

ROTINA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO HIDRÁULICO DE VÁLVULAS DE AR DURANTE ESCOAMENTO TRANSIENTE EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Leonardo Morimoto¹; Alexandre Kepler Soares²

RESUMO – Diversos sistemas hidráulicos da atualidade funcionam por meio de condutos forçados. Em decorrência de manobras de válvulas durante a operação da adutora ou mesmo por interrupção súbita do sistema elevatório por eventual queda de energia, ocorre o fenômeno do transitório hidráulico, causando subpressões e sobrepressões cuja magnitude pode comprometer a segurança do sistema. Observa-se a existência de subpressão em trechos de cota elevada, recomendando-se instalação de uma ventosa tríplice função para expulsão e admissão de ar do interior do tubo, estabilizando-se a pressão em pontos críticos da adutora. Este trabalho visa a modelagem, através de um código em *Python*, de um sistema de bombeamento que sofre uma parada repentina devido à queda de energia, equipando-se a adutora com uma ventosa posicionada estrategicamente em um ponto alto da tubulação. Os resultados serão validados através de simulações realizadas no software Allievi, que permite analisar vários parâmetros do sistema durante o transitório hidráulico. Os resultados obtidos a partir da simulação em *Python* possuem boa correlação com o Allievi, embora seja possível notar algumas diferenças, que serão melhor abordadas ao longo deste trabalho.

ABSTRACT– Several hydraulic systems nowadays work throughout pressure pipes. As a result of valve maneuvers during the operation of the water supply system or even sudden interruption of the pumping system due to a possible power outage, the phenomenon of hydraulic transient occurs, causing the waterhammer effect whose magnitude can compromise the safety of the system. It is observed the existence of low pressures in high elevation sections, recommending the installation of an air valve for expulsion and admission of air from inside the tube, stabilizing the pressure at critical points of the pipeline. This work aims to model a pumping system that suffers a sudden stop due to a power outage, equipping the pipeline with an air valve strategically located at a high point in the pipeline. The results will be validated throughout simulations carried out in the software Allievi, which allows the analysis of several parameters of the system during the hydraulic transient. The results of the *Python* simulation have a good correlation with Allievi, although it is possible to realize some differences between the two models, which will be better explained in this work.

Palavras-Chave – Ventosa, Transitório hidráulico, Subpressão, Sobrepressão.

1) Universidade de Brasília. (61) 99214-8983 morimoto.leonardo@gmail.com

2) Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília. E-mail: alexandre.kepler@unb.br

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um sistema hidráulico que se baseia em condutos forçados deve envolver tanto a análise do regime permanente, quanto o regime transitório, decorrente de manobras ou paradas súbitas de um sistema de bombeamento. Filion e Karney (2002a) citam três questões práticas que motivam os estudos sobre os transitórios hidráulicos em sistemas de distribuição de água: (i) melhor proteção contra os efeitos dos transientes; (ii) otimizar os algoritmos de comandos dos dispositivos de controle nas adutoras e (iii) melhorar os métodos numéricos empregados na modelagem dos transitórios hidráulicos para que possam ser utilizados para outros fins como localização de vazamentos, calibração da rugosidade e outros (Soares, 2007).

Desta forma, observa-se a necessidade de uma análise quantitativa dos fenômenos supracitados. Neste trabalho é empregado o método numérico das características cujos resultados serão comparados, para fins de validação do modelo, com simulações realizadas no *software* Allievi, desenvolvido pelo ITA da Universitat Politecnica de Valencia, Espanha. O enfoque principal será na utilização da válvula ventosa tríplice função como medida mitigadora do golpe do aríete proveniente da parada súbita de uma bomba instalada em uma adutora.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição do sistema hidráulico

O sistema proposto para a simulação é composto por 2 reservatórios (1 de montante e 1 de jusante), um conjunto motor bomba, uma válvula ventosa tríplice função e uma tubulação com o perfil indicado na Figura 1.

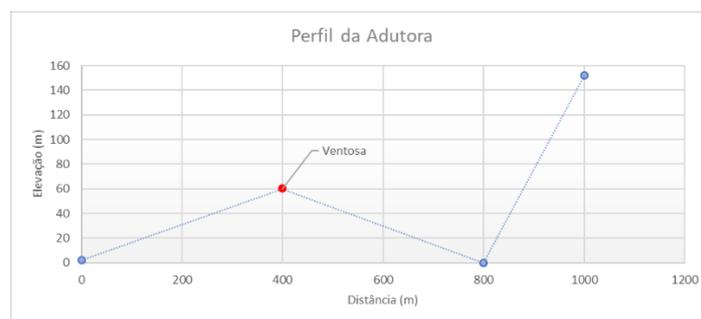


Figura 1- Perfil da adutora do sistema proposto

A altura manométrica da bomba é de 158m, uma potência de 150 kW, rotação de 1750 rpm, vazão bombeada de 70 L/s, rendimento de 72,33% e momento polar de inércia de 4,03 kg.m². A cota do reservatório de montante é 2m, enquanto a cota do reservatório de jusante é de 152m. A rugosidade

absoluta considerada das tubulações foi de 0,1mm com diâmetro interno de 300mm, considerando-se celeridade de 1000m/s e com um comprimento horizontal total de 1000m.

O sistema foi modelado no *software* Allievi para a obtenção de valores de referência para os resultados obtidos a partir da modelagem descrita nos tópicos 2.2 e 2.3.

2.2. O Método das Características e o Modelo da Coluna Elástica

A modelagem hidráulica do sistema supramencionado foi baseada no modelo da coluna elástica e no método das características (Chaudhry, 2014; Wylie e Streeter, 1993), sendo o maior desafio para a modelagem estabelecer as condições de contorno inerentes ao sistema como a parada súbita do funcionamento da bomba, reservatórios e, principalmente, a válvula ventosa, cerne deste trabalho.

Primeiramente, vale ressaltar que o fator de atrito foi considerado constante ao longo de toda a tubulação, pois deu-se enfoque às condições de contorno dos diversos elementos que compõe o sistema hidráulico. Os detalhes do desenvolvimento do método numérico em questão são mostrados em (Lister, 1960; Streeter e Lai, 1962; Perkins et al. 1964 Abbot, 1966; Evangelisti, 1969; Gray, 1953) e são baseados em equações que descrevem o escoamento ao longo dos condutos e que se adaptam de acordo com as condições de contorno geradas por elementos especiais como válvulas, bombas e reservatórios.

Para a obtenção dos valores de carga piezométrica (H) e vazão (Q) na adutora ao longo do tempo, é necessário dividir a tubulação em diversos nós, os quais possuirão valores de pressão e vazão. Inicialmente, calcula-se o regime permanente, atribuindo a cada nó um valor de H e Q , que serão utilizados no próximo passo de tempo (iteração). Para o cálculo de H e Q na próxima iteração, utiliza-se os valores de H e Q do passo de tempo anterior dos nós imediatamente à montante e jusante do nó analisado. A Figura 2 ilustra um exemplo de tubulação dividida em 10 nós em que a carga no passo de tempo 1 (H_p) é obtida a partir das cargas dos pontos a montante (H_A) e a jusante (H_B) no passo de tempo 0 (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007). Vale ressaltar que as tubulações do sistema descrito no tópico 2.1 deste trabalho serão modeladas da forma supracitada.

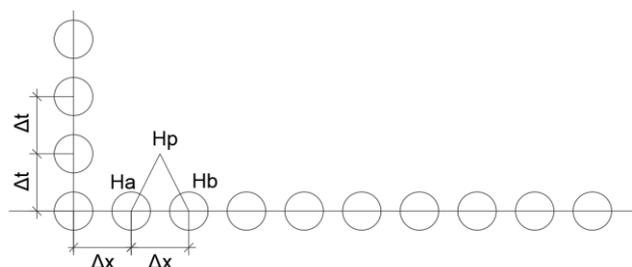


Figura 2 – Método das características

A simulação e a obtenção dos parâmetros de pressão e vazão ao longo das tubulações se dão a partir da resolução das equações (1) e (2) apresentadas a seguir, que representam a forma simplificada das equações de momento e de continuidade (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007):

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad (1)$$

$$L_1 = \alpha^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Em que $R = \frac{f}{2DA}$, sendo f o fator de atrito da Fórmula Universal, D o diâmetro da tubulação, A a área da seção transversal, H a carga piezométrica, Q a vazão, a a celeridade da onda de pressão, t o tempo e x a extensão da tubulação (distância). Após a resolução das equações (1) e (2), obtém-se as equações (3) e (4), utilizadas para se determinar as vazões e cargas piezométricas em diferentes pontos da adutora (Chaudhry, 2014):

$$Q_p = C_p - C_a H_p \quad (3)$$

$$Q_p = C_n + C_a H_p \quad (4)$$

A equação (3) representa a característica positiva enquanto a equação (4) representa a característica negativa. Vale ressaltar que $C_a = \frac{gA}{a}$ (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007). C_p e C_n podem ser calculados a partir das equações (5) e (6).

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - R\Delta t Q_A |Q_A| \quad (5)$$

$$C_n = Q_B + \frac{gA}{a} H_B - R\Delta t Q_B |Q_B| \quad (6)$$

Em que os parâmetros do passo de tempo anterior são: Q_A a vazão do nó de montante, Q_B é a vazão do nó de jusante, H_A é a carga piezométrica do nó de montante e H_B é a carga piezométrica do nó de jusante. Os valores de Q_p e H_p são a vazão e carga piezométrica respectivamente no nó analisado ao final do passo de tempo (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007).

2.3. Modelagem da Ventosa Tríplice Função

Quando a pressão no interior da adutora atinge um valor menor do que um valor de referência, a válvula ventosa tríplice função permite a entrada de ar no sistema hidráulico. Tal evento tende a manter a pressão estável, evitando-se a formação de vácuo. Conforme o andamento do regime transiente, a pressão volta a níveis aceitáveis (cota piezométrica acima da cota da ventosa) e a ventosa expulsa o ar aprisionado (Chaudhry, 2014).

A condição de contorno criada pela ventosa baseia-se, principalmente, na concepção apresentada no parágrafo anterior, entretanto vale ressaltar que é postulado (Chaudhry, 2014):

- O fluxo de ar dentro do tubo é isentrópico (adiabático, sem atrito, sem ondas de choque ou de expansão);
- O ar permanece no local da válvula ventosa e não é “carregado” pelo fluxo de água;
- A expansão ou contração do ar aprisionado é isotérmico.

O nó em que se encontra a ventosa é dividido em dois trechos (montante e jusante), devido a vazão de montante e jusante da ventosa poderem assumir valores distintos. A carga piezométrica, no entanto, terá o mesmo o valor à montante e jusante, caso a perda de carga na ventosa seja muito pequena ou desprezível (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007).

Assim, considerando uma ventosa em um determinado ponto i da adutora, as equações das características positiva e negativa das seções $(i, n+1)$ e $(i+1, 1)$ são respectivamente (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007):

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_P - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad (7)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_P - C_{a_i} H_{P_{i+1,1}} \quad (8)$$

Assumindo-se que a perda de carga na válvula seja desprezível (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007):

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad (9)$$

Sendo m_a a massa de ar aprisionado na tubulação no início do passo de tempo, para um Δt suficientemente pequeno, a massa de ar no final do passo de tempo (m_{pa}) será (Chaudhry, 2014) (Soares, 2007):

$$m_{pa} = m_a + \frac{dm_a}{dt} \Delta t \quad (10)$$

Em que dm_a/dt é a taxa de admissão de ar para o interior do sistema. O volume de ar aprisionado na tubulação ao final da iteração é mostrado na equação (11) (Chaudhry, 2014).

$$V_{Par} = C_{ar} + 0,5\Delta t(2C_{a_i})H_{P_{i,n+1}} \quad (11)$$

Em que $C_{ar} = V_{ar} + 0,5\Delta t(C_n + Q_{i+1,1} - C_P - Q_{i,n+1})$. Para uma expansão ou contração isotérmica do ar aprisionado, tem-se (Chaudhry, 2014):

$$pV_{Par} = m_{pa}RT \quad (12)$$

Em que R é a constante universal dos gases ideais e T é a pressão absoluta no interior da tubulação. A carga piezométrica ao final do passo de tempo é calculada segundo a equação (13), isolando-se o termo $H_{P_{i,n+1}}$ (Chaudhry, 2014).

$$p = \gamma(H_{P_{i,n+1}} - z + H_b) \quad (13)$$

A equação (13) fornece o valor da pressão absoluta p (Chaudhry, 2014).

$$\left(m_a + \frac{dm_a}{dt} \Delta t\right) RT = p[C_{ar} + 0,5\Delta t(2C_a) \left(\frac{P}{\gamma} + z - H_b\right)] \quad (14)$$

Entretanto, na equação (14) há duas incógnitas: $\frac{dm_a}{dt}$ e p . A taxa de variação de massa dependerá da própria pressão absoluta, sendo possíveis 4 cenários, conforme Tabela 1 (Streeter, 1966).

Tabela 1- Taxa de variação de massa de ar através da ventosa

Taxa de variação da massa	Caso
$\frac{dm_a}{dt} = 0,686C_aA \frac{p_a}{\sqrt{RT}}$	Admissão de ar $p \leq 0,528 p_a$
$\frac{dm_a}{dt} = C_aA \sqrt{7p_a\rho_a \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1,4286} - \left(\frac{p}{p_a}\right)^{1,714}}$	Admissão de ar $0,528 p_a < p < p_a$
$\frac{dm_a}{dt} = -C_aA p \sqrt{\frac{7}{RT} \left(\frac{p_a}{p}\right)^{1,4286} - \left(\frac{p_a}{p}\right)^{1,714}}$	Expulsão de ar $p_a < p < 1,894 p_a$
$\frac{dm_a}{dt} = -0,686C_aA \frac{p}{\sqrt{RT}}$	Expulsão de ar $p \geq 1,894 p_a$

Os parâmetros $H_{P_{i,n+1}}$, V_{Par} , m_{Pa} , $H_{P_{i+1,1}}$, $Q_{P_{i,n+1}}$ e $Q_{P_{i+1,1}}$ podem ser determinados pelas equações (13), (11), (10), (9), (7) e (8) respectivamente. A pressão absoluta, obtida a partir das equações da Tabela 1 (Streeter, 1966), foi calculada a partir do método da bissecção, utilizando-se a linguagem de programação *Python 2.7.10*.

3. RESULTADOS

3.1. Shut-off do sistema elevatório

Inicialmente foi simulada a parada repentina da bomba devido a uma queda de energia. A Figura 3 ilustra a carga na bomba durante o transiente hidráulico causado pela parada súbita do funcionamento do sistema. Observa-se notória conformidade entre o Allievi e o modelo desenvolvido em *Python*.

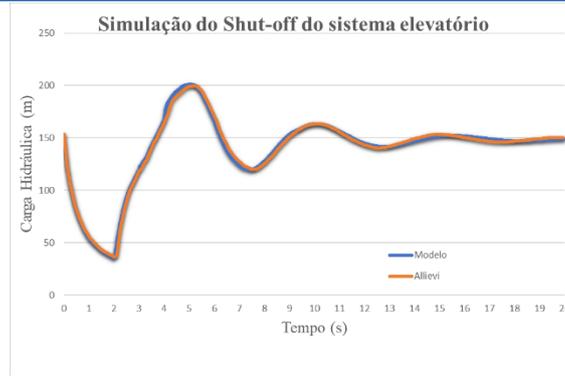


Figura 3 - Carga hidráulica na bomba durante o transiente hidráulico

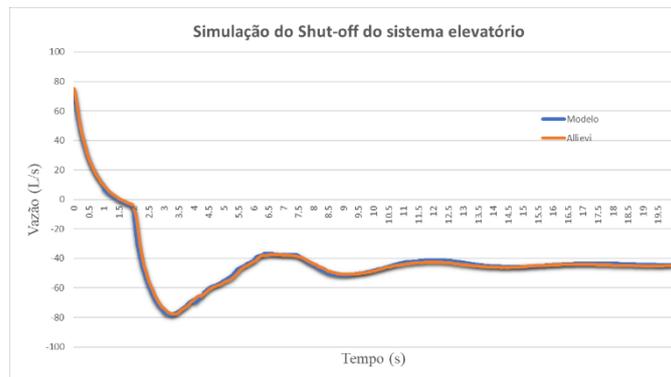


Figura 4- Vazão na bomba durante o transiente hidráulico

A Figura 4 a seguir ilustra o resultado da simulação para a vazão escoando na bomba após o shut-off.

A Figura 5 ilustra a rotação do rotor da bomba.

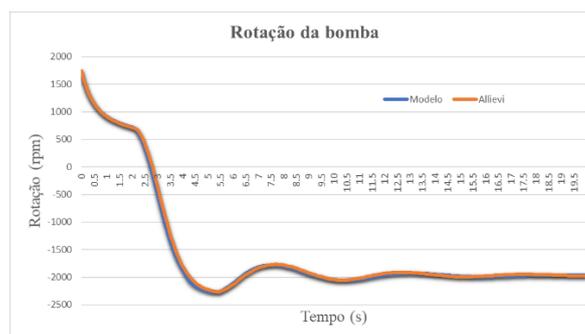


Figura 5 - Rotação da bomba durante o transiente hidráulico

3.2. Efeitos da válvula ventosa

Note que na Figura 1 foi alocada uma ventosa em um ponto alto da adutora, onde verifica-se uma região em que haveria pressões negativas.

Assim, modelou-se a válvula ventosa tríplice função para evitar pressões negativas. A Figura 6 ilustra o resultado da modelagem no *software* Allievi e do código em *Python* utilizando o método das

características e a modelagem da ventosa explicada no tópico 2.3. Nota-se alguma divergência em alguns pontos do gráfico, mas um comportamento igual para as duas simulações.

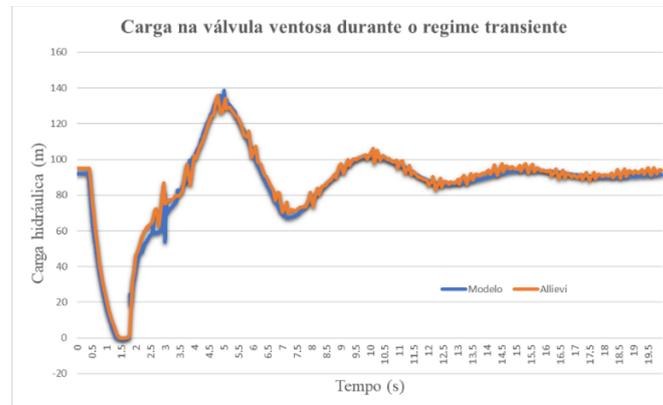


Figura 6 – Carga hidráulica na ventosa durante o transitório hidráulico

As vazões de admissão e expulsão de ar também apresentaram alguma divergência entre seus resultados, possivelmente causado pelas diferentes discretizações e passos de tempo utilizados no modelo da ventosa e nos cálculos do Allievi. O volume de ar no interior da tubulação durante o regime transiente é mostrado na Figura 8.

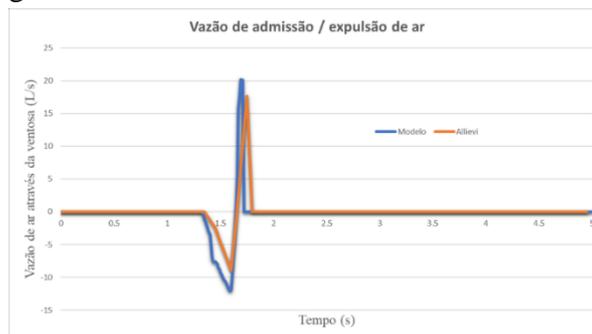


Figura 7 - Vazões de admissão e expulsão de ar

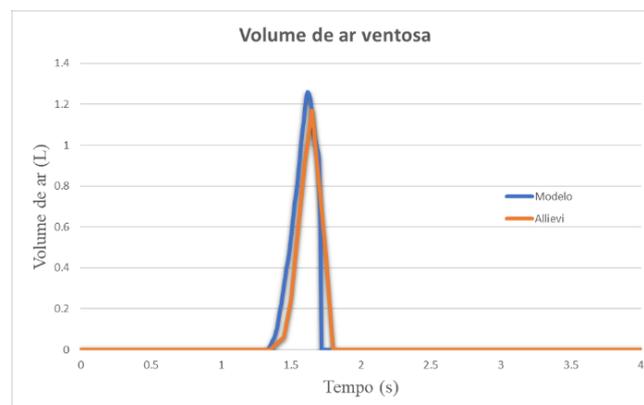


Figura 8 - Volume de ar no interior da tubulação

A Figura 7 ilustra as vazões de admissão e expulsão de ar através da ventosa.

Os efeitos da ventosa foram observados ao longo de toda a adutora e percebe-se que mesmo o efeito da ventosa sendo pontual, as consequências são boas para toda a tubulação, eliminando-se quaisquer trechos em que a linha piezométrica esteja abaixo da cota da adutora.

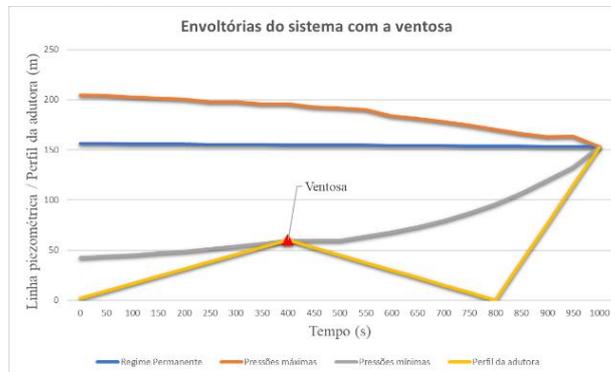


Figura 9- Cargas do sistema adutor com os efeitos da ventosa

4. CONCLUSÃO

A correlação entre o modelo proposto em *Python* apresentou significativa correspondência com os resultados do Allievi, tendo algumas divergências na modelagem da ventosa devido, provavelmente, a diferenças de discretização ou a utilização de diferentes métodos numéricos para a resolução de diversas equações ao longo do método.

5. BIBLIOGRAFIA

CHAUDHRY, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. 3 ed. Columbia, South Carolina, USA: Springer.

DINIZ, A. B. N; SOARES, A. K. (2019). “Modelagem e análise do comportamento dinâmico de ventosas tríplice função em linhas de recalque”, XXIII SBRH, ABRHidro, Foz do Iguaçu.

SOARES, A. K. (2007). “Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório”, Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

WYLIE, E. B; STREETER, V. L. (1978). *Fluid transients*, USA: McGraw-Hill.

6. ROTINA COMPUTACIONAL

```

if Hp < 60 or (Vair*1000) > 0.01:
    Cair = Vair + (0.5*dt*(Cn + (Qventosaj[0]) - Cp - (Qventosam[0])))
    p = gama*(Hp - z + Hbaro)
    x = p
    p = Symbol("p")
    cont = 0
    validacao = 100
    resultado = 0
    valor_a0 = 0.0
    valor_b0 = 0.528*pa
    while abs(validacao) > 0.001:
        media = (valor_a0 + valor_b0)/2
        funcao=((p*((Cair)+(0.5*dt)*(2*Ca)*(p/gama)+z.Hbaro)))/((ma+((0.686*Cd*Avadm)*(pa/((Rgas*Ta)**0.5)))*dt)*Rgas*Ta))-1)
        madt = (0.686*Cd*Avadm)*(pa/((Rgas*Ta)**0.5))*(p/p)
        valor_m = float(funcao.subs(p,valor_a0))
        funcao_BS = funcao.subs(p,media)
        funcao_BS = float(funcao_BS)
        if (valor_m) * (funcao_BS) > 0:
            valor_a0 = media
        elif (valor_m * funcao_BS) < 0:
            valor_b0 = media
        cont += 1
        x = media
        if cont > 300:
            break
        validacao = float(funcao.subs(p,media))
        if abs(validacao) < 0.001:

```

```

resultado = 1
cont = 0
valor_a0 = pa*0.528
valor_b0 = 1.0*pa
while abs(validacao) > 0.001:
    if resultado == 1:
        break
    media = (valor_a0 + valor_b0)/2
    funcao=((p*(Cair)+(0.5*dt)*(2*Ca)*(p/gama)+z-Hbaro))/((ma+((Cd*Avadm)*((7*pa*roa)*((p/pa)**1.4286)-(p/pa)**1.714)))*0.5)*dt)*Rgas*Ta)-1)
    dmdt = Cd*Avadm*((7*pa*roa)*((p/pa)**1.4286)-(p/pa)**1.714))*0.5)
    valor_m = float(funcao.subs(p,valor_a0))
    funcao_BS = funcao.subs(p,media)
    if abs(valor_b0 - valor_a0) < 0.01:
        break
    funcao_BS = float(funcao_BS)
    if (valor_m) * (funcao_BS) > 0:
        valor_a0 = media
    else:
        valor_b0 = media
    cont += 1
    if cont > 300:
        break
    x = media
    validacao = float(funcao.subs(p,media))
    if abs(validacao) < 0.001:
        resultado = 1
cont = 0
valor_a0 = pa*1.0
valor_b0 = 1.894*pa
while abs(validacao) > 0.001:
    if resultado == 1:
        break
    media = (valor_a0 + valor_b0)/2
    funcao=((p*(Cair)+(0.5*dt)*(2*Ca)*(p/gama)+z-Hbaro))/((ma+((Cd*Avadm)*((7/(Rgas*Ta))*((pa/p)**1.4286)-(pa/p)**1.714)))*0.5)*dt)*Rgas*Ta)-1)
    dmdt = -(Cd*Avexp*p)*((7/(Rgas*Ta))*((pa/p)**1.4286)-(pa/p)**1.714))*0.5)
    valor_m = float(funcao.subs(p,valor_a0))
    funcao_BS = funcao.subs(p,media)
    funcao_BS = float(funcao_BS)
    if (valor_m) * (funcao_BS) > 0:
        valor_a0 = media
    else:
        valor_b0 = media
    x = media
    validacao = float(funcao.subs(p,media))
    cont += 1
    if cont > 300:
        break
    if abs(validacao) < 0.001:
        resultado = 1
cont = 0
valor_a0 = pa*1.894
valor_b0 = 5.0*pa
while abs(validacao) > 0.001:
    media = (valor_a0 + valor_b0)/2
    funcao = ((p*(Cair) + (0.5*dt)*(2*Ca)*(p/gama) + z - Hbaro))/((ma + ((-0.686*Cd*Avadm)*p/((Rgas*Ta)**0.5))*dt)*Rgas*Ta)-1)
    dmdt = -(0.686*Cd*Avexp)*pa/((Rgas*Ta)**0.5)*p/p)
    valor_m = float(funcao.subs(p,valor_a0))
    funcao_BS = funcao.subs(p,media)
    funcao_BS = float(funcao_BS)
    if (valor_m) * (funcao_BS) > 0:
        valor_a0 = media
    else:
        valor_b0 = media
    x = media
    validacao = float(funcao.subs(p,media))
    validacao = float(funcao.subs(p,media))
    cont += 1
    if cont > 300:
        break
    if abs(validacao) < 0.001:
        resultado = 1
dmdt = float(dmdt.subs(p,x))
p = x
xcalc = 0
Hp = ((p/gama) + z - Hbaro)
Qpm = Cp - (Ca*Hp)
Qpj = Cn + (Ca*Hp)
mpa = ma + (dmdt*dt)
Vairp = (mpa*Rgas*Ta)/x
ma = mpa
if ma < 0:
    ma = 0
Qair = (Vairp - Vair) / dt
Vair = Vairp
if Vair < 0:
    Vair = 0
    Qair = 0
Qventosam1.append(Qpm)
Qventosaj1.append(Qpj)
Qp = 0.5*(Qpm + Qpj)
Hlista1.append(Hp)
Qlista1.append(Qp)
arquivoH.write(str(Hp) + "\n")
arquivoQ.write(str(Qp) + "\n")
if armazenaHp >= 60:
    Hlista1.append(Hp)
    Qlista1.append(Qp)
    arquivoH.write(str(Hp) + "\n")
    arquivoQ.write(str(Qp) + "\n")
    Qventosam1.append(Qp)
    Qventosaj1.append(Qp)

```