

XI-003 - ESTUDO EXPERIMENTAL DE PERDA DE CARGA EM CONDUTOS FORÇADOS ATRAVÉS DO PRINCÍPIO DE BERNOULLI

Lígia Conceição Tavares⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Bolsista de Iniciação Tecnológica e Industrial - Fapespa/Cnpq. Grupo de Estudos em Gerenciamento de Água e Reuso de Efluentes (GESA).

Ian Rocha de Almeida⁽²⁾

Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET) de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Lorena Freitas Soares Aguiar⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA).

Igor Campos da Silva Cavalcante⁽⁴⁾

Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA).

Endereço⁽¹⁾: Rua. José de Alencar. Psg. Bom Jesus, 349 – Marambaia - Belém - PA - CEP: 66620-530 - Brasil - Tel: +55 (91) 98319-2335 - e-mail: ligiactavares@ymail.com

RESUMO

O seguinte trabalho faz uma releitura do segmento da engenharia relacionado à hidráulica de tubulações, para demonstrar aspectos práticos que envolvem a análise do escoamento de fluidos incompressíveis em condutos forçados com regime turbulento. Contudo, essa abordagem não visa esgotar este vasto assunto, mas sim enaltecer a importância do estudo de vários aspectos, como a largura da seção do conduto, suas conexões e seus percursos, e sua relação com a perda de carga. Estudo esse importante para o dimensionamento de toda e qualquer obra hidráulica. Assim, determinou-se a perda de carga do experimento através do Teorema do Bernoulli, sendo feito em duas etapas paralelas: O experimental em laboratório com a montagem de uma bancada de estudo e o teórico por meio de cálculos matemáticos pela fórmula de Flamant, e pelo Método dos Comprimentos Virtuais, sendo ao final do experimento comparados os resultados para a validação da resolução experimental, e calculado o erro em forma de porcentagem.

PALAVRAS-CHAVE: Perda de carga, Condutos Forçados, Flamant, Bancada Experimental.

INTRODUÇÃO

Sempre que um líquido escoar no interior de um tubo de um ponto para outro, há uma perda de energia, denominada perda de pressão ou perda de carga. Esta perda de energia é devida ao atrito com as paredes do tubo e devida à viscosidade do líquido em escoamento. Quanto maior for a rugosidade da parede da tubulação, isto é, a altura das asperezas, maior será a turbulência do escoamento e, logo, maior será a perda de carga (MEDEIROS, 2006).

Várias fórmulas empíricas que envolvem esse conceito foram estabelecidas com confiança em diversas aplicações de engenharia tornando o estudo da perda de carga em condutos forçados cada vez mais importante para o entendimento e resolução de problemas, seja dentro de uma indústria ou em uma estação de tratamento de água, desde que envolva a mecânica dos fluidos.

Altura manométrica, vazão, canais, perda de carga e qualidade de água utilizada no sistema, são parâmetros de projeto intimamente relacionados e que justificam a necessidade de conhecimento hidráulico para a irrigação pressurizada, visto que estes influenciam diretamente na eficiência do sistema. Tais parâmetros são imprescindíveis quando se deseja minimizar custos anuais e de implantação de um projeto hidráulico e para isso é necessário contabilizar de maneira exata as perdas de carga totais, correspondentes às perdas de carga contínua e localizadas, contribuindo assim para uma distribuição uniforme da água (CARDOSO, 2007).

Para a determinação da perda de carga do sistema faz-se necessário o conhecimento do Teorema do Bernoulli, que, resumidamente, traz para os fluidos o conceito de conservação de energia. Um líquido ao escorrer de um ponto mais alto para um mais baixo, por exemplo, tem a soma das alturas cinéticas, piezométricas e

geométricas do ponto mais alto, diferente da soma do ponto mais baixo, essa diferença representa o valor da perda de carga, ou seja, perda de energia, dado em metros (NETO, 1998).

Azevedo Neto (1998) afirma que a perda de carga localizada pode ser determinada através de diversos métodos e destaca o Teorema de Borda-Bélanger e o Método dos Comprimentos Virtuais. Além disso, a perda de carga distribuída, da mesma forma da localizada, também pode ser determinada através de vários métodos como o de Hazen-Williams, a “fórmula Universal” também conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach, a fórmula de Fair-Whipple-Hsia e a fórmula de Flamant.

A partir da seleção do método teórico de avaliação da perda de carga e da montagem do projeto piloto de ensaios de perda de carga, o trabalho desenvolveu-se em duas etapas de forma paralela. Realizou-se em laboratório a investigação experimental para a determinação da perda de carga total por meio da diferença de pressão entre a entrada e a saída da tubulação que compõe o projeto piloto. A segunda etapa caracterizou-se pelos testes teóricos da avaliação da perda de carga, onde utilizou-se a fórmula de Flamant para a determinação da perda de carga distribuída e pelo Método dos Comprimentos Virtuais para as perdas de carga localizadas. Ao final dos experimentos e dos testes teóricos foram comparados os resultados de forma que os valores teóricos validassem os experimentais.

A perda de carga, essencialmente, varia de forma proporcional ao comprimento da tubulação, diâmetro da mesma e número de conexões. Ao comprimento da tubulação, em tratando-se de perda distribuída, e ao número de conexões, em tratando-se de perda localizada. Tal afirmação é corroborada pela execução do experimento e cálculos teóricos.

Percebe-se ainda a maior contribuição de perda de carga em relação ao diâmetro da tubulação do que seu comprimento. Isso é evidenciado em trechos com mesmo número de conexões, mesmo comprimento, porém com valores de perda diferentes.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para o estudo e determinação de perda de carga experimental, montou-se uma bancada de perda de carga como mostra a Imagem 01. A bancada foi feita com um total de 10 metros de tubulação, sendo 7 metros de 25 mm; 2 metros de 20 mm; 1 metro de 32 mm. Os acessórios utilizados para o diâmetro de 25 foram: 2 torneiras de plástico, 4 Tês, sendo 2 deles com alargamento para 32 mm e um com redução para 20 mm; 5 curvas, sendo 2 de raio longo e 3 de raio curto; 5 registros de globo; 3 luvas, sendo uma com redução para 20 mm, 1 comum e uma com aumento para 32 mm. Para o diâmetro de 20 mm foram utilizados: 3 registros de globo, 1 Tê, 1 luva com aumento para 32 mm e 1 curva. Para o diâmetro de 32 mm foi utilizado um registro de globo.

Para as tomadas de pressão foram adaptados cap's de 25 mm com roscas perfuradas no fundo e mangueiras de aquário, que por sua vez foram ligadas ao tubo em “U” que continha o líquido manométrico.



Imagem 01: Bancada de Perda de Carga. Fonte: Autores, 2014.

Inicialmente, definiram-se quatro percursos pelos quais passaria o fluxo de água. O primeiro percurso é composto pelos trechos 1, 2, 3, 4 e 9, sendo o trecho 1 (entrada do sistema) e 9 (saída do sistema) de diâmetro de 25 mm e o restante de diâmetro de 20 mm, desta maneira os trechos 1 e 9 compõem todos os percursos. O segundo percurso é composto pelos trechos 1, 2, 5, 8 e 9, sendo o trecho 5 de diâmetro de 32 mm, trecho 8 de 25 mm. O terceiro percurso é composto pelos trechos 1, 6, 7, 8 e 9 de diâmetros de 25 mm. O quarto percurso é constituído pelos trechos 1, 6, 7, 5, 3, 4 e 9. A Imagem 02, ilustra os percursos e seus respectivos trechos.

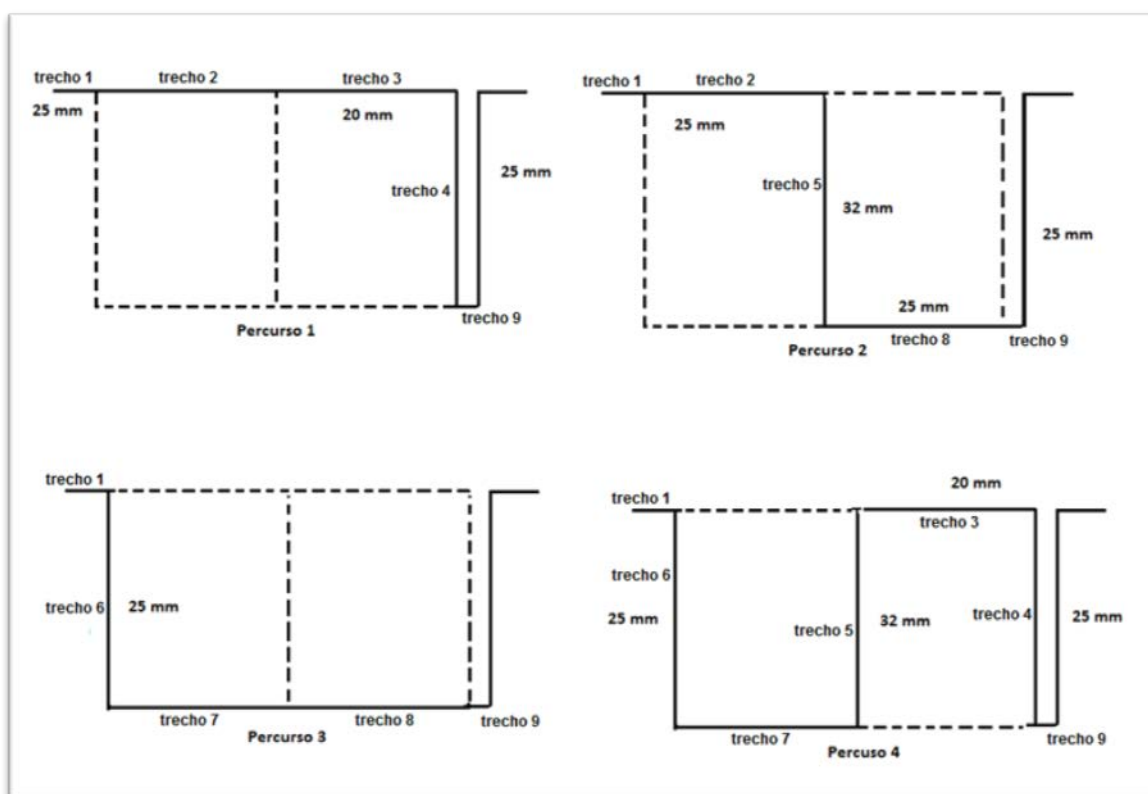


Imagem 02: Percursos e trechos da Bancada de Perda de Carga. Fonte: Autores, 2014.

Em seguida, utilizou-se um Tubo em U para medir a diferença de pressão entre o início e o fim de cada percurso. Nivelou-se o fluido manométrico, tetrabromoetano ($C_2H_2Br_4$), de densidade $2,77 \text{ g/cm}^3$ (valor encontrado em laboratório).

No manômetro de Tubo em U, nivelou-se em uma mesma altura (em centímetros), de referência, a água e o líquido, retirando-se o ar contido na mangueira para que assim a pressão observada fosse minimamente afetada por essa variável. Um ponto a se considerar é que as cotas da entrada e da saída da tubulação possuem o mesmo valor e o mesmo diâmetro, dessa forma a medição da pressão nesses pontos pelo tubo em U equivale ao valor de perda de carga baseando-se no princípio de Bernoulli (NETO, 1998).

Em seguida, realizou-se a determinação da perda de carga para o primeiro percurso. Inicialmente abriram-se os registros de globo 1, 2, 3, 4 e 9 contidos do sistema, e fecharam-se os registros de globo 6, 5 e 8. Esses registros de globo são correspondentes a cada trecho. Logo após, esperou-se a pressão exercida sobre o fluido manométrico se estabilizar no tubo em U para que assim fosse feito a determinação da perda de carga a partir da diferença de altura da água com o tetrabromoetano (em centímetros).

Fez-se necessária a transformação de cm de $C_2H_2Br_4$ para metro de coluna de água (mca), com base na experiência de Torricelli constatado no roteiro do Professor Geraldo Pereira e o Professor Carlos Melo, da UFLA (Universidade Federal de Lavras, MG), a transformação de cm de tetrabromoetano para mca pode ser realizada através da Equação 1:

$$H_{\text{água}} = \frac{\delta_{C_2H_2Br_4} \cdot H_{C_2H_2Br_4}}{\delta_{\text{água}}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

$H_{\text{água}}$ = altura da água (mca);

$\delta_{C_2H_2Br_4}$ = densidade do tetrabromoetano (2,77 g/cm³);

$H_{C_2H_2Br_4}$ = altura do tetrabromoetano (m);

$\delta_{\text{água}}$ = densidade da água (1,00 g/cm³);

Obtendo-se desta maneira a altura da água que correspondente à perda de carga. O mesmo método foi aplicado aos outros percursos a fim de se obter o valor de perda de carga.

METODOLOGIA TEÓRICA

A fórmula de Flamant foi selecionada para o cálculo da perda de carga distribuída devido ao fato de que, segundo Coelho e Baptista (2012), ser originalmente testada para tubos de parede lisa de uma maneira geral, e posteriormente mostrou ajustar-se bem aos tubos de plástico de pequenos diâmetros como os empregados em instalações hidráulicas prediais de água fria, tubos esses empregados no referente estudo. A fórmula desta apresenta-se descrita abaixo na Equação 2.

$$J = 4 \cdot b \cdot \frac{v^{1,75}}{D^{1,25}} \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

J = perde de carga em (m/m);

b = 0,00012 para canos de plástico (pvc);

v = velocidade do escoamento (m/s);

D = diâmetro da tubulação.

O diâmetro e a vazão já eram conhecidos, logo pôde-se determinar a velocidade pela equação da continuidade.

Para a determinação da perda de carga localizada foi utilizado o método do comprimento virtual, encontrado com base na Tabela 01 a seguir que apresenta o número de diâmetros para cada conexão. O valor do comprimento virtual, número de diâmetros, é multiplicado pelo diâmetro da tubulação. Tal número fictício é somado ao comprimento da tubulação, de mesmo diâmetro, de forma que o valor encontrado para a perda de carga abranja essa singularidade.

Tabela 01 – Perdas localizadas expressas em diâmetros de canalização retilínea (comprimento virtual).

Peça	Comprimento virtuais expressos em diâmetros (números de diâmetros)
Ampliação gradual	12
Cotovelo de 90°	45
Cotovelo de 45°	20
Curva de 90°	30
Curva de 45°	15
Entrada normal	17
Entrada de Borda	35
Junção	30
Redução gradual	6
Registro de gaveta, aberto	8
Registro de globo, aberto	350
Registro de ângulo, aberto	170
Saída de canalização	35
Tê, passagem direta	20
Tê, saída de lado	50
Tê, saída bilateral	65
Válvula-de-pé e crivo	250
Válvula de retenção	100

Fonte: Manual de Hidráulica – Azevedo Netto (1998).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

1º PERCURSO (TRECHOS 1, 2, 3, 4 E 9)

De acordo com o procedimento experimental realizado na bancada, para uma vazão de 0,19 L/s constatou-se que a diferença de altura no tubo em U foi de 20 cm de tetrabromoetano ($C_2H_2Br_4$) referindo-se a perda de carga total encontrada. Resultando em um valor de 0,554 mca através da equação 1. Esta transformação foi feita para todos os percursos.

2º PERCURSO (TRECHOS 1, 2, 5, 8 E 9)

A diferença de altura no tubo em U foi de 12,5 cm de tetrabromoetano para uma vazão de 0,18 L/s, referindo-se a perda de carga encontrada, ou seja, 0,346 mca.

3º PERCURSO (TRECHOS 1, 6, 7, 8 E 9)

A diferença de altura no tubo em U foi de 12 cm de tetrabromoetano para uma vazão de 0,17 L/s, referindo-se a perda de carga encontrada, ou seja, 0,332 mca.

4º PERCURSO (TRECHOS 1, 6, 7, 5, 3, 4 E 9)

A diferença de altura no tubo em U foi de 29,2 cm de tetrabromoetano para uma vazão de 0,18 L/s, referindo-se a perda de carga encontrada, ou seja, 0,809 mca.

A Tabela 02 abaixo apresenta uma síntese dos resultados experimentais obtidos durante as medições de perda de carga para cada vazão encontrada. Os diferentes valores de vazão são justificados devido ao fornecimento de água no laboratório ser realizado pela concessionária da universidade, dessa forma, estando sujeito a constantes oscilações.

Tabela 02: Síntese dos resultados experimentais obtidos.

Percorso	Vazão (L/s)	Hf _{experimental} (mca)
1	0,19	0,554
2	0,18	0,346
3	0,17	0,332
4	0,18	0,809

RESULTADOS TEÓRICOS

Através de cálculos matemáticos utilizando o método teórico descrito, determinou-se os valores de perda de carga para cada percurso a partir dos valores de vazão encontrados durante o procedimento experimental. Os resultados estão tabelados a seguir.

Tabela 03: Síntese dos resultados teóricos obtidos.

Percurso	Vazão (L/s)	Distr	Local	Hft (m)
1	0,19	0,105	0,557	0,662
2	0,18	0,057	0,501	0,558
3	0,17	0,039	0,241	0,280
4	0,18	0,089	0,862	0,952

A fim de possibilitar uma melhor discussão a cerca dos valores teóricos, calculou-se a perda de carga localizada, distribuída e total para o mesmo valor de vazão (0,18 L/s) conforme mostrado na tabela 04.

Tabela 04: Síntese dos resultados experimentais obtidos.

Percurso	Distr	Local	Hft (m)
1	0,095	0,507	0,602
2	0,057	0,501	0,558
3	0,043	0,266	0,309
4	0,089	0,862	0,952

DISCUSSÕES

Conforme o observado no decorrer do estudo, tanto teórico quanto experimental, pôde-se concluir e comprovar que a perda de carga é proporcional ao aumento do comprimento da tubulação, da variação do diâmetro da mesma e do número de conexões que a compõe.

O aumento do valor da perda de carga localizada é resultante da quantidade de conexões assim como a perda de carga distribuída varia de acordo com o comprimento da tubulação. Ao comparar-se as perdas de cargas localizadas nota-se que quanto maior o número de conexões, maior o valor da perda de carga, pois como foi analisado, o Percurso 4 que apresenta 17 conexões e perda de carga localizada para a vazão teórica de 0,18 L/s (Tabela 04) de 0,862 m, sendo a maior de todos os percursos, enquanto que o Percurso 3, por exemplo, que possuía 9 conexões apresentou a menor perda de carga localizada para a mesma vazão, com um quantitativo de 0,266 m.

Conceitualmente, a perda de carga distribuída eleva-se quanto maior o comprimento da tubulação. Contudo, verificou-se que, para uma mesma vazão, a perda de carga distribuída do Percurso 1 (0,095 m) foi maior do que a do Percurso 4 (0,089 m), que possuía maior extensão. Tal fato pode ser explanado pelo menor comprimento que o líquido precisou atravessar no trecho com diâmetro de 20 mm pelo Percurso 4 em relação ao Percurso 1, onde a maior parte do mesmo é composta pelos trechos de menor diâmetro. Assim, pode-se afirmar que para esse caso o diâmetro menor influenciou em uma maior perda de carga distribuída em detrimento do comprimento da tubulação. O mesmo ocorre quando compara-se os Percursos 2 e 3, onde, para a mesma vazão, a perda de carga distribuída no Percurso 2 é maior do que no Percurso 3, devido a variação de diâmetros no 2, enquanto que no 3 o diâmetro permaneceu-se constante (25 mm).

É interessante salientar-se que nos Percursos 1, 2 e 3 o deslocamento do fluido e a quantidade de conexões é a mesma, contudo as suas perdas de carga distribuída e localizada não assemelham-se experimentalmente nem teoricamente. Isso se deve ao fato de que os valores das perdas de carga localizadas e distribuídas relacionam-se com o diâmetro e o comprimento da tubulação no caso do cálculo pelo método de comprimentos virtuais, usado no presente trabalho. Isso faz com que os valores de perdas de carga diferenciem-se para cada percurso, como já foi dito e agora comprovado experimentalmente.

No Percurso 3 não há variação de diâmetro, portanto apresenta a menor perda de carga total. O Percurso 2 apresentou uma perda de carga total maior que a do Percurso 3, justificável pelas alterações de diâmetro, já que quanto menor essa grandeza, maior a perda de carga. Fato este que explica o fato de o Percurso 2 ter uma

menor perda de carga total quando comparado ao Percurso 1, que também possui variação no diâmetro, no entanto uma variação menor de diâmetros, o que gera uma perda de carga maior em comparação com o Percurso 2 que atravessou o trecho de maior diâmetro, diminuindo a sua perda de carga total.

Como visto, o percurso 4 foi o que apresentou a maior perda de carga total quando comparado aos Percursos 1, 2 e 3, devido ao maior deslocamento, maior número de peças, conexões, variação do diâmetro, variação das cotas, conforme o esperado.

Depois de obtido o valor da perda de carga experimental, calculou-se para todos os trechos os valores de perda de carga teórica para as vazões identificadas em cada procedimento experimental, afim de conhecer-se os erros percentuais, a partir da seguinte formulação.

$$\text{Erro (\%)} = \left(\frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Experimental}}{\text{Valor teórico}} \right) * 100\% \quad \text{equação (3)}$$

Para o Percurso 1, através da formulação apresentada, encontrou-se um erro aproximado de 16%. Para o Percurso 2, o erro encontrado foi de 38%, e nos Percursos 3 e 4 foram de, respectivamente 19% e 15%.

Quanto a esses erros encontrados destacam-se alguns possíveis fatores que podem ter alterado os resultados experimentais justificando, assim, os erros. Tais fatores podem compreender: impurezas presentes na água que alteram sua densidade, dureza, turbidez, materiais em suspensão, viscosidade, entre outros, que influenciam no aumento do atrito entre as paredes do tubo e as partículas presentes na água, causando maior turbulência, além do valor teórico da densidade da água utilizado nos cálculos considerar a água pura, diferindo-se da densidade real utilizada; variação da pressão da água nas instalações prediais (causando variação na vazão da mesma que sai pela torneira e percorre a bancada de perda de carga em estudo), visto que as águas provêm da rede de abastecimento da universidade; presença de bolhas de ar na tubulação que induzem a uma pressão diferente na água, influenciando na leitura do tubo em U; erro de manipulação e montagem da bancada (como um possível excesso de cola dentro da tubulação que compõe a bancada), dentre outros.

CONCLUSÕES

Conforme observado no decorrer do estudo, pode-se concluir que a perda de carga é proporcional ao aumento do comprimento da tubulação, da variação do seu diâmetro e do aumento do número de conexões. O aumento da perda de carga localizada é resultante da quantidade de conexões assim como a perda de carga distribuída varia de acordo com o comprimento da tubulação. Podemos observar que os diâmetros menores influenciam em uma maior perda de carga em vez do maior comprimento, no experimento em questão.

É interessante salientar-se que tanto o Percurso 1, quanto o 2 e o 3 apresentam o mesmo número de conexões e o mesmo deslocamento, mas suas perdas de carga experimentais totais não são iguais. Isso deve-se ao fato do valor da perda de carga relacionar-se com o diâmetro da tubulação, que difere em cada percurso. Como visto, o percurso 4 foi o que apresentou a maior perda de carga total quando comparado aos percursos 1, 2 e 3, devido ao maior deslocamento, número de peças, conexões, variação do diâmetro, variação das cotas, conforme o esperado.

Diante disso, foram demonstradas de maneira satisfatória a relação da perda de carga com os aspectos do dimensionamento hidráulico, tais como a largura e as conexões das tubulações, de forma experimental, em condutos forçados. Quando executados os cálculos teóricos afim de comparar com os valores experimentais, pôde-se constatar que os resultados do experimento realizado ficaram dentro do esperado, sendo assim, comprovou-se com êxito a perda de carga em condutos forçados.

Percebeu-se a grande importância, na engenharia, da avaliação eficaz das perdas de carga durante a execução do projeto hidráulico, pois a quantidade da mesma é diretamente proporcional ao custo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO NETO, J. M. Manual de Hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
2. CARDOSO, G. G. de Guimarães. Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre polietileno de pequeno diâmetro. 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.
3. MEDEIROS, F. I de. MODELO DE ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES COM INTERFACE GRÁFICA. RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. INPE. 2006.
4. PEREIRA, G. M.; MELLO, C. R. Sistemas de Unidades. Disponível em: <http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/1_aula%20pratica%201.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2014.