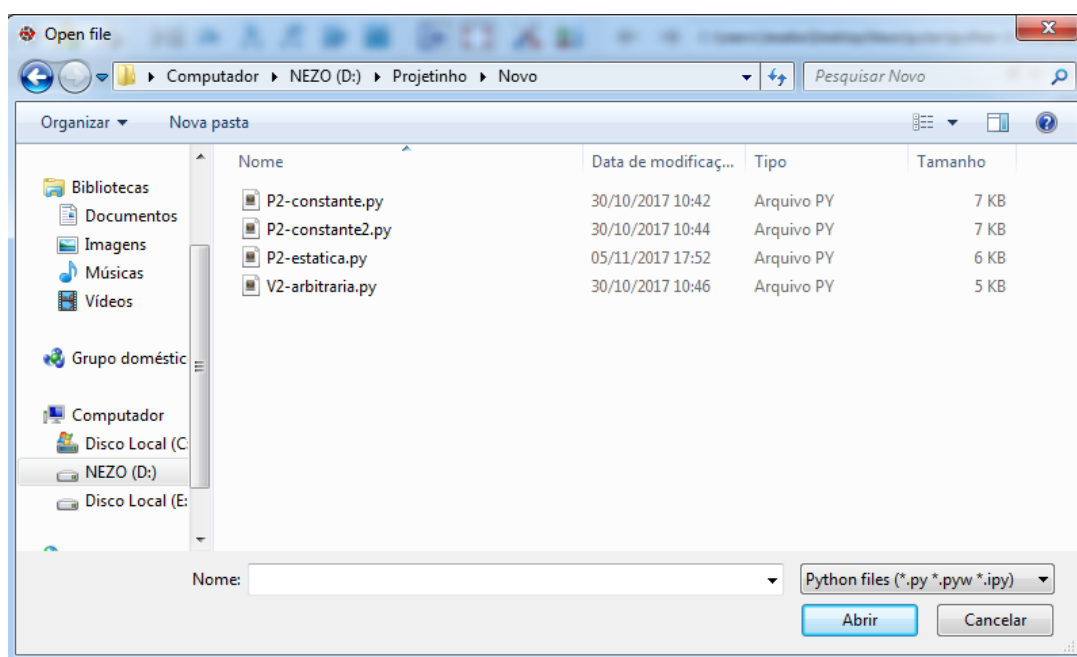


Figura 5 – Pasta onde os arquivos se encontram.

Selecionando o arquivo *V2-arbitraria.py*, deve surgir na tela conforme a Fig. 6:

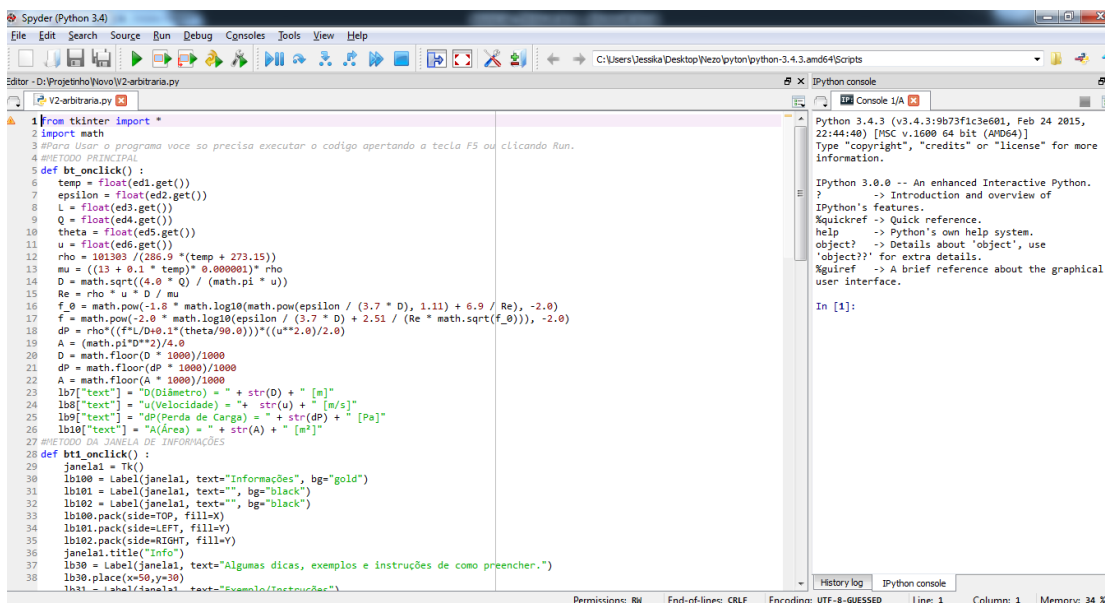


Figura 6 – Tela do programa para o Método da Velocidade Arbitrária

Segundo Passo

Selecione o botão *Run File* na parte superior da tela, conforme mostra a Fig. 7:

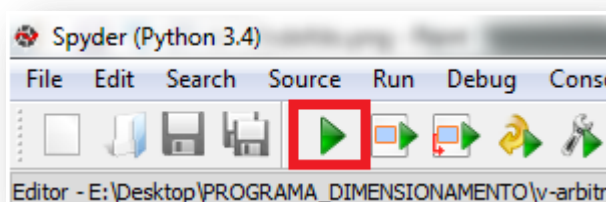


Figura 7 – Botão *Run File* destacado em “vermelho”

Terceiro Passo

Os campos referentes aos “VALORES DE ENTRADA CONHECIDOS” devem ser preenchidos, Fig. 8. Sendo eles:

Tem = Temperatura

L = Comprimento do trecho

$Theta$ = Ângulo total de curvas

$Epsilon$ = Rugosidade absoluta

Q = Vazão no trecho

u = Velocidade desejada

temp [°C]:	20	(temperatura)
Epsilon [m]:	0.0001	(Rugosidade Absoluta)
L [m]:	10.0	(Comprimento do Trecho)
Q [m³/s]:	1.5	(Vazão no Trecho)
Theta [deg]:	0.0	(Angulo Total de Curvas)
u [m/s]:	6.0	(Velocidade)

Figura 8 – Campos para os valores de entrada.

Os valores da Fig. 8 são correspondentes ao *trecho A*, onde a vazão é a máxima. A velocidade 6m/s é adotada da tabela de velocidades recomendadas;

Quarto Passo

Selecione o botão Resultado, conforme mostra a Fig. 9

u [m/s]: 6.0 (Velocidade)

Resultado

Figura 9 – Botão *Resultado* destacado em “vermelho”

Quinto Passo

Após o acionamento do botão, surgem no canto inferior direito os valores dos resultados calculados (neste caso do *trecho A*), conforme Fig. 10. Sendo eles:

D = Diâmetro [m]

u = Velocidade [m/s]

dP = Perda de Carga [Pa]

A = Área [m²]

D(Diâmetro) = 0.564 [m]
 u(Velocidade) = 6.0 [m/s]
 dP(Perda de Carga) = 6.411 [Pa]
 A(Área) = 0.249 [m²]

Figura 10 – Indicação dos resultados.

A seguir segue a resolução para o *trecho B*, através do método de dimensionamento da velocidade arbitrária:

Todos os passos permanecem iguais, sendo que, os campos referentes aos “VALORES DE ENTRADA CONHECIDOS” devem ser preenchidos com os valores correspondentes ao *trecho B*, Fig. 11.

temp [°C]:	20	(temperatura)
Epsilon [m]:	0.0001	(Rugosidade Absoluta)
L [m]:	10	(Comprimento do Trecho)
Q [m³/s]:	1.33	(Vazão no Trecho)
Theta [deg]:	0.0	(Angulo Total de Curvas)
u [m/s]:	6.0	(Velocidade)

Figura 11 – Dados para o *trecho B*.

Os resultados para o *trecho B*, serão apresentados logo abaixo daqueles do trecho anterior (no canto inferior direito) conforme mostra Fig. 12.

D(Diâmetro) = 0.531 [m]
 u(Velocidade) = 6.0 [m/s]
 dP(Perda de Carga) = 6.895 [Pa]
 A(Área) = 0.221 [m²]

Figura 12 – Resultados para o *trecho B*.

4.2 Perda de Carga Constante (Método ASHRAE)

Será dimensionada a tubulação dos *trechos A e B*, novamente, porém utilizando-se o Método de Dimensionamento de Perda de Carga Constante (ASHRAE). Nesta rotina de cálculos são calculados **dois trechos** por vez. Assim, os *trechos A e B* são calculados simultaneamente.

Todos os passos se repetem. Algumas modificações ocorrem em relação aos campos de entrada (*segundo passo*). Porém, aqui o arquivo a ser aberto é:

P2-constante.py

A tela que deverá surgir é apresentada na Fig. 13:

```

1 from tkinter import *
2 import math
3 from scipy.optimize import fsolve
4 #Para Usar o programa voce so precisa executar o codigo apertando a tecla F5 ou clicando Run.
5 #Método PRINCIPAL
6 def bt_onclick() :
7     temp = float(ed1.get())
8     Q_1 = float(ed4.get())
9     Q_2 = float(ed5.get())
10    theta = float(ed6.get())
11    epsilon = float(ed12.get())
12    Tipo = float(ed13.get())
13    L_1 = 1
14    rho = 101303 / (286.9 * (temp + 273.15))
15    mu = ((13 + 0.1 * temp) * 0.000001) * rho
16    if Tipo == 1:
17        Q_1L = Q_1 * 1000.0 # [L/s]
18        D_1 = 32.0 * (math.pow(Q_1L, 0.38)) / 1000
19        A_1 = (math.pi * D_1 ** 2.0) / 4.0
20        u_1 = Q_1 / A_1
21        Q_2L = Q_2 * 1000.0 # [L/s]
22        D_2 = 32.0 * (math.pow(Q_2L, 0.38)) / 1000
23        A_2 = (math.pi * D_2 ** 2.0) / 4.0
24        u_2 = Q_2 / A_2
25
26    if Tipo == 2:
27        Q_1L = Q_1 * 1000.0 # [L/s]
28        D_1 = 25.0 * (math.pow(Q_1L, 0.38)) / 1000
29        A_1 = (math.pi * D_1 ** 2.0) / 4.0
30        u_1 = Q_1 / A_1
31        Q_2L = Q_2 * 1000.0 # [L/s]
32        D_2 = 25.0 * (math.pow(Q_2L, 0.38)) / 1000
33        A_2 = (math.pi * D_2 ** 2.0) / 4.0
34        u_2 = Q_2 / A_2
35
36    Re = rho * u_1 * D_1 / mu
37    f_0 = math.pow(-1.8 * math.log10(math.pow(epsilon / (3.7 * D_1), 1.11) + 6.9 / Re), -2.0)
38    f = math.pow(-2.0 * math.log10(epsilon / (3.7 * D_1) + 2.51 / (Re * math.sqrt(f_0))), -2.0)
39    dP_m = -f * (rho * L_1 / D_1 + 0.1 * theta / 0.003) * u_1 ** 2.0 * rho

```

Figura 13 - Tela do programa para o Método da Perda de Carga Constante (ASHRAE)

Segundo Passo

Os campos referentes aos “VALORES DE ENTRADA CONHECIDOS” devem ser preenchidos da mesma forma como no método anterior. Porém **muita atenção** em relação ao L_1 . Este deve permanecer **sempre** em 1.0 metro (um metro), pois o método calcula em termos de perda por metro de tubulação reta. Os valores de Q_1 e Q_2 são as vazões para o trecho 1 e 2, respectivamente. Conforme o esquema da Fig. 2.

Deve-se preencher o *Tipo de Sistema* (conforto ou industrial), conforme apresentado anteriormente.

Tipo = 1 (DE ACORDO COM O TIPO DE SISTEMA, CONFORME DESCRITO ABAIXO)

TIPO DE SISTEMAS:

- (1) BAIXA VELOCIDADE (CONFORTO) :
- PERDA DE CARGA UNITÁRIA EM TORNO DE 1.2 - 2.2 Pa/m
- VELOCIDADE MÁX.: 12 m/s
- (2) ALTA VELOCIDADE (INDUSTRIAL) :
- PERDA DE CARGA UNITÁRIA EM TORNO DE 4.0 - 6.0 Pa/m
- VELOCIDADE MÁX.: 20 m/s

Figura 13 – Tipos de sistemas.

Após o **segundo passo**, os valores dos resultados são apresentados Fig. 15. Deverá ser guardado o valor de dP , pois este valor deverá ser multiplicado pelo comprimento do *trecho de maior caminho que o ar percorre*, obtendo-se, assim, a perda de carga total do sistema.

$D_1 = 0.441[m]$
 $u_1 = 6.525[m/s]$
 $A_1 = 0.153[m^2]$
 $D_2 = 0.405[m]$
 $u_2 = 6.185[m/s]$
 $A_2 = 0.129[m^2]$
 $dP_m = 2.017[Pa/m]$

Figura 15 – Indicação dos resultados para os *trechos A e B*.

4.3 Perda de Carga Constante (Método Clássico)

O Método de Dimensionamento de Dutos Perda de Carga Constante (Clássico), se diferencia do Método ASHRAE por resolver o problema de perda de carga a partir de método iterativo, segundo a mecânica dos fluidos clássica. Nesta rotina de solução do programa é resolvido **um trecho** por vez (e não os dois, como no método da ASHRAE).

Os **passos são análogos** ao apresentado até então para os outros métodos. O arquivo a ser aberto é: *P2-constante2.py*. A tela que surge é conforme apresentado na Fig. 16.

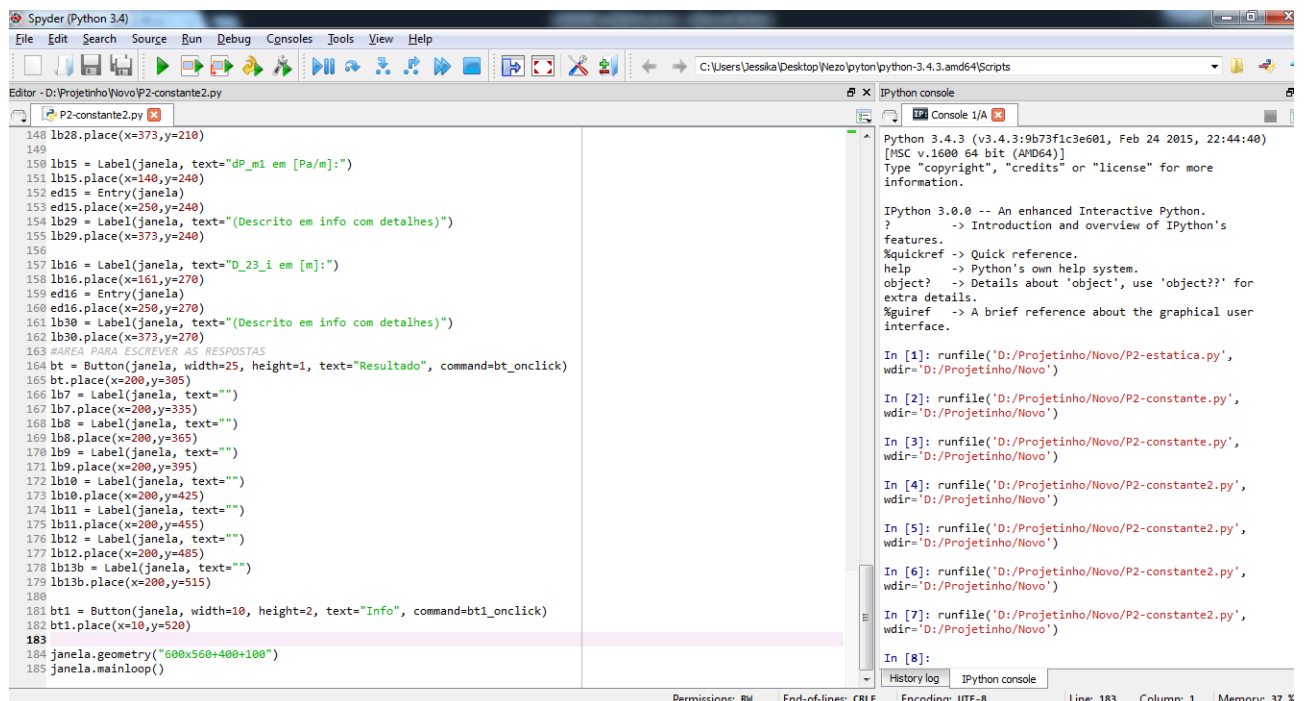


Figura 16 - Tela do programa para o Método da Perda de Carga Constante

Primeiro Passo

Os campos referentes aos “VALORES DE ENTRADA CONHECIDOS” devem ser preenchidos com os valores referentes ao do *Trecho B*. O primeiro trecho é dimensionado da mesma forma como feito para o *Método da*

Velocidade Arbitrária, ou seja, por conservação de massa. Os valores de Q_1 e u_1 são referentes aos do primeiro trecho, ou seja, a vazão inicial (total) e a velocidade inicial (de acordo com recomendação de norma), para este caso do exemplo, $u_1 = 6\text{m/s}$. **Importante:** o comprimento L_{2-3} deve ser mantido igual a 1.0 metro (um metro), pois a perda de carga é obtida para cada metro de tubulação.

Segundo Passo

Para a *primeira rodada* de cálculos, não se esqueça de iniciar com Zero os campos assinalados na Fig. 17.

temp em [°C]:	<input type="text"/>	(Temperatura)
Q_23 em [m³/s]:	<input type="text"/>	(Vazão do Trecho Atual)
theta em [deg]:	<input type="text"/>	(Angulo total de curvas no trecho)
epsilon em [m]:	<input type="text"/>	(Ruguosidade)
Q_1 em [m³/s]:	<input type="text"/>	(Vazão ao trecho anterior)
u_1 em [m/s]:	<input type="text"/>	(Descrito em info com detalhes)
Trecho:	<input type="text"/>	(Descrito em info com detalhes)
dP_m1 em [Pa/m]:	0	(Descrito em info com detalhes)
D_23_i em [m]:	0	(Descrito em info com detalhes)

Figura 17 – Representação os campos que devem ser iniciados com Zero

Terceiro Passo

Após *rodar* o programa, Fig. 18.

D_2-3 = 0.393[m]
 u_2-3 = 6.582[m/s]
 D_1 = 0.444[m]
 dP_m1 = 1.96[Pa/m]

Figura 18 - Indicação dos resultados.

Sendo,

D_{2-3} : Diâmetro da tubulação que esta sendo calculada.

dP_m : Perda de carga por metro. **Importante:** *este valor será multiplicado, posteriormente pelo comprimento real dos trechos, de forma a fornecer a perda de carga total do sistema.*

u_{2-3} : Nova velocidade calculada para o trecho.

Quarto Passo

Anotar os resultados obtidos. Substituir os valores de entrada e colocar os novos dados. Ou seja, Q_i e u_i agora são os valores de resultados apresentados no **terceiro passo**. O valor de Q_{2-3} diz respeito à vazão do trecho que está sendo calculado agora, Fig. 19.

Q ₂₃ em [m³/s]:	1.33	(Vazão do Trecho Atual)
theta em [deg]:	0.0	(Ângulo total de curvas no trecho)
epsilon em [m]:	0.0001	(Rugosidade)
Q ₁ em [m³/s]:	1.16	(Vazão ao trecho anterior)
u ₁ em [m/s]:	6.582	(Descrito em info com detalhes)

Figura 19 - Campos para os valores de entrada.

Deve-se ter **atenção** para o valor de dP_{m1} deve ser colocado neste campo o valor calculado **na primeira etapa apenas**. Ou seja, uma vez feita a primeira *rodada* de cálculos, este valor não deverá mudar. O valor D_{2-3i} deverá ser digitado com o resultado da **etapa anterior**. Conforme apresentado na Fig. 20.

Trecho:	2	(Descrito em info com detalhes)
dP _{m1} em [Pa/m]:	1.96	(Descrito em info com detalhes)
D _{23_i} em [m]:	0.444	(Descrito em info com detalhes)

Figura 20 – Campos a serem preenchidos após a primeira etapa.

Oitavo Passo

Apertar em resolver e mostrara a resposta como na figura Fig. 21.

D₂₋₃ = 0.476[m]
 u₂₋₃ = 7.455[m/s]
 D₁ = 0.444[m]
 dP_{m1} = 1.96[Pa/m]

Figura 21 - Resultados para o *trecho B*.

Sendo,

D_{2-3} : Diâmetro do trecho calculado. Neste caso o do *Trecho B*.

u_{2-3} : Nova velocidade.

4.4 Recuperação da Pressão Estática

O passo de abertura de arquivo é **análogo aos anteriores**. No Método de Dimensionamento de Dutos Recuperação da Pressão Estática, abre-se o arquivo:

P2-estatica.py.

A tela que deve abrir é apresentada na Fig. 22:

```

1 from tkinter import *
2 import math
3 from scipy.optimize import fsolve
4 #Para Usar o programa voce so precisa executar o codigo apertando a tecla F5 ou clicando Run.
5 #MÉTODO PRINCIPAL
6 def bt_onclick():
7     temp = float(ed1.get())
8     L_23 = float(ed3.get()) # Comprimento do Trecho Atual
9     Q_23 = float(ed4.get()) # Vazão do Trecho Atual
10    u_12 = float(ed5.get())
11    theta = float(ed6.get())
12    R = float(ed12.get())
13    epsilon = float(ed13.get()) #Rugosidade
14    D_23_i = float(ed14.get())
15    u_23_i = float(ed15.get())
16    Trecho = float(ed16.get())
17    rho = 101303 / (286.9 * (temp + 273.15))
18    mu = ((13 + 0.1 * temp) * 0.000001) * rho
19    def residuals(initial):
20        D_23 = initial[0]
21        u_23 = initial[1]
22        residual = [0.0, 0.0]
23        global Re
24        global f
25        Re = rho * u_23 * D_23 / mu
26        f_0 = math.pow(-1.8 * math.log10(math.pow(epsilon / (3.7 * D_23), 1.11) + 6.9 / Re), -2.0)
27        f = math.pow(-2.0 * math.log10(epsilon / (3.7 * D_23) + 2.51 / (Re * math.sqrt(f_0))), -2.0)
28        residual[0] = (f * L_23 / D_23 + 0.1 * theta / 90.0 + R) * u_23 ** 2.0 - R * u_12 ** 2.0
29        residual[1] = D_23 - math.sqrt((4.0 * Q_23) / (math.pi * u_23))
30        return residual
31
32    D_23, u_23 = fsolve(residuals, [D_23_i, u_23_i])
33    if Trecho == 1: dP = (rho * f * L_23 * u_23 ** 2.0 / (D_23 ** 2.0))
34    A = (math.pi * D_23 ** 2.0) / 4.0
35    lb7["text"] = "D_2-3 =" + str(math.floor(D_23 * 1000) / 1000) + "[m]" # 3 casos
36    lb8["text"] = "u_2-3 =" + str(math.floor(u_23 * 100) / 100) + "[m/s]" # 2 casos
37    lb9["text"] = "A =" + str(math.floor(A * 1000) / 1000) + "[m²]" # 3 casos
38    lb10["text"] = "f_0 =" + str(math.floor(f_0 * 100000) / 100000) + "[s⁻²]" # 3 casos

```

Figura 22 - Tela do programa para o Método da Recuperação da Pressão Estática

Segundo Passo

Preencher os campos referentes aos “VALORES DE ENTRADA CONHECIDOS” com os valores referentes ao do *Trecho B*. O primeiro trecho, ou seja, o *trecho A* é dimensionado da mesma forma como feito no *Método da Velocidade Arbitrária*, pela conservação de massa.

Os campos a serem preenchidos dizem respeito ao trecho em que se está dimensionando. Sendo assim, Q_{2-3} e L_{2-3} são os valores conhecidos de vazão e comprimento para o trecho que se está calculando, respectivamente.

O valor de u_{1-2} diz respeito a velocidade inicial no primeiro trecho, conforme indicação de norma (neste caso, 6m/s).

Os campos de D_{2-3i} e u_{2-3i} são valores escolhidos como *chute inicial* para o trecho que está sendo calculado. Esses não serão os *verdadeiros valores* para o trecho, são apenas para dar início ao processo iterativo de cálculo. O campo D_{2-3i} deve ser iniciado com um valor maior ou igual a 2.

Os valores mencionados devem ser preenchidos nos campos conforme apresentado na Fig. (23).

Estatica		
temp [°C]:	20	(Temperatura)
L_23 em [m]:	10	(Comprimento do Trecho Atual)
Q_23 em [m³/s]:	1.33	(Vazão do Trecho Atual)
u_12 em [m/s]:	6.0	(Velocidade no trecho anterior)
theta em [deg]:	0.0	(Angulo total de curvas no trecho)
R em []:	1.0	(Fator de recuperacao)
epsilon em [m]:	0.0	(Ruguosidade)
D_23_i em [m]:	2	(Chute inicial do diametro)
u_23_i em [m/s]:	5.7	(Chute inicial da velocidade)
Trecho(1,2,3 etc):	1	(Inserir o trecho que esta calculando)

Figura 23 - Campos para os valores de entrada.

Terceiro passo

Aperte em resultado que serão como mostrado na Fig. 25.

Sendo eles,

D_{2-3} - Diâmetro do Trecho

A - Área do trecho

u_{2-3} - Velocidade no Trecho

$D_{2-3} = 0.564[m]$
 $u_{2-3} = 5.3[m/s]$
 $A = 0.25[m^2]$
 $f = 0.0156[]$
 $dP = 4.705[Pa]$

Figura 25 - Indicação dos resultados.

Quarto Passo

Preencher novamente os “VALORES DE ENTRADA CONHECIDOS” utilizando os **valores calculados pelo programa no passo anterior**. E apertar Resultado novamente.

Estática		
temp [°C]:	20	(Temperatura)
L ₂₃ em [m]:	10	(Comprimento do Trecho Atual)
Q ₂₃ em [m³/s]:	1.16	(Vazão do Trecho Atual)
u ₁₂ em [m/s]:	5.3	(Velocidade no trecho anterior)
theta em [deg]:	0.0	(Angulo total de curvas no trecho)
R em []:	1.0	(Fator de recuperacao)
epsilon em [m]:	0.0	(Rugurosidade)
D _{23_i} em [m]:	2	(Chute inicial do diametro)
u _{23_i} em [m/s]:	5.7	(Chute inicial da velocidade)
Trecho(1,2,3 etc):	4	(Inserir o trecho que esta calculando)

Figura 26 - Campos para os valores de entrada.

5. Considerações Finais

O manual apresentou como utilizar o software para cada um dos métodos. Foram dimensionados apenas os dois primeiros trechos do exemplo. Os demais trechos seguem de forma análoga. Algumas observações importantes devem ser seguidas:

- Não se esqueça de anotar todos os valores de resultados para cada trecho dimensionado. Faça isto para cada *rodada* de cálculos até que todo o sistema esteja dimensionado;
- O valor de *theta*, o qual não foi modificado em nenhum exemplo será utilizado quando no trecho de interesse tiver alguma curva. Por exemplo: se tiver apenas **uma única curva de 90°**, este será o valor de *theta*. Se tiver duas, o valor será 180. E assim por diante;
- Quando algum acessório que não seja curva deve ser considerado, o valor de perda de carga do mesmo precisa ser conhecido e acrescentado na perda de carga total do sistema, ao final do dimensionamento;
- O valor de *R*, referente a constante de recuperação para o *Método da Recuperação da Pressão Estática*, é um valor totalmente arbitrário dentro da faixa estipulada. Vai depender da experiência do projetista.

6. Bibliografia Consultada

ASHRAE – HVAC: Applications Handbook.

ASHRAE – HVAC: Systems and Equipments Handbook.

BRAN, SOUZA. Máquinas de Fluxo: Turbinas, Bombas e Ventiladores. Ed. LTC. 1969.

COSTA, E. C. Ventilação. Editora Edgard Blucher. 2005.

FOX, MCDONALD E PRITCHARD: Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8ª Ed. LTC. 2014.

MACINTYRE. Ventilação Industrial e Controle da Poluição. 2ª Ed. Guanabara. 1990.

MESQUITA. Engenharia de Ventilação Industrial. Ed. Edgard Blucher. 1977.