

OSCILAÇÃO EM MASSA E ESTABILIDADE HIDRÁULICA DE SISTEMAS COMPLEXOS DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

JOÃO AUGUSTO RIBEIRO CORREIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Pedro de Almeida Manso

(Janeiro 2014)

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer aos meus Orientadores e aos serviços da Biblioteca da FEUP.

Queria deixar também um agradecimento especial à minha namorada pela paciência que teve nestes meses.

RESUMO

Na presente dissertação foi caracterizado o funcionamento dos diversos tipos e sistemas de chaminés de equilíbrio associados a aproveitamentos hidroelétricos, tendo especial atenção aos aspectos relacionados com a estabilidade das oscilações do nível de água no interior da chaminé quando admitido que a regulação automática da turbina é realizada de modo a gerar potência constante.

Foram apresentadas metodologias para a resolução das equações fundamentais que caracterizam o fenómeno da oscilação em massa para diversos tipos e sistemas de chaminés.

Com base no trabalho desenvolvido por Gardel, foi também desenvolvida uma metodologia para simular a regulação automática da turbina tendo em conta os efeitos da energia cinética no túnel junto do ponto de inserção da chaminé, das perdas de carga na conduta forçada, da curva de rendimento da turbina e do funcionamento em rede do aproveitamento.

Estas metodologias foram implementadas em ferramentas de cálculo automático que permitem para exemplos concretos de CE localizadas a montante e/ou a jusante da turbina simular diversos casos de carga para a determinação dos níveis máximos e mínimos e também aferir a estabilidade hidráulica das oscilações através da observação dos resultados.

Essas ferramentas foram utilizadas no estudo de um circuito hidráulico com chaminés de equilíbrio a montante e a jusante de uma central equipada com turbinas Francis.

PALAVRAS-CHAVE: Chaminés de Equilíbrio, Oscilação em Massa, Estabilidade das Oscilações, Aproveitamentos Hidroelétricos.

ABSTRACT

In this dissertation was characterized the behaviour of the various surge chambers types and systems, when integrated in the waterways of hydroelectric power plants, focusing the aspects related with the incipient stability of the oscillations when a constant power regulation is considered.

It was presented methodologies to solve the governing equations which characterize the mass oscillation phenomenon for the various types and surge chambers systems.

A methodology to simulate the constant power regulation of the turbine was developed based on Gardel's work, taking into account the kinetic energy in the tunnel near the insertion point of the surge chamber, head losses in penstock, the turbine efficiency curve and the operation in parallel with other units.

These methodologies were implemented in some calculation tools, allowing the simulation of some scenarios to evaluate the maximum and minimum levels in the upstream and/or the downstream surge chambers and to evaluate the incipient stability of oscillations through the computation results observation.

These tools were used for the study of a particular project provided with two surge chambers located on the downstream and upstream side of a Francis turbine.

KEYWORDS: Surge Chambers, Mass Oscillation, Incipient Stability, Hydropower.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. CARACTERIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DAS CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO	3
2.1. ENQUADRAMENTO	3
2.2. DEFINIÇÕES E NOMENCLATURA	4
2.3. TIPOS DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS COM CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO	5
2.4. EXEMPLOS DE AH COM CE LOCALIZADOS EM PORTUGAL	6
2.5. TIPOS DE CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	10
2.5.1. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS. HIPÓTESES DE BASE	10
2.5.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SIMPLES	11
2.5.3. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO COM ESTRANGULAMENTO	14
2.5.4. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO COM CÂMARAS DE EXPANSÃO LATERAIS	21
2.5.5. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DESCARREGADORA	23
2.5.6. CÂMARA DE EQUILÍBRIO NÃO AREJADA	24
2.5.7. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIFERENCIAL	28
2.5.8. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIFERENCIAL COM ESTRANGULAMENTO	31
2.5.9. FUNCIONAMENTO EM MODO DE BOMBAGEM	33
2.6. SISTEMAS DE CHAMINÉS	33
2.6.1. SISTEMA COM DUAS CHAMINÉS LOCALIZADAS A MONTANTE	33
2.6.2. SISTEMA COM UMA CHAMINÉ A MONTANTE E OUTRA A JUSANTE	34
2.7. RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	35
2.7.1. RESOLUÇÃO DESPREZANDO AS PERDAS DE CARGA	35
2.7.2. RESOLUÇÃO NÃO DESPREZANDO AS PERDAS DE CARGA	36
2.7.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS DIVERSOS MÉTODOS DE DIFERENÇAS FINITAS	37
2.8. PERDAS DE CARGA	38
2.8.1. PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS	38
2.8.2. PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS	43

2.9. DIMENSIONAMENTO	48
2.9.1. CENÁRIOS DE DIMENSIONAMENTO	48
2.9.2. ESCOLHA DE CAUDAIS	49
3. ESTABILIDADE HIDRÁULICA. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS PARA A RESOLUÇÃO NUMÉRICA	51
3.1. INTRODUÇÃO	51
3.2. PEQUENAS OSCILAÇÕES	52
3.3. GRANDES OSCILAÇÕES	53
3.4. OUTROS FACTORES QUE INFLUENCIAM A ESTABILIDADE HIDRÁULICA	55
3.4.1. ENERGIA CINÉTICA NO TÚNEL NO PONTO DE INSERÇÃO DA CE	56
3.4.2. PERDA DE CARGA NA CONDUTA FORÇADA	59
3.4.3. AMORTECIMENTO.....	61
3.4.4. FORMA DA CURVA DE RENDIMENTO DA TURBINA.....	62
3.4.5. EFEITO DO FUNCIONAMENTO EM PARALELO COM OUTRAS UNIDADES PRODUTORAS.....	65
3.4.6. CHOQUE HIDRÁULICO	67
3.5. CÂMARA DE EQUILÍBRIO NÃO AREJADA	67
3.6. SISTEMAS DE CHAMINÉS.....	67
4. FERRAMENTAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO	72
5. ESTUDO DE UM SISTEMA DE DUAS CE, UMA EM CADA LADO DA CENTRAL EQUIPADA COM GRUPOS FRANCIS...74	
5.1. INTRODUÇÃO	74
5.2. PERDAS DE CARGA	75
5.3. ANÁLISE DA ESTABILIDADE	76
5.4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	78
5.4.1. MODELO DE CÁLCULO	78
5.4.2. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	79
5.4.3. AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	80
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	84
BIBLIOGRAFIA	
ANEXO 1	
ANEXO 2	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Nomenclatura considerada.....	4
Figura 2.2 - Principais tipos de circuitos hidráulicos com CE (adaptada da ref.[3])	5
Figura 2.3- Perfil longitudinal do circuito hidráulico do AH do Alto Rabagão, [4].	6
Figura 2.4- Perfil longitudinal e CE do AH de Venda Nova, [5].	6
Figura 2.5- Perfil longitudinal e CE do AH de Salamonde, [7].	7
Figura 2.6- Perfil longitudinal e CE do circuito hidráulico de Salamonde II, [8], [9].	7
Figura 2.7- Perfil longitudinal e Chaminé de Equilíbrio do AH de Caniçada, [10], [11].	7
Figura 2.8- Perfil longitudinal do circuito hidráulico – AH de Vilarinho das Furnas, [12].	8
Figura 2.9- Perfil longitudinal do circuito hidráulico do AH do Alto Lindoso [13]	8
Figura 2.10- Perfil longitudinal dos circuitos hidráulicos de Venda Nova II e III [14], [15]	9
Figura 2.11- Perfil longitudinal do circuito hidráulico do AH de Villarino [16].	9
Figura 2.12 - Tipos de chaminé de equilíbrio, adaptado de [17].	10
Figura 2.13 - Chaminé de equilíbrio localizada a montante da turbina. Esquema das forças no túnel. 11	
Figura 2.14 - Chaminé de equilíbrio localizada a jusante da turbina. Esquema das forças no túnel. ...	13
Figura 2.15- Nomenclatura considerada para as CE com estrangulamento.	14
Figura 2.16 - CE com estrangulamento localizada a montante da turbina. Esquema das forças no túnel.....	15
Figura 2.17 - CE com estrangulamento localizada a jusante da turbina. Esquema das forças no túnel.	16
Figura 2.18 - Contrapressão para os diversos graus de estrangulamento – Cenário de Fecho [19]....	17
Figura 2.19 - Contrapressão para os diversos graus de estrangulamento – Cenário de Abertura [19] 17	
Figura 2.20 - Exemplo de um AH com a CE localizada a montante.....	18
Figura 2.21 - z , $z +$ perdas de carga na bifurcação, $z +$ perdas de carga na bifurcação e orifício. Fecho e abertura instantâneas.....	19
Figura 2.22 - Comparação entre as oscilações numa CE com estrangulamento e numa do tipo simples	19
Figura 2.23 - Oscilações e valor da pressão no túnel junto do ponto de inserção da CE	20
Figura 2.24 - CE com câmaras de expansão.....	21
Figura 2.25 - CE de jusante do AH de Reisseck II, na Áustria [22]	22
Figura 2.26 - CE de montante do AH de Lindberg II [23] e CE de montante do AH de Reisseck II [24].	22
Figura 2.27 - Comparação entre as oscilações na CE simples e numa solução com câmaras de expansão	23
Figura 2.28 - Nomenclatura considerada para a CE descarregadora.	24

Figura 2.29 - Câmara de equilíbrio não arejada. Esquema das forças no túnel.	25
Figura 2.30 - Câmara de equilíbrio não arejada do AH de Ulset, [29]	26
Figura 2.31 - Comparação entre as oscilações na CE não arejada e numa CE do tipo simples	27
Figura 2.32 - CE não arejada do AH de Tajford na Noruega [29] e Central do AH de Kopswerk II na Áustria, [30].	27
Figura 2.33 - Chaminé de equilíbrio diferencial. Fases de funcionamento, [2].....	28
Figura 2.34 - Solução para o orifício de ligação entre câmaras do AH de Appalachia, [31]	30
Figura 2.35 - Chaminé de equilíbrio diferencial associada apenas à camara de expansão superior, [32].....	30
Figura 2.36 - CE diferenciais do AH de Innertkirchen [25] e Jinping II [33].	31
Figura 2.37 - Esquema da CE Diferencial com Estrangulamento (adap. de [34]) e CE do AH de Kaunertal [35].	31
Figura 2.38 - Exemplo de um estrangulamento cónico [36] e de um estrangulamento com vórtice [34].....	32
Figura 2.39 - Evolução do coeficiente de perda de carga no estrangulamento com vórtice da CE de Kaunertal [35].	32
Figura 2.40- Sistema com duas chaminés de equilíbrio localizadas a montante. Nomenclatura adoptada.....	33
Figura 2.41 - Exemplo estudado por Pickford [25].....	37
Figura 2.42- Ábaco de Moody, [26]	40
Figura 2.43- Resultados da simulação numérica até ser atingido o nível máximo na CE.	41
Figura 2.44- Cálculo de K_S e f numa secção mista, [41]	42
Figura 2.45 - Esquema e nomenclatura da bifurcação em “T”, [52].	44
Figura 2.46 - Esquema com os tipos de escoamento possíveis numa bifurcação em T, [52].	44
Figura 2.47 – Comparação entre os valores calculados e as medições em laboratório, apresentados na ref. [53].	47
Figura 2.48 - Exemplo de casos de carga com mais do que 2 manobras e com alternância do modo de bombagem e turbinagem, [32].	49
Figura 2.49 - Diagrama de colina de uma turbina Francis, [38].	50
Figura 3.1 - Resultados da simulação numérica para $A_s = A_{Th}$, $A_s > A_{Th}$ e $A_s < A_{Th}$	53
Figura 3.2 - Curvas β_{Fr} , β^* , β_{Lim} e β_{Th} para a análise da estabilidade associada a grandes oscilações.....	54
Figura 3.3 - Oscilações considerando $A_s = A_{Th}$ e $A_s = 1.17 A_{Th}$	55
Figura 3.4 - Tipos de escoamento no ponto de inserção da CE localizada a montante da turbina	57
Figura 3.5 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a A_{Th}$	57

Figura 3.6 - Tipos de escoamento no ponto de inserção da CE de equilíbrio localizada a jusante da turbina.	59
Figura 3.7 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a^* A_{Th}$	59
Figura 3.8 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a n_b A_{Th}$	60
Figura 3.9 - Nomenclatura para definição do amortecimento (A), [31].	61
Figura 3.10 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a n_b n_c A_{Th}$	62
Figura 3.11 - Definição das variáveis ρ , φ , ψ [2]	63
Figura 3.12 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a n_b n_d A_{Th}$	65
Figura 3.13 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a n_b n_d n_e A_{Th}$	66
Figura 3.14 - Exemplo de AH apresentado por Escande e Huron, [58].	68
Figura 3.15 - Resultados da simulação numérica, considerando $A_{S1} = A_{Th1}$ e $A_{S2} = A_{Th2}$	69
Figura 3.16 - Representação gráfica dos pontos que satisfazem a condição $\Gamma = 0$	70
Figura 3.17 - Resultados da simulação considerando $n_1=1.0$ e $n_2=1.19$	70
Figura 3.18- Resultados da simulação considerando $n_1=2$ e $n_2=1.6$	71
Figura 5.1 - Planta e perfil esquemático do AH estudado.	74
Figura 5.2 - Ligação entre o túnel e a CE. CE de montante e de Jusante	75
Figura 5.3 - Representação da curva que contem os pontos n_1 e n_2 que satisfazem a condição $\Gamma = 0$. ..	77
Figura 5.4 - Verificação da estabilidade das oscilações. CE de Montante	79
Figura 5.5 - Verificação da estabilidade das oscilações. CE de Jusante	79
Figura 5.6 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de montante. Caso de Carga 1.	80
Figura 5.7 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de montante. Caso de Carga 2.	81
Figura 5.8 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de montante. Caso de Carga 3.	81
Figura 5.9 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de montante. Caso de Carga 4.	81
Figura 5.10 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de jusante. Caso de Carga 5.....	82
Figura 5.11 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de jusante. Caso de Carga 6.....	82
Figura 5.12 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de jusante. Caso de Carga 7.	82
Figura 5.13 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de jusante. Caso de Carga 8.....	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Nível de água máximo na chaminé calculado por diferentes métodos de cálculo de diferenças finitas.	38
Tabela 2.2 - Valores do coeficiente K_S ($m^{1/3}/s$) para diversos revestimentos.	42
Tabela 2.3 - Perdas de carga em tomadas de água, [51].....	43
Tabela 2.4 - Valores dos coeficientes k_y^x , l_y^x e m_y^x , [52].	46
Tabela 2.5- Cenários a considerar no dimensionamento de CE.	48
Tabela 3.1- Cálculo de A_{Th} para o exemplo da Figura 2.20.	52
Tabela 3.2 - Cálculo do valor de n^*	54
Tabela 3.3 - Cálculo de A_{Th} para o exemplo da Figura 2.20, admitindo uma solução com estrangulamento.	56
Tabela 3.4 - Valores de λ em função do ângulo da bifurcação (δ) e para $\varphi = 1$	56
Tabela 3.5- Enquadramento das variáveis respeitantes à curva de rendimento da turbina, [56].	63
Tabela 3.6 - Cálculo de A_{Th} para a CE de Montante (índice 1) e de Jusante (índice 2)	68
Tabela 3.7- Cálculo das Condições de estabilidade de Routh-Wurwitz	68
Tabela 5.1 - Características geométricas e perdas de carga do circuito analisado	75
Tabela 5.2- Cálculo de A_{Th1} e A_{Th2}	76
Tabela 5.3- Cálculo dos factores de segurança $n_{(a)}$, $n_{(b)}$, $n_{(c)}$, $n_{(d)}$ e $n_{(e)}$	76
Tabela 5.4- Cálculo das Condições de estabilidade de Routh-Wurwitz	77
Tabela 5.5 - Cenários simulados para averiguação dos níveis nas CE.	80

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CE - Chaminés de Equilíbrio

AH - Aproveitamentos Hidroelétricos

Os índices I e 2 referem-se, respectivamente, ao circuito de montante e de jusante e apenas são utilizados quando interessa fazer essa distinção.

O índice 0 é utilizado para identificar o valor de uma determinada em regime permanente.

Os índices romanos $I, II, \dots$, são usados quando a chaminé tem câmaras separadas ou quando num mesmo troço de túnel existe mais do que uma CE.

O índice c é utilizado para referenciar as variáveis relacionadas com a conduta forçada.

O índice d é utilizado para referenciar as variáveis relacionadas com o orifício de ligação a uma CE com estrangulamento.

Os índices superiores “+” ou “-” identificam a variável quando o sentido do escoamento é positivo ou negativo. (s^2/m);

A_T - área da secção do túnel, (m^2);

L - comprimento do túnel, (m);

v - velocidade do escoamento no túnel, (m/s);

Q - caudal turbinado, (m^3/s);

A_S - área da secção chaminé, m^2 ;

z - nível na CE, medido em relação ao nível estático ($z = 0$), (m);

z_{min} - nível mínimo das oscilações na CE medido em relação ao nível estático ($z = 0$), (m);

z_{max} - nível máximo das oscilações na CE medido em relação ao nível estático ($z = 0$), (m);

ΔH_R - perda de carga localizada na ligação à albufeira, (m);

ΔH_S - perda de carga localizada na ligação à CE, (m);

p - factor de perda de carga contínua, (s^2/m);

p' e $p'^{\pm}$ - factor de perda de carga incluindo as perdas de carga localizadas na tomada de água ou na restituição, (s^2/m);

p'' e $p''^{\pm}$ - factor de perda de carga incluindo as perdas de carga localizadas na tomada de água ou restituição e na ligação à chaminé, (s^2/m);

H a queda bruta, (m);

H' a queda útil, (m);

H'_0 a queda útil em regime permanente, m.

A_m - média ponderada da área da secção to túnel, (m²);

z_c - limite superior da CE ou do Poço Descarregador no caso das CE diferenciais, medido em relação ao nível estático ($z = 0$), (m);

$p_d^{\pm}$ - factor de perda de carga no estrangulamento de ligação à CE, (s²/m);

v_d - velocidade do escoamento no orifício de ligação à CE.

ΔH_β - perda de carga entre o túnel e a bifurcação, (m);

t - tempo, (s);

Q_s - caudal descarregado através da soleira, (m³/s)

C - coeficiente de vazão do escoamento sobre a soleira descarregadora (-)

b - largura da soleira descarregadora, (m);

h - carga hidráulica sobre a soleira descarregadora, (m);

V_m - volume de ar na CE não arejada, (m³);

s - diferença entre o nível de água no reservatório e na câmara de equilíbrio não arejada em condições estáticas, (m);

$\bar{p}$ - pressão atmosférica, (Pa);

p_b - a pressão do volume de ar na câmara, (Pa);

p_m - pressão do volume de ar na CE não arejada em condições estáticas, (Pa);

γ - peso específico da água, (N/m³);

m - altura da almofada de ar em condições estáticas; (m);

e - expoente politrópico; (-);

q - caudal aduzido através do poço de alimentação, (m³/s);

T - período das oscilações quando desprezadas as perdas de carga, (s);

z_* - amplitude das oscilações quando as perdas de carga são desprezadas, (m);

h_f - perda de carga ao longo do troço de conduta de comprimento L , (m);

D - diâmetro da conduta, (m);

K_s - coeficiente de perda de carga da fórmula de Manning-Strickler, (m^{1/3}/s);

f - factor de resistência da fórmula de Colebrook-White, (-);

k - rugosidade absoluta equivalente, (m);

ν - viscosidade cinemática da água, (m²/s);

A - área da secção, (m²);

P_m - perímetro molhado, (m);

$K^\pm$ - coeficiente de perda de carga localizada.

ΔH - perda de carga localizada, (m);

d_v - diâmetro do túnel no ponto de inserção da bifurcação, (m);

d'' - diâmetro da bifurcação, (m);

F_v - área da secção do túnel no ponto de inserção da bifurcação, (m²);

F'' - área da secção do braço da bifurcação, (m²);

r - raio do arredondamento na junção entre o túnel e o braço da bifurcação, (m);

δ - ângulo da inserção da bifurcação no túnel, (rad);

ϕ - relação entre a área da bifurcação (F'') e a área do túnel; (-);

ρ - relação entre o r e d_v , (-);

Δh_y^x - Coeficiente de perda de carga localizada na bifurcação. x indica entre que braços é medida a perda de carga e pode ser substituído por ' , ' , ou ' ' e y indica o tipo de escoamento.

k_y^x - representa o valor relativo da perda de carga para o caso particular em que o escoamento para o braço lateral da bifurcação (β) é nulo;

l_y^x - perda de carga relativa para o caso particular em que o escoamento num dos braços do túnel α ou γ é nulo;

m_y^x - coeficiente de correcção para o termo q'' que intervém para o “escoamento fraccionado”;

$\Delta H'$ - perda de carga localizada medida entre a bifurcação (β) e a secção do túnel a montante do ponto de inserção (α), (m);

$\Delta H''$ - perda de carga localizada medida entre as secções do túnel a jusante (γ) e a montante (α) do ponto de inserção, (m);

$\Delta H'''$ - perda de carga localizada medida entre o troço de túnel a jusante (γ) e a bifurcação (β), (m);

q'' - caudal relativo que passa para a chaminé ($Q''/Q_{\max}$), (-);

Q'' - caudal que passa para a chaminé através da bifurcação, (m³/s);

$Q_{\max}$ - caudal máximo em qualquer um dos braços α ou γ , (m³/s);

ΔH_d - perda de carga no orifício de ligação à CE, (m);

$K_d^\pm$ - Coeficiente de perda de carga no orifício de ligação à CE.

Q^* - valor do caudal turbinado imediatamente antes da manobra para alteração da potência produzida, (m³/s);

P_0 - potência gerada em regime permanente, (W),

η - rendimento, (-)

A_{S_min} - Área mínima da secção da CE, (m²);

A_{Th} - área da secção da CE calculada a partir da formula de Thoma (2ª condição), (m²);

n - factor de segurança relativo a A_{Th} , (-);

β e ε - parâmetros de Vogt;

n^* - factor de segurança relativo relativo a A_{Th} para grandes oscilações, (-);

n_a - factor de segurança relativo a A_{Th} para ter em conta o efeito da energia cinética no ponto de inserção da CE localizada a montante da turbina, (-);

E_0 - energia cinética no túnel no ponto de inserção da CE, (m);

n_a^* - factor de segurança relativo a A_{Th} para ter em conta o efeito da energia cinética no ponto de inserção de uma CE localizada a jusante da turbina, (-);

n_b - factor de segurança relativo a A_{Th} para ter em conta o efeito da perda de carga da conduta forçada, (-);

C_0 - perda de carga na conduta forçada em regime permanente, (m).

n_c - factor de segurança relativo a A_{Th} para ter se obter um determinado amortecimento (A) medido no intervalo de tempo (T_0).

A - o amortecimento pretendido para as oscilações, (-);

T_0 - intervalo de tempo ao longo qual é medido o amortecimento (A), (s);

n_d - factor de segurança relativo a A_{Th} para ter em conta o efeito da curva de rendimento da turbina, (-);

$\tan \sigma$ - parâmetro relativo à curva de rendimento da turbina que engloba $\tan \rho$, $\tan \varphi$ e $\tan \psi$.

$\tan \rho$ - tangente do angulo da curva de rendimento em função da potência no ponto de funcionamento em regime permanente, (-);

$\tan \rho'$ - tangente do angulo da curva de rendimento em função da abertura relativa (θ/θ_0) do distribuidor no ponto de funcionamento em regime permanente, (-);

n_e - factor de segurança relativo a A_{Th} para ter em conta o efeito do funcionamento em rede com outras unidades produtoras, (-).

K - relação entre capacidade da central (P) e a capacidade produtora total da rede (P_T), (m);

α_1 ; α_2 ; α_3 ; α_4 ; Γ - parâmetros utilizados para definição das condições de estabilidade de Routh-Wurwitz.

1

INTRODUÇÃO

As Chaminés de Equilíbrio (CE) são elementos essenciais em Aproveitamentos Hidroelétricos (AH) com circuitos hidráulicos longos. A colocação da CE num ponto intermédio do circuito hidráulico melhora as condições de regulação da turbina e possibilita a adopção de soluções globalmente mais económicas, pois reduzem a magnitude das ondas de pressão associadas ao choque hidráulico.

A motivação para a escolha das CE como tema de estudo para esta dissertação deve-se em primeiro lugar a um interesse pessoal nesta matéria.

Este tema revela alguma pertinência e actualidade, tendo em conta os novos AH actualmente em construção, bem como, os que está previsto serem construídos em Portugal.

Estes projectos seguem uma tendência Europeia, onde também têm sido construídos AH equipados com grupos reversíveis para o aproveitamento da energia disponível nas horas de vazio.

Na Europa, ultimamente, esta tendência tem perdido algum fôlego, com os incentivos para a sua construção a diminuir, alguns projectos têm sido cancelados ou adiados; no entanto, noutras latitudes, em países como Angola e Moçambique estão previstos diversos projectos com circuitos hidráulicos equipados com CE, neste caso, para o aproveitamento da energia hídrica disponível.

As CE são um tema clássico da hidráulica que tem sido profundamente estudado, desde há mais de 100 anos. Actualmente existem também programas comerciais que possibilitam a construção de modelos numéricos bastante completos, permitindo o estudo dos regimes transitórios em circuitos hidráulicos de AH, tendo em conta o fenómeno da oscilação em massa, o choque hidráulico, as características dos equipamentos a instalar e alguns, inclusive, permitem até a incorporação da própria rede eléctrica no modelo.

Sendo um tema vasto e profundamente estudado, nesta dissertação restringiu-se um pouco o estudo à teoria mais clássica sobre as CE, estudando-se em pormenor o fenómeno da oscilação em massa, sem dúvida, o que mais influi no comportamento das oscilações no interior da CE.

O objectivo desta dissertação é apresentar a função e funcionamento dos diversos tipos e sistemas de CE associados a AH, tendo especial atenção aos aspectos relacionados com a estabilidade das oscilações no interior da chaminé, quando admitido que a regulação automática da turbina é realizada de modo a gerar potência constante.

Para tal, foram estudadas várias obras de referência listadas na bibliografia. Uma boa parte dessas obras foi elaborada numa altura em que as ferramentas de cálculo automático disponíveis actualmente, não existiam ou, pelo menos, o seu uso não estava generalizado; por isso, procurou-se adaptar as formulações teóricas e certas metodologias às ferramentas de cálculo actuais, evitando o uso de ábacos ou métodos de cálculo gráficos.

Foram desenvolvidas ferramentas de cálculo automático que permitem resolver as equações fundamentais que caracterizam o fenómeno da oscilação em massa para os diversos tipos e sistemas de CE e simular a admissão de caudais da turbina, tendo em conta os factores que podem afectar a estabilidade das oscilações.

Paralelamente, e de modo a ilustrar o documento com exemplos elucidativos, foi recolhida informação sobre AH equipados com CE, localizados em Portugal. Com o mesmo objectivo, procuraram-se também exemplos de projectos recentes com soluções diferentes das adoptadas em Portugal.

Na bibliografia, o estudo deste tema é muitas vezes focado na CE localizada a montante da turbina. Como em Portugal existem muitos AH com CE localizadas a jusante, nesta dissertação estudaram-se ambas as localizações de forma idêntica tendo em conta os aspectos particulares de cada uma.

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos:

No capítulo 1, é introduzido o tema e são apresentados os objectivos da presente dissertação.

No capítulo 2, é apresentada a caracterização e funcionamento dos diversos tipos e sistemas de CE, no que se refere ao cálculo das oscilações.

No capítulo 3, é apresentada a problemática da estabilidade das oscilações quando admitido que a regulação automática da turbina é realizada de forma a manter constante o valor da potência gerada.

No capítulo 4, são apresentadas as características e funcionalidades das ferramentas de cálculo desenvolvidas no âmbito da presente dissertação.

No capítulo 5, é apresentado um exemplo de aplicação, onde as metodologias apresentadas nos capítulos 2 e 3, implementadas nas ferramentas de cálculo automático, descritas no capítulo 4, são postas em prática.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e desenvolvimentos futuros.

2

CARACTERIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DAS CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

2.1 ENQUADRAMENTO

Suponhamos que o grupo turbina-alternador de um aproveitamento hidroeléctrico é alimentado por um longo túnel e uma conduta forçada.

Durante o seu funcionamento, a turbina tem necessidade de modificar o caudal turbinado de modo a fazer corresponder a potência gerada à requerida pela rede. Estas variações de caudal durante o seu funcionamento, bem como, as associadas ao arranque e paragem dos grupos originam uma aceleração ou desaceleração da coluna de água, provocando variações de pressão, que se transmitem a grande velocidade ao longo do circuito hidráulico. Quando as variações de caudal são realizadas de modo brusco, estas ondas de pressão atingem grande magnitude.

Este fenómeno é geralmente designado por golpe de ariete ou choque hidráulico e a sua grandeza depende de diversos factores, sendo os mais importantes a velocidade da variação de caudal imposta, o comprimento da conduta e as características do material que a compõem.

A existência de uma CE num ponto intermédio do circuito, com a água em superfície livre, permite a reflexão dessas ondas de pressão, reduzindo o comprimento de conduta exposto a estas variações de caudal e pressão.

Como o comprimento de conduta, cujo escoamento terá de ser acelerado ou desacelerado, é mais pequeno com a presença da CE, o tempo de aceleração da coluna de água será menor, permitindo assim tempos de abertura ou fecho mais curtos, melhorando portanto as condições de regulação da turbina.

No túnel, estas variações de caudal provocadas pela manobra da turbina não se farão reflectir imediatamente e, nos primeiros instantes a seguir à ocorrência da manobra, o escoamento manter-se-á inalterado.

Por exemplo, a seguir ao fecho do distribuidor, o escoamento no túnel tenderá a fazer-se para a CE, aumentando o seu nível por efeito da acumulação de água, e simultaneamente diminuindo a inclinação da linha de energia entre a albufeira e a chaminé, provocando a diminuição da velocidade.

Em virtude da inércia, o nível na CE, ultrapassa o nível na albufeira, até atingir um nível máximo. A partir desse momento o sentido de escoamento no túnel inverte-se. Em consequência deste facto o nível começa a descer e a velocidade no túnel vai diminuindo até que se inverta novamente o sentido de escoamento, iniciando um novo ciclo, [1]. Este fenómeno é designado por oscilação em massa.

Neste capítulo, descrevem-se as características e modo de funcionamento dos vários tipos e sistemas de CE, são apresentadas as equações fundamentais que regem o fenómeno de oscilação em massa e os métodos adoptados para a resolução destas equações diferenciais. Apresenta-se também a teoria para o cálculo das perdas de carga contínuas e localizadas no circuito hidráulico entre o reservatório e a CE.

2.2 DEFINIÇÕES E NOMENCLATURA

De uma maneira geral, nas formulações apresentadas nesta dissertação, considerou-se a nomenclatura utilizada por Jaeger [2].

Ao longo deste documento será designado por Túnel, o troço de conduta compreendido entre a albufeira e a Chaminé de Equilíbrio (CE), e por Conduta Forçada, o troço do circuito hidráulico entre a CE e a turbina.

O termo turbina, será utilizado para designar o(s) grupo(s) turbina-alternador, localizados na central.

Serão designados por cenário de fecho as situações em que, a seguir à rejeição de carga, se dá o fecho do distribuidor ou injectores no caso das turbinas Pelton ou ainda da válvula de guarda da turbina. A situação inversa de entrada em funcionamento da turbina será designada por cenário de abertura.

Na Figura 2.1 apresenta-se de forma esquemática um circuito hidráulico equipado com uma CE a montante e outra a jusante da turbina.

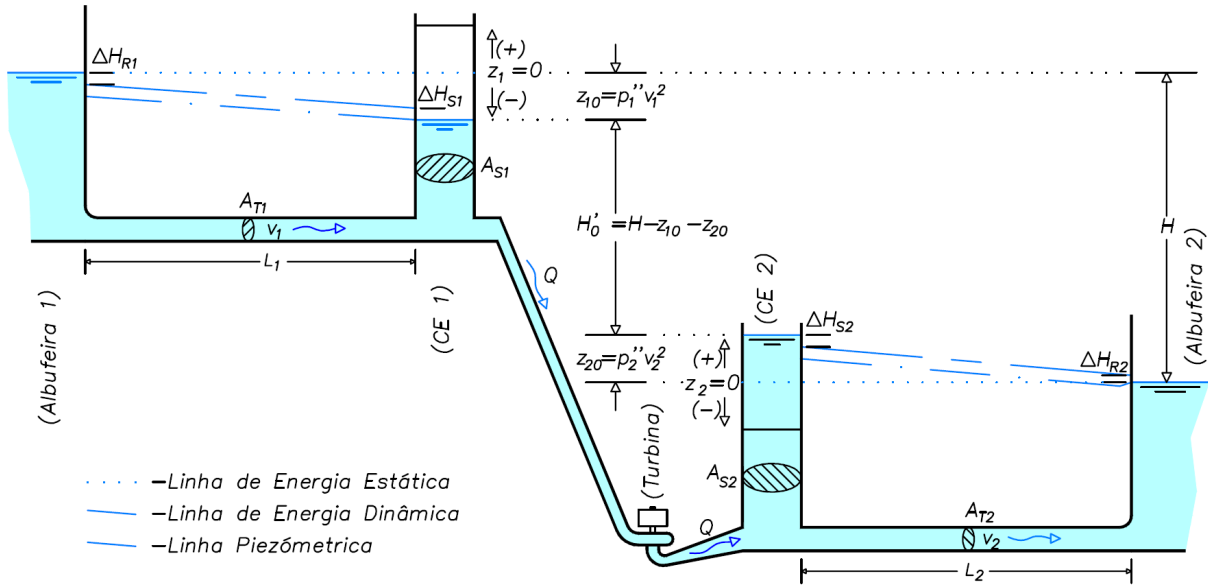


Figura 2.1 - Nomenclatura considerada

O sentido positivo da velocidade no túnel está representado pelas setas a azul. Na figura estão também representadas as principais variáveis consideradas nas formulações a apresentadas, cujo significado se apresenta de seguida:

A_T representa a área da secção do túnel, (m^2);

L o comprimento do túnel, (m);

v a velocidade do escoamento no túnel, (m/s);

Q o caudal turbinado, (m^3/s);

A_S a área da secção chaminé, (m^2);

z o nível na CE, medido em relação ao nível estático ($z = 0$), (m);

ΔH_R a perda de carga localizada na ligação à albufeira, (m);

ΔH_S a perda de carga localizada na ligação à CE, (m);

p o factor de perda de carga contínua; p' o factor de perda de carga incluindo as perdas de carga localizadas na tomada de água ou na restituição e p'' o factor de perda de carga incluindo as perdas de carga localizadas na tomada de água ou restituição e na ligação à chaminé, (s^2/m);

H a queda bruta, (m);

H' a queda útil, (m);

H'_0 a queda útil em regime permanente, (m). Na Figura 2.1 a queda útil está referenciada aos níveis na CE, admitindo-se portanto que no rendimento da turbina estão também incluídas as perdas na conduta forçada.

Os índices 1 e 2 referem-se, respectivamente, ao circuito de montante e de jusante e apenas serão utilizados quando interessar fazer essa distinção. O índice 0 será utilizado para o regime permanente.

Os índices romanos I, II, ..., serão usados quando a chaminé tiver câmaras separadas ou quando num mesmo troço de túnel exista mais do que uma CE.

O índice *c* será utilizado para referenciar as variáveis relacionadas com a conduta forçada.

2.3 TIPOS DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS COM CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO

As CE devem ficar localizadas o mais próximo possível da central, de modo a maximizar os seus benefícios.

Quando a localização é a montante, como o topo da CE não poderá ficar abaixo da linha de energia estática definida pelo nível na albufeira, a sua posição é condicionada pela topografia, sendo comum posicioná-la antes da curva em perfil para conduta forçada, de modo a reduzir a sua dimensão.

A CE de jusante é normalmente definida junto da central, de modo a proteger também o equipamento hidromecânico das pressões negativas, com eventual separação da coluna de água e consequente onda de sobrepressão, a seguir ao fecho da turbina.

O projecto do circuito hidráulico está intimamente ligado à localização e tipo de chaminé de equilíbrio a adoptar. Na figura seguinte apresentam-se os principais tipos de circuitos hidráulicos com CE.

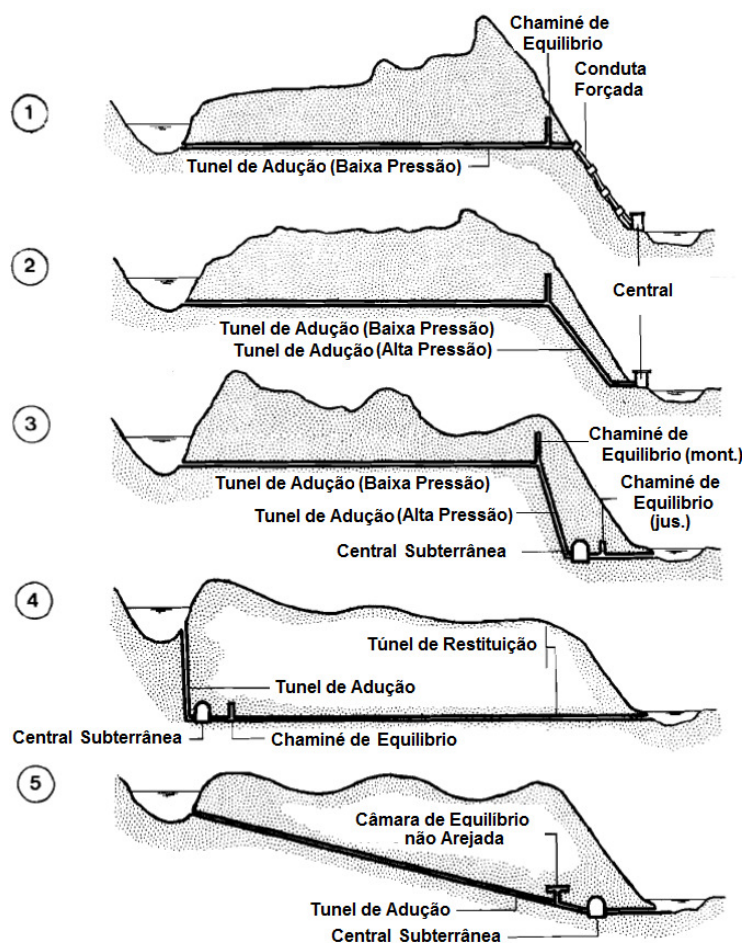


Figura 2.2 - Principais tipos de circuitos hidráulicos com CE (adaptada da ref.[3])

Tipos 1 e 2 – A central localiza-se mais a jusante no circuito hidráulico. A adução é feita através de um túnel longo e pouco inclinado até à CE e por uma conduta forçada (1) ou por um túnel de alta pressão (2) desde a chaminé até à central;

Tipo 3 – A central está posicionada numa posição intermédia no circuito hidráulico. O túnel de adução e de restituição estão ambos equipados com CE;

Tipo 4- O túnel de adução até à central subterrânea é relativamente curto e apresenta um traçado muito inclinado ou mesmo vertical. A central subterrânea localiza-se mais a montante no circuito hidráulico e o túnel de restituição é longo. A CE fica localizada no início do túnel de restituição, logo a seguir à central, de modo a proteger também a turbina das pressões negativas e consequente onda de sobrepressão a seguir ao fecho do distribuidor;

Tipo 5- Arranjo do tipo Norueguês: A central subterrânea localiza-se mais a jusante no circuito hidráulico. O túnel de adução até à central é longo e com uma forte pendente. A câmara de equilíbrio não arejada fica posicionada perto da central a uma cota altimétrica abaixo da linha de energia estática definida pela albufeira.

2.4 EXEMPLOS DE AH COM CE LOCALIZADOS EM PORTUGAL

De seguida apresentam-se alguns exemplos de circuitos hidráulicos equipados com CE de AH localizados no Norte de Portugal.

Na Figura 2.3 apresenta-se o circuito hidráulico (reversível) do AH do Alto Rabagão (Tipo 4). A CE é localizada a jusante da central tem estrangulamento na base e câmaras de expansão inferior e superior.

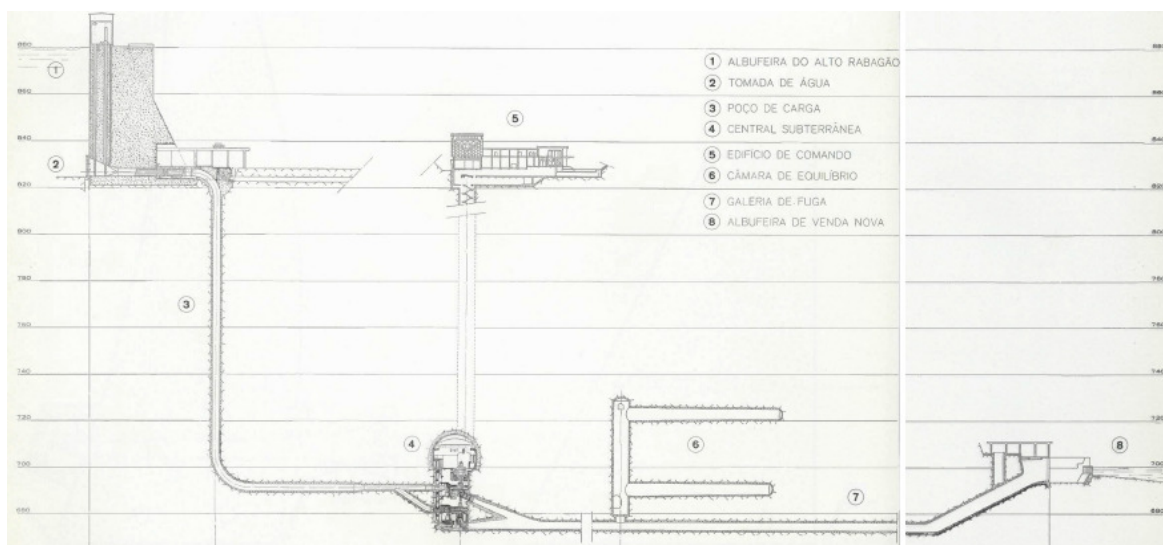


Figura 2.3 - Perfil longitudinal do circuito hidráulico do AH do Alto Rabagão, [4].

Na Figura 2.4 apresenta-se o circuito hidráulico do AH de Venda Nova (Tipo 1). A CE localizada a montante da central possui câmaras de expansão inferior e superior, esta última localiza-se à superfície.

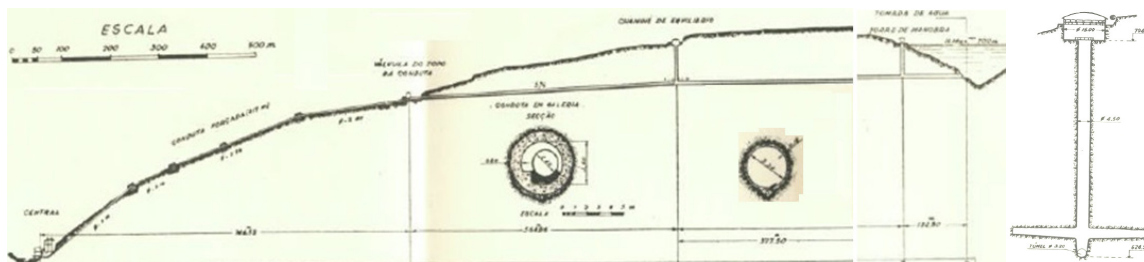


Figura 2.4 - Perfil longitudinal e CE do AH de Venda Nova, [5].

Na Figura 2.5 apresenta-se o circuito hidráulico do AH de Salamonde (Tipo 4). A CE localizada a jusante da central tem um estrangulamento na base e possui câmaras de expansão inferior e superior.

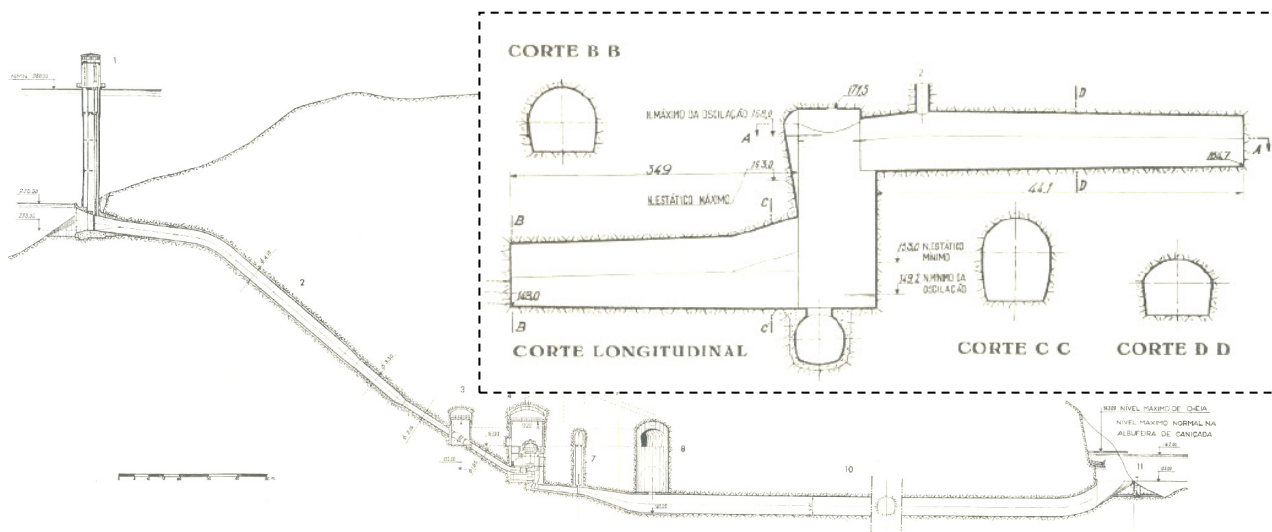


Figura 2.5- Perfil longitudinal e CE do AH de Salamonde, [6].

Na Figura 2.6 apresenta-se o circuito hidráulico do reforço de potência Salamonde II (Tipo 4), actualmente em construção. A CE com estrangulamento está localizada a jusante da central.

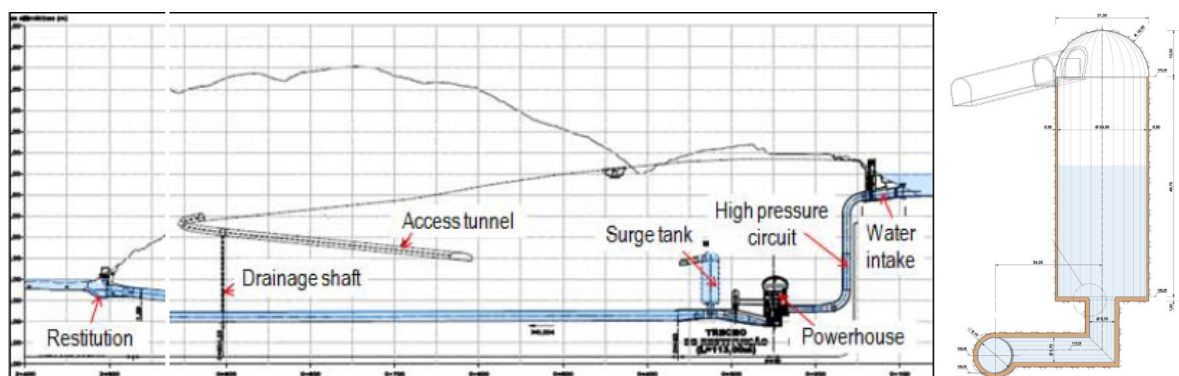


Figura 2.6 - Perfil longitudinal e CE do circuito hidráulico de Salamonde II, [7], [8].

Na Figura 2.7 apresenta-se o circuito hidráulico do AH de caniçada. A CE localizada a jusante da central tem um estrangulamento na base e câmaras de expansão superior e inferior.

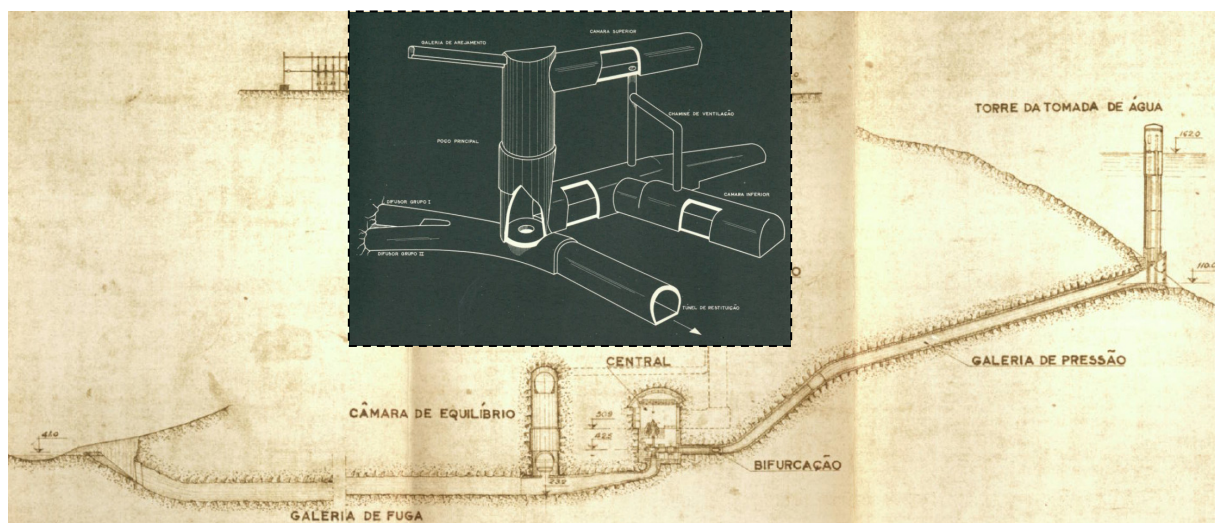


Figura 2.7- Perfil longitudinal e Chaminé de Equilíbrio do AH de Caniçada, [9], [10].

Na Figura 2.8 apresenta-se o circuito hidráulico do AH de Vilarinho das Furnas (Tipo 1). A CE localizada a montante da central têm estrangulamento na base e câmaras de expansão superior e inferior. O túnel de adução possui um túnel de alimentação intermédio.

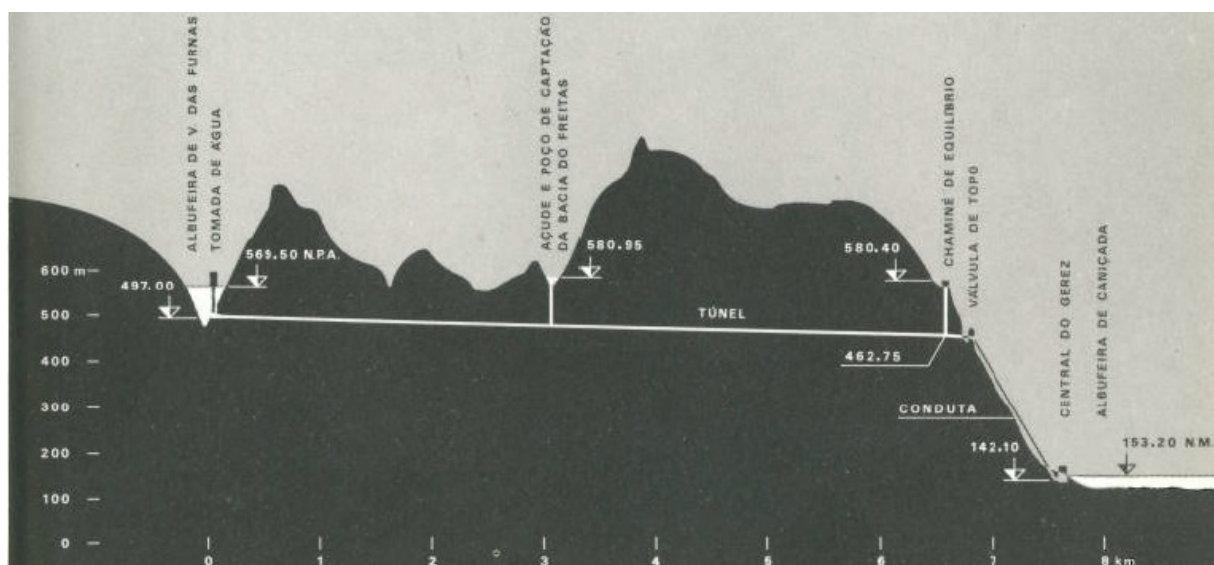


Figura 2.8- Perfil longitudinal do circuito hidráulico – AH de Vilarinho das Furnas, [11].

Na Figura 2.9 apresenta-se o circuito hidráulico do AH do Alto Lindoso (Tipo 4). A CE localizada a jusante da central é tem estrangulamento na base e câmaras de expansão superior e inferior.

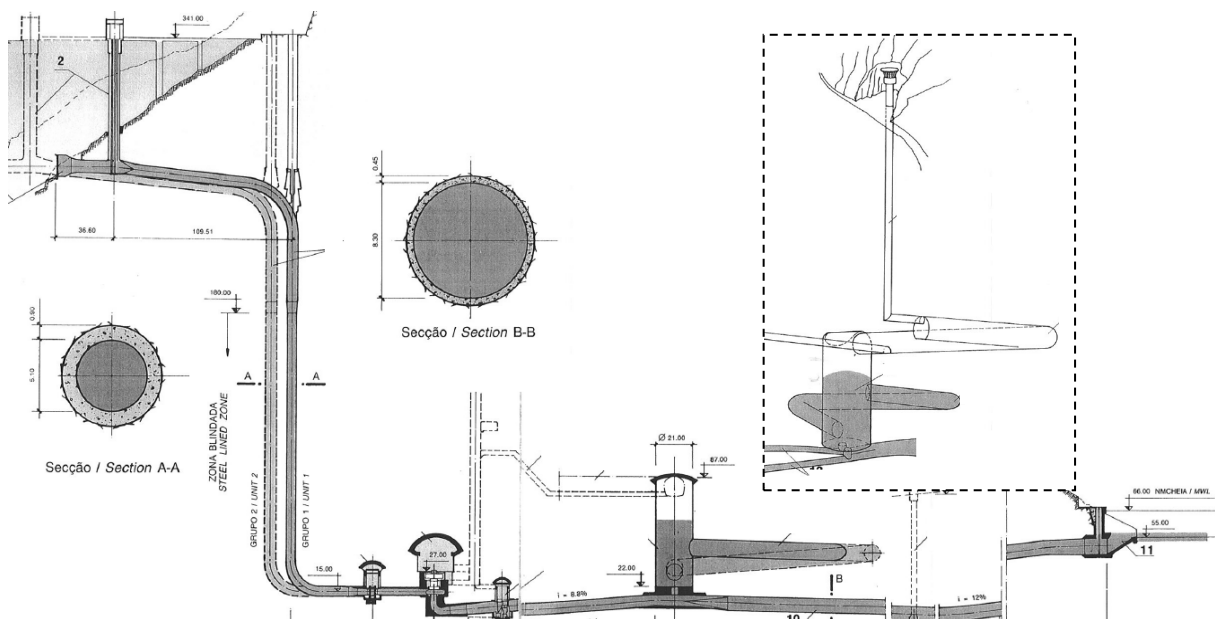


Figura 2.9- Perfil longitudinal do circuito hidráulico do AH do Alto Lindoso [12]

Deve notar-se que tanto a câmara de expansão inferior, em “asa de cesto”, tal como, a câmara de expansão superior, são formadas por túneis com inclinação constante. Nessas zonas, a área da chaminé corresponde à secção do poço, acrescido do plano horizontal do nível de água no túnel inclinado.

Em Portugal, bem como no resto da Europa, nos anos mais recentes, para aumentar a potência instalada e para o aproveitamento da energia disponível nas horas de vazio foram construídos novos circuitos hidráulicos, muitos deles reversíveis. Neste contexto, para além do reforço de potência de Salamonde II (Figura 2.6) são de referir os AH de Venda Nova II (Frades) e Venda Nova III (Frades II), representados na Figura 2.10.

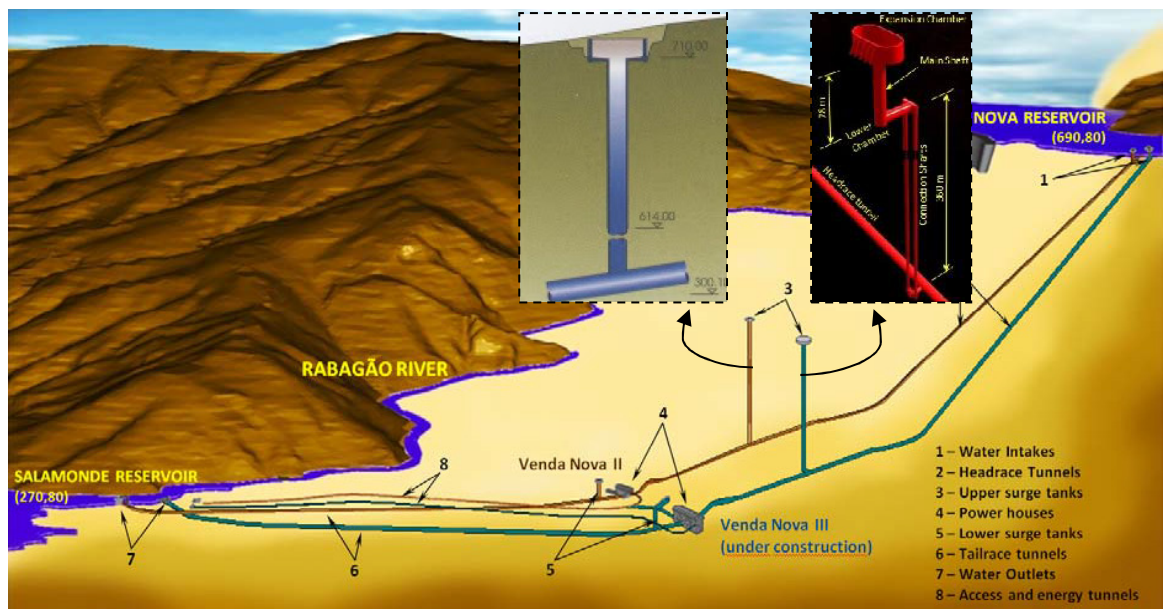


Figura 2.10- Perfil longitudinal dos circuitos hidráulicos de Venda Nova II e III [13], [14]

Ambos os circuitos hidráulicos são do Tipo 3, com CE de equilíbrio a montante e a jusante da central. A solução adoptada para estes aproveitamentos é bastante interessante pois, em ambos os casos, o túnel de adução é bastante inclinado, encaixando no tipo Norueguês, sem no entanto ter sido adoptada uma câmara de equilíbrio não arejada, tendo sido antes considerada uma CE com estrangulamento conectada ao túnel de adução através de poços verticais com cerca de 300 m.

Pela sua espectacularidade e pela proximidade a Portugal apresenta-se também o do AH de Villarino que liga as albufeiras das barragens de Almendra e Aldeadávila (Figura 2.11).

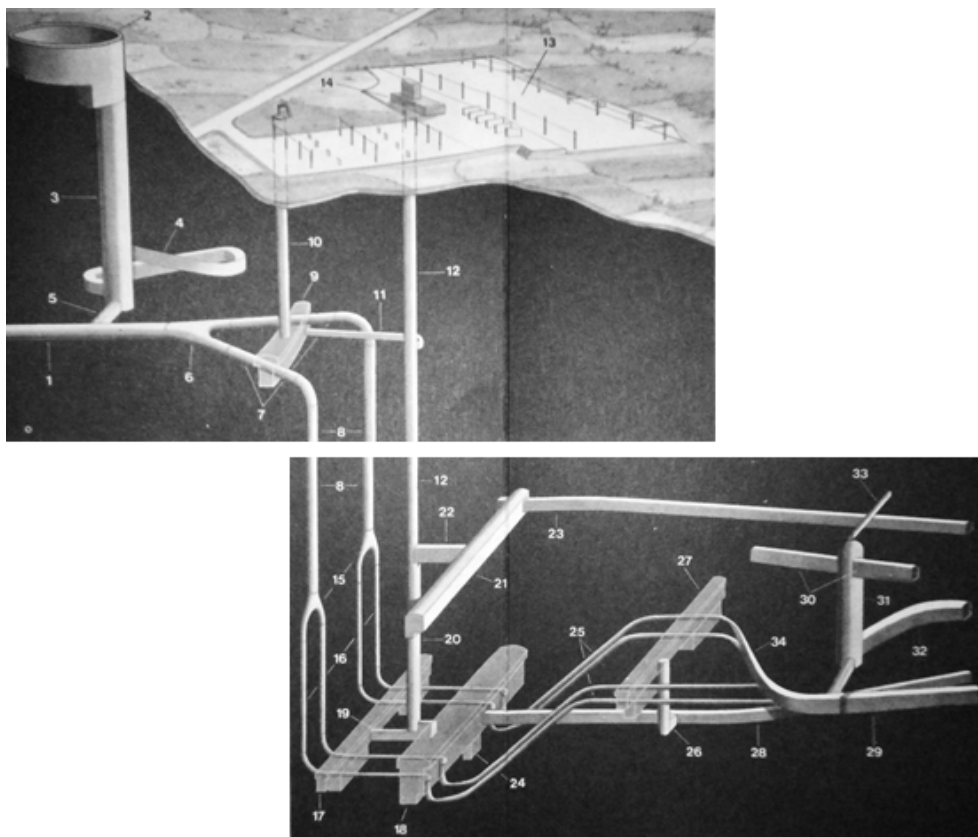


Figura 2.11- Perfil longitudinal do circuito hidráulico do AH de Villarino [15].

Este circuito hidráulico é do Tipo 3, com CE de equilíbrio a montante e a jusante da central. Ambas as CE de equilíbrio têm estrangulamento na base e câmaras de expansão superiores e inferiores.

2.5 TIPOS DE CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

Para além da CE simples, existem outros tipos de chaminés, que podem apresentar vantagens significativas para um determinado projecto.

Na Figura 2.12 apresentam-se os 3 tipos principais de chaminés de equilíbrio: simples, com estrangulamento na base e diferenciais.

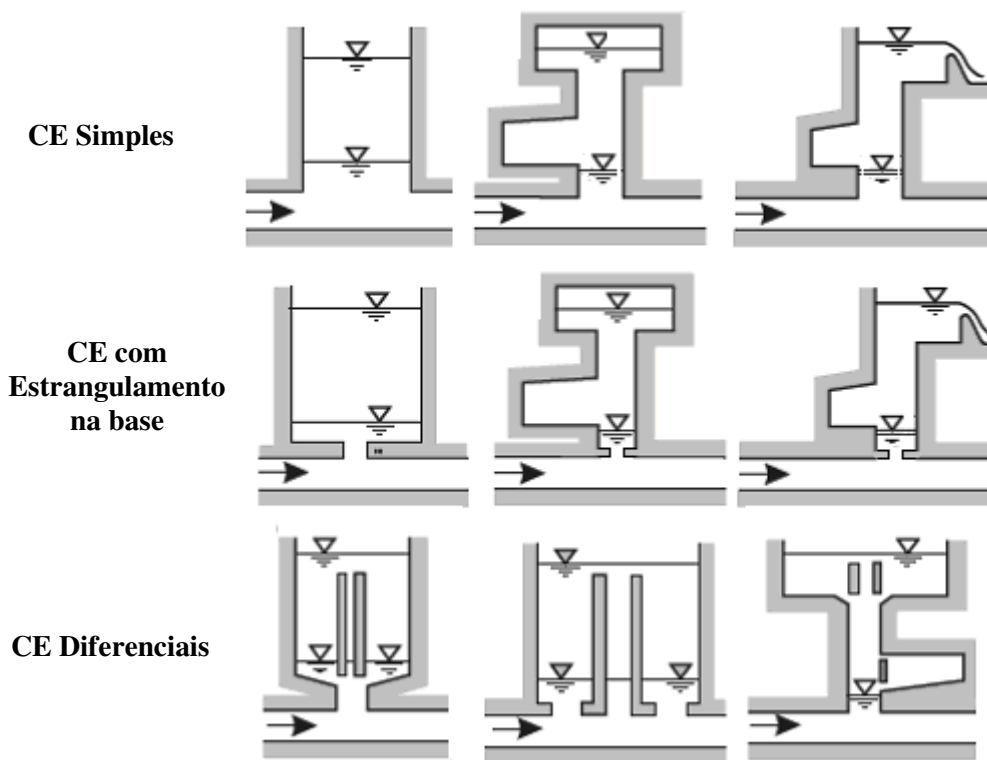


Figura 2.12 - Tipos de chaminé de equilíbrio, adaptado de [16].

Dentro de cada grupo, as chaminés poderão ter câmaras de expansão laterais e/ou serem também descarregadoras. Qualquer uma delas pode ser definida a montante ou a jusante da turbina.

Para além dos tipos apresentados, na Noruega é por vezes adoptado um outro tipo de chaminé especial, as Câmaras de Equilíbrio não Arejadas.

Neste capítulo, para cada tipo de CE, será então descrito o seu funcionamento, apresentadas as respectivas equações fundamentais e algumas orientações para o seu dimensionamento.

2.5.1 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS. HIPÓTESES DE BASE.

A fundamentação teórica de base para a análise das oscilações numa CE baseia-se no princípio de equilíbrio dinâmico aplicado a um troço de escoamento entre duas secções transversais - Equação Dinâmica; e na condição de continuidade aplicada ao ponto de inserção da chaminé de equilíbrio - Equação da Continuidade.

Para a dedução destas equações consideram-se as seguintes hipóteses de base:

- as paredes do túnel do circuito de adução/restituição são infinitamente rígidas e a água é incompressível, pelo que o caudal será igual em todas as secções do túnel.
- as perdas de carga em cada instante são equivalentes às que se verificariam em regime permanente;

- a inércia da água na CE é desprezável, quando comparada com a do túnel;
- a albufeira tem uma área muito grande e, por isso, o nível de água manter-se-á constante durante a ocorrência dos regimes transitórios;
- a energia cinética do movimento oscilatório na CE será desprezada.

Em termos formais, a dedução da equação dinâmica para os tipos de CE que se apresentam nos pontos seguintes, foi feita de modo idêntico ao apresentado por Chaudry [17]; no entanto, e de modo a claramente se identificarem as perdas de carga que variam em função do sentido de escoamento, para essa dedução partiu-se de 2 cenários relativos ao escoamento no túnel.

2.5.2 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SIMPLES

2.5.2.1 Montante da turbina

A equação dinâmica traduz o equilíbrio das forças que actuam num troço de escoamento, segundo o eixo da conduta.

Na Figura 2.13 apresenta-se, de forma esquemática, um circuito hidráulico com a CE situada a montante da turbina. Para esse circuito são apresentados dois cenários relativos ao sentido do escoamento no túnel. Para cada um desses cenários é também apresentado o esquema de forças no túnel.

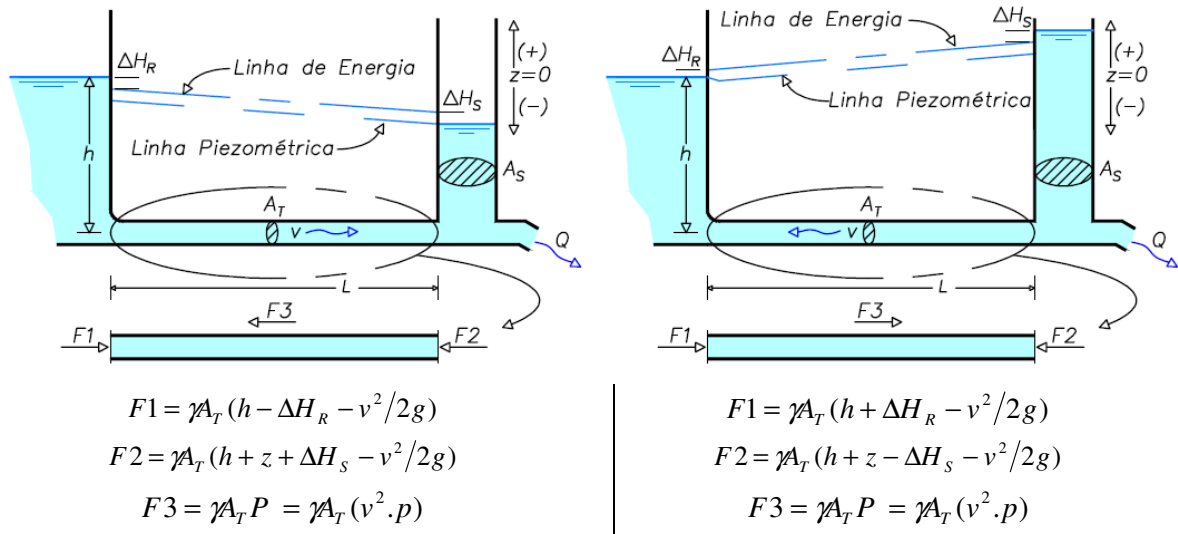


Figura 2.13 - Chaminé de equilíbrio localizada a montante da turbina. Esquema das forças no túnel.

A soma das forças F1, F2 e F3 é igual à força de inércia a que está sujeito o troço de escoamento (2ª Lei de Newton) ou seja:

$$\rho A_T L \frac{dv}{dt} = F1 - F2 - F3 \quad \left| \quad \rho A_T L \frac{dv}{dt} = F1 - F2 + F3 \right.$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} (\Delta H_R + \Delta H_S + v^2 p + z) \quad \left| \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} (-\Delta H_R - \Delta H_S - v^2 p + z) \right.$$

As perdas de carga localizadas na tomada de água e na ligação ao reservatório, respectivamente, ΔH_R e ΔH_S , podem ser escritas em função de v^2 e, juntamente com as perdas de carga contínuas, podem ser englobados num único factor de perda de carga (p'').

As perdas de carga localizadas na tomada de água e na ligação à CE, tomam valores diferentes consoante o sentido do escoamento, por isso será designado por p''^+ o factor de perda de carga a utilizar quando o escoamento for positivo e p''^- na situação inversa.

Desta forma, as equações podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L}(\pm v^2 p''^{\pm} + z) \quad (2.1)$$

Na equação, o sinal positivo deverá ser usado quando o escoamento ocorrer na direcção da chaminé de equilíbrio e negativo quando ocorre no sentido contrário, por isso, se em vez de v^2 se considerar $|v|v$ esta condição deixa de ser necessária.

Assim, a equação dinâmica pode ser escrita da seguinte forma:

$$\boxed{\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L}(v|v|p''^{\pm} + z)} \quad (2.2)$$

Em algumas das formulações que podemos encontrar na bibliografia, não é considerada a perda de carga na ligação à CE, sendo incluída a energia cinética do escoamento na equação, ou seja, admite-se que toda a energia cinética do escoamento é perdida. De facto, quando o escoamento se processa na direcção da chaminé, a energia cinética do escoamento será praticamente toda perdida na ligação à chaminé; no entanto, quando o escoamento se processa na direcção oposta não é certo que a energia seja toda perdida na ligação ao reservatório, pois por regra, as estruturas de tomada de água são definidas com transições mais ou menos suaves que permitem recuperar uma parte dessa energia.

A expressão (2.2) foi deduzida para um túnel horizontal, mas também é válida para túneis inclinados [17], devendo-se considerar o comprimento real do túnel e não o projectado no plano horizontal.

Quando a secção do túnel é variável, deverá ser considerada a média ponderada da área da secção, calculada da seguinte forma [2]:

$$A_m = \frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{A_i}} \quad (2.3)$$

O caudal que entra ou sai da chaminé, corresponderá à variação de nível multiplicada pela área da secção ($\frac{dz}{dt} A_s$) e será igual ao caudal do túnel (vA_T), menos o caudal turbinado (Q). Esta relação de caudais corresponde à equação da continuidade e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\boxed{\frac{dz}{dt} A_s = vA_T - Q} \quad (2.4)$$

Em regime permanente o nível na chaminé é calculado através da seguinte expressão:

$$\boxed{z_0 = -p''^+ v_0^2} \quad (2.5)$$

2.5.2.2 Chaminé de Equilíbrio Localizada a Jusante da Turbina

De forma análoga foram deduzidas as equações fundamentais para a situação em que a CE está localizada a jusante da turbina, no início do circuito de restituição, tal como apresentado de forma esquemática na Figura 2.14.

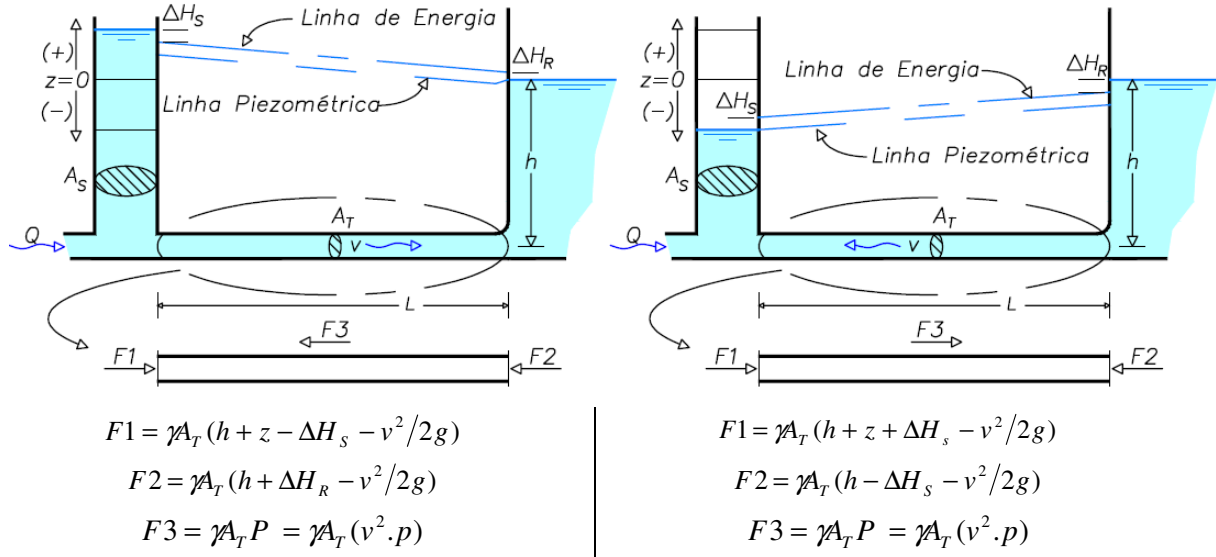


Figura 2.14 - Chaminé de equilíbrio localizada a jusante da turbina. Esquema das forças no túnel.

A soma de F1, F2 e F3 será igual à força de inércia a que está sujeito o troço de escoamento, ou seja:

$$\begin{aligned} \rho A_T L \frac{dv}{dt} &= F1 - F2 - F3 & \rho A_T L \frac{dv}{dt} &= F1 - F2 + F3 \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{g}{L} (\Delta H_R + \Delta H_s + v^2 p - z) & \frac{dv}{dt} &= -\frac{g}{L} (-\Delta H_R - \Delta H_s - v^2 p - z) \end{aligned}$$

A equação da continuidade pode então ser escrita da seguinte forma:

$$\boxed{\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} (v|v|p''^{\pm} - z)} \quad (2.6)$$

A única diferença entre esta equação e a equação da continuidade para a situação da CE localizada a montante da turbina é o sinal que precede z .

O caudal que entra na chaminé de equilíbrio ($dz/dt A_s$) é igual ao caudal turbinado menos o caudal que segue pelo túnel de restituição ($v A_T$). A equação da continuidade, para uma CE localizada a jusante, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\boxed{\frac{dz}{dt} A_s = -v A_T + Q} \quad (2.7)$$

Em regime permanente o nível na chaminé é calculado através da seguinte expressão:

$$\boxed{z_0 = p''^{\pm} v_0^2} \quad (2.8)$$

2.5.3 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO COM ESTRANGULAMENTO

Este tipo de CE está ligada ao túnel, através de uma bifurcação em “T”. Desta forma, e ao contrário do tipo simples, o escoamento em regime permanente não atravessa a chaminé.

Na Figura 2.15 apresenta-se a nomenclatura adoptada para a CE com estrangulamento.

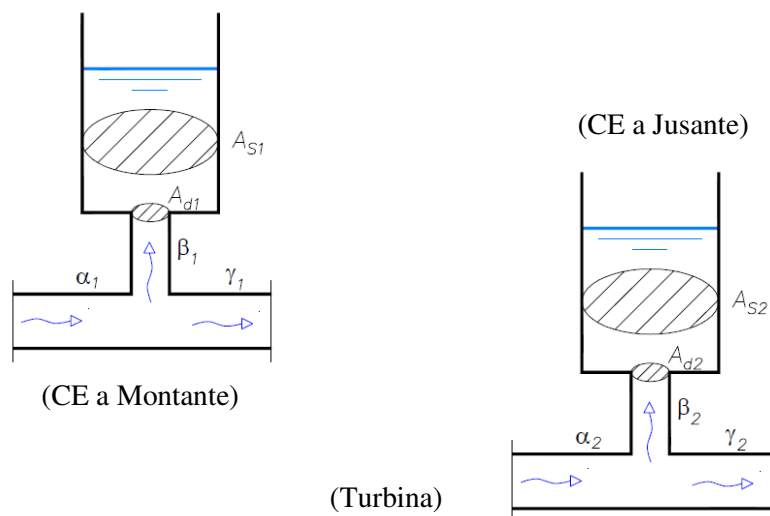


Figura 2.15 - Nomenclatura considerada para as CE com estrangulamento.

As setas azuis representam o sentido positivo dos caudais. O índice d será utilizado para referenciar as variáveis relativas ao troço de ligação à CE e as letras gregas são utilizadas para referenciar as perdas de carga na bifurcação.

As CE com estrangulamento acabam por ser mais vezes adoptadas do que as do tipo simples, pois apresentam algumas vantagens, nomeadamente:

- a existência do estrangulamento na base da chaminé cria uma perda de carga que faz com que as amplitudes das oscilações sejam menores.
- as perdas de carga em regime permanente são menores, maximizando a produção de energia.
- permitem uma maior liberdade na definição do traçado do circuito hidráulico, podendo adoptar-se traçados com inclinações maiores, ficando a CE ligada ao túnel através de um poço vertical.

Tem como principal desvantagem, quando comparada com CE simples, o facto de as ondas de pressão devidas ao golpe de ariete, não serem totalmente reflectidas/anuladas.

2.5.3.1 CE localizada a montante da turbina

A dedução da equação dinâmica para este tipo de CE é idêntica à anteriormente apresentada para CE simples; no entanto, no termo $F2$ subdividiu-se a perda de carga na ligação à chaminé (ΔH_s), na perda de carga que ocorre na bifurcação (ΔH_β) e perda de carga que ocorre no orifício de ligação à chaminé (ΔH_d).

Na Figura 2.16 apresenta-se, de forma esquemática, um circuito hidráulico com a CE situada a montante da turbina. Para esse circuito, são apresentados duas situações relativas ao sentido do escoamento no túnel.

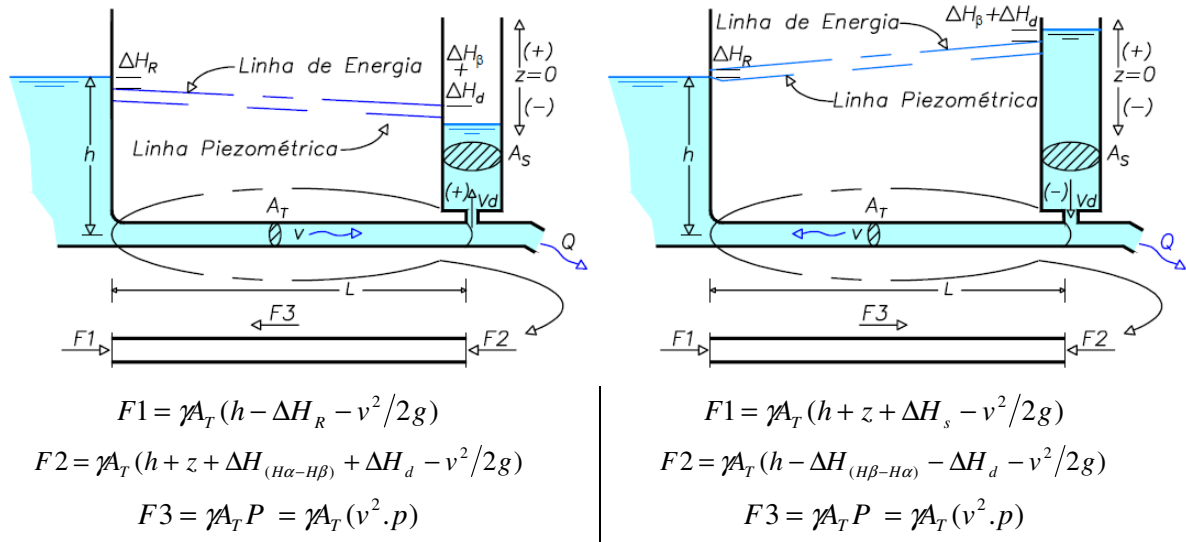


Figura 2.16 - CE com estrangulamento localizada a montante da turbina. Esquema das forças no túnel

A soma de F1, F2 e F3 será igual à força de inércia a que está sujeito o troço de escoamento, ou seja:

$$\rho A_T L \frac{dv}{dt} = F1 - F2 - F3 \quad \left| \quad \rho A_T L \frac{dv}{dt} = F1 - F2 + F3 \right.$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} (\Delta H_R + \Delta H_{(H\alpha-H\beta)} + \Delta H_d + v^2 p - z) \quad \left| \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} (-\Delta H_R - \Delta H_{(H\beta-H\alpha)} - \Delta H_d - v^2 p - z) \right.$$

A perda de carga localizada na tomada de água pode ser incluída no factor p , passando este, a designar-se por p' . Será designado por p'^+ o factor de perda de carga a utilizar quando o escoamento for positivo e p'^- na situação inversa.

A perda de carga no orifício de ligação à chaminé (ΔH_d) pode ser calculada de forma idêntica à perda de carga no túnel, ou seja, em função do quadrado da velocidade no orifício (v_d^2), através de um factor de perda de carga, normalmente constante para cada sentido do escoamento (p_d^+ e p_d^-). ΔH_d deverá ter sinal positivo quando o escoamento ocorre para o interior da chaminé, e sinal negativo na situação inversa, por isso em vez do quadrado da velocidade será considerado $v_d |v_d|$.

Designa-se como ΔH_β as perdas de carga na bifurcação, considerando que representará sempre a diferença de carga entre o túnel e a bifurcação ($H_\alpha - H_\beta$). Como se verá no ponto 2.8.2.2, ΔH_β é calculado através da velocidade do túnel na zona de inserção da CE; no entanto, o coeficiente de perda de carga a considerar varia em função da percentagem de caudal derivado para a chaminé.

Assim, a equação dinâmica para a CE com estrangulamento pode então ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} (z + v_d |v_d| p_d^\pm + \Delta H_\beta + v |v| p'^\pm) \quad (2.9)$$

A metodologia adoptada para o cálculo de ΔH_β inclui o sinal “+” ou “-”. Remetendo para o ponto 2.8.2.2, ΔH_β corresponderá a $-\Delta H'$.

A equação da continuidade é idêntica à deduzida anteriormente para a CE simples (2.4).

Em regime permanente o nível na chaminé z_0 é calculado através da seguinte expressão:

$$z_0 = -p'^{(+)} v_0^2 - \Delta H_{\beta 0} \quad (2.10)$$

2.5.3.2 Chaminé localizada a jusante da turbina

Na Figura 2.17 apresenta-se de forma esquemática um circuito hidráulico com a CE situada a jusante da turbina. Para esse circuito são também apresentados dois cenários relativos ao sentido do escoamento no túnel.

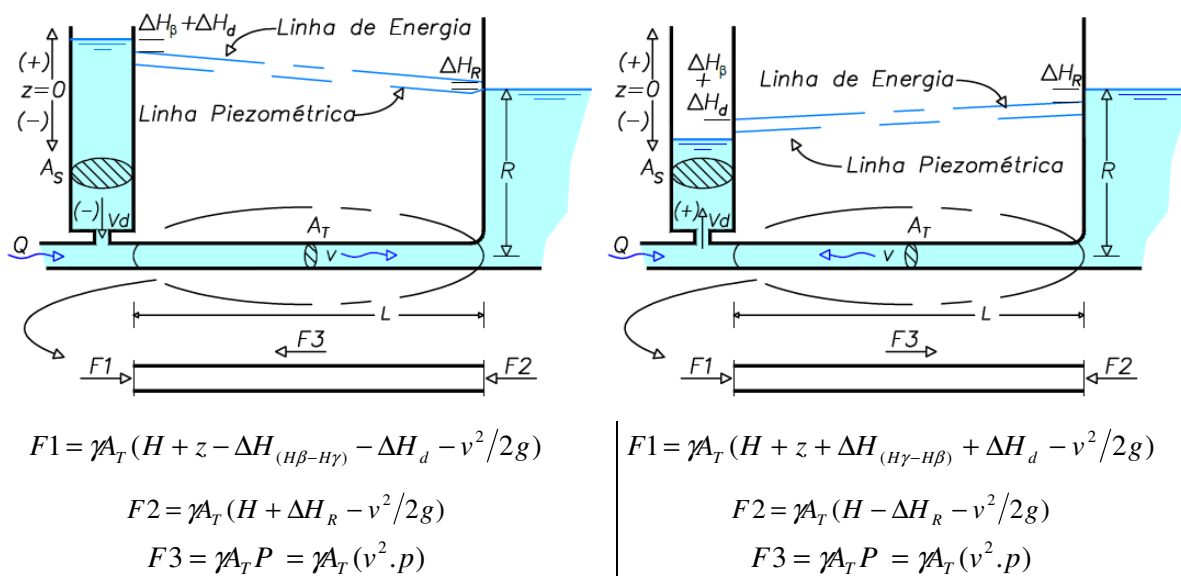


Figura 2.17 - CE com estrangulamento localizada a jusante da turbina. Esquema das forças no túnel.

Também aqui, designa-se como ΔH_β as perdas de carga na bifurcação, considerando que representará sempre a diferença de carga entre o túnel e a bifurcação ($H_\gamma - H_\beta$).

Considerando a mesma abordagem feita para a situação em que a CE está localizada a montante da turbina, a equação dinâmica pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} \left(-z - \Delta H_{\beta} - v_d |v_d| p_d^{\pm} + v |v| p^{\pm} \right) \quad (2.11)$$

Remetendo para o ponto 2.8.2.2, ΔH_β corresponderá a $\Delta H'''$.

A equação da continuidade é idêntica à deduzida anteriormente para a CH simples localizada a jusante (2.7).

Em regime permanente o nível na chaminé z_0 é calculado através da seguinte expressão:

$$\boxed{z_0 = p'^+ v_0^2 - \Delta H_{\beta 0}} \quad (2.12)$$

2.5.3.3 Dimensionamento do Orifício

Considerando um circuito hidráulico com a CE localizada a montante da turbina, numa situação de interrupção de caudal, o aumento de nível na chaminé cria uma contrapressão, que actua como uma força de frenagem retardando o escoamento no túnel. Esta força é nula no início e máxima quando a chaminé atinge o seu nível máximo.

Quando se introduz o estrangulamento na base, cria-se uma perda de carga entre o túnel e a chaminé, por efeito da bifurcação e do orifício de ligação que faz com que a contrapressão aumente quando o escoamento se realiza para o interior da chaminé. Como a perda de carga é, por regra, proporcional ao quadrado da velocidade, esta perda de carga é máxima no início, quando o caudal derivado é também máximo.

Na situação inversa, nos primeiros instantes, a seguir à abertura do distribuidor, o escoamento processa-se primeiro na totalidade e depois parcialmente a partir da CE. Com a introdução do estrangulamento, é adicionada uma subpressão na base da chaminé que diminui a contrapressão, potenciando a aceleração do escoamento no túnel.

Com base nestes princípios, Calame e Gaden desenvolveram uma teoria para o cálculo do estrangulamento óptimo do orifício [18]. Na Figura 2.18 ilustram-se os conceitos de estrangulamento elevado, óptimo e reduzido para o cenário de fecho instantâneo da turbina.

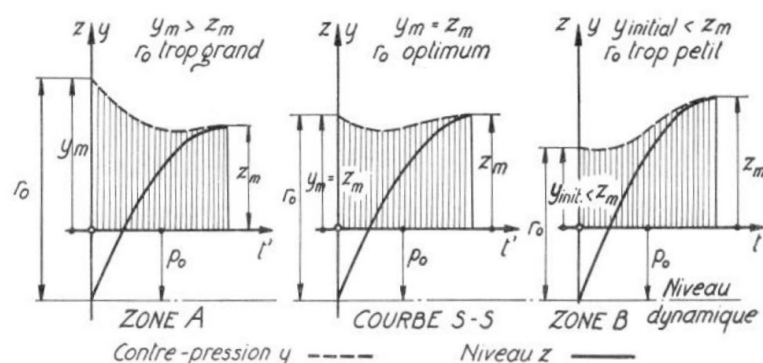


Figura 2.18 - Contrapressão para os diversos graus de estrangulamento – Cenário de Fecho [18]

Na Figura 2.18, r_o representa o valor inicial da perda de carga entre o túnel e a CE. O símbolo z_m representa o valor da oscilação máxima.

Se o estrangulamento for demasiado elevado, a pressão no túnel será superior à pressão correspondente ao nível máximo na chaminé, aumentando portanto o valor da pressão a considerar no dimensionamento do túnel. Se o estrangulamento for reduzido, a contrapressão inicial será menor do que a correspondente ao nível máximo, reduzindo por isso a eficácia do estrangulamento.

O estrangulamento óptimo passa então por igualar as perdas de carga iniciais, ao valor da oscilação máxima.

Para o cenário de abertura instantânea do distribuidor, o raciocínio é análogo; no entanto neste caso poderá ser aceite uma pressão inicial menor do que a correspondente a z_{min} . Na Figura 2.18 ilustram-se os diferentes cenários de estrangulamento para o cenário de abertura instantânea.

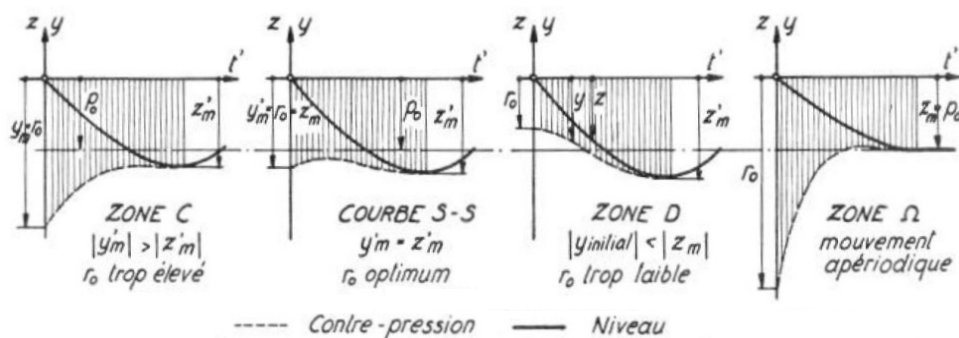


Figura 2.19 - Contrapressão para os diversos graus de estrangulamento – Cenário de Abertura [18]

Quando a contrapressão é muito grande, o nível na chaminé desce até ao correspondente em regime permanente sem o ultrapassar, não originando por isso oscilações.

Quando a chaminé se localiza a jusante da turbina a lógica é a mesma; no entanto, deverá ter-se em conta que a oscilação máxima ocorre no cenário de abertura instantânea e que a oscilação mínima ocorre no cenário de fecho instantâneo.

Os referidos autores desenvolveram também uma série de ábacos para o dimensionamento das chaminés com orifícios. O uso desses ábacos é perfeitamente válido; no entanto, tendo em conta as

ferramentas disponíveis actualmente, como se verá no ponto seguinte, será relativamente simples, por tentativa erro, ajustar a geometria do orifício até se atingirem os objectivos pré-estabelecidos.

Quando as ondas de pressão provocadas pelo choque hidráulico forem significativas, este dimensionamento “óptimo” do orifício, pode na realidade não corresponder à geometria que de facto minimiza as pressões no túnel.

As ondas de pressão provocadas pelo fecho ou abertura do distribuidor viajam a grande velocidade ao longo da conduta forçada. Como numa CE com estrangulamento essas ondas de pressão podem ser reflectidas através do túnel, interessa perceber em que medida a geometria do orifício pode influenciar as pressões máximas que se poderão verificar no túnel.

O período das ondas de pressão provocadas pelo choque hidráulico é muito menor do que o período das oscilações na chaminé, e a sobrepressão máxima ocorre logo a seguir ao fecho do distribuidor, enquanto que o nível máximo na CE é atingido apenas algum tempo depois.

Se a definição da geometria do orifício for feita de acordo com o conceito de estrangulamento óptimo, a “contrapressão” na base da CE a seguir ao fecho da turbina é mais ou menos constante. Por isso, quando considerado também os efeitos do choque hidráulico, a esta pressão mais ou menos constante, sobrepõem-se as ondas de pressão devidas ao choque hidráulico.

No ponto seguinte, apresenta-se o exemplo de dimensionamento de um orifício, onde se analisa esta problemática.

2.5.3.4 Exemplo de Aplicação

Para o AH apresentado na Figura 2.20, sem alterar a área da chaminé, vai-se definir a dimensão de um orifício para uma CE com estrangulamento, considerando os conceitos apresentados.

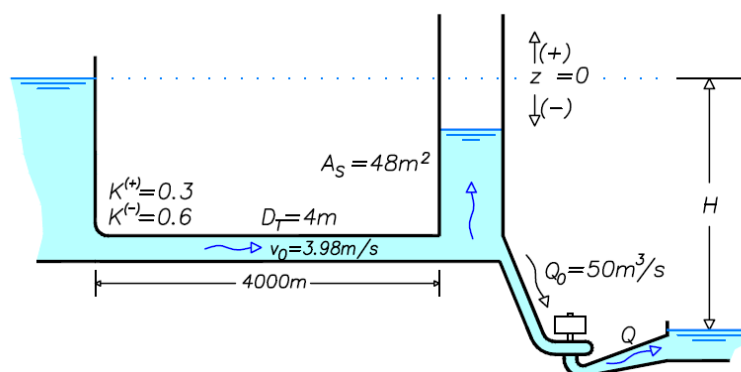


Figura 2.20 - Exemplo de um AH com a CE localizada a montante

No cenário de fecho instantâneo, e admitindo o valor de 1 para o coeficiente de perda de carga na saída do orifício para a chaminé, será necessário um diâmetro de 1.72m, de modo a soma das perdas de carga na bifurcação e orifício de ligação com z no instante inicial iguale o valor corresponde a z_{max} . Este diâmetro foi obtido por aproximações sucessivas e considerando que a bifurcação faz um ângulo de 90° com o túnel. As perdas de carga na bifurcação foram calculadas de acordo com o exposto no ponto 2.8.2.2.

De notar que foi considerado que o diâmetro da bifurcação se mantém sempre constante. Muitas vezes, o diâmetro do orifício na ligação à chaminé é inferior ao da bifurcação.

Assumindo este diâmetro, quando se considera o cenário de abertura instantânea, será necessário ter um valor de 0.55 para o coeficiente de perda de carga na entrada do orifício de modo que a perda de carga inicial na bifurcação e orifício de entrada seja igual a z_{min} . Este coeficiente de perda de carga foi obtido também por aproximações sucessivas.

Esta solução é uma das muitas combinações possíveis que permitirão atingir os 2 objectivos pré-estabelecidos. No presente caso, não será muito difícil definir uma geometria que origine as referidas perdas de carga. No entanto, quase nunca é assim tão simples conceber uma geometria que permita cumprir os objectivos pré-estabelecidos, aparecendo por vezes orifícios com geometrias relativamente complexas.

Na Figura 2.21 apresentam-se as oscilações e as perdas de carga na bifurcação e orifício de ligação correspondentes aos cenários de fecho instantâneo (gráfico da esquerda) e abertura instantânea (gráfico da direita), considerando o diâmetro e os coeficientes de perda de carga atrás referidos.

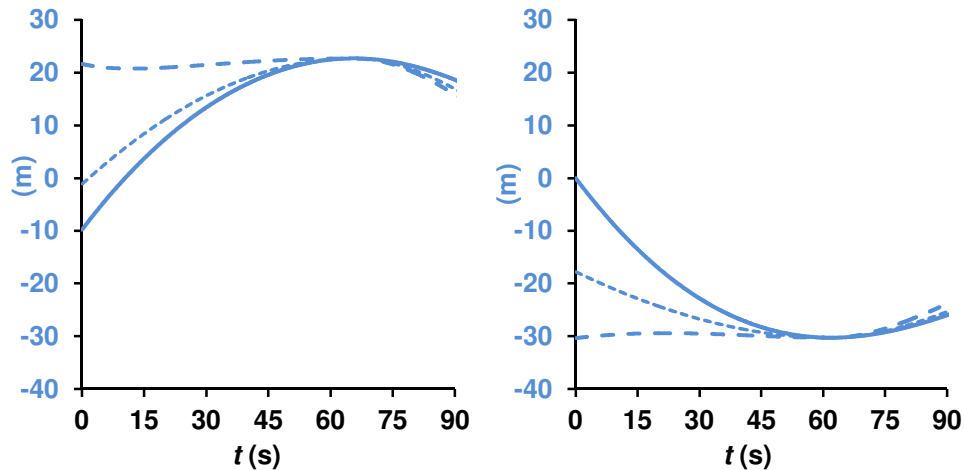


Figura 2.21 – z (—), z + perdas de carga na bifurcação (---), z + perdas de carga na bifurcação e orifício (- · -). Fecho e abertura instantâneas.

A linha a tracejado fina inclui apenas as perdas na bifurcação e a linha a tracejado inclui também as perdas na ligação à chaminé e representa o valor da pressão na base da CE, referenciado em relação a $z = 0$. Nos gráficos estão representadas estas duas linhas para se perceber a importância de se considerarem as perdas de carga na bifurcação nesta análise.

Para melhor percebermos as vantagens da CE com estrangulamento face à do tipo simples, apresenta-se na Figura 2.22, para estes 2 tipos de chaminés e considerando a mesma secção, a comparação das oscilações para os cenários de fecho instantâneo (gráfico da esquerda) e abertura instantânea (gráfico da direita).

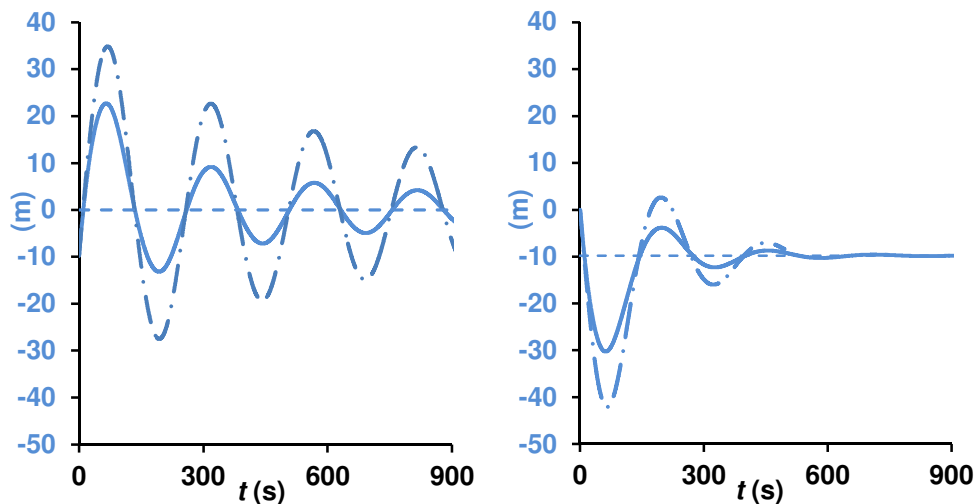


Figura 2.22 - Comparação entre as oscilações numa CE com estrangulamento (—) e numa do tipo simples (- · -).

A linha a cheio representa as oscilações para a CE com estrangulamento e a linha a traço-ponto representa as oscilações considerando uma chaminé do tipo simples.

A linha recta a tracejado representa o nível para onde as oscilações tendem a estabilizar. No cenário de fecho, o nível na CE irá estabilizar em $z = 0$ e no cenário de abertura irá estabilizar em $z = z_0$, ou seja, o nível correspondente ao regime permanente.

Como se pode observar, as amplitudes das oscilações na CE com estrangulamento são significativamente mais pequenas, fazendo com que possa adoptar uma chaminé mais baixa ou, alternativamente, com uma secção menor, reduzindo-se em qualquer dos casos os volumes de escavação.

Para este diâmetro do orifício, 1.72 m, vai-se agora analisar o comportamento das oscilações e pressão no túnel junto do ponto de inserção da CE, quando é tido também em conta o efeito do choque hidráulico a seguir a uma manobra de fecho com uma duração de 7.5 s, considerando que a conduta forçada tem um diâmetro de 3 m e um comprimento de 2000 m. Repetiu-se a mesma análise considerando um diâmetro ligeiramente maior, 1.92 m.

Como as ferramentas desenvolvidas não tem em conta o choque hidráulico, para esta análise em particular utilizou-se o programa WHAMO¹ considerando um valor de 1000 m/s para a celeridade.

Na Figura 2.23 apresentam-se os resultados das simulações até se atingir o valor máximo na primeira oscilação, considerando um diâmetro na bifurcação e orifício de 1.72 m (gráfico da esquerda) e 1.92 m (gráfico da direita)

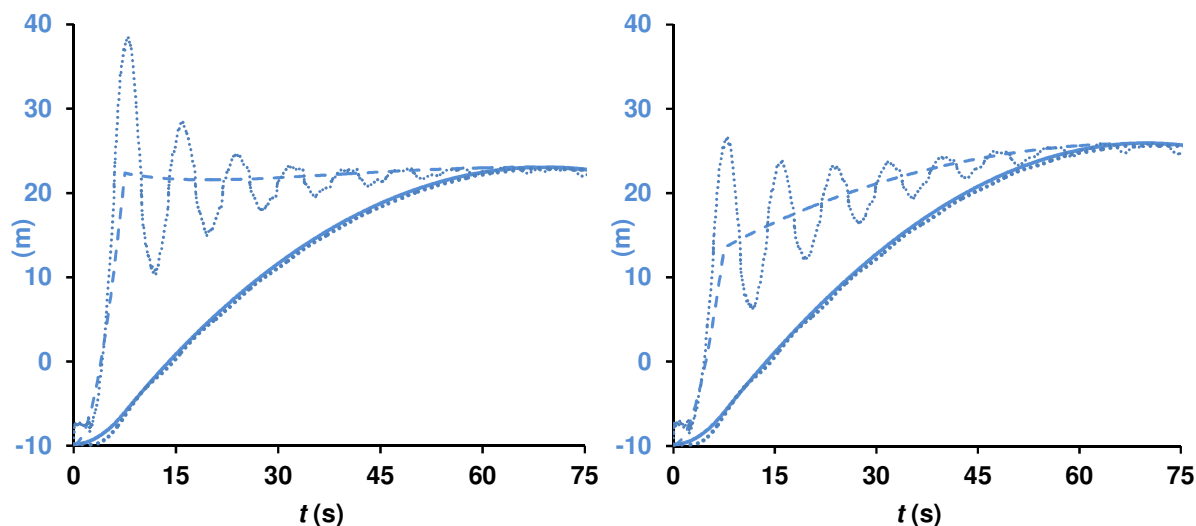


Figura 2.23 - Oscilações (—) e valor da pressão no túnel junto do ponto de inserção da CE (- - -).

Todos os valores estão referenciados a $z = 0$. As linhas a cheio representam os níveis na CE e a linha a tracejado representa a pressão no túnel calculadas através das ferramentas desenvolvidas no âmbito da presente tese, tendo em conta apenas o fenómeno da oscilação em massa. As linhas a picotado correspondem aos valores calculados com o software WHAMO, tendo em conta também o efeito do choque hidráulico.

Os níveis na CE, quando considerado o efeito do choque hidráulico não diferem significativamente dos calculados considerando unicamente o fenómeno da oscilação massa, no entanto, as pressões na base da chaminé, junto ao ponto de inserção variam bastante.

¹ WHAMO – Water Hammer and Mass Oscillation. US Army Corps of Engineers. Construction Engineering Research Laboratories.

No gráfico da esquerda, o nível máximo na CE é mais baixo, mas a pressão máxima verificada no túnel é cerca de 15 m superior do que a pressão máxima no gráfico da esquerda. Para este cenário, o diâmetro que de facto minimiza as pressões no túnel é um pouco maior do que o obtido através do conceito de estrangulamento óptimo.

2.5.4 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO COM CÂMARAS DE EXPANSÃO LATERAIS

Numa CE com secção constante a limitação do nível máximo e/ou nível mínimo pode ser conseguido através do aumento da área da chaminé. No entanto, do ponto de vista geotécnico este aumento de área traz custos acrescidos e, por vezes, pode até nem ser possível. Nas chaminés localizadas a jusante, normalmente definidas numa zona muito próxima da central, este aumento de área pode trazer também constrangimentos devido à proximidade entre a chaminé e a caverna da central.

A colocação de câmaras laterais de expansão “dão volume” à chaminé, através de soluções mais razoáveis do ponto de vista geotécnico, permitindo reduzir a área do poço, o que do ponto de vista hidráulico é também uma vantagem, pois quanto mais rápida for a subida ou a descida de nível na chaminé de equilíbrio, mais rapidamente o escoamento no túnel é frenado ou acelerado, respectivamente.

Na Figura 2.24 apresentam-se os dois tipos principais de CE com câmaras de expansão.

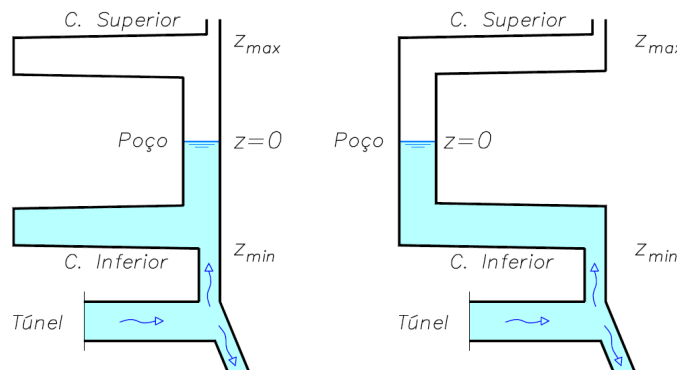


Figura 2.24 - CE com câmaras de expansão.

Não é obrigatório que uma CE tenha as duas câmaras representadas, dependendo das características específicas do projecto, poderá ter apenas a câmara superior ou a inferior.

As CE com câmaras podem-se combinar com qualquer outro tipo de chaminé.

As equações fundamentais são idênticas às da CE simples ou com estrangulamento, caso tenha um estrangulamento na base. No entanto, há que ter em conta, na resolução das equações fundamentais a variação da área da chaminé, em função do nível na mesma.

As câmaras de expansão superior e inferior deverão ser definidas fora da gama das cotas de serviço da CE em regime permanente.

A câmara de expansão inferior deverá ser colocada a cotas mais baixas, pois desta forma potencia-se a aceleração do escoamento no túnel, reduzindo-se assim os volumes de água que a câmara terá de garantir ao início de operação da turbina; no entanto, por razões construtivas deverá ser mantida uma distância entre a abóbada do túnel e a soleira da câmara entre 3 a 5m, [19].

Na definição da câmara de expansão superior, por um lado interessa coloca-la o mais acima possível, pois o aumento rápido de nível no poço aumenta a contrapressão, permitindo adoptar uma câmara com menor volume; por outro lado, interessa colocar esta câmara a cotas mais baixas, pois desta forma consegue-se reduzir a pressão máxima a que o túnel irá estar sujeito.

Na maior parte dos casos, numa CE localizada a montante, a posição da câmara de expansão superior acaba por ser condicionada pela topografia, sendo normalmente definida já muito perto da superfície. Numa CE localizada a jusante é normal definir a câmara de expansão superior a cotas mais baixas, limitando desta forma as pressões a que o túnel irá estar sujeito.

Na definição das câmaras de expansão laterais, há que ter alguns cuidados, devendo garantir-se uma inclinação mínima na soleira e, quando não possuírem arejamento, deve-se considerar também uma inclinação mínima na abóbada, de modo a permitir a saída do ar, aquando do enchimento da mesma, [20].

Relativamente ao poço deverá ser definido com uma área mínima que garanta a estabilidade das oscilações (ver Capítulo 3).

Na Figura 2.25 apresenta-se um exemplo interessante, pelo facto da área do poço não ser constante ao longo de toda a sua altura.

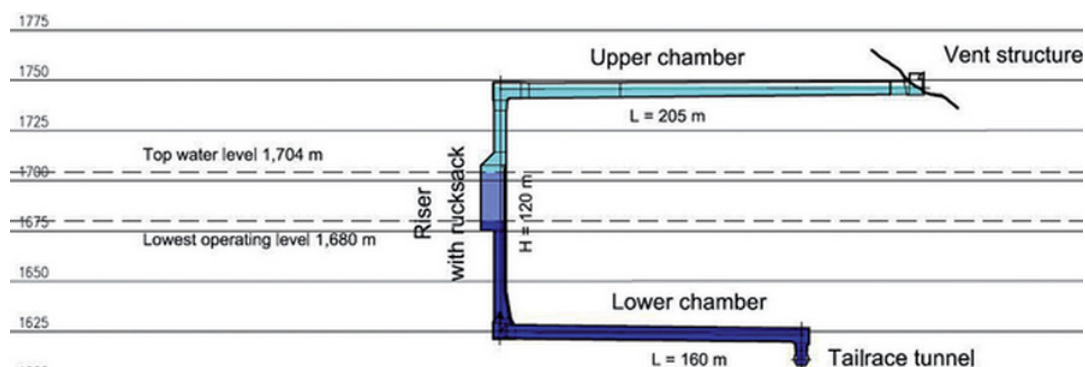


Figura 2.25 - CE de jusante do AH de Reisseck II, na Áustria [21]

Na gama de cotas de serviço da CE a secção do poço é maior. É nesta gama de cotas que se situam os níveis na CE durante regulação automática para “pequenas oscilações” (ver Capítulo 3).

Normalmente um dos critérios de projecto considerado passa por garantir que a câmara inferior não esvazia totalmente, de modo a não entrar ar para o interior do túnel. Este princípio, em dois projectos recentes, localizados também na Áustria, não foi totalmente seguido, pois fez-se coincidir a câmara de expansão inferior com o próprio túnel, tal como se apresenta na Figura 2.26.

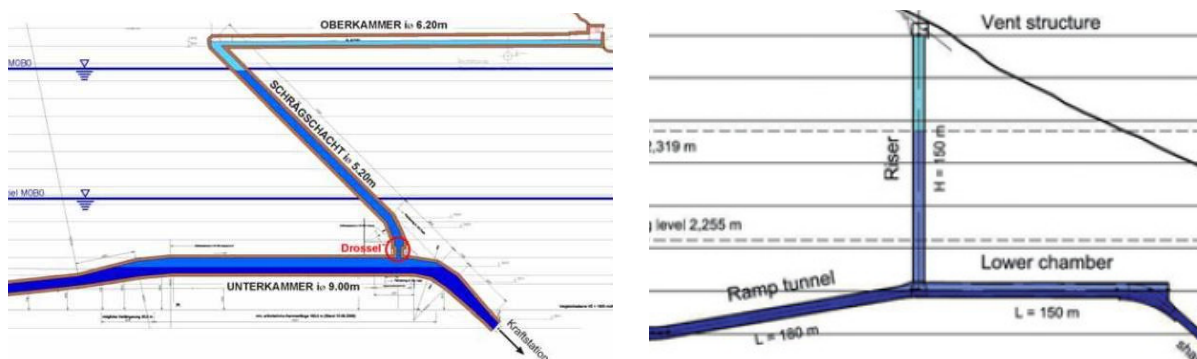


Figura 2.26 - CE de montante do AH de Lindberg II [22] e CE de montante do AH de Reisseck II [23].

O troço de túnel que acumula funções como câmara de expansão inferior foi definido com uma maior secção e como um “ponto alto” no traçado longitudinal. Nesta solução, admite-se portanto que, quando o nível de água descer abaixo da cota inferior do poço, o escoamento se processa em superfície livre.

A equação dinâmica para este tipo de chaminé será idêntica à CE com estrangulamento; no entanto, há que introduzir uma condição em que as perdas de carga provocadas pela bifurcação e pelo orifício, só funcionam quando o nível de água estiver acima da cota do orifício de ligação.

Tal como nos exemplos anteriores, na Áustria, é comum colocar o estrangulamento entre a câmara inferior e o poço; este conceito é levado ao limite no tipo de CE apresentado no ponto 2.5.8.

2.5.4.1 Exemplo de Aplicação

Para o AH apresentado na Figura 2.20, apresentam-se na Figura 2.27 as oscilações para uma CE simples e para uma solução com câmaras de expansão laterais. Para estas duas soluções, são apresentados os níveis de água para os cenários de fecho instantâneo (gráfico da esquerda) e abertura instantânea (gráfico na direita).

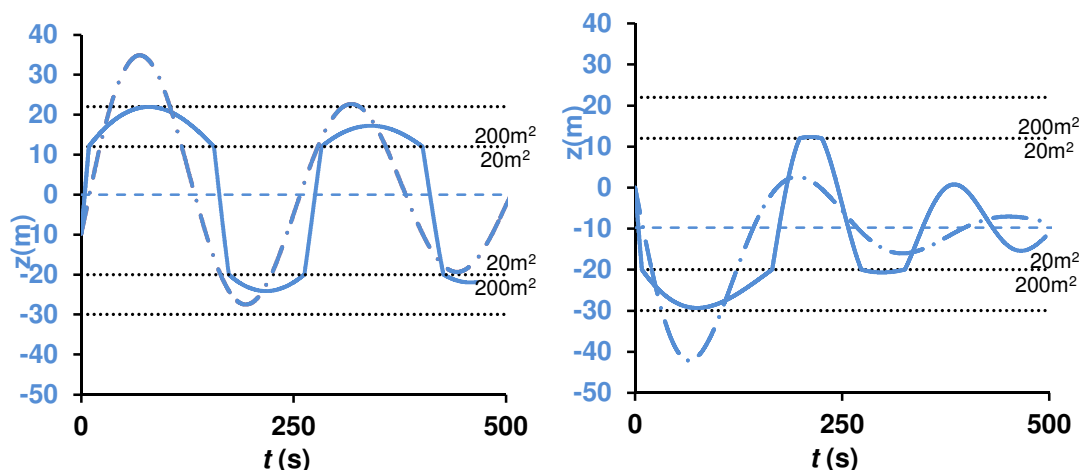


Figura 2.27 - Comparação entre as oscilações na CE simples (— · —) e numa solução com câmaras de expansão (—).

A linha a cheio representa as oscilações para a CE com câmaras de expansão e a linha a traço-ponto representa as oscilações, considerando a CE simples.

Neste exemplo, as câmaras de expansão foram definidas de forma a limitar o nível mínimo e o nível máximo das oscilações, considerando aproximadamente o mesmo volume de escavação da CE simples.

A localização das câmaras está referenciada ao nível estático, tendo-se considerado uma área de 200 m^2 quando z for maior que 12 m ou menor que -20 m . Considerou-se que a área do poço seria de 20 m^2 .

Como se pode observar, as câmaras de expansão permitiram reduzir a subida máxima e descida mínima.

A limitação da descida mínima, por si só não tem grande vantagem hidráulica, mas pode ser importante para validar determinados arranjos.

2.5.5 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DESCARREGADORA

Por vezes, em circunstâncias especiais, é necessário equipar a CE com um descarregador de superfície que irá descarregar caudais para fora do sistema quando os níveis na chaminé ultrapassarem a cota da soleira, limitando assim a subida dos níveis máximos.

Na Figura 2.28 apresenta-se de forma esquemática uma CE descarregadora com a representação da nomenclatura considerada.

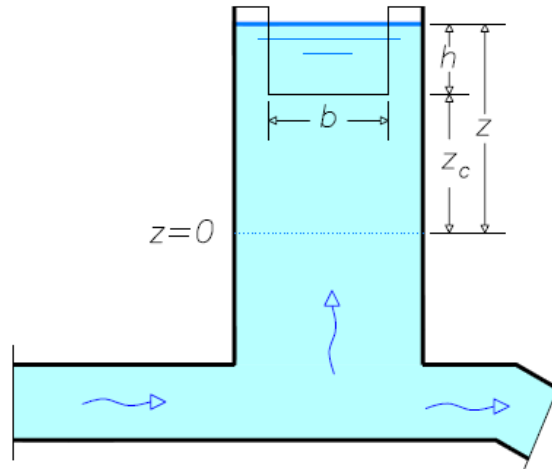


Figura 2.28 - Nomenclatura considerada para a CE descarregadora.

A equação dinâmica é idêntica à da CE simples ou com estrangulamento, se for o caso.

Quando o nível de água estiver abaixo da cota da soleira do descarregador ($z \leq z_c$), a equação da continuidade é também idêntica à da CE simples.

Quando o nível de água na CE estiver acima da cota da soleira do descarregador ($z \geq z_c$), a chaminé estará a descarregar caudais para fora do sistema. O caudal descarregado (Q_s) pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$Q_s = Cbh^{3/2} \quad 2.13)$$

em que:

b representa largura da soleira descarregadora, (m);

C o coeficiente de vazão do descarregador, (m);

h a carga sobre a soleira ($z - z_c$), (m);

Nestes casos, a variação de nível multiplicada pela área ($dz/dt A_s$) será igual ao caudal do túnel (vA_T) menos o caudal turbinado (Q) menos o caudal descarregado (Q_s).

Assim, quando ($z > z_c$), a equação da continuidade é dada pela seguinte expressão, [24]:

$$\boxed{\frac{dz}{dt} A_s = vA_T - Q - Cb(z - z_c)^{3/2}} \quad 2.14)$$

Há que referir que este tipo de solução deverá, sempre que possível, ser evitada pois para além dos caudais descarregados não serem turbinados, será necessário definir uma solução para os transportar até uma linha de água que os permita acomodar, aumentando os impactos ambientais da solução.

2.5.6 CÂMARA DE EQUILÍBRIO NÃO AREJADA

Numa câmara de equilíbrio não arejada, tal como num reservatório de ar comprimido, a pressão do ar acima do nível de água é superior à pressão atmosférica.

Este tipo de solução associada a AH é quase unicamente utilizada na Noruega, e na bibliografia apenas se encontrou um aproveitamento fora da Noruega, em que esta solução foi também adoptada, AH de Moose River (12 MW) nos EUA,[25].

De seguida são deduzidas as equações fundamentais para este tipo de CE seguindo, de uma maneira geral, o apresentado em Jaeger [2], tendo sido, no entanto, mantida a convenção de sinais adoptada nesta dissertação.

Em condições estáticas ($v=0$; $z=0$), a pressão absoluta do volume de ar numa câmara de equilíbrio não arejada (V_m), pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$\frac{p_m}{\gamma} = s + \frac{\bar{p}}{\gamma} \quad (2.15)$$

Tal como representado na Figura 2.29, s representa a diferença entre o nível no reservatório e na câmara em condições estáticas, e $\bar{p}$ representa a pressão atmosférica.

Em regime permanente, o volume de ar V_m varia de ΔV em relação às condições estáticas. Considerando uma condição politrópica, a pressão do volume de ar na câmara (p_b) pode ser obtido através da seguinte expressão:

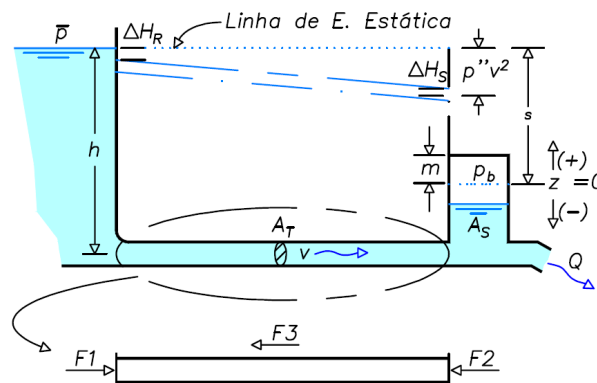
$$\frac{p_b}{\gamma} = \frac{p_m}{\gamma} \left(\frac{V_m}{V_m + \Delta V} \right)^e \quad (2.16)$$

Considerando uma câmara com secção constante, podemos escrever:

$$\frac{p_b}{\gamma} = \frac{p_m}{\gamma} \left(\frac{m}{m-z} \right)^e \quad (2.17)$$

Em que m representa a altura da almofada de ar em condições estáticas e e representa o expoente politrópico, que normalmente toma valores entre 1 e 1.4.

Na Figura 2.29 apresenta-se de forma esquemática um aproveitamento equipado com uma câmara de equilíbrio não arejada.



$$F1 = \mathcal{A}_T(\bar{p}/\gamma + h - \Delta H_R - v^2/2g); \text{ como } \bar{p}/\gamma = p_m/\gamma - s, \quad F1 = \mathcal{A}_T(p_m/\gamma - s + h - \Delta H_R - v^2/2g)$$

$$F2 = \gamma A_T (h - s + z + p_b / \gamma + \Delta H_s - v^2 / 2g)$$

$$F3 = \gamma A_T P = \gamma A_T (v^2.p)$$

Figura 2.29 - Câmara de equilíbrio não arejada. Esquema das forças no túnel.

Analogamente à dedução apresentada para a chaminé de equilíbrio simples, a equação dinâmica fica:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} \left(-\frac{p_m}{\gamma} + \frac{p_b}{\gamma} + z + v|v|p'^{\pm} \right) \quad (2.18)$$

Substituindo (2.15) e (2.17) na equação (2.18), a equação dinâmica fica:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} \left(\left(s + \frac{\bar{p}}{\gamma} \right) \cdot \left(\left(\frac{m}{m-z} \right)^e - 1 \right) + z + v|v|p'^{\pm} \right) \quad (2.19)$$

A equação da continuidade é igual à deduzida para a CE simples.

O valor de z em regime permanente (z_0) pode-se obter, considerando na equação (2.19), $v=v_0$, $d_v/d_t=0$ e $z=z_0$.

$$0 = \left(s + \frac{\bar{p}}{\gamma} \right) \cdot \left(\left(\frac{m}{m-z_0} \right)^e - 1 \right) + z_0 + v_0|v_0|p'^{\pm} \quad (2.20)$$

A grande vantagem deste tipo de solução prende-se com o facto de não haver necessidade da CE ficar situada, em termos altimétricos, na zona do nível da linha de energia estática, permitindo portanto uma maior liberdade, não só no traçado do túnel, como também na escolha da localização da CE, possibilitando posicioná-la mais próxima da posição ideal, ou seja junto à central ou na zona onde existam as melhores condições geotécnicas para a sua construção.

Este tipo de solução tem como principal inconveniente a necessidade do uso de equipamento (compressores), requerendo, por isso, manutenção e monitorização. Os compressores são utilizados para a injeção de ar a seguir ao enchimento do túnel, antes do início da entrada em serviço. Depois da entrada em serviço, os compressores são também utilizados para manter a pressão de ar dentro dos valores aceitáveis de modo a compensar as perdas de ar. Estas perdas são relativamente pequenas, segundo Brock [26], nos aproveitamentos Noruegueses, anualmente, situam-se entre 3% e 10% do volume de ar na câmara (V_m).

Na Noruega, existem 10 aproveitamentos com este tipo de solução, normalmente associados a grandes quedas e a túneis não revestidos. Nas ref. [26],[27] e [28], apresentam-se algumas características destas CE não arejadas. As pressões nas câmaras (P_m/γ) variam entre 1.9 Mpa ($s \sim 200m$) e 7.8 Mpa ($s \sim 800m$) e a altura da almofada de ar (m) situa-se entre 25% e 85% da altura da CE.

Na Figura 2.30 apresenta-se um exemplo de uma CE deste tipo no AH de Ulset (1985), na Noruega.

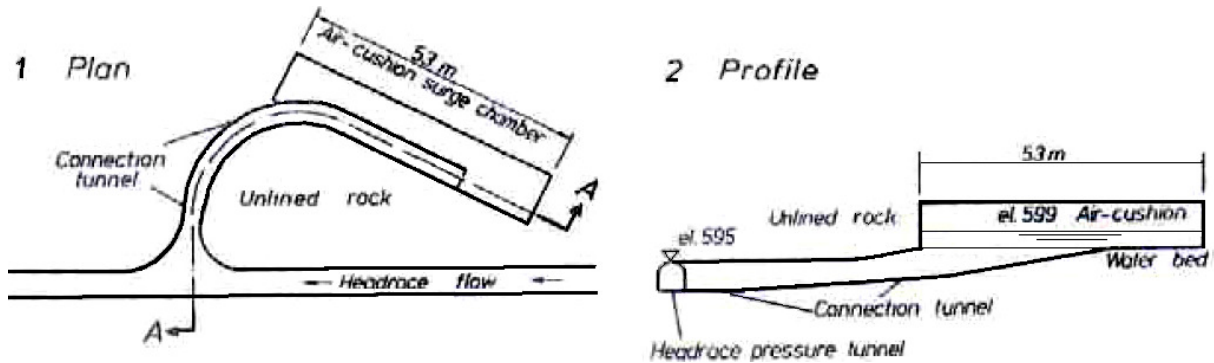


Figura 2.30 – Câmara de equilíbrio não arejada do AH de Ulset, [28]

2.5.6.1 Exemplo de Aplicação

Considerando o exemplo da Figura 2.20, apresentam-se na Figura 2.31 as oscilações para uma câmara de equilíbrio não arejada ($s=200m$, $m=10m$ e $e=1$). São também apresentadas as oscilações considerando uma CE simples para os cenários de fecho (gráfico da esquerda) e abertura instantânea da turbina (gráfico da direita).

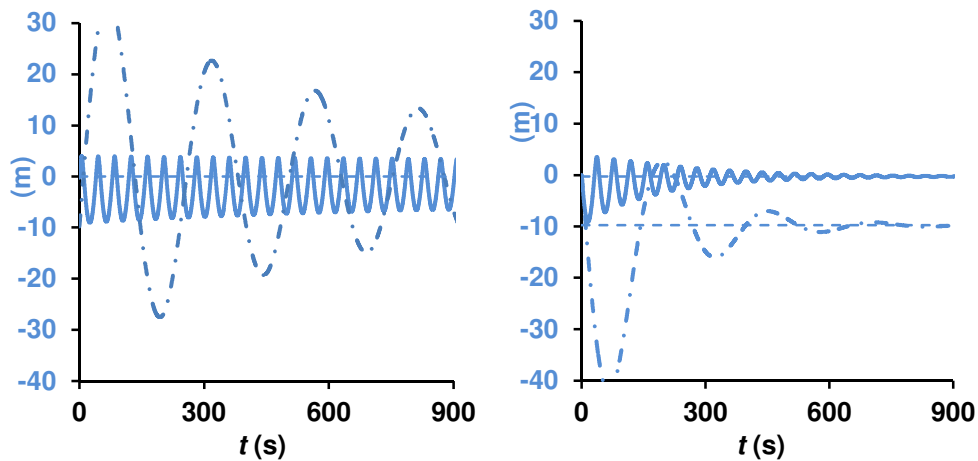


Figura 2.31 - Comparação entre as oscilações na CE não arejada (—) e numa CE do tipo simples (--- + ---).

A linha a cheio representa as oscilações na câmara de equilíbrio não arejada e a linha a traço ponto as oscilações na CE simples.

As amplitudes das oscilações na câmara de equilíbrio não arejada são significativamente mais pequenas do que na CE Simples. Repare-se que o período das oscilações é também bastante mais pequeno.

No exemplo apresentado, considerou-se a mesma secção para câmara de equilíbrio não arejada e para CE simples, mas como se verá no ponto 3.5, a área mínima que garante a estabilidade hidráulica das oscilações é maior numa chaminé de equilíbrio não arejada.

2.5.6.2 Casos Particulares de Centrais Subterrâneas Equipadas com Grupos Pelton

Em centrais subterrâneas equipadas com turbinas Pelton, por vezes quando o túnel de restituição é muito longo e/ou a cota da turbina é definida abaixo do nível de restituição, os túneis são dimensionados para funcionar em pressão. Para o correcto funcionamento da turbina Pelton será necessário pressurizar o poço de restituição da turbina (“turbine pit”), de modo a garantir que o nível de água no poço se situa 2-3 m abaixo da cota dos injectores. Nessas situações esse poço funciona também como CE não arejada. Na Figura 2.32 apresentam-se 2 exemplos deste tipo de situação.

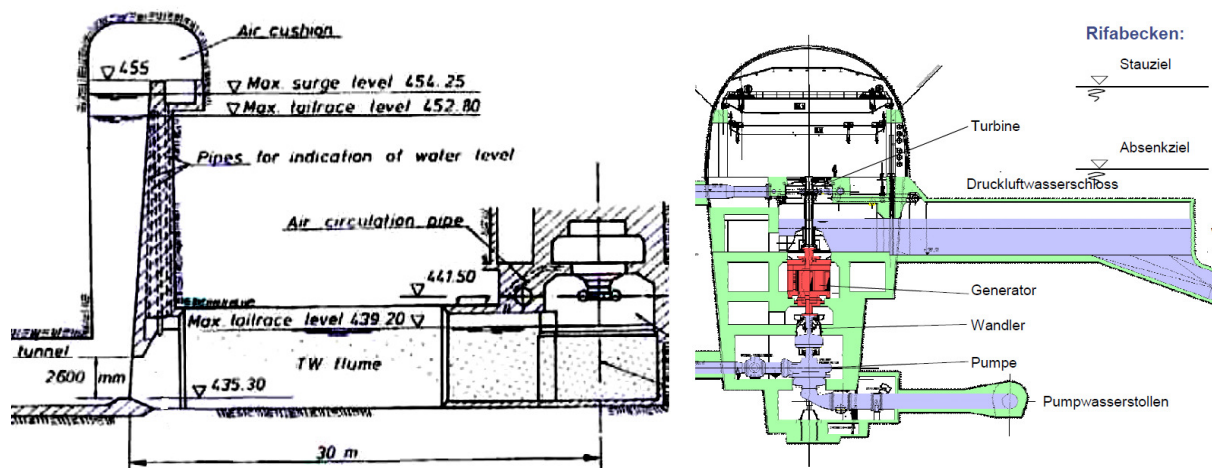


Figura 2.32 - CE não arejada do AH de Tafjord na Noruega [28] e Central do AH de Kopswerk II na Áustria, [29].

No AH de Tafjord (1982), a CE de jusante é também do tipo não arejada. As pressões do ar (p_m/γ) no poço da turbina e na CE não arejada terão obrigatoriamente de ser diferentes.

No AH de Kopswerk II, facilmente se percebe que a cota da turbina (roda da turbina Pelton) está abaixo do nível da restituição, pelo que, é necessário pressurizar o poço de restituição da turbina, de modo a baixar o nível de água para o correcto funcionamento da turbina Pelton.

Quando a CE não arejada se localiza a jusante da turbina, a equação dinâmica para o cálculo das oscilações toma a seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L} \left(\left(s + \frac{\bar{p}}{\gamma} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{m}{m-z} \right)^n \right) - z + v|v|p''^{\pm} \right) \quad (2.21)$$

A equação da continuidade é igual à deduzida para a CE simples localizada a jusante da turbina.

2.5.7 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIFERENCIAL

As CE diferenciais caracterizam-se pela existência de duas câmaras separadas, interligadas por um orifício. Durante os regimes transitórios, devido às perdas de carga nesse orifício, os níveis de água nas duas câmaras serão diferentes.

Na prática, este tipo de solução é semelhante a uma CE com estrangulamento em que é adicionado um poço descarregador que dá continuidade ao orifício através da chaminé, fazendo com que existam duas câmaras: Câmara Exterior e Poço Descarregador.

Na Figura 2.33 apresentam-se as diversas fases de funcionamento numa chaminé deste tipo, a seguir ao fecho da turbina.

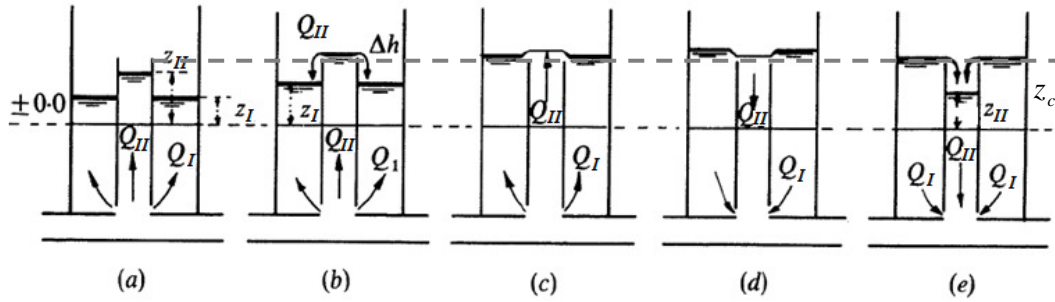


Figura 2.33 - Chaminé de equilíbrio diferencial. Fases de funcionamento, [2].

As diferentes fases de funcionamento ilustradas na figura são descritas de seguida:

- (a) a seguir ao fecho da turbina, a subida do nível de água é mais rápida no interior do poço, devido à perda de carga no(s) orifício(s) de ligação à camara exterior;
- (b) depois do nível de água no poço atingir o limite superior (z_c), o caudal é descarregado para a câmara exterior;
- (c) quando os níveis de água se igualam nas duas câmaras, a subida de nível ocorre de forma similar até que o escoamento para o interior da chaminé se inverta (d);
- (e) devido à perda de carga no(s) orifício(s) de ligação entre as duas câmaras, a descida do nível será mais rápida no poço, sendo por isso, alimentado através do bordo superior, enquanto o nível de água na câmara exterior for superior ao limite superior do poço, ou seja enquanto $z_I > z_c$.

De seguida apresentam-se as equações fundamentais para este tipo de CE, seguindo, de uma maneira geral, o apresentado em Jaeger [2].

A equação dinâmica é idêntica à da CE com estrangulamento, no entanto, deverá ser considerado o nível de água no poço descarregador (z_{II}). Além disso, como o poço dá continuidade ao orifício de

entrada, não foi considerada a parcela referente à perda de carga no orifício de ligação à CE ($v_d |v_d| p_d^\pm$), tendo sido apenas incluída na equação a perda de carga na bifurcação (ΔH_β).

$$\boxed{\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L}(z_{II} + \Delta H_\beta + v|v|p^\pm)}$$
 (2.22)

Relativamente à equação da continuidade, quando $z_{II} < z_c$ ou $z_I < z_c$, fica:

$$A_T v = Q_I + Q_{II} + Q$$
 (2.23)

em que:

$$Q_I = A_I \frac{dz_I}{dt} = \pm A_o \sqrt{2g} \sqrt{|z_{II} - z_I|} \quad \text{ou} \quad dz_I = \frac{\pm A_o \sqrt{2g} \sqrt{|z_{II} - z_I|}}{A_I} dt$$
 (2.24)

A_o representa a área efectiva do(s) orifício(s) de ligação para a câmara exterior. O sinal positivo deverá ser usado quando $z_{II} < z_I$.

$$Q_{II} = A_{II} \frac{dz_{II}}{dt} \quad \text{se} \quad z_{II} < z_c \text{ e } z_I < z_c$$
 (2.25)

$$Q_{II} = A_{II} \left(\frac{dz_{II}}{dt} \right) \pm Cbh^{3/2} \quad \text{se} \quad z_{II} > z_c \text{ ou } z_I > z_c$$
 (2.26)

O sinal positivo deverá ser usado quando $z_{II} > z_c$; b representa o comprimento da soleira descarregadora do poço, (m); c o coeficiente de vazão da soleira, (m); h a carga sobre a soleira ($h = z_{II} - z_c$ se $z_{II} > z_c$ ou $h = z_I - z_c$ se $z_I > z_c$), (m).

Quando $z_{II} > z_c$ e $z_I > z_c$, os níveis nas duas câmaras são idênticos e a equação da continuidade toma a seguinte forma:

$$Q_I + Q_{II} = (A_I + A_{II}) \frac{dz}{dt}$$
 (2.27)

O valor de z_0 em regime permanente obtém-se através da seguinte expressão:

$$z_{I0} = z_{II0} = -p^{(+)} v_0^2 - \Delta H_{\beta 0}$$
 (2.28)

Num cenário de fecho, neste tipo de CE, interessa que o poço tenha uma área pequena de modo a que a subida do nível de água até ao limite superior, se faça o mais rapidamente possível, para que a contrapressão máxima actue o mais cedo possível. A área do poço não deverá, no entanto, ser inferior a $\frac{3}{4}$ da área do túnel, pois, caso contrário, as variações de nível de água na chaminé seriam muito rápidas dificultando a regulação da turbina [30].

Em cenários de abertura, tanto a dimensão do poço, como dos orifícios de ligação entre a câmara exterior e o poço deverão ter uma dimensão mínima, de modo a fornecer o caudal inicial necessário para o funcionamento da turbina.

Esta indicação de dimensionamento para o cenário de abertura, faz com que, no cenário de fecho, a velocidade de subida dos níveis de água no poço seja menor, pois esta dimensão dos orifícios irá permitir a entrada de caudais elevados para a câmara exterior.

Por causa desta contradição, Jaeger [2] refere que as CE diferenciais serão apenas vantajosas se o caudal para o cenário de abertura for menor do que Q_0 . Rich [30] identifica também este problema e descreve a solução adoptada para o resolver, ou pelo menos, minimizar no exemplo de dimensionamento que apresenta.

Na Figura 2.34 apresenta-se a solução adoptada para o orifício de ligação entre o poço e a câmara exterior da CE do AH de Appalachia nos Estados Unidos.

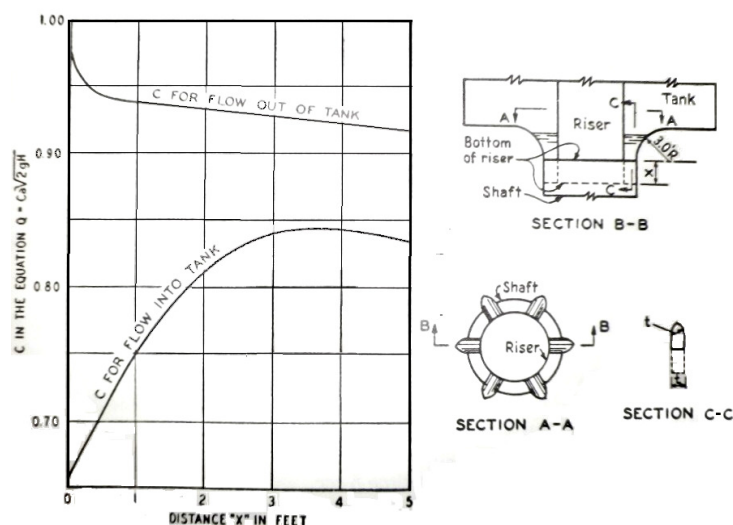


Figura 2.34 - Solução para o orifício de ligação entre câmaras do AH de Appalachia, [30]

A geometria do orifício de ligação entre o poço e a câmara exterior foi definida de modo a ter coeficientes de vazão diferentes, em função do sentido do escoamento. No cenário de fecho, o coeficiente de vazão será menor, possibilitando portanto, uma subida rápida dos níveis de água no poço. No cenário de abertura, esse coeficiente de vazão é mais elevado, permitindo fornecer o caudal inicial necessário para o funcionamento da turbina.

As CE diferenciais, quando associadas apenas à câmara de expansão superior serão sempre vantajosas. Na Figura 2.35 apresenta-se, como exemplo, a CE de equilíbrio de jusante do AH de Kopswerk II na Áustria.

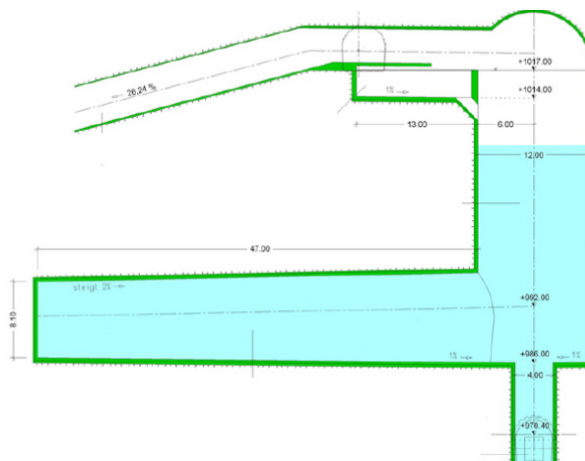


Figura 2.35 - Chaminé de equilíbrio diferencial associada apenas à câmara de expansão superior, [31].

Em termos construtivos, nem sempre é fácil construir o poço descarregador no meio da chaminé, e poderá ser vantajoso definir 2 chaminés separadas, ambas conectadas ao túnel, como no AH de Innertkirchen na Suíça ou ainda, encostar o poço descarregador à parede da câmara exterior, como no AH de Jinping II na China (Figura 2.36).

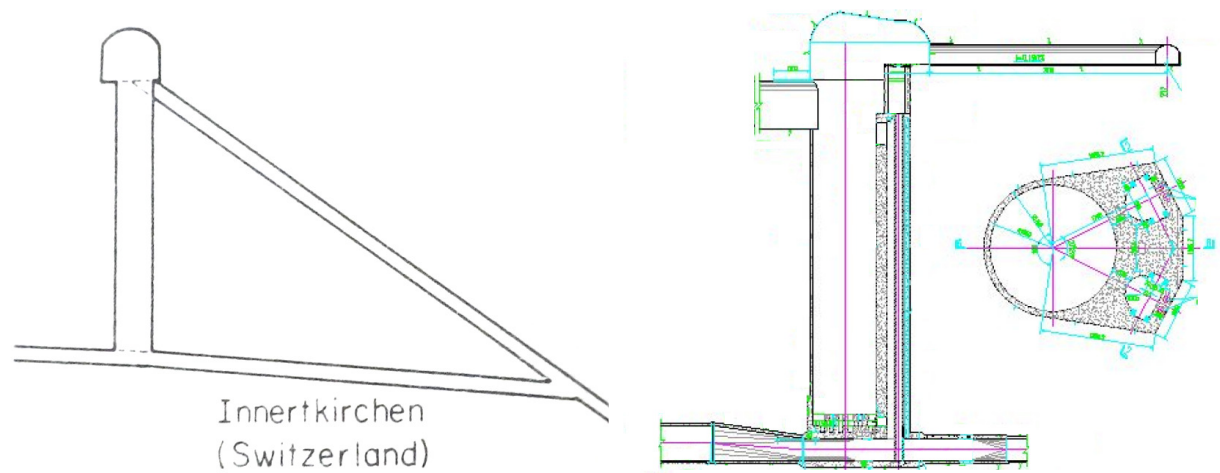


Figura 2.36 - CE diferenciais do AH de Innertkirchen [24] e Jinping II [32].

2.5.8 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIFERENCIAL COM ESTRANGULAMENTO

Na Áustria, desde os anos 60 tem sido adoptado um tipo de chaminé especial, designado de CE Diferencial com Estrangulamento.

Este sistema foi inventado por Thoma em 1928; no entanto, a primeira vez que esta solução foi adoptada foi nos anos 60, no AH de Kaunertal. Desde aí, este tipo de solução já foi considerado em pelo menos mais 6 AH, [33][34].

Na Figura 2.37 apresenta-se um esquema deste tipo de chaminé e como exemplo, a CE do AH de Kaunertal.

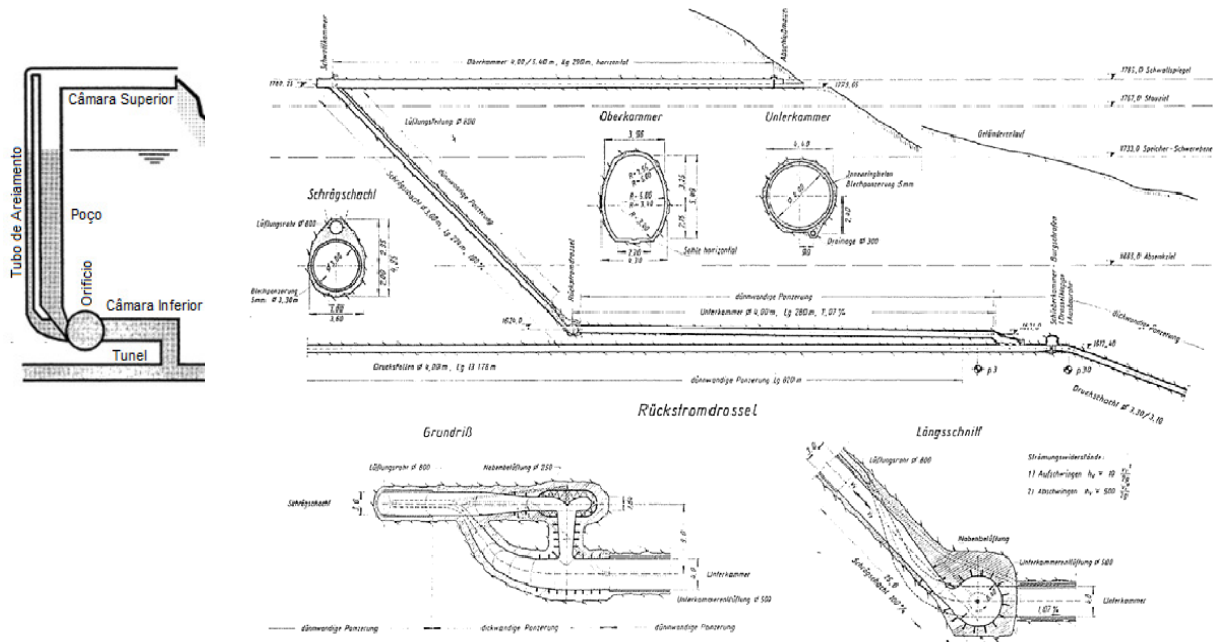


Figura 2.37 - Esquema da CE Diferencial com Estrangulamento (adap. de [33]) e CE do AH de Kaunertal [34].

Este tipo de chaminé é constituído por 2 sistemas:

1º - Câmara Inferior, que estreita no final para um tubo, designado por Tubo de Arejamento.

2º - Poço e Câmara Superior. O orifício de ligação com estrangulamento, localizado no fundo do poço, faz a ligação à Câmara Inferior.

Na Figura 2.38 apresentam-se os dois tipos de orifícios de ligação utilizados: estrangulamento cónico (imagem da esquerda) e estrangulamento com vórtice (imagem da direita).

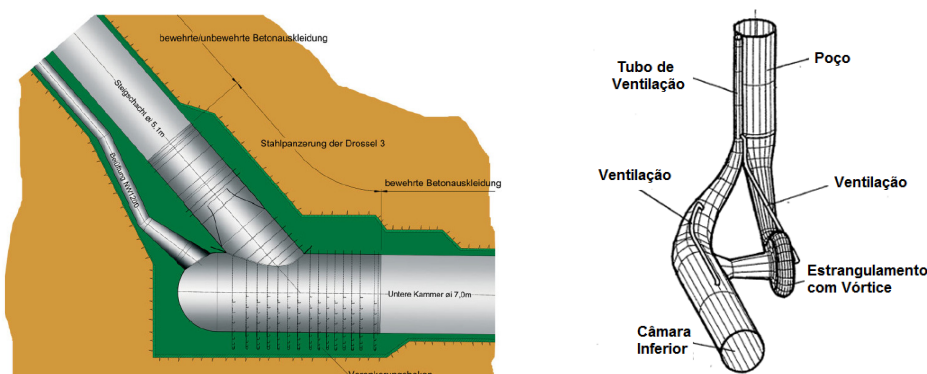


Figura 2.38 - Exemplo de um estrangulamento cónico [35] e de um estrangulamento com vórtice [33].

Na imagem da esquerda, a ligação entre a câmara inferior e o poço é feita através de um orifício cónico. Na imagem da direita, esta ligação é feita através de um estrangulamento com vórtice (“Vortex Flow Throttle Orifice”). Esta geometria é semelhante à caixa espiral de uma turbina Francis. Em ambos os casos, devido ao risco de cavitação, estas zonas são revestidas com aço.

Este tipo de orifícios de ligação, dependendo do sentido do escoamento, originam perdas de carga significativamente diferentes. As perdas de carga serão maiores quando o escoamento se processa do poço para a câmara. Esta característica do estrangulamento é medida através de um rácio que relaciona o coeficiente de perda de carga num e noutro sentido. Para o estrangulamento do tipo cónico esse rácio toma normalmente valores entre 1:2 e 1:3, enquanto que nos estrangulamentos com vórtice este valor se situa normalmente entre 1:20 e 1:50, [33].

Depois de totalmente formado, a perda de carga provocada pelo vórtice é praticamente constante. Até lá, verificam-se perdas de carga devidas às mudanças de secção e direcção, com um coeficiente de perda de carga relativamente baixo, seguindo-se um período de transição até o vórtice funcionar em pleno.

Na Figura 2.39 apresenta-se a evolução do coeficiente de perda de carga do estrangulamento com vórtice da CE do AH de Kaunertal, quando o escoamento se processa do poço para a câmara inferior.

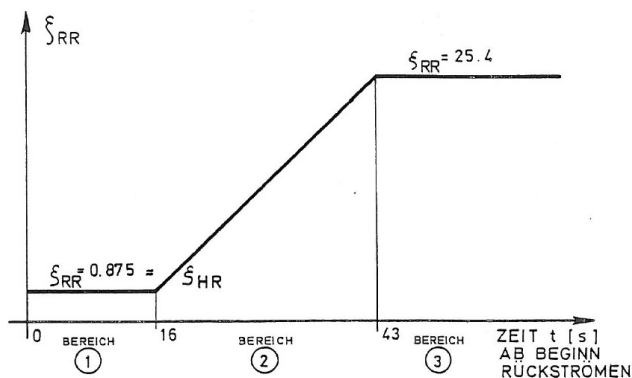


Figura 2.39 - Evolução do coeficiente de perda de carga no estrangulamento com vórtice da CE de Kaunertal [34].

Num cenário de fecho, o funcionamento é semelhante à CE diferencial, pois o nível de água no tubo de arejamento sobe rapidamente para o nível máximo. Num cenário de abertura o nível de água no tubo de arejamento sofre um abaixamento repentino, devido à perda de carga provocada pelo estrangulamento, fazendo com que a contrapressão seja definida pelo nível da câmara inferior.

No exemplo de dimensionamento apresentado por STEYER [33], a adopção deste tipo de solução, quando comparada com uma CE com estrangulamento, permitiu reduzir consideravelmente o volume das câmaras de expansão, especialmente da câmara de expansão inferior.

Este tipo solução tem como principais inconvenientes, o risco de cavitação e definição relativamente complicada, que obriga a um estudo pormenorizado em modelo reduzido.

2.5.9 FUNCIONAMENTO EM MODO DE BOMBAGEM

Em circuitos reversíveis, quando os grupos estiverem a funcionar em modo de bombagem, as equações deduzidas nos pontos anteriores para o túnel de restituição deverão ser consideradas no túnel de adução/compressão para o estudo das oscilações na CE de montante; do mesmo modo, no estudo das oscilações na CE de jusante, as equações fundamentais do circuito de adução, deverão ser consideradas para o túnel de aspiração/restituição.

2.6 SISTEMAS DE CHAMINÉS

O termo sistema de chaminés será utilizado quando num circuito hidráulico existir mais do que uma CE.

Neste capítulo apresentaremos os dois tipos de sistemas mais usuais principais:

- Sistema com duas CE no túnel de adução
- Sistema com uma CE no túnel de adução e outra no túnel de restituição

2.6.1 SISTEMA COM DUAS CHAMINÉS LOCALIZADAS A MONTANTE

Quando o túnel de adução é alimentado por poços ao longo do seu traçado, estes poços funcionam também como chaminés de equilíbrio. Em Portugal temos como exemplo o AH de Vilarinho das Furnas (ver Figura 2.8), com um poço de alimentação intermédio.

Por razões construtivas pode também interessar ter 2 CE no mesmo túnel.

Na Figura 2.40 apresenta-se a nomenclatura considerada para análise de um sistema composto por duas CE Simples localizadas no túnel de adução.

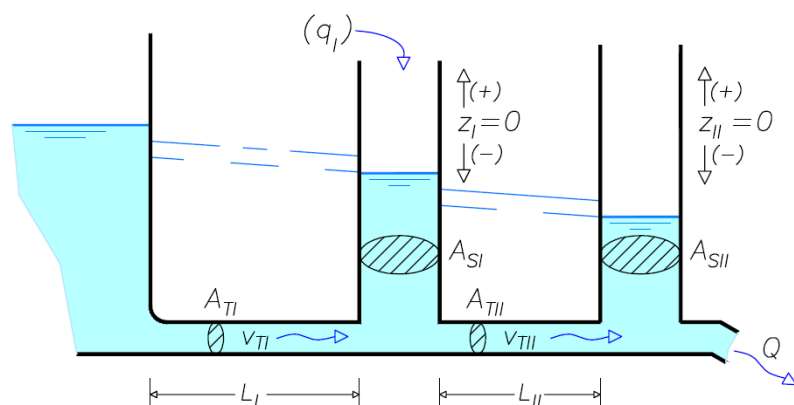


Figura 2.40 - Sistema com duas chaminés de equilíbrio localizadas a montante. Nomenclatura adoptada.

A determinação dos níveis nas chaminés num sistema deste tipo passa pela resolução de 2 sistemas de equações respeitantes à CE I e à CE II, respectivamente:

$$\begin{cases} \frac{dv_I}{dt} = -\frac{g}{L_I} (v_I |v_I| p''^{\pm}_I + z_I) \\ \frac{dz_I}{dt} A_{SI} = v_I A_{TI} - v_{II} A_{TII} + (q_I) \end{cases} \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} \frac{dv_{II}}{dt} = -\frac{g}{L_{II}} (v_{II} |v_{II}| p''^{\pm}_{II} + z_{II} - z_I) \\ \frac{dz_{II}}{dt} A_{SII} = v_{II} A_{TII} - Q \end{cases} \quad (2.30)$$

Considerou-se que a CE I seria um poço de alimentação, que fornece ao sistema o caudal (q_I).

Na equação dinâmica respeitante à CE II é preciso entrar com o nível na primeira. Do mesmo modo, também, na equação da continuidade da CE I é preciso entrar com a velocidade no túnel referente à segunda CE.

Os níveis iniciais em regime permanente obtém-se através das seguintes expressões:

$$z_{I0} = -v_{I0} |v_{I0}| p''^{+}_I \quad \text{e} \quad z_{II0} = z_{I0} - v_{II0} |v_{II0}| p''^{+}_{II},$$

em que:

$$v_{I0} = \frac{Q_0 - (q_I)}{A_{TI}} \quad \text{e} \quad v_{II0} = \frac{Q_0}{A_{TII}} \quad (2.31)$$

2.6.2 SISTEMA COM UMA CHAMINÉ A MONTANTE E OUTRA A JUSANTE

No arranjo do Tipo 3 (ver Figura 2.2) é definida uma CE no túnel de adução e outra no túnel de restituição.

De seguida apresentam-se as equações fundamenais para este tipo de sistema considerando que ambas as chaminés são do tipo simples.

Tal como representado na Figura 2.1, o índice 1 diz respeito à CE de montante e o índice 2 diz respeito à de jusante.

A determinação dos níveis nas chaminés num sistema deste tipo passa pela resolução de 2 sistemas de equações, respeitantes à CE 1 e à CE 2, respectivamente:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = -\frac{g}{L_1} (v_1 |v_1| p''^{\pm}_1 + z_1) \\ \frac{dz_1}{dt} A_{S1} = v_1 A_{T1} - Q \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\begin{cases} \frac{dv_2}{dt} = -\frac{g}{L_2} (v_2 |v_2| p''^{\pm}_2 - z_2) \\ \frac{dz_2}{dt} A_{S2} = -v_2 A_{T2} + Q \end{cases} \quad (2.33)$$

O valor de caudal turbinado (Q) a considerar nas duas equações da continuidade é o mesmo. Quando este caudal é avaliado a partir dos níveis nas CE, nas simulações numéricas efectuadas considerou-se os níveis nas CE no instante de tempo anterior.

Os níveis iniciais em regime permanente obtêm-se através das seguintes expressões:

$$z_{10} = -v_{10}|v_{10}|p''^+_{10} \text{ e } z_{20} = v_{20}|v_{20}|p''^+_{20} \quad (2.34)$$

Para o cálculo das v_{10} e v_{20} o valor de caudal em regime permanente será o mesmo.

2.7 RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

2.7.1 RESOLUÇÃO DESPREZANDO AS PERDAS DE CARGA

A integração directa das equações fundamentais, só é possível em algumas circunstâncias especiais, uma delas é quando desprezadas as perdas de carga. De seguida apresenta-se essa resolução [2], pois a partir dela, deduzem-se as variáveis z_* e T , muitas vezes referidas nas metodologias estudadas, que representam, respectivamente, a amplitude e o período das oscilações quando as perdas de carga são desprezadas.

Considerando uma CE simples e as respectivas equações fundamentais. No cenário de fecho instantâneo, considerando nulas as perdas de carga ($v|v|p'=0$), pode-se escrever a equação dinâmica da seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} \frac{L}{g} + z = 0 \quad (2.35)$$

Na equação da continuidade, se derivarmos em ordem a t , obtém-se:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dz^2}{dt^2} \frac{A_s}{A_r} \quad (2.36)$$

Substituindo dv/dt na equação (2.35), vem:

$$\frac{dz^2}{dt^2} \frac{A_s}{A_r} \frac{L}{g} + z = 0 \quad (2.37)$$

A equação (2.36) é uma equação diferencial linear homogénea de 2ª ordem, com coeficientes constantes. Como o termo dz/dt não existe na equação, a solução geral é dada pela seguinte equação:

$$z = C_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + C_2 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2.38)$$

Se admitirmos $t=0$ e $z=0$, podemos deduzir que $C_1=0$. Colocando $C_2=z_*$ obtém-se a seguinte equação:

$$z = z_* \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2.39)$$

Considerando (2.39) na equação (2.35), pode-se deduzir a seguinte equação:

$$v = v_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2.40)$$

Considerando (2.39) e (2.40) na equação (2.36), pode-se deduzir:

$$z_* = v_0 \sqrt{\frac{LA_r}{gA_s}} \quad (2.41)$$

Considerando (2.39) na equação (2.37) obtém-se:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{LA_s}{gA_r}} \quad (2.42)$$

2.7.2 RESOLUÇÃO NÃO DESPREZANDO AS PERDAS DE CARGA

Na bibliografia podemos encontrar diversos métodos para a resolução das equações diferenciais que regem o fenómeno da oscilação em massa nas chaminés de equilíbrio.

Antes da generalização do uso de computadores, como a resolução das equações diferenciais, com o uso de métodos com diferenças finitas, era muito morosa, era frequente o uso de métodos gráficos, como o de Scholitsch ou o método semi-gráfico de Calame e Gaden.

Para além destes métodos gráficos, na bibliografia, podemos encontrar referidos os seguintes métodos de resolução com diferenças finitas:

- Método de aproximações sucessivas de Pressel [2]
- Método de Jakobsen [24];
- Método de Escande [24];
- Método de Jaeger [2];
- Aritmético [24],[28], [18];
- Método de Runge Kutta [1], [17].

Actualmente, com a completa generalização do uso dos computadores, não faz muito sentido a utilização dos métodos gráficos, pelo que não serão considerados nesta dissertação.

Relativamente aos métodos de resolução com diferenças finitas, as ferramentas de cálculo desenvolvidas no âmbito da presente dissertação, possibilitam a resolução das equações fundamentais pelo método Aritmético ou pelo método de Runge Kutta, apresentados nos pontos seguintes.

2.7.2.1 Método Aritmético [24],[28], [18]

Se, nas equações fundamentais (2.2) e (2.4) da CE simples localizada a montante da turbina, substituirmos os diferenciais dz e dv pelas diferenças finitas Δz e Δv , relativas ao intervalo de tempo de Δt , as equações fundamentais podem-se escrever da seguinte forma:

$$\Delta v = -\frac{g}{L}(v|v|p'+z)\Delta t \text{ e } \Delta z = \frac{vA_r - Q}{A_s}\Delta t \quad (2.43) \text{ e } (2.44)$$

Os valores z e v variam, respectivamente, de Δz e Δv no intervalo de tempo Δt .

Os índices i e $i+1$ referem-se respectivamente ao valor da variável no início e no final do intervalo de tempo. O índice m representará a média do valor inicial e final da variável, nesse intervalo.

Stucky [18] e Mosonyi [28], sugerem que se considere nas eq. (2.43) e (2.44) os valores de z_{i+1} e v_i .

A área da secção (A_s) numa CE simples é constante, mas numa solução com câmaras de expansão laterais, A_s varia em função de z , pelo que, nestes casos a área será avaliada a partir de z_i .

O caudal turbinado (Q) pode ser um dado de entrada, com uma lei de variação temporal. Assim será considerado o valor médio $(Q_i + Q_{i+1})/2$ quando a variação de caudal é conhecida.

Desta forma as equações fundamentais ficam:

$$\Delta v = -\frac{g}{L}(v_i|v_i|p'+z_{i+1})\Delta t \text{ e } \Delta z = \frac{v_i A_r - Q_m}{A_{s(z_i)}}\Delta t \quad (2.45) \text{ e } (2.46)$$

Quando o caudal turbinado depender do nível na CE (z), por exemplo, quando se admitir que a regulação automática da turbina é feita de modo a que a potência gerada seja constante, o caudal será calculado a partir do valor de z_i .

Este método é simples e fácil de implementar, com bons resultados, se forem considerados intervalos pequenos.

2.7.2.2 Método de Runge Kutta (4º ordem) [1], [36]

A resolução do sistema de equações diferenciais de primeira ordem constituído pelas equações fundamentais (2.2) e (2.4):

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{g}{L}(v|v|p'+z) = F(t, v, z) \text{ e } \frac{dz}{dt} = \frac{vA_T - Q}{A_s} = G(t, v, z) \quad (2.47) \text{ e } (2.48)$$

pode ser realizada através do método de Runge-Kutta, considerando:

$$K_1 = F(t_i, v_i, z_i) \cdot \Delta t; \quad L_1 = G(t_i, v_i, z_i) \cdot \Delta t$$

$$K_2 = F(t_i + \Delta t / 2, v_i + K_1 / 2, z_i + L_1 / 2) \cdot \Delta t; \quad L_2 = G(t_i + \Delta t / 2, v_i + K_1 / 2, z_i + L_1 / 2) \cdot \Delta t$$

$$K_3 = F(t_i + \Delta t / 2, v_i + K_2 / 2, z_i + L_2 / 2) \cdot \Delta t; \quad L_3 = G(t_i + \Delta t / 2, v_i + K_2 / 2, z_i + L_2 / 2) \cdot \Delta t$$

$$K_4 = F(t_i + \Delta t, v_i + K_3, z_i + L_3) \cdot \Delta t; \quad L_4 = G(t_i + \Delta t, v_i + K_3, z_i + L_3) \cdot \Delta t$$

Os valores das variáveis no final do intervalo de tempo poderão então ser calculados através das seguintes expressões:

$$v_{i+1} = v_i + \frac{K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4}{6} \text{ e } z_{i+1} = z_i + \frac{L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4}{6} \quad (2.49) \text{ e } (2.50)$$

2.7.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS DIVERSOS MÉTODOS DE DIFERENÇAS FINITAS

Para o exemplo da Figura 2.41, Pickford [24] calculou através de diferentes métodos e para vários tempos de cálculo, o valor máximo de z a seguir ao fecho instantâneo da turbina.

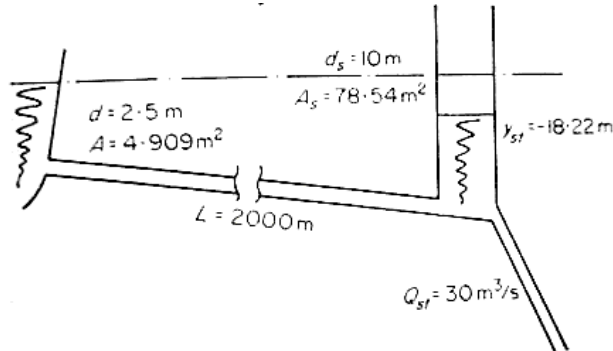


Figura 2.41 - Exemplo estudado por Pickford [24]

Para este aproveitamento, em regime permanente, $v_0|v_0|p''''$ é igual a 18.22 m. Para o caudal de 30 m³/s, a velocidade inicial no túnel é de 6.11 m/s, pelo que, o factor de perda de carga p'''' será igual a 0.488 s²/m.

Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores do nível de água máximo na chaminé, a seguir ao fecho instantâneo da turbina, calculados pelos diferentes métodos e para diferentes tempos de cálculo. Para cada valor calculado apresenta-se também o erro relativo ao valor correcto, 11.747 m.

Tabela 2.1 - Nível de água máximo na chaminé calculado por diferentes métodos de cálculo de diferenças finitas.

Δt (s)	Arit. Simples***		Jacobsen*		Escande*		Aritmético		Runge Kutta	
	z (m)	erro (%)	z (m)	erro (%)	z (m)	erro (%)	z (m)	erro (%)	z (m)	(%)
10	13.351	13.65%	11.821	0.63%	12.587	7.15%	11.641	0.90%	11.791	0.37%
5	12.521	6.59%	11.767	0.17%	12.261	4.38%	11.703	0.37%	11.751	0.03%
2	12.053	2.60%	11.751	0.03%	11.964	1.85%	11.736	0.09%	11.748	0.01%
1	11.9	1.30%	11.749	0.02%	11.858	0.94%	11.742	0.04%	11.747	0.00%
0.5	11.824	0.66%	11.748	0.01%	11.803	0.48%	11.744	0.02%	11.747	0.00%
0.2	11.778	0.26%	11.748	0.01%	11.769	0.19%	11.746	0.01%	11.747	0.00%
0.1	11.763	0.14%	11.748	0.01%	11.758	0.09%	11.746	0.01%	11.747	0.00%
0.05	11.756	0.08%	11.748	0.01%	11.752	0.04%	11.746	0.01%	11.747	0.00%

* valores calculados por Pickford[24]

** O método simples utilizado por Pickford considera sempre os valores do início do período de cálculo ou seja, z_i e v_i .

Os valores relativos ao método Aritmético e de Runge Kutta foram calculados através das ferramentas desenvolvidas no âmbito da presente dissertação e seguindo o apresentado nos pontos 2.7.2.1 e 2.7.2.2. Os valores calculados pelos métodos Aritmético Simples, Jacobsen e Escande foram calculados por Pickford [24].

Da observação dos resultados da tabela podemos concluir:

- em qualquer um dos métodos, a precisão dos resultados aumenta com a redução do tempo de cálculo,
- o método Runge Kutta é o método com o qual se obtém resultados mais precisos com tempos de cálculo menores.

Regra geral, nesta dissertação foi utilizado o método de Runge Kutta, com um tempo de cálculo de 0.1s.

2.8 PERDAS DE CARGA

O estudo das perdas de carga ao longo do circuito hidráulico é necessário para o dimensionamento hidráulico, estudos energéticos e dimensionamento dos grupos turbina-alternador.

Neste subcapítulo apresenta-se a teoria para o cálculo das perdas de carga contínuas e localizadas, focando os pontos mais importantes para o estudo e dimensionamento das chaminés de equilíbrio, no que respeita às perdas de carga contínuas no túnel, perdas de carga localizadas na tomada de água ou na estrutura de restituição e as perdas de carga na bifurcação e no orifício de ligação à CE.

2.8.1 PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS

Na Equação Dinâmica, as perdas de carga no túnel dependem de v^2 e são calculadas através do factor de perda de carga p .

Em regime permanente e uniforme, as perdas de carga contínuas num determinado troço de conduta podem ser avaliadas através de diversas formulações, sendo as mais usuais, as fórmulas de Manning-Strickler e de Darcy-Weisback, respectivamente:

$$h_f = \left(\frac{L}{(D/4)^{4/3} K_s^2} \right) v^2 ; h_f = \left(\frac{f}{D} \frac{L}{2g} \right) v^2 \quad (2.51)$$

$$(2.52)$$

Em ambas as equações os termos entre parêntesis representam o factor de perda de carga p ;

h_f representa a perda de carga ao longo do troço de conduta de comprimento L , (m);

v a velocidade, (m/s);

D o diâmetro da conduta, (m);

K_s o coeficiente de perda de carga da fórmula de Manning-Strickler, (m^{1/3}/s);

f o factor de resistência, adimensional, calculado a partir do número de Reynolds ($Re = vD/\nu$) e da rugosidade relativa (k/D), através da fórmula de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.53)$$

k a rugosidade absoluta equivalente, (m) e

ν a viscosidade cinemática, 1.31×10^{-6} m²/s, para uma temperatura da água de 20°C, [37].

Igualando as equações (2.51) e (2.52), podemos deduzir a seguinte expressão que permite relacionar f e K_s para o regime turbulento rugoso:

$$f = \frac{g \cdot 8 \cdot \sqrt[3]{4}}{(D)^{1/3} K_s^2} \quad (2.54)$$

No caso das condutas não circulares, nas expressões (2.51) a (2.54), em vez de D deverá ser utilizado diâmetro equivalente, ou seja 4 vezes o raio hidráulico, definido como a relação entre a área e o perímetro molhado (A/Pm).

A fórmula de Colebrook-White é uma lei única, válida para todo o domínio de escoamentos turbulentos, enquanto que a fórmula de Manning-Strickler é uma fórmula empírica, válida apenas para o regime turbulento rugoso.

O cálculo das perdas de carga através da fórmula de Colebrook-White é preferível; no entanto, na bibliografia é frequentemente considerado o coeficiente K_s da fórmula de Manning-Strickler para caracterizar as perdas de carga.

2.8.1.1 Discussão da hipótese de base: factor de perda de carga constante

Como foi referido anteriormente, durante o fenómeno de oscilação em massa, admite-se que as perdas de carga sejam equivalentes às do regime permanente, ou seja, admite-se que o factor de perda de carga p , se mantém constante durante a ocorrência dos regimes transitórios.

Para melhor discutirmos esta hipótese de base, apresenta-se na Figura 2.42, o ábaco de Moody, que traduz a equação de Colebrook-White, [37].

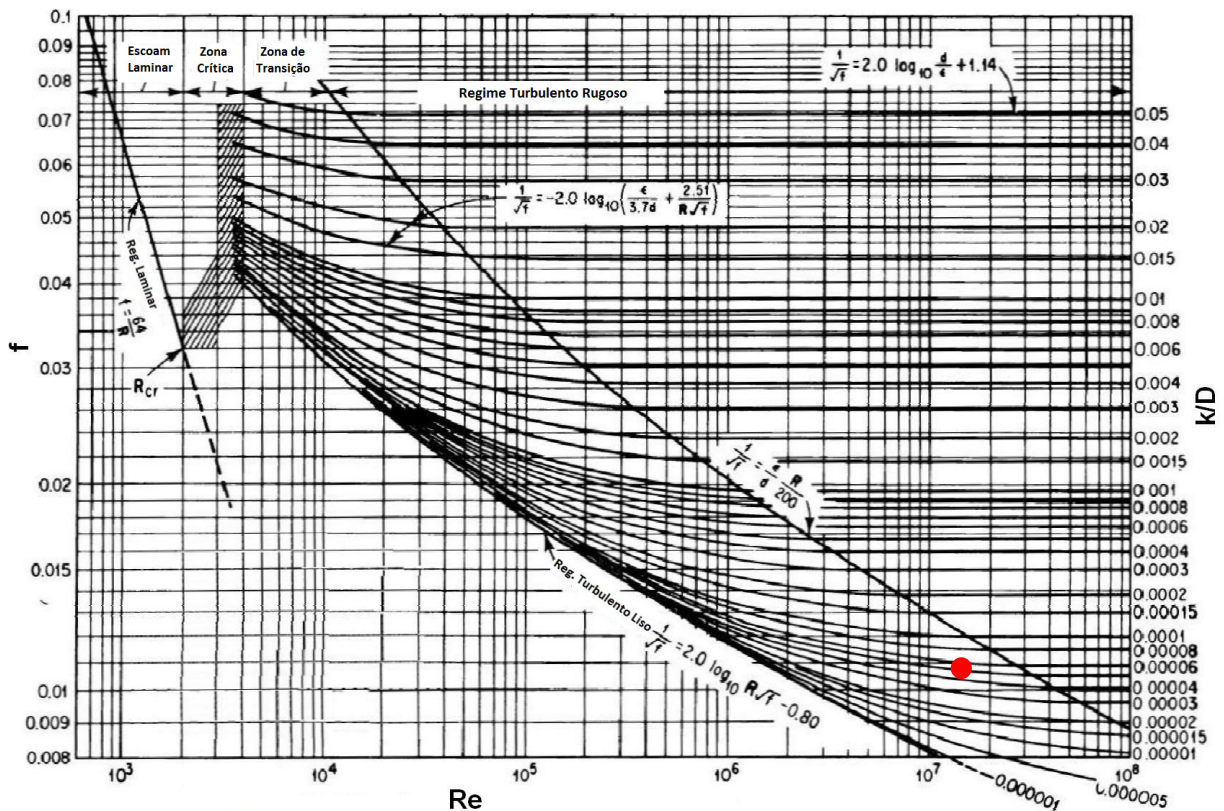


Figura 2.42 - Ábaco de Moody, [25]

A velocidade no túnel a seguir a uma manobra de fecho vai diminuindo até ser nula quando o nível na CE atinge o seu valor máximo. O número de Reynolds, calculado a partir da velocidade, também vai diminuindo.

Assim, enquanto o escoamento se mantiver no regime turbulento rugoso, f manter-se-á constante, mas a partir do momento que entra na zona de transição, o valor de f vai aumentando com a diminuição da velocidade.

Desta forma, o factor de perda de carga p , calculado a partir de f , não será constante durante o fenómeno de oscilação em massa, tal como admitido como hipótese de base.

Este aumento de p faz-se sentir para valores de velocidades mais baixos e, como as perdas de carga são calculadas a partir do quadrado da velocidade, as diferenças nos resultados poderão não ser significativas.

Para se perceber essas diferenças, vai-se analisar esta problemática para o AH apresentado na Figura 2.20. O valor da rugosidade no túnel deste AH é de 0.2 mm, pelo que k/D é igual a 0.00005. Em regime permanente, o número de Reynolds é 1.6×10^7 . Representou-se este ponto de funcionamento em regime permanente com um círculo vermelho na Figura 2.42.

Neste caso, o ponto de funcionamento em regime permanente está já na “zona de transição”, pelo que, a diminuição da velocidade no túnel faz com que o valor de f e, consequentemente p , aumentem.

Para este exemplo, simulou-se o cenário de fecho instantâneo, calculando, num caso, o valor de p em cada instante de tempo e considerando noutro caso a hipótese de base em que se admite que p se mantém constante.

As diferenças nos valores dos níveis máximos na primeira oscilação são relativamente pequenas, cerca de 2.5 cm, sem visualização gráfica portanto. Assim, para uma melhor percepção da razão destas diferenças serem pequenas, apresenta-se na Figura 2.43 os valores de p e das perdas de carga contínuas ΔH num e noutro caso desde o instante 0 até ao momento em que é atingido o nível máximo na CE.

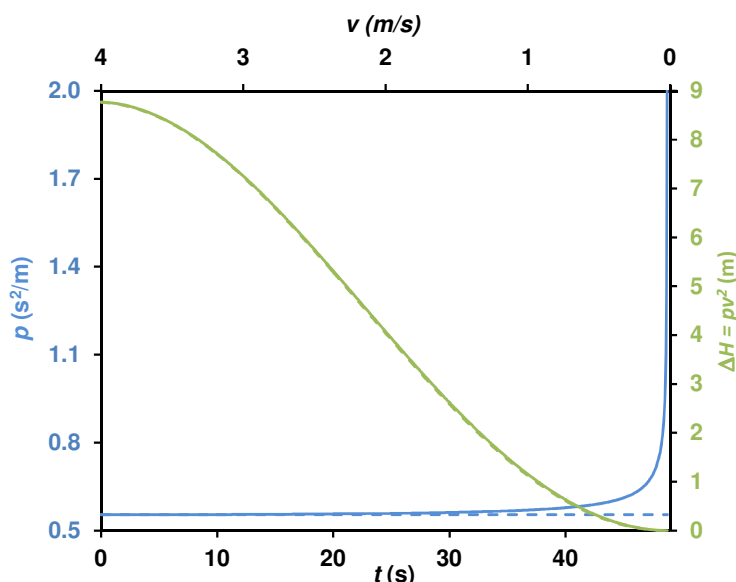


Figura 2.43 - Resultados da simulação numérica até ser atingido o nível máximo na CE.

As linhas a tracejado representam os resultados da simulação considerando a hipótese de base e as linhas a cheio representam os resultados quando o valor de p é calculado em cada instante de tempo.

Como se pode observar, apesar de p ter uma variação significativa na parte final, como a velocidade já é muito baixa, o peso no cálculo das perdas de carga é também baixo e, por isso, as diferenças nos níveis das oscilações num e noutro caso são pequenas.

Como a maior parte das formulações deduzidas a partir da equação dinâmica considera p constante, nas ferramentas de cálculo automático manteve-se a hipótese de base em que se admite que p é constante e corresponde ao valor em regime permanente.

2.8.1.2 Rugosidade. Valores de k e K_S .

Durante a fase de projecto, não é possível saber com exactidão quais as perdas de carga quando o circuito entrar em funcionamento. Além disso, ao longo da vida da obra essa rugosidade irá também alterar-se.

Desta forma, a avaliação dos níveis máximos e mínimos na fase de projecto deverá ser feita de forma conservativa. Como se verá no ponto 2.9.1, dependendo da localização e caso de carga deverão ser considerados valores de perda de carga optimistas ou pessimistas para a avaliação dos níveis na CE.

De seguida, para cada tipo de revestimento, apresentam-se alguns dos valores que é possível encontrar na bibliografia analisada, para a rugosidade (k) e para o coeficiente K_S da fórmula de Manning-Strickler.

A maior parte dos túneis dos circuitos hidráulicos são revestidos com betão. A rugosidade depende do tipo de betão, do tipo de cofragem e do tratamento das juntas.

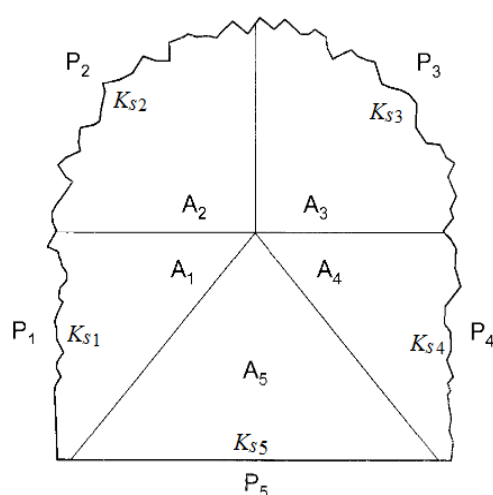
Na norma de projecto do USBR [38], para túneis revestidos a betão, é indicado um valor de dimensionamento de 0.6 mm e valores mínimos de 0.09 e 0.3 mm. Na ref. [39] é indicado como valor máximo, quando utilizadas cofragens metálicas, um valor de 1.5 mm.

Quando o maciço rochoso, onde é escavado o túnel, é de boa qualidade e pouco fracturado, a hipótese do não revestimento do túnel poderá ser economicamente vantajosa. Em Portugal, há alguns exemplos de AH com túneis não revestidos, nomeadamente Venda Nova II e III e os túneis de restituição de Caniçada e Salamonde.

A escavação de túneis em rocha pode ser feita por métodos convencionais com explosivos (“*drill and blast*”) ou com tuneladora.

As secções escavadas com métodos convencionais são bastante irregulares, pelo que naturalmente apresentarão maiores rugosidades. Além disso, raramente são adoptadas secções circulares, mais favoráveis do ponto de vista hidráulico, sendo normalmente adoptadas secções do tipo ferradura, preferidas pelos empreiteiros para a construção. Como durante a construção poderão circular veículos dentro dos túneis, por vezes a soleira é revestida o que faz com que a rugosidade da soleira seja diferente. Para ter em conta estas diferentes rugosidades deverá ser considerada a rugosidade da secção mista.

Para a análise de secções mistas, apresenta-se na Figura 2.44 o esquema e formulações propostos para o cálculo do coeficiente K_S da fórmula de Manning-Strickler e para o factor de resistência (f) da fórmula de Darcy-Weisbach, [40].



K_S da fórmula de Manning-Strickler:

$$K_S = \left(\frac{P}{\sum \frac{P_i}{K_{Si}}} \right)^{2/3} \quad (\text{fórmula de Einstein})$$

f da fórmula de Darcy-Weisbach

$$f = \frac{\sum P_i f_i}{P}$$

Figura 2.44 - Cálculo de K_S e f numa secção mista, [40]

Na ref.[41] é apresentada informação relativa às perdas de carga em 42 túneis não revestidos escavados com métodos convencionais. Os valores das rugosidades absolutas variam entre 150 e 800 mm, sendo que o valor médio é de cerca de 400 mm. Na ref. [39] são indicados valores um pouco mais baixos, entre 60 e 300 mm para túneis escavados em granito, podendo chegar aos 600 mm quando a escavação é realizada noutros tipos de rocha.

Quando são utilizadas tuneladoras, a secção de escavação é redonda e a superfície é bastante regular, apresentando por isso rugosidades mais baixas.

Os valores da rugosidade dos tuneis não revestidos escavados com TBM do AH de Kárahnjúkar na Islândia, variam normalmente entre 2 e 40 mm, podendo, em zonas onde o maciço é muito fracturado, apresentar valores superiores. Os valores de rugosidade para a secções revestidas com betão projectado variam entre 5 e 25mm. [42]

Na tabela Figura 2.3 apresenta-se um resumo dos valores de K_S da fórmula de Manning-Strickler referidos na bibliografia analisada.

Tabela 2.2 - Valores do coeficiente K_S ($m^{1/3}/s$) para diversos revestimentos.

	Benson[43]		EPRI[44]		Pennington[45]		USCE[46]	Min.	Max.
Não revestidos (D&B)	25.0	40.0	24.4	37.0	-	-	26.3	24.4	40.0
Não revestidos (TBM)	45.5	62.5	50.0	66.7	60.6	69.4	55.6	45.5	69.4
Betão projectado (D&B)	40.0	55.6	40.0	50.0	-	-	-	40.0	55.6
Betão projectado (TBM)	-	-	-	-	59.2	65.4	-	59.2	83.3
Betão	62.5	83.3	62.5	83.3	78.1	90.9	76.9	62.5	90.9
Aço	71.4	100	-	-	-	-	80.0	71.4	100.0

Na ref. [40] é apresentado um gráfico relacionando o valor de K_S com a área da secção de diversos túneis não revestidos localizados nos países nórdicos. Nesse gráfico, para secções com áreas menores do que 150 m², o valor de K_S deverá situar-se entre 32 e 38 m^{1/3}/s.

Na ref.[33], no dimensionamento de AH na Áustria é referido um valor de 110 m^{1/3}/s para revestimentos em aço e valores entre 80 e 90 m^{1/3}/s, para revestimentos em betão. Martins [47] refere um valor de 85 m^{1/3}/s para o túnel de restituição do AH do Alto Lindoso.

2.8.2 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS

A perda de carga localizada numa determinada singularidade pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\Delta H = \left(\frac{K^{\pm}}{2g} \right) v^2 \quad (2.55)$$

Certas singularidades têm um coeficiente de perda de carga localizada (K) diferente, consoante o sentido de escoamento, assim será designado por K^+ , o coeficiente de perda de carga quando o sentido da velocidade no túnel é positivo e K^- , quando é negativo.

2.8.2.1 Tomada de Água e Estrutura de Restituição.

Para o cálculo das perdas de carga nestes elementos há que contabilizar as perdas na entrada, ranhuras das comportas e transição quadrado-redondo, quando existente.

Nas tomadas de água e nas estruturas de restituição de circuitos reversíveis, por regra são colocadas grelhas para protecção do circuito hidráulico e o equipamento hidromecânico. A perda de carga nas grelhas depende de vários factores, sendo porventura o principal, o espaçamento entre as barras e reforços estruturais. O espaçamento máximo entre as barras é definido pelo tipo de turbina adoptado, podendo ser considerados espaçamentos menores devido a aspectos de natureza ambiental e/ou transporte sólido. O cálculo das perdas de carga nas grelhas pode ser feito através da fórmula de Kirschmer, [48].

Para as tomadas de água, Gardel [49] refere valores globais de perdas de carga entre 0.1 e 0.3 quando a velocidade no túnel é positiva (K^+), ou seja, a tomada de água funciona como convergente e valores entre 0.4 e 0.8 quando esta é negativa (K^-) e a tomada de água funciona como divergente.

Penino e Hecker [50], também referem para K^+ um valor entre 0.1 e 0.3 e apresentam alguns valores de projectos nos EUA, Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Perdas de carga em tomadas de água, [50]

Projecto	Tipo de Tomada de Água	K^+	K^-
Bad Creek	Vertical (sem cobertura)	0.2 ^a	0.5 ^a
	Vertical (com cobertura e sem difusor)	0.1	0.9
Davis	Lateral	0.3	0.8
Jocasse	Vertical (torre)	0.3	-
Kinzua	Vertical (com cobertura)	0.2	-
Muddy Run	Vertical (torre)	0.5	1.5
Northfield	Lateral	0.6 ^b	0.4 ^b

a inclui 35 m de difusor com 6° e vigas da grelha sobre a tomada de água.

b inclui 91 m de túnel, curva a 55° e difusor com 55 m

Quando as curvas do traçado do túnel forem suaves, as perdas de carga poderão ser desprezadas; no entanto, quando as curvas forem mais apertadas, como a que muitas vezes é definida a seguir à tomada de água deverão ser consideradas as perdas de carga localizadas nessas curvas.

Na fórmula (2.55), a parcela da equação entre parêntesis deverá ser somada ao factor de perda de carga p , referente às perdas de carga contínuas no túnel, de modo a obter-se o factor p' .

2.8.2.2 Bifurcação em “T” na Ligação à Chaminé

As perdas de carga numa bifurcação em “T” são bastante importantes para a correcta análise e dimensionamento das chaminés de equilíbrio.

Nos próximos parágrafos, apresenta-se a metodologia considerada para o cálculo das perdas de carga na bifurcação em “T” seguindo, de uma maneira geral, o exposto em Khan [51]. Este autor, na sua tese de doutoramento, apresentou as conclusões do trabalho desenvolvido por Gardel [49] de forma mais condensada.

Na Figura 2.45 apresenta-se o esquema e nomenclatura adoptada para o cálculo e identificação das perdas de carga entre os diversos troços de bifurcação em “T”.

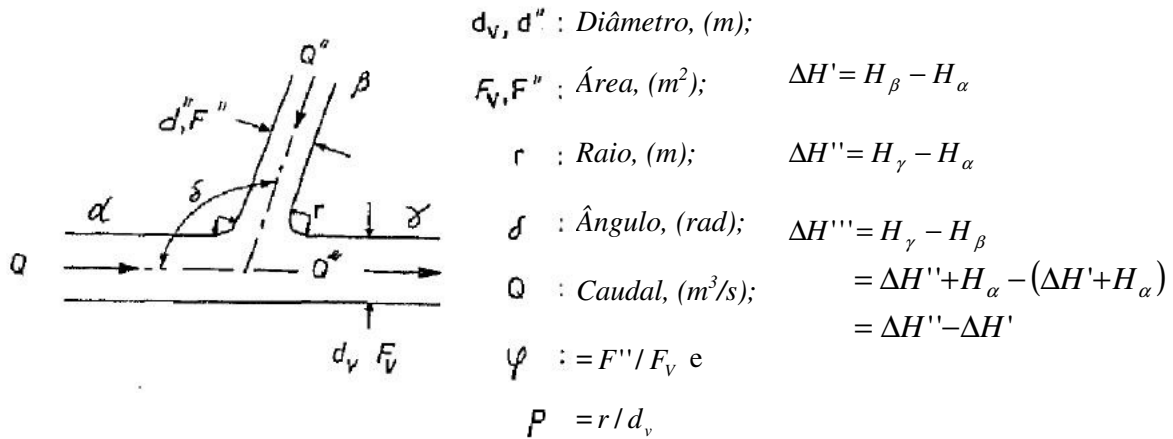


Figura 2.45 - Esquema e nomenclatura da bifurcação em “T”, [51].

Os tipos de escoamento numa bifurcação em “T” são apresentados na Figura 2.46:

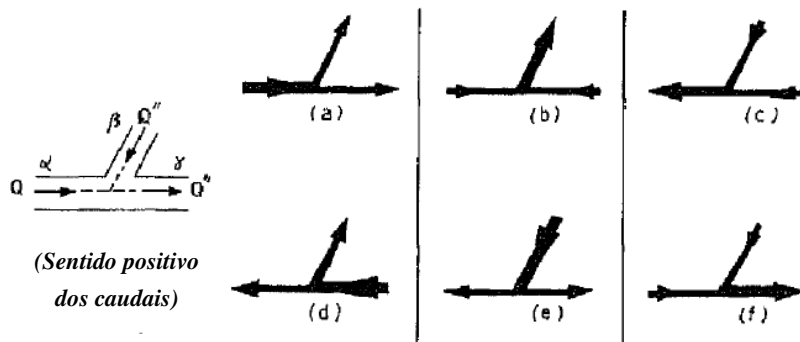


Figura 2.46 - Esquema com os tipos de escoamento possíveis numa bifurcação em T, [51].

Note-se que o sentido positivo da velocidade na bifurcação é ao contrário do considerado na presente dissertação. Devido à complexidade desta formulação optou-se por não se alterar a nomenclatura considerada por Khan [51].

Durante a operação de um aproveitamento e considerando a turbina localizada a jusante de γ (CE localizada a montante da turbina), poderão ocorrer os tipos de escoamento (a), (e), (f) e, excepcionalmente, (b) num cenário de fecho brusco.

Caso a turbina se localize a montante de α (CE localizada a jusante da turbina), poderão ocorrer os tipos de escoamento (a), (b) e (f).

Os tipos (c) e (d) ocorrem em modo de bombagem.

O coeficiente de perda de carga localizada (Δh_y^x) pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\Delta h_y^x = k_y^x (1 \mp q'')^2 + l_y^x (q'')^2 + m_y^x q'' (1 \mp q'') \quad (2.56)$$

em que:

q'' representa o caudal relativo que passa para a chaminé: $q'' = Q'' / Q_{\max}$;

Q'' o caudal que passa para a chaminé através da bifurcação, (m³/s);

$Q_{\max}$ o caudal máximo em qualquer um dos braços α ou γ , (m³/s);

x indica entre que braços é medida a perda de carga e pode ser substituído por ' , ' , ou ' ' ;

y indica o tipo de escoamento.

A escolha de sinais no termo $(1 \mp q'')$, depende do valor q'' , em que o sinal negativo é utilizado quando $q'' > 0$. Sublinha-se que neste cálculo em particular, o escoamento é positivo quando se processa da chaminé para o túnel.

Por exemplo, $\Delta h_f''$ representa a perda de carga relativa entre os braços α e γ para o tipo de escoamento (f) e poderá ser calculado através da utilização dos coeficientes k_f'' , l_f'' e m_f'' na equação (2.56).

Os coeficientes k_y^x , l_y^x e m_y^x são constantes para cada tipo de escoamento e dependem da forma da bifurcação. A definição de cada um destes coeficientes é apresentada de seguida:

k_y^x representa o valor relativo da perda de carga para o caso particular em que o escoamento para o braço lateral β é nulo,

l_y^x a perda de carga relativa para o caso particular em que o escoamento num dos braços do túnel α ou γ é nulo;

m_y^x o coeficiente de correcção para o termo q'' que intervém para o “escoamento fraccionado”.

Os coeficientes k_y^x , l_y^x e m_y^x , deverão ser estudados em laboratório. No caso de bifurcações em “T” com formas idênticas às estudadas por Gardel, estes coeficientes poderão ser obtidos através das expressões apresentadas na Tabela 2.4, [51].

Tabela 2.4 - Valores dos coeficientes k_y^x , l_y^x e m_y^x , [51].

Coeff.	Type d'écoul. y	x = ' (pour Δh')	x = '' (pour Δh'')
k_y^x	a et f	- 0,95	- 0,03
	c et d	- 0,92	+ 0,03
l_y^x	a	$- \left[1,3 \cot g \frac{\phi}{2} - 0,3 + \frac{0,4 - 0,1\phi}{\phi^2} \right] \left[1 - 0,9\sqrt{F/\phi} \right]$	- 0,35
	f	$1 + 0,42 \left[\frac{\cos \phi}{\phi} - 1 \right] - 0,8 \left[1 - \frac{1}{\phi^2} \right] + \left[1 - \phi \right] \left[\frac{\cos \phi}{\phi} - 0,38 \right]$	$1 + \left[1,62 - \sqrt{F} \right] \left[\frac{\cos \phi}{\phi} - 1 \right] - 0,38 \left[1 - \phi \right]$
	c	$\left[1,2 - \sqrt{F} \right] \left[\frac{\cos \phi}{\phi} + 1 \right] - 0,8 \left[1 - \frac{1}{\phi^2} \right] - \left[1 - \phi \right] \frac{\cos \phi}{\phi}$	$-1 + \left[1,62 - \sqrt{F} \right] \left[\frac{\cos \phi}{\phi} + 1 \right] - 0,38 \left[1 - \phi \right]$
	d	$0,35 - \left[1,3 \tan \frac{\phi}{2} - 0,3 + \frac{0,4 - 0,1\phi}{\phi^2} \right] \left[1 - 0,9\sqrt{F/\phi} \right]$	+ 0,35
m_y^x	a	$0,4 \left[1 + \frac{1}{\phi} \right] \cot g \frac{\phi}{2}$	- 0,2
	f	0	(φ - 2)
	c	(φ - 2)	(φ - 2)
	d	$-0,2 - 0,4 \left[1 + \frac{1}{\phi} \right] \tan \frac{\phi}{2}$	- 0,2

A perda de carga total pode então ser obtida através da seguinte expressão:

$$\Delta H_y^x = \Delta h_y^x \frac{(Q_{\max}^x)^2}{2gF_V^2} \quad (2.57)$$

Khan [51] apresenta também as expressões para o cálculo das perdas de carga para os escoamentos (b) e (d).

$$\Delta H_b^x = \Delta h_y^x \frac{Q''^2}{2gF_V^2} \left(k_b^x (1 - q''')^2 + l_b^x (q''')^2 + m_b^x q''' (1 - q''') \right) \quad (2.58)$$

em que: $q''' = Q'''/Q''$, $k_b^x = l_a^x$ e $l_b^x = l_d^x$

$$\Delta H_e^x = \Delta h_y^x \frac{Q''^2}{2gF_V^2} \left(k_e^x (1 - q''')^2 + l_e^x (q''')^2 + m_e^x q''' (1 - q''') \right) \quad (2.59)$$

em que: $k_e^x = l_f^x$ e $l_e^x = l_c^x$

Note-se que para as equações (2.58) e (2.59) os coeficientes m_e^x e m_b^x , referentes ao “escoamento fraccionário”, não são apresentados pelo que terão sempre de ser avaliados experimentalmente.

Interessa sublinhar que o coeficiente de perda de carga na bifurcação não é constante durante o regime transitório, visto que os caudais relativos variam, por isso na resolução da equação dinâmica há que calcular as perdas de carga na bifurcação em cada intervalo de tempo.

Gardel e Rechsteiner [52] estudaram de novo esta problemática, apresentando os valores dos coeficientes de perda de carga localizada ($\Delta h'$, $\Delta h''$ e $\Delta h'''$) observadas nas várias geometrias testadas em laboratório. Na Figura 2.47 apresenta-se para uma das geometrias estudadas, a comparação dos resultados medidos em laboratório (linhas a preto ao fundo) com os resultados agora calculados através da formulação atrás apresentada (linhas a cores).

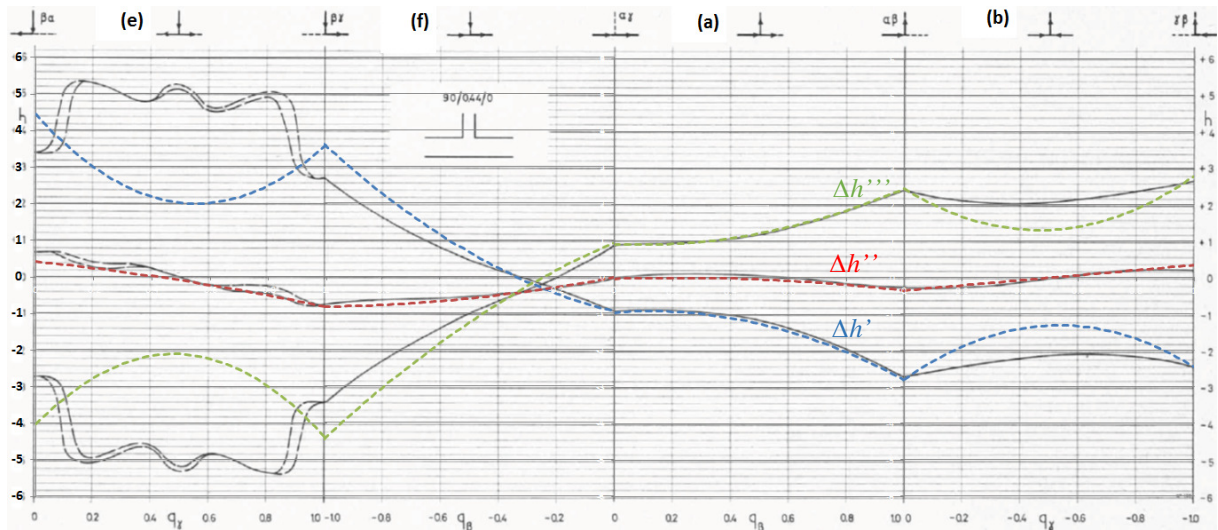


Figura 2.47 - Comparação entre os valores calculados e as medições em laboratório, apresentados na ref. [52].

Como nas expressões (2.58) e (2.59) não foi considerado qualquer coeficiente para o “escoamento fraccionário”, os resultados afastam-se dos obtidos experimentalmente para os tipos (e) e (b). Estas duas combinações de sentidos de escoamento são bastante raras no funcionamento de uma CE.

Nas ferramentas de cálculo automático preparadas no âmbito desta dissertação implementou-se a formulação atrás descrita, permitindo o cálculo das perdas de carga entre o túnel e a bifurcação em cada instante de cálculo.

2.8.2.3 Orifício de ligação à chaminé

Além da perda de carga na bifurcação deveremos considerar a perda de carga no orifício de entrada/saída da chaminé que pode ou não ter o mesmo diâmetro da bifurcação. O cálculo das perdas de carga no orifício será realizado considerando a velocidade na bifurcação (v_d), através da seguinte expressão:

$$\Delta H_d = \left(\frac{K_d^{\pm}}{2g} \right) v_d^2 \quad (2.60)$$

Quando o orifício tem um diâmetro igual à bifurcação, tendo em conta que a velocidade na chaminé é muito baixa quando comparada com a velocidade na bifurcação, os valores de K_d^+ e K_d^- serão muito próximos de 1 e 0.5, respectivamente. Quando são consideradas formas arredondadas ou transições mais ou menos suaves, os valores serão naturalmente menores.

Como se viu no ponto 2.5.3.3, onde se apresentou o conceito do dimensionamento óptimo do orifício, por vezes interessa “trabalhar” as perdas de carga no orifício, de modo a atingir-se determinados objectivos. Os orifícios do tipo cónico permitem “desenhar”, dentro de certos intervalos, as perdas de carga num e noutro sentido. O cálculo das perdas de carga, neste tipo de orifícios, pode ser feito de acordo com as formulações propostas por Gardel [49].

Quando o troço que liga a bifurcação à chaminé, tem dimensões relativamente grandes, como por exemplo no AH de Venda Nova II e III (ver Figura 2.10) há que contabilizar, também, as perdas de carga contínuas ao longo desse troço de ligação. Se a bifurcação for feita lateralmente, e não no topo do túnel, haverá ainda que contar com a perda de carga na curva.

2.9 DIMENSIONAMENTO

Na ref. [58] é referido que num determinado AH deverá ser adoptada uma solução com CE quando:

- a redução das pressões máximas no circuito hidráulico resultantes da adopção da CE leva a uma solução global mais económica.
- num cenário de rejeição de carga, não é possível limitar a sobre-velocidade da turbina a um valor inferior a 60%, através do aumento da inércia do grupo ou pela diminuição do tempo de fecho do distribuidor.

Como regra prática é também referido que a CE deverá ser considerada quando:

$$\frac{\sum L_i v_i}{H'_{0_min}} > 3 \text{ a } 5 \quad (2.61)$$

Nesta formulação deverão ser considerados os vários troços do circuito hidráulico até à turbina.

Quando se concluir que para um determinado AH, será vantajoso adoptar uma solução com CE, esta deverá ser dimensionada de modo a garantir:

- a estabilidade das oscilações no interior da CE (ver capítulo 3).
- que os níveis de água não originam o transbordamento através do limite superior da CE
- o nível de água mínimo não desce abaixo da cota da abóbada do túnel.

2.9.1 CENÁRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Como foi referido anteriormente, o valor exacto das perdas de carga não é conhecido no início do projecto, além disso, este valor terá tendência a alterar-se com o envelhecimento da obra. Assim deverão ser considerados valores conservativos consoante o nível que se pretende estimar.

A possibilidade de realização de pelo menos uma segunda manobra durante a ocorrência das oscilações deverá também ser estudada.

Na Tabela 2.5, faz-se um apanhado dos diferentes cenários que é costume considerar para o dimensionamento das CE.

Tabela 2.5 - Cenários a considerar no dimensionamento de CE

Manobras	CE localizada a Montante			CE localizada a Jusante		
	Perdas de carga	Nível na Albufeira	Nível a avaliar	Perdas de carga	Nível na Albufeira	Nível a avaliar
Fecho	Previsão optimista	Máximo	Máximo	Previsão optimista	Mínimo	Mínimo
Abertura	Previsão pessimista	Mínimo	Mínimo	Previsão pessimista	Máximo	Máximo
Fecho seguido da Abertura	Médias	Mínima	Mínimo	Médias	Máxima	Máximo
Abertura seguida do fecho	Médias	Máxima	Máximo	Médias	Mínima	Mínimo
Estabilidade Hidráulica (Capítulo 3)	Previsão optimista	Mínimo	Área mínima	Previsão optimista	Máximo	Área mínima

O momento mais desfavorável para execução da segunda manobra será próxima do momento em que a velocidade na CE é máxima,[20].

Em centrais com mais do que uma unidade, nos cenários de fecho para a avaliar os níveis máximos, deverá ser considerada rejeição de carga simultânea em todos os grupos. Este cenário é possível se houver uma falha na linha de transmissão da central,[17].

Para a selecção das condições de entrada em funcionamento (cenário de abertura), alguns autores sugerem um valor entre 50 e 100 % da carga nominal. A escolha do valor a adoptar deverá ser feita em conjunto com os responsáveis de operação da rede,[17].

Nas ref. [13], [31], [33] e [34] podemos encontrar cenários em que são simuladas mais do que duas manobras. Em AH equipados com grupos reversíveis poderão também ser estudados cenários em que se alterna entre o modo de turbinagem e o de bombagem. Na Figura 2.48 apresentam-se os cenários considerados no exemplo de dimensionamento apresentado na ref. [33].

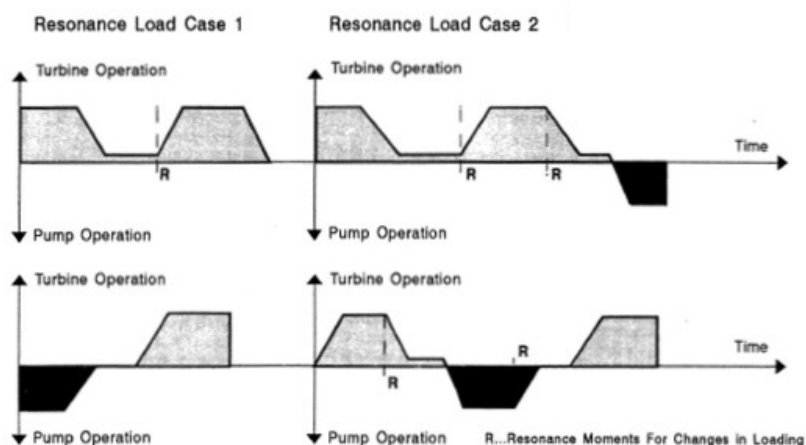


Figura 2.48 - Exemplo de casos de carga com mais do que 2 manobras e com alternância do modo de bombagem e turbinagem, [31].

Nos gráficos da figura, estão representados diferentes casos de carga onde são efectuadas diversas manobras que alteram a consigna de potência e que alternam entre o modo de turbinagem e o de bombagem.

O estudo destes cenários deverá ser feito em conjunto ou pelo menos em paralelo com o estudo do choque hidráulico em todo circuito tendo em conta as características dos equipamentos instalados na central.

Os estudos do choque hidráulico apesar de não serem decisivos para a determinação dos níveis na CE, são essenciais para a avaliação das pressões máximas que irão ocorrer ao longo do circuito hidráulico, podendo levar a alterações na definição da CE. Os estudos do choque hidráulico são também importantes para definição dos tempos de abertura e fecho a considerar. Deve notar-se que em algumas turbinas a seguir à rejeição de carga, devido ao efeito da sobrevelocidade, a admissão de caudal anula-se muito rapidamente, independentemente do tempo de fecho definido para o distribuidor.

2.9.2 ESCOLHA DE CAUDAIS

Para a escolha dos valores de caudal a utilizar nos cenários de dimensionamento interessa reter alguns conceitos importantes relativos às turbinas.

Na Figura 2.49 apresenta-se um diagrama de coluna, onde são apresentados os rendimentos de uma turbina Francis para diferentes quedas e caudais.

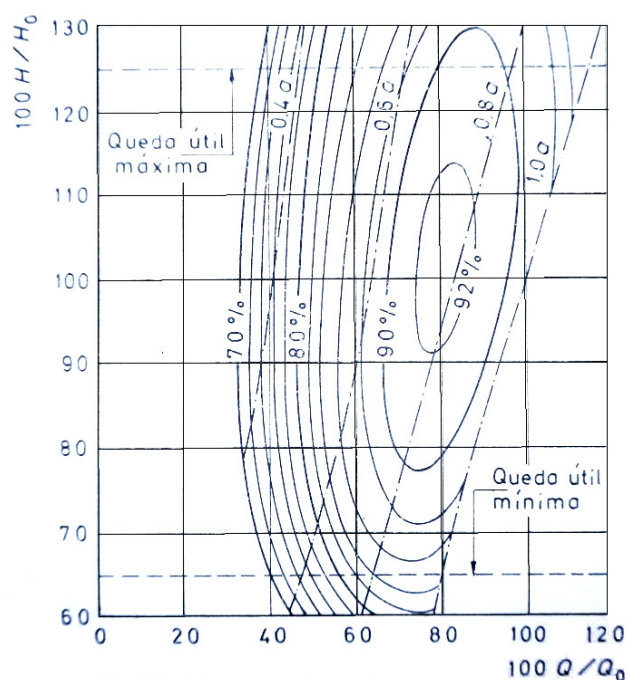


Figura 2.49 - Diagrama de colina de uma turbina Francis, [37].

A Queda dos melhores rendimentos é a queda útil para a qual se pretende que o grupo funcione com o rendimento máximo. Note-se que para o rendimento máximo, a turbina funciona com abertura parcial, no exemplo da Figura 2.49 corresponde a cerca de 80% da abertura (linha 0.8a).

A Queda Nominal é a queda em que a turbina com o distribuidor totalmente aberto produz a potência nominal do alternador.

Para a averiguação dos níveis na CE interessa considerar os cenários com os caudais máximos, mas ao mesmo tempo é necessário também ser realista. Assim, para a queda máxima deverá ser considerado o caudal que, em funcionamento normal, origina a potência de dimensionamento do alternador e, para a queda mínima, admitindo que seja menor que a queda nominal, deverá ser considerado o caudal correspondente à máxima abertura do distribuidor.

3

ESTABILIDADE HIDRÁULICA. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS PARA A RESOLUÇÃO NUMÉRICA

3.1 INTRODUÇÃO

Num determinado AH com a CE localizada a montante, suponha-se que há uma necessidade imediata de alterar a potência produzida pela turbina de modo a responder a uma alteração de demanda da rede. Para atender a essa necessidade, a admissão de caudal irá aumentar ou diminuir, consoante seja exigida uma potência maior ou menor.

Ou seja, o caudal turbinado vai variar de ΔQ , passando de Q^* para Q_0 , em que Q_0 corresponde ao caudal que, em regime permanente, gera o novo valor de potência P_0 . Entre estes dois regimes permanentes irá ocorrer um regime transitório em que os níveis da chaminé irão oscilar. Como, na maior parte dos casos, a regulação da turbina é feita de modo a gerar uma potência constante; durante o regime transitório, o caudal admitido pela turbina irá variar em função da queda, que por sua vez varia em função do nível na chaminé.

Para a análise desta problemática, vai-se partir da equação para o cálculo da potência. Se para além das perdas do grupo turbina-alternador e transformador se incluir no rendimento (η) as perdas na conduta forçada e circuito de restituição, pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$P_0 = \eta Q_0 H'_0 = \eta Q (H + z) \quad (3.1)$$

em que P_0 , Q_0 , H'_0 representam, respectivamente, os valores da potência, caudal e queda útil no regime permanente que se pretende atingir.

Se, para pequenas variações de caudal, se admitir um rendimento constante, pode-se escrever:

$$Q_0 H'_0 = Q (H + z) \text{ ou } Q = \frac{Q_0 H'_0}{H + z} \quad (3.2)$$

De modo a manter constante a potência gerada, o caudal admitido será inversamente proporcional a $(H + z)$, que por sua vez varia durante os regimes transitórios provocados pelas variações de caudal admitido.

Quando a chaminé estiver localizada a jusante a abordagem é análoga, no entanto na equação (3.2) deverá ser considerado $(H - z)$.

Este tipo de funcionamento pode, em certas circunstâncias, tornar-se instável com oscilações auto-induzidas, em que a amplitude, em vez de diminuir, aumenta.

Nos próximos pontos vai-se analisar a estabilidade hidráulica das oscilações no interior das CE no que se refere a:

- pequenas oscilações provocadas por pequenas variações na potência;
- grandes oscilações provocadas por variações não tão pequenas;
- diferentes factores que interferem na estabilidade hidráulica
- estabilidade hidráulica numa câmara de equilíbrio não arejada
- estabilidade das oscilações em AH equipados com CE a montante e da turbina.

3.2 PEQUENAS OSCILAÇÕES

Dieter Thoma em 1910, depois de uma série de acidentes no início do século XX, foi o primeiro a demonstrar que em aproveitamentos hidroelétricos com regulação automática, a CE tem de ter uma área mínima, de modo a que as oscilações sejam estáveis.

No Anexo 1, apresenta-se a dedução das condições de Thoma para uma CE simples localizada a montante, seguindo, de uma maneira geral, o apresentado em Jaeger [2].

Para pequenas oscilações, segundo Thoma será necessário cumprir duas condições:

$$\begin{aligned} 1^{\text{a}} \text{ condição: } z_0 &< \frac{H}{3}; \\ 2^{\text{a}} \text{ condição: } A_{s_min} &\geq \frac{LA_T}{2gp''^+(H_0)} = A_{th} \end{aligned} \quad (3-3)$$

Estas condições são válidas para pequenas oscilações, isto é, para oscilações provocadas por pequenas alterações na demanda da rede. Rich [30] para enquadrar estas “pequenas oscilações”, refere como exemplo, uma variação de 1 MW quando a potência gerada é de 50 MW.

Na prática a primeira condição é sempre cumprida, pois não é economicamente viável ter perdas de carga tão elevadas num aproveitamento.

A segunda condição implica portanto que área da chaminé tenha uma área mínima (A_{s_min}) maior ou igual a A_{Th} . Esta área mínima é muitas vezes definida através de um factor de segurança (n) relativo a A_{Th} , ou seja $A_{s_min} = n A_{Th}$.

Este factor de segurança pode variar bastante, Jaeger [2] sugere valores entre 1.5 e 1.8, podendo para túneis longos adoptar-se valores menores que 1.5.

Nos Estados Unidos, o USBR considera um factor de segurança de 1, enquanto que o corpo de engenheiros do exército (USACE) considera um factor de segurança de 1.5 para CE simples e 1.25 para CE diferenciais,[39].

Nas expressões apresentadas deverão ser consideradas as perdas de carga localizadas, na ligação entre o túnel e a chaminé de equilíbrio e na tomada de água (ou estrutura de restituição quando a chaminé se localizar a jusante). Estas perdas de carga terão um peso reduzido quando os túneis forem longos e/ou quedas forem elevadas, mas serão muito importantes quando os túneis forem curtos e as quedas forem pequenas.

A estabilidade hidráulica das oscilações associadas a pequenas variações de potência pode também ser aferida através da visualização dos resultados da simulação numérica.

Para o AH apresentado na Figura 2.20, vão-se analisar as oscilações associadas a uma pequena variação de potência gerada pela turbina, considerando diversas áreas para a CE. Na Tabela 3.1 apresenta-se o cálculo de A_{Th} para este AH.

Tabela 3.1 - Cálculo de A_{Th} para o exemplo da Figura 2.20

H	150.00 m
L	4000 m
Q_0	50 m ³ /s
v_0	3.98 m/s
p''^+	0.62 s ² /m
H'_0	140.18 m
A_{Th}	29.49 m ²

Para a análise da estabilidade das oscilações é comum apresentar o gráfico que relaciona a velocidade no túnel com o nível na chaminé em cada instante de tempo. Neste gráfico o limite de estabilidade pode ser observado quando os resultados formarem uma elipse.

Na Figura 3.1 apresentam-se os resultados da simulação numérica das oscilações admitindo que $Q^*=52 \text{ m}^3/\text{s}$ e que a admissão do caudal turbinado é feita segundo a fórmula (3.2).

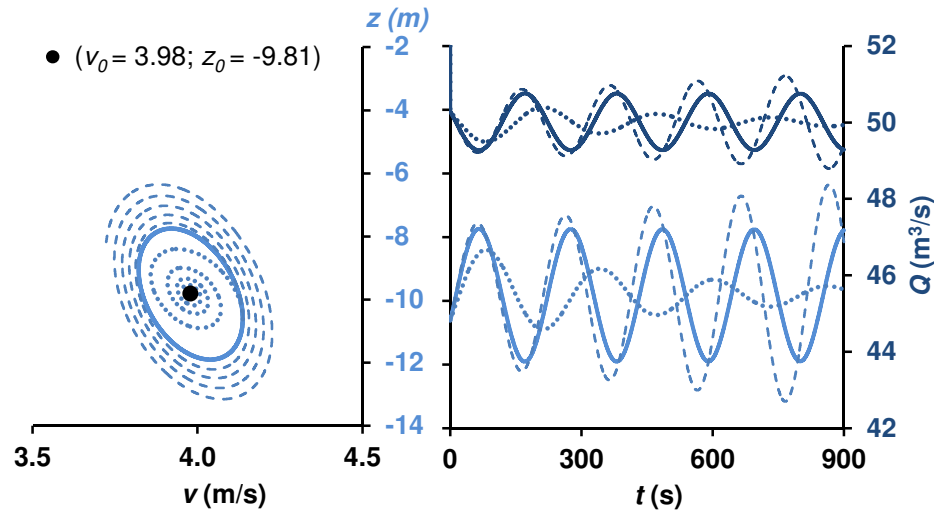


Figura 3.1 - Resultados da simulação numérica para $A_s = A_{Th}$ (—), $A_s > A_{Th}$ (- - -) e $A_s < A_{Th}$ (.....).

Quando a área da chaminé é igual a A_{Th} (linha a cheio), como seria de esperar, o comportamento das oscilações e do caudal turbinado assume um comportamento perfeitamente senoidal e no gráfico que relaciona v e z toma a forma de uma elipse.

Quando a área da chaminé é maior do que A_{Th} (linha a picotado), as oscilações são amortecidas e, no gráfico que relaciona v e z , a espiral converge para o regime permanente (v_0, z_0) , representado pelo círculo a negro no centro da elipse.

Quando a área da chaminé é menor do que A_{Th} (linha a tracejado), as oscilações vão aumentando (oscilações forçadas ou auto-induzidas) e no gráfico que relaciona v e z , a espiral afasta-se do valor do regime permanente.

Se através dos resultados da simulação numérica, no gráfico que relaciona v e z , obtivermos uma espiral convergente podemos concluir que as oscilações serão estáveis e se a espiral for divergente as oscilações serão instáveis. A elipse representa portanto o limite de estabilidade em que as oscilações assumem um comportamento perfeitamente senoidal.

3.3 GRANDES OSCILAÇÕES

Quando as oscilações não forem pequenas, algumas das hipóteses consideradas por Thoma para a análise de pequenas oscilações não são válidas, podendo as oscilações ser instáveis, mesmo quando consideradas áreas superiores a A_{Th} .

Tradicionalmente este problema é analisado através dos parâmetros de Vogt, β e ε , definidos através das seguintes expressões [2]:

$$\beta = \frac{p'' v_0^2}{H}; \quad \varepsilon = \frac{z_*^2}{(p'' v_0^2)^2} \quad (3.4)$$

Vários autores estudaram esta problemática. Jaeger [2] apresenta as curvas definidas por Thoma (β_{Th}), Frank (β_{Fr}) e ele próprio (β^*) que permitem avaliar a estabilidade hidráulica das oscilações associadas a grandes variações de potência (grandes oscilações), Figura 3.2.

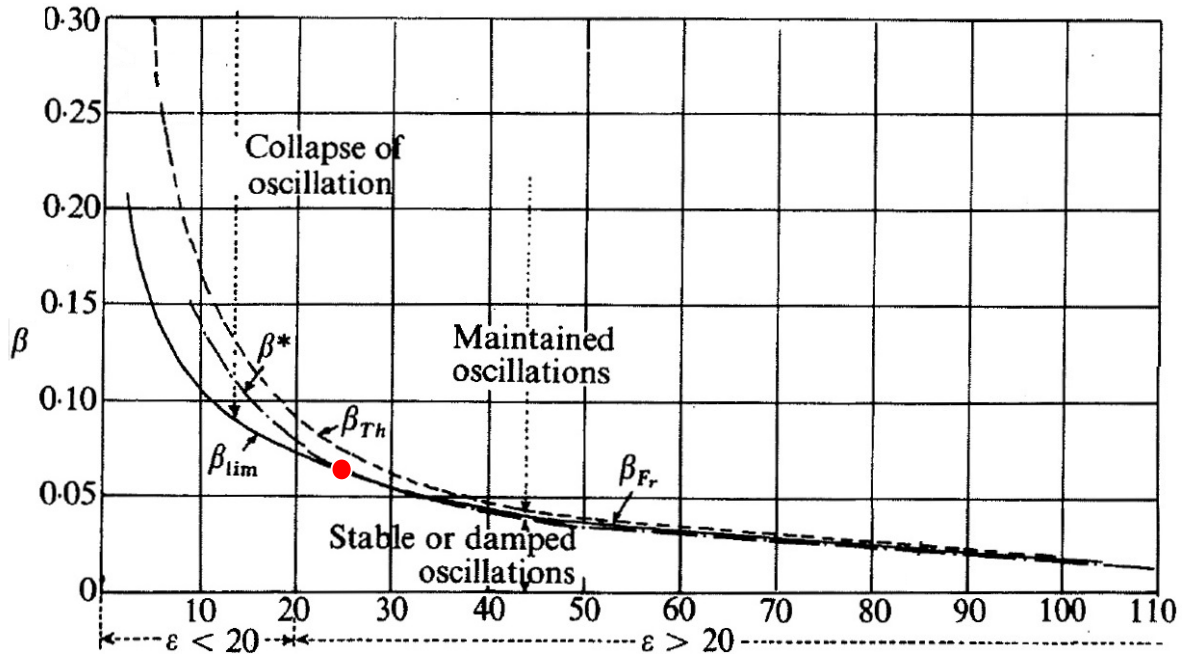


Figura 3.2 - Curvas β_{Fr} , β^* , β_{Lim} e β_{Th} para a análise da estabilidade associada a grandes oscilações, [2].

Para $\epsilon > 20$ deverão ser consideradas as curvas β_{Fr} ou β^* e quando $\epsilon < 20$ deverá ser considerado β_{Lim} .

Para $\epsilon > 20$, a curva β^* no gráfico anterior é equivalente a considerar o seguinte factor de segurança [2]:

$$n^* = \frac{A_s}{A_{Th}} = 1 + 0.482 \frac{z^*}{H + z_0} \quad (3.5)$$

Note-se que z^* depende da área da chaminé, e esta depende de n^* , por isso, a determinação do factor n^* é um processo interativo.

Ainda em relação ao exemplo anterior, como $\epsilon > 20$, calculou-se iterativamente o valor n^* através da equação (3.5).

Tabela 3.2-Cálculo do valor de n^*

	A_{Th}	$1.18. A_{Th}$	$1.17. A_{Th}$
z^*	52.45	48.28	48.49
β	0.07	0.07	0.07
ϵ	28.56	24.20	24.41
n^*	1.18	1.17	1.17

Na Figura 3.2, o ponto a vermelho, correspondente aos valores de ϵ e β do exemplo estudado quando a chaminé tem uma área de $1.17 A_{th}$.

Na Figura 3.3 apresentam-se os resultados das simulações numéricas para $A_s = A_{Th}$ (linha a tracejado) e $A_s = 1.17 A_{Th}$ (linha a cheio), considerando $Q^* = 20 \text{ m}^3/\text{s}$.

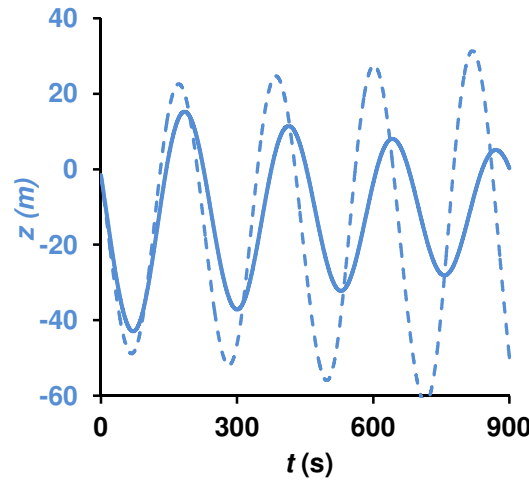


Figura 3.3 - Oscilações considerando $A_S = A_{Th}$ (---) e $A_S = 1.17A_{Th}$ (—).

Note-se que a variação de caudal imposta, de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ para $50 \text{ m}^3/\text{s}$, provoca grandes oscilações no interior da CE.

Como se pode observar quando considerado um factor de segurança de 1.17, o comportamento das oscilações é decrescente, enquanto que quando considerado que $A_S = A_{Th}$, as oscilações são crescentes ou seja auto-induzidas.

3.4 OUTROS FACTORES QUE INFLUENCIAM A ESTABILIDADE HIDRÁULICA

Para pequenas oscilações, existem outros factores, não considerados na fórmula de Thoma, que influenciam a estabilidade hidráulica e consequentemente a área da chaminé, nomeadamente:

- Energia cinética no túnel na zona da ligação à chaminé de equilíbrio;
- Perdas de carga na conduta forçada;
- Inclusão de um factor de amortecimento;
- Influência da curva de rendimento da turbina;
- Funcionamento em paralelo com outras unidades produtoras;
- Choque Hidráulico.

Gardel [49][55] estudou o efeito destes factores, propondo a seguinte formulação para a determinação do cálculo do factor de segurança a considerar numa CE localizada a montante.

$$n = \left[\left(1 + \lambda \frac{E_0}{p'^+ v_0^2} + \ln(1 - A) \right) \cdot \left(\frac{1 - C_0/H'_0}{1 - \frac{3}{2}\varepsilon - \frac{3}{2}(1 - \varepsilon)\tan\sigma} - \frac{2C_0}{H_0} \right) \right]^{-1} \quad (3.6)$$

em que H'_0 representa a queda útil considerada na fórmula de Thoma.

Numa CE com estrangulamento, Gardel [55] calcula a A_{Th} considerando o factor de perda de carga p'^+ , através da seguinte expressão:

$$A_{Th} \geq \frac{LA_T}{2gp'^+(H'_0)}; \quad (3.7)$$

em que $H'_0 = H - p'v_0^2$, λ representa um coeficiente averiguado experimentalmente e que depende da forma de inserção da bifurcação para a chaminé, (-); E_0 a energia cinética no túnel no ponto de inserção da CE, (m); A o amortecimento pretendido para as oscilações, (-); C_0 a perda de carga na conduta forçada em regime permanente, (m); $\varepsilon = 1 - K$, em que K representa a relação entre capacidade da central (P) e a capacidade produtora total da rede (P_T), ou seja $K = P/P_T$ e $\tan \sigma$ o efeito da curva de rendimento da turbina.

Apesar da fórmula apresentada ser indicada para chaminés localizadas a montante, estes factores influenciam também a estabilidade das oscilações de uma CE localizada a jusante.

De seguida, serão analisados, em particular, os factores atrás listados de modo a perceber-se em que medida cada um deles contribui para a estabilidade das oscilações. Quando se justificar será, também, analisada a influência destes factores na estabilidade das oscilações numa CE localizada a jusante da turbina.

Esta análise será feita através de factores de segurança específicos e através da simulação numérica das oscilações para um exemplo concreto.

Para o AH apresentado na Figura 2.20, em vez de uma CE simples, admite-se uma solução com estrangulamento, com o diâmetro da bifurcação igual ao do túnel. Na Tabela 3.3 apresenta-se o cálculo da A_{Th} segundo a equação (3.7).

Tabela 3.3 - Cálculo de A_{Th} para o exemplo da Figura 2.20, admitindo uma solução com estrangulamento.

H	150.00 m
L	4000 m
Q_0	50 m ³ /s
v_0	3.98 m/s
P'^+	0.57 s ² /m
H_0	140.99 m
A_{Th}	31.95 m ²

Este AH será adoptado como exemplo nos pontos seguintes para averiguar o efeito de cada um dos factores atrás referidos na estabilidade das oscilações.

3.4.1 ENERGIA CINÉTICA NO TÚNEL NO PONTO DE INSERÇÃO DA CE

3.4.1.1 Chaminé localizada a montante

Numa chaminé com estrangulamento, a energia cinética do túnel na zona de inserção da chaminé tem um efeito estabilizante. O efeito particular deste factor, representado por n_a , pode ser calculado através da seguinte expressão, [53].

$$n_a \approx \frac{1}{1 + \lambda \frac{E_0}{P'^+ v_0^2}} \quad (3.8)$$

em que λ representa um coeficiente, que deverá ser averiguado experimentalmente. Na Tabela 3.4 apresentam-se os coeficientes definidos por Gardel [53], para as situações em que o diâmetro da bifurcação é igual ao do túnel na zona de inserção da CE ($\varphi = 1$).

Tabela 3.4 - Valores de λ em função do ângulo da bifurcação (δ) e para $\varphi = 1$.

δ	$\lambda(\varphi = 1)$
60°	0.75
90°	0.65
120°	0.55

Pela fórmula (3.8), pode-se concluir que, quanto maior for E_0 , ou seja, quanto menor for o diâmetro do túnel junto à bifurcação no ponto de inserção da CE, menor será o valor de n_a e, claro, menor será a área a adoptar para a secção da chaminé.

Em alguns AH com a CE localizada a montante, tendo em conta este efeito estabilizante da energia cinética, o diâmetro do túnel na zona de inserção é reduzido, permitindo portanto adoptar uma área menor para a CE.

Para o estudo deste factor específico através da simulação numérica, há que referenciar a queda útil ao ponto de inserção da chaminé (ponto a vermelho da Figura 3.4) de modo a ter em conta as perdas de carga na bifurcação. Na Figura 3.4 estão também representados os dois tipos de escoamento que ocorrem durante este regime transitório - escoamentos do tipo (a) e (f).



Figura 3.4 - Tipos de escoamento no ponto de inserção da CE localizada a montante da turbina

Partindo da expressão para o cálculo da potência pode-se escrever:

$$P_0 = \eta Q_0 H'_0 = \eta Q H' \quad (3.9)$$

Englobando também no rendimento (η), as perdas de carga na conduta forçada e circuito de restituição e, se para pequenas oscilações, se admitir que o rendimento é constante, pode-se escrever a seguinte expressão:

$$Q = \frac{Q_0 H'_0}{H'}, \quad (3.10)$$

em que: $H'_0 = H - p^{'+} v_0^2$; $H' = H + z + \Delta H_\beta + v_d |v_d| p_d^\pm$

Para o exemplo apresentado na Tabela 3.3, o valor de n_a é de 0.945, pelo que:

$$A_{s_min} = n_a A_{Th} = 0.945 \times 31.95 = 30.19 m^2$$

Na Figura 3.5 apresenta-se o gráfico com os resultados da simulação numérica, considerando esta área para a CE, $Q^*=52 m^3/s$ em que a admissão do caudal turbinado é feita segundo a equação (3.10).

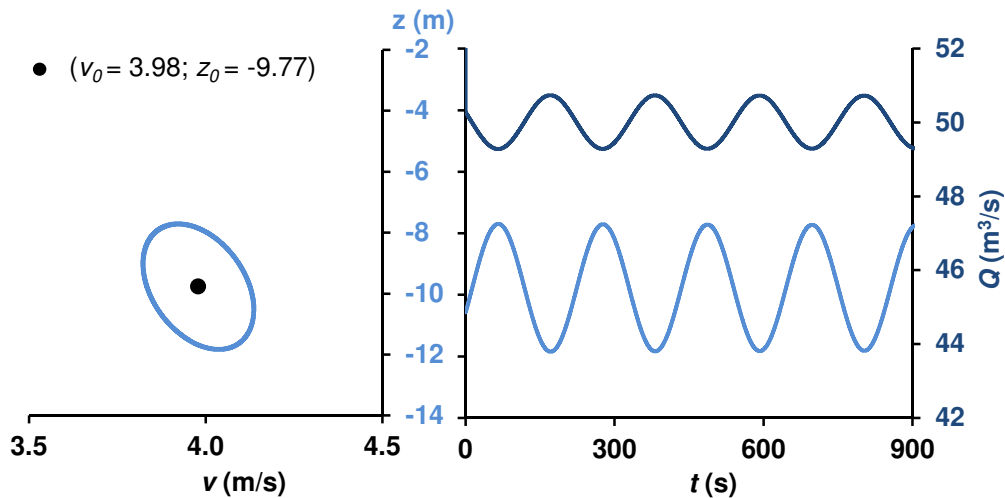


Figura 3.5 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a A_{Th}$

Como se pode observar o valor considerado para A_s origina oscilações perfeitamente senoidais. Através da simulação numérica e considerando a lei de admissão de caudais apresentada, que tem em conta as perdas de carga na bifurcação, foi chegar à mesma conclusão que a formula (3.8).

Na simulação numérica nota-se que quando se aumenta o estrangulamento, ou seja, quando se diminui o diâmetro da bifurcação, a estabilidade aumenta, pelo que se conclui que caso sejam considerados diâmetros menores do que o túnel ($\varphi < 1$), o factor n_a será menor.

3.4.1.2 Chaminé localizada a Jusante da Turbina

Numa chaminé localizada a jusante da turbina, o efeito da velocidade no túnel é instabilizante. Em algumas formulações, no denominador da fórmula para o cálculo de A_{Th} em vez de p' considera-se $(p' - 1/2g)$. Esta abordagem é correcta, mas conservativa, pois há também que ter em conta as perdas de carga entre a bifurcação e o túnel. Lai [54], através das fórmulas desenvolvidas por Gardel [49] para a avaliação das perdas de carga na bifurcação, apresentadas no ponto 2.8.2.2, deduziu a seguinte expressão para o cálculo da área mínima de uma CE com estrangulamento localizada a jusante da turbina.

$$A_{s_min} \geq \frac{LA_T}{g \left(2 \cdot \left(p'^+ - \frac{1}{2g} \right) + \frac{\bar{\sigma}}{2g} \right) H_0} \quad (3.11)$$

em que:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} \left(\frac{0.4 \left(1 + \frac{1}{\varphi} \right)}{\tan \left(\frac{\delta}{2} \right)} + 0.36 + 3.84 - \varphi \right) \quad (3.12)$$

As variáveis apresentadas na expressão (3.12) referem-se à forma da bifurcação e seguem a nomenclatura considerada na metodologia para o cálculo das perdas de carga na bifurcação (ver capítulo 2.8.2.2).

Através da equação (3.11), pode ser deduzida a seguinte expressão para o factor de segurança n_a^* para uma chaminé localizada a jusante.

$$n_a^* \approx \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\bar{\sigma}}{2} \right) \frac{E_0}{p'^+ v_0^2}} \quad (3.13)$$

Repare-se que quando se considerara que o diâmetro da bifurcação é igual ao do túnel ($\varphi=1$), para $\delta = 90^\circ$ vem $\bar{\sigma}=2$ e $n_a^*=1$. Ou seja, numa CE localizada a jusante, quando o diâmetro da bifurcação é igual ao do túnel a área mínima para a secção da CE é igual a A_{Th} .

Para o estudo deste factor específico através da simulação numérica é necessário referenciar a queda útil ao ponto de inserção da chaminé - ponto a vermelho da Figura 3.6. Na figura estão de novo representados os dois tipos de escoamento que ocorrem durante este tipo de regime transitório - escoamentos do tipo (a) e (f). Deve notar-se que a turbina se encontra a montante de α .

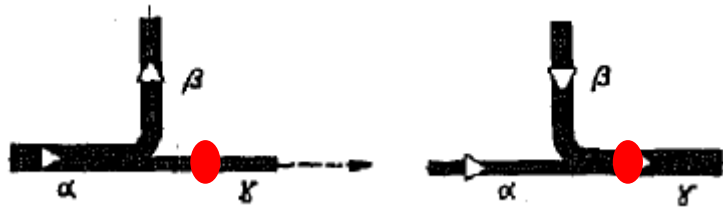


Figura 3.6 - Tipos de escoamento no ponto de inserção da CE de equilíbrio localizada a jusante da turbina.

Partindo da equação do cálculo da potência e englobando no rendimento (η) também as perdas de carga entre a tomada da água e a CE de jusante e, se se admitir que o rendimento é constante para pequenas oscilações, pode-se escrever a seguinte expressão:

$$Q = \frac{Q_0 H'_0}{H'}; \quad (3.14)$$

em que: $H'_0 = H - p'^+ v_0^2$; $H' = H - z - \Delta H_\beta - v_d |v_d| p_d^\pm$

Para uma CE com estrangulamento localizada a jusante da turbina e considerando as mesmas variáveis apresentadas na Tabela 3.3; como $\varphi=1$, $n_a^*=1$, pelo que:

$$A_{s_min} = n_a^* A_{Th} = 1 \times 31.95 = 31.95 m^2$$

Na Figura 3.7 apresenta-se o gráfico com o resultado da simulação numérica, considerando esta área para a CE, $Q^*=52 m^3/s$ e que a admissão de caudal turbinado é feita segundo a equação (3.14).

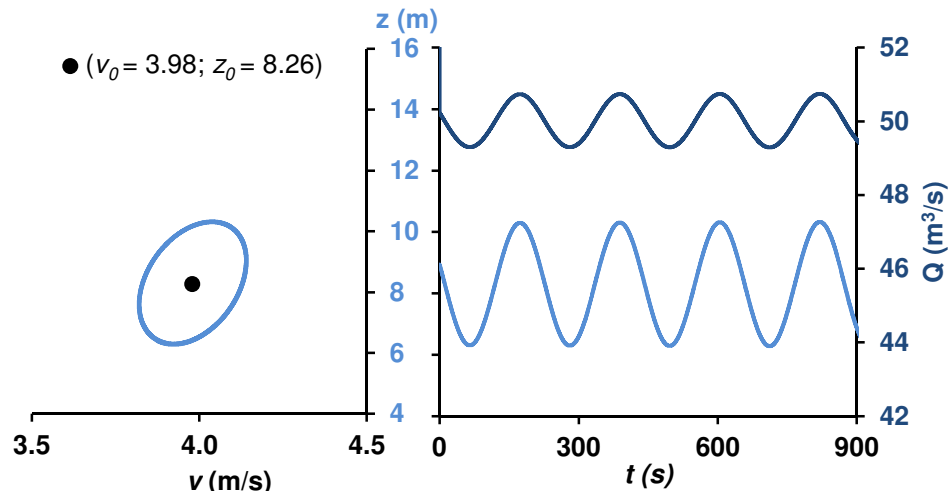


Figura 3.7 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a^* A_{Th}$

Como se pode observar, o valor considerado para a secção da CE origina oscilações perfeitamente sinoidais.

É interessante notar que neste caso, quando o nível na chaminé diminui o caudal também diminui ao contrário do que acontece quando a localização é a montante da turbina.

3.4.2 PERDA DE CARGA NA CONDOTA FORÇADA

As perdas de carga na conduta forçada têm sempre um efeito instabilizante, independentemente da localização da CE, em relação à turbina.

Para além das perdas de carga na conduta forçada, deverão também ser consideradas as perdas de carga no circuito de restituição.

No caso da CE localizada a jusante da turbina deverão ser consideradas as perdas de carga no circuito de adução e no troço entre a turbina e a CE.

O efeito particular deste factor, representado por n_b , pode ser avaliado através da seguinte expressão [55]:

$$n_b = \frac{1}{1 - \frac{3C_0}{H - p^{*+} v_0^2}}, \text{ em que } C_0 = p_c v_{c0}^2 \quad (3.15)$$

O efeito deste factor é passível também de ser visualizado graficamente através da simulação numérica. Há, no entanto, que referenciar o valor da queda para o cálculo da potência à queda útil na turbina. De modo a manter-se o exemplo em análise, é necessário também que ter em conta o efeito das perdas de carga na zona de inserção da CE.

Partindo da equação do cálculo da potência e admitindo que o rendimento é constante para pequenas oscilações, podemos escrever a seguinte expressão que define a lei de admissão de caudal na turbina:

$$Q = \frac{Q_0 H'_0}{H'}, \quad (3.16)$$

em que: $H'_0 = H - p^{*+} v_0^2 - p_c v_{c0}^2$ e

$$H' = H + z + \Delta H_\beta + v_d |v_d| p_d^\pm - p_c v_c^2$$

Para o AH em análise, vai-se considerar uma conduta forçada com um diâmetro de 3 m e com um factor de perda de carga (p_c) de $0.147 \text{ s}^2/\text{m}$. C_0 pode ser calculado da seguinte forma:

$$C_0 = p_c v_{c0}^2 = 0.147 \times \left(\frac{50}{1.5^2 \pi} \right)^2 = 7.34 \text{ m},$$

Considerando este valor para C_0 , através da expressão (3.15) obtém-se um valor para n_b de 1.185, pelo que:

$$A_{s_min} = 0.945 \times 1.185 \times 31.95 = 35.78 \text{ m}^2.$$

Na Figura 3.8, apresenta-se o gráfico com os resultados da simulação numérica, considerando esta área para a CE, $Q^* = 52 \text{ m}^3/\text{s}$ e que a admissão de caudal turbinado é feita segundo a equação (3.16).

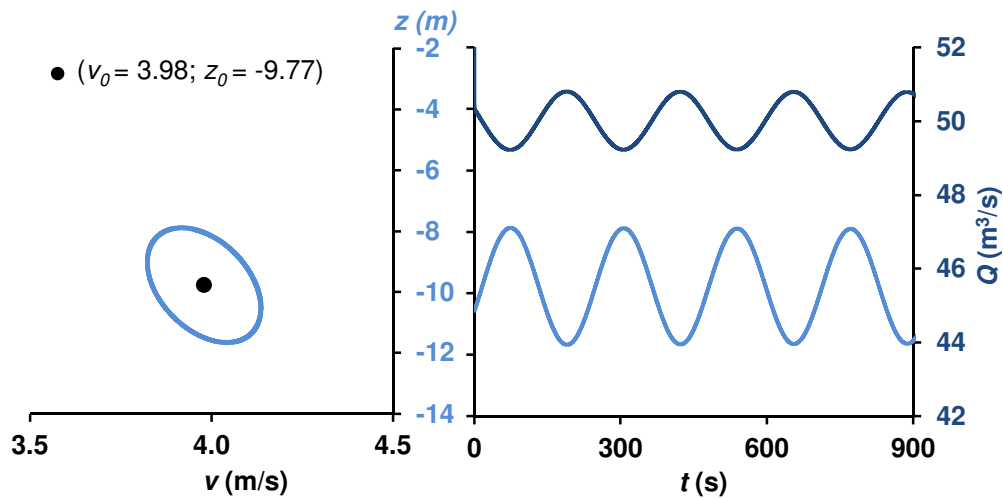


Figura 3.8 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a n_b A_{Th}$

Como se pode observar o valor considerado para A_s origina oscilações perfeitamente senoidais. Através da simulação numérica e considerando na lei de admissão de caudais as perdas de carga na conduta forçada, foi possível chegar à mesma conclusão que a fórmula (3.15) relativamente à área da CE.

3.4.3 AMORTECIMENTO

Não é benéfico para o AH que as oscilações se prolonguem durante muito tempo pois, deste modo, aumentam também o número de manobras que o distribuidor da turbina tem de executar, causando desgaste no equipamento. Por isso, pode-se definir, a priori, qual o amortecimento pretendido para as oscilações.

Na Figura 3.9 apresenta-se, de forma esquemática, a nomenclatura para a definição do amortecimento (A).

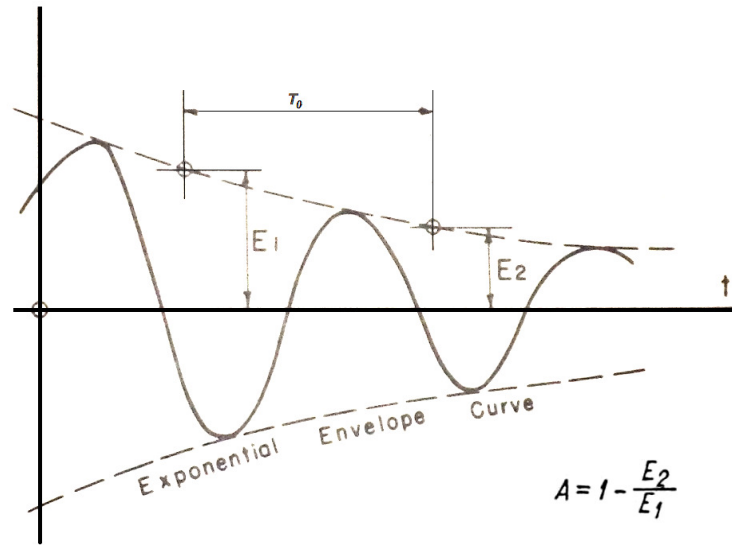


Figura 3.9 - Nomenclatura para definição do amortecimento (A), [30].

O amortecimento é medido no intervalo de tempo T_0 , que corresponde ao período entre 2 picos consecutivos caso fosse adoptada A_{Th} . T_0 pode ser determinado através da seguinte expressão, [55]:

$$T_0 = \frac{v_0 L}{g p^{*+} v_0^2} \quad (3.17)$$

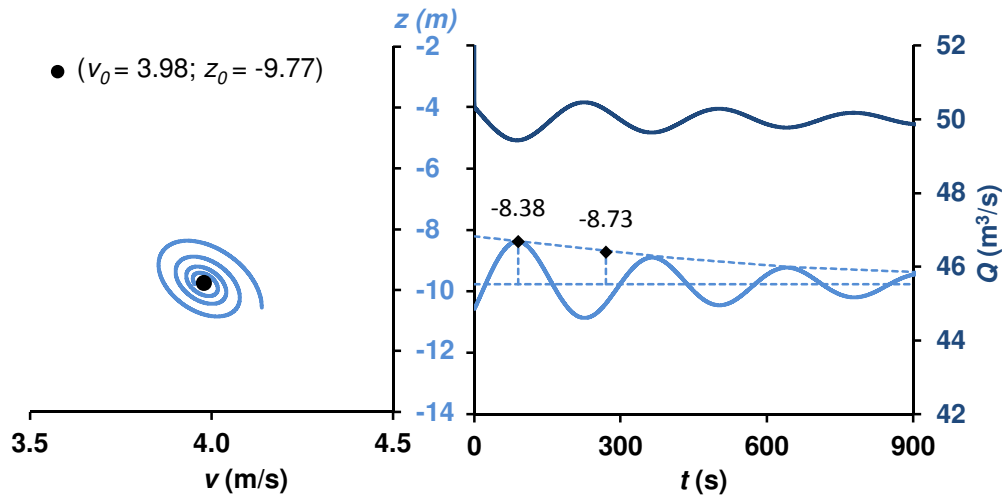
Para se conseguir o amortecimento pretendido deverá ser considerado o seguinte factor, [55]:

$$n_c = \frac{1}{1 + \log_e(1 - A)} \quad (3.18)$$

Voltando ao exemplo em análise, caso se queira um amortecimento (A) de 0.25 (25%), é necessário considerar um factor de 1.404, pelo que:

$$A_{s_min} = 0.945 \times 1.185 \times 1.404 \times 31.95 = 50.23 m^2.$$

Na Figura 3.10 apresenta-se o resultado da simulação considerando esta área para a CE e $Q^*=52 m^3/s$. A regulação do caudal turbinado é realizada de forma idêntica ao ponto anterior.


 Figura 3.10 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a)n_b)n_c)A_{Th}$

A duração temporal que separa os dois pontos marcados na figura corresponde à duração de T_0 , cujo valor é de 180s. Pode-se então confirmar com os resultados da simulação numérica que:

$$E_1 = -8.38 - (-9.77) = 1.39 \text{ e } E_2 = -8.73 - (-9.77) = 1.04;$$

$$\text{logo: } A = 1 - 1.04/1.39 = 0.25$$

3.4.4 FORMA DA CURVA DE RENDIMENTO DA TURBINA

Até este ponto, tem-se considerado o rendimento constante; no entanto, como é sabido, o rendimento varia consoante o ponto de funcionamento da turbina.

Quando a curva de rendimento da turbina está a subir, a variação do rendimento aumenta a estabilidade, mas se estiver a descer, diminui a estabilidade.

No dimensionamento da chaminé, são normalmente considerados cenários de potência máxima para a queda mínima. Nessas situações, o ponto de funcionamento em regime permanente, está normalmente, do lado descendente da curva de rendimento da turbina, por isso, o efeito é instabilizante e como tal leva a que se adoptem áreas maiores para a chaminé.

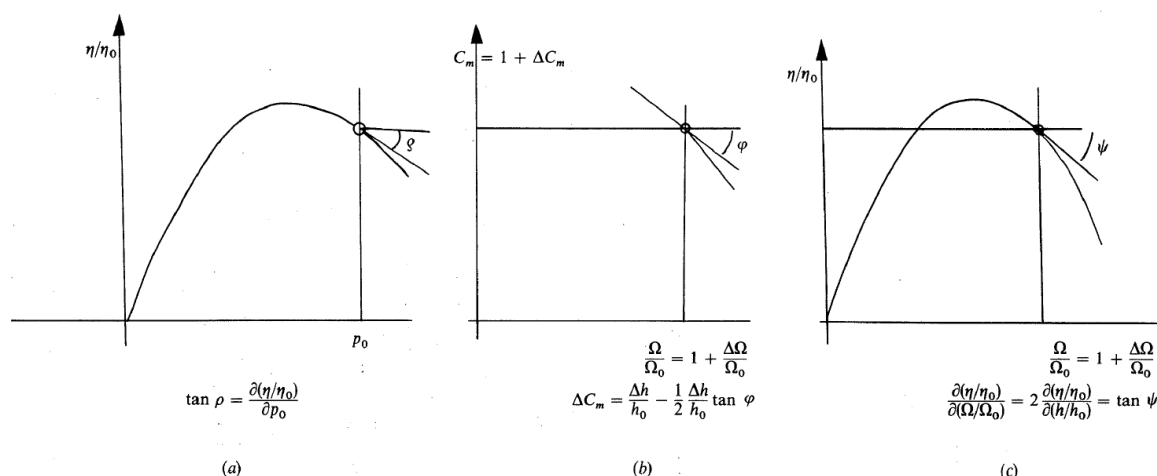
Para ter em conta este efeito, Gardel propõe o seguinte coeficiente, [55]:

$$n_{d)} = 1 - \frac{3}{2} \tan \sigma \quad (3.19)$$

em que:

$$\tan \sigma = \frac{2 - \tan \varphi}{3} \tan \rho + \frac{\tan \psi}{3} \quad (3.20)$$

em que ρ , φ , ψ representam, respectivamente, os ângulos com a horizontal das tangentes no ponto de funcionamento em regime permanente das curvas a), b) e c) apresentadas na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Definição das variáveis ρ , φ , ψ [2]

O gráfico a) representa, para uma queda constante, a variação do rendimento com a potência. Os gráficos b) e c) representam respectivamente o binário actuante na roda (“torque”) e o rendimento em função da velocidade de rotação com abertura e queda constantes.

A curva a) é a mais importante, pois permite a determinação de $\tan \rho$, que é, geralmente a variável predominante para a avaliação de $\tan \sigma$. O valor de $\tan \rho$ na vizinhança da abertura total é negativo e geralmente toma valores entre -0.2 e -0.3.

O parâmetro $\tan \varphi$ caracteriza o grau de reacção da roda e toma em média um valor próximo de -1. Quando a velocidade específica da turbina é baixa este valor aproxima-se de -0.8 e quando é alta este valor aproxima-se de -1.2.

O valor de $\tan \psi$ deverá ser zero para a queda de dimensionamento da roda. Será negativo ou positivo quando a turbina funcionar, respectivamente, com quedas mais baixas ou mais altas do que a queda de dimensionamento. Quando o nível estático varia bastante em relação ao nível de dimensionamento $\tan \psi$ não deverá ser desprezado.

Este tipo de informação nem sempre está disponível, por isso, será interessante mostrar o enquadramento apresentado por Gardel [55].

Tabela 3.5 - Enquadramento das variáveis respeitantes à curva de rendimento da turbina, [55].

	$\tan \rho$	$\tan \psi$	$\tan \varphi$	$\tan \sigma$	n_d
Sem efeito no rendimento	0	0	-1	0	1
Frequentes	-0.2	0	-1	-0.2	1.3
Pouco frequentes	-0.25	-0.2	-1.1	-0.32	1.48
Valores raros	-0.3	-0.6	-1.2	-0.52	1.78

Será relativamente comum ter de majorar a dimensão da chaminé devido ao efeito da curva de rendimento entre 30 % e 50%.

Para os casos “frequentes” $\tan \varphi$ próximo de -1, enquanto $\tan \psi$ não deverá diferir muito de 0, pelo que $\tan \sigma$ será aproximadamente igual a $\tan \rho$, fazendo coincidir a fórmula (3.19) com a apresentada por Calame e Gaden [56].

De sublinhar que nesta abordagem $\tan \rho$ é determinado a partir da curva de rendimento em função da potência. Existe uma outra versão do factor n_d calculado unicamente a partir da curva de rendimento em função da abertura relativa (θ/θ_0) [18].

Para fazer a distinção designa-se por $\tan \rho'$ quando for considerada a curva de rendimento definida em função da abertura relativa (θ/θ_0) .

O efeito deste factor é também passível de ser visualizado graficamente através da simulação numérica.

Partindo da equação do cálculo da potência, pode-se escrever a seguinte expressão:

$$P_0 = \eta_0 Q_0 H'_0 = \eta Q H' \text{ ou } Q = \frac{\eta_0}{\eta} \frac{Q_0 H'_0}{H'} \quad (3.21)$$

Será portanto necessário definir em cada instante de tempo o valor de η_0/η . Para as situações em que $\tan \rho$ é predominante, para o cálculo de $\tan \sigma$, pode-se utilizar a seguinte expressão que relaciona $\tan \rho'$ e $\tan \rho$ [18].

$$\tan \rho' = \frac{\tan \rho}{1 - \tan \rho} \quad (3.22)$$

Por definição, $\tan \rho'$ é definido pela seguinte expressão:

$$\tan \rho' = \frac{\frac{\eta}{\theta} - \frac{\eta_0}{\theta_0}}{\frac{\eta_0}{\theta} - \frac{\eta_0}{\theta_0}}, \text{ logo } \frac{\eta}{\eta_0} = \tan \rho' \left(\frac{\theta}{\theta_0} - 1 \right) + 1 \quad (3.23)$$

A queda e o caudal estão normalmente relacionados por relações quadráticas pelo que se poderá estabelecer a seguinte relação [18] :

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\theta}{\theta_0} \sqrt{\frac{H'}{H'_0}} \quad (3.24)$$

Assim, a lei de admissão de caudal na turbina (equação (3.21) pode agora ser escrita da seguinte forma:

$$Q = \frac{1}{\tan \rho' \left(\frac{Q}{Q_0} \sqrt{\frac{H'_0}{H'}} - 1 \right) + 1} \frac{Q_0 H_0}{(H')} ; \quad (3.25)$$

em que:

$$H'_0 = H - p^{++} v_0^2 - p_c v_{c0}^2 \text{ e}$$

$$H' = H + z + \Delta H_\beta + v_d |v_d| p_d^\pm - p_c v_c^2$$

No exemplo em análise, considera-se que a curva de rendimento da turbina será do tipo “frequente”, pelo que $\tan \sigma = \tan \rho = -0.2$ e $n_d = 1.3$.

Para o estudo deste factor em particular admite-se que o amortecimento (A) é zero, de modo a que, na visualização gráfica da simulação, se possa observar o limite de estabilidade. Assim:

$$A_{s_min} = 0.945 \times 1.185 \times 1 \times 1.30 \times 31.95 = 46.51 m^2$$

Na Figura 3.12 apresenta-se o resultado da simulação numérica considerando esta área para a chaminé de equilíbrio. Na expressão (3.25) foi considerado para $\tan \rho'$ o valor de -0.17, calculado através da expressão (3.22).

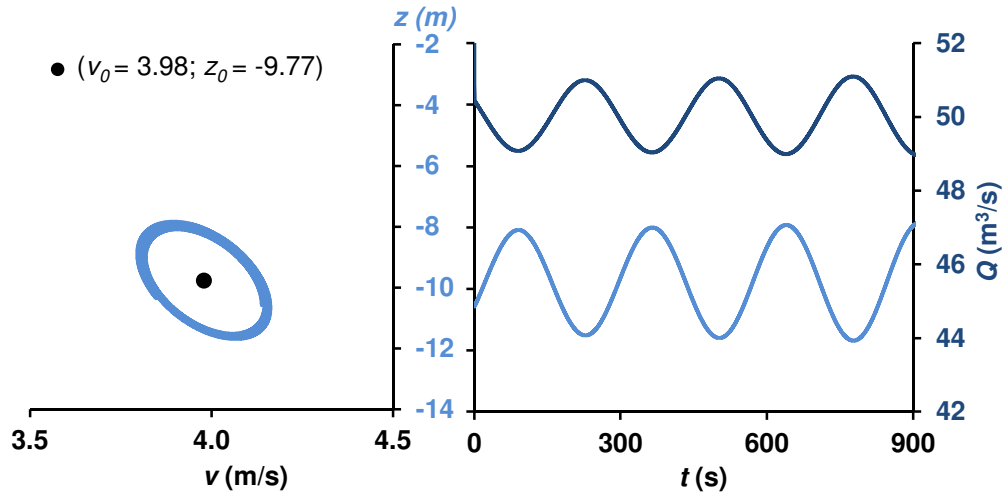


Figura 3.12 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a) n_b) n_d) A_{Th}$

Neste caso não se observa a elipse perfeita esperada, que representa o limite de estabilidade, mas aproxima-se bastante.

Através da simulação numérica e considerando na lei de admissão de caudais o efeito da curva de rendimento da turbina, foi possível chegar a conclusões muito próximas das obtidas através da fórmula (3.15) relativamente à área da CE.

Note-se que a lei de admissão de caudais desenvolvida só é válida para os “casos frequentes”, em que $\tan \sigma = \tan \rho$.

3.4.5 EFEITO DO FUNCIONAMENTO EM PARALELO COM OUTRAS UNIDADES PRODUTORAS

Quando a central está ligada a uma rede à qual estão também ligadas outras centrais produtoras sem CE, a área necessária para a secção da chaminé poderá ser menor.

O efeito particular deste factor, representado por n_e , pode ser avaliado através da seguinte expressão [55]:

$$n_e = 1 - \frac{3}{2}(1 - K) \quad (3.26)$$

em que K representa a relação entre capacidade da central (P) e a capacidade produtora total da rede (P_t).

Portanto, se a central fornecer energia para uma rede isolada, $P < P_t$, $K=1$ pelo que $n_e = 1$. Quando $P < P_t$ a área da CE poderá ser reduzida.

Calame e Gaden mostraram que as oscilações serão sempre estáveis, seja qual for a área da chaminé, se a capacidade da central representar menos de um terço da capacidade produtora da rede [2], ou seja, quando o valor de n_e for menor do que zero.

Esta condição é frequentemente satisfeita em redes importantes, e na bibliografia pode-se encontrar exemplos em que foram adoptadas áreas bem menores do que A_{Th} . Nos AH de la Rhue ($n=0.25$) e Jouques ($n=0.077$) em França, foram consideradas áreas significativamente menores do que A_{Th} [2].

O efeito deste factor pode também ser visualizado graficamente através da simulação numérica. Para pequenas oscilações, a potência gerada pela central pode ser calculada através da seguinte expressão [2]:

$$P = P_0 \left(1 + \frac{3}{2} \frac{x}{H'_0} (1 - K) \right) \quad (3.27)$$

em que x representa a variação de queda útil relativamente a H'_0 .

Nesta expressão $P = P_0$, quando $K=1$, ou em regime permanente, em que x é igual a zero.

A partir da expressão (3.27) e considerando também o efeito da curva de rendimento, a expressão para modelar o caudal turbinado pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q = \frac{1}{\tan \rho' \left(\frac{Q}{Q_0} \sqrt{\frac{H'_0}{H'}} - 1 \right) + 1} \cdot \frac{Q_0 H'_0}{H'} \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \frac{H' - H'_0}{H'_0} (1 - K) \right); \quad (3.28)$$

em que:

$$H'_0 = H - p^{++} v_0^2 - p_c v_{c0}^2$$

$$H' = H + z + \Delta H_\beta + v_d |v_d| p_d^\pm - p_c v_c^2$$

No exemplo em análise, vai-se considerar que a central representa 70% da capacidade produtora da rede, ou seja $k = 0.7$, pelo que $n_e = 0.55$.

Para o estudo deste factor vai-se continuar a admitir que o amortecimento (A) é igual a zero, e manter o efeito da curva de rendimento da turbina ($\tan \sigma = \tan \rho = -0.2$), pelo que:

$$A_{s_min} = 0.945 \times 1.185 \times 1 \times 1.30 \times 0.55 \times 31.95 = 25.58 m^2$$

Na Figura 3.13 apresenta-se o resultado da simulação numérica considerando esta área para a CE e que a admissão de caudal turbinado é feita de acordo com a expressão (3.28).

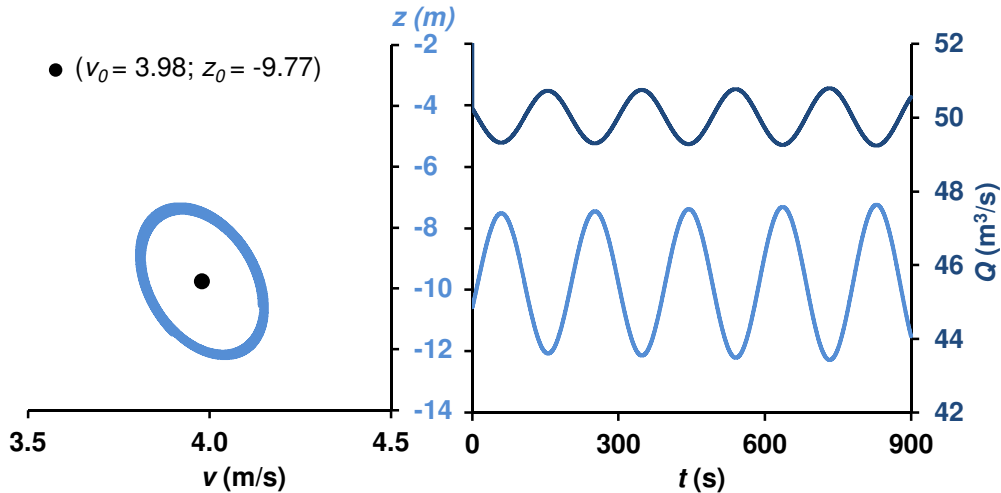


Figura 3.13 - Resultados da simulação numérica considerando $A_{s_min} = n_a n_b n_d n_e A_{Th}$

Neste caso, também, não é possível observar a elipse perfeita esperada, mas, mais uma vez, aproxima-se bastante.

Através da simulação numérica e considerando na lei de admissão de caudais o efeito do funcionamento em paralelo com outras unidades produtoras, foi possível chegar a conclusões muito próximas das obtidas através da fórmula (3.26) relativamente à área da CE.

3.4.6 CHOQUE HIDRÁULICO

De acordo com Gardel [55], regra geral, o efeito do choque hidráulico na estabilidade das oscilações é muito pequeno e é admissível ser desprezado. Em circunstâncias muito especiais, quando período das oscilações for muito pequeno, se a velocidade na conduta forçada for elevada, o efeito do choque hidráulico poderá ter alguma importância, sendo proposto um factor para ter em conta os seus efeitos.

Como nesta dissertação, apenas estamos a estudar a oscilação em massa, este factor não é passível de ser simulado da mesma forma que os anteriores, por isso, nas diferentes análises efectuadas desprezou-se o efeito do choque hidráulico.

3.5 CÂMARA DE EQUILÍBRIO NÃO AREJADA

Numa CE não arejada a área que garante a estabilidade hidráulica das oscilações é maior do que numa CE simples. Svec desenvolveu a seguinte expressão para o cálculo da A_{s_min} , [25]:

$$A_{s_min} = A_{Th} \left(1 + e \left(\frac{p_m}{\gamma m} \right) \right) \quad (3.29)$$

A nomenclatura considerada na expressão é a mesma que foi adoptada no ponto 2.5.6.

Na expressão (3.29) quando $p_m = 0$, $A_{s_min} = A_{Th}$ e, quando $p_m > 0$, $A_{s_min} > A_{Th}$.

3.6 SISTEMAS DE CHAMINÉS

Em AH com CE a montante e a jusante da turbina, as oscilações poderão ter um comportamento instável mesmo que sejam respeitadas as condições de Thoma.

De acordo com Escande e Huron [57], num AH com duas CE e com turbinas de reação, as oscilações serão estáveis em ambas as chaminés se forem cumpridas as condições de estabilidade de Routh-Wurwitz:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &> 0; \alpha_2 > 0; \alpha_3 > 0; \alpha_4 > 0 \\ \Gamma &= \alpha_3^2 - \alpha_1(\alpha_2\alpha_3 - \alpha_1\alpha_4) < 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

em que:

$$\alpha_1 = \frac{2g}{Q_0} \left(p_1 v_{10}^2 \frac{A_{T1}}{L_1} + p_2 v_{20}^2 \frac{A_{T2}}{L_2} \right) - \frac{Q_0}{H_0} \left(\frac{1}{A_{S1}} + \frac{1}{A_{S2}} \right) \quad (3.31)$$

$$\alpha_2 = 4g^2 \frac{p_1 v_{10}^2 p_2 v_{20}^2}{Q_0^2} \cdot \frac{A_{T1}}{L_1} \cdot \frac{A_{T2}}{L_2} - \frac{2g}{H_0} \left(\frac{1}{A_{S1}} + \frac{1}{A_{S2}} \right) \left(p_1 v_{10}^2 \frac{A_{T1}}{L_1} + p_2 v_{20}^2 \frac{A_{T2}}{L_2} \right) + g \left(\frac{A_{T1}}{L_1 A_{S1}} + \frac{A_{T2}}{L_2 A_{S2}} \right) \quad (3.32)$$

$$\alpha_3 = \frac{2g^2}{Q_0} \cdot \frac{A_{T1}}{L_1} \cdot \frac{A_{T2}}{L_2} \left(\frac{p_1 v_{10}^2}{A_{S2}} + \frac{p_2 v_{20}^2}{A_{S1}} \right) - \frac{gQ_0}{A_{S1}A_{S2}H_0} \left(\frac{A_{T2}}{L_2} + \frac{A_{T1}}{L_1} \right) - \frac{4g^2 p_1 v_{10}^2 p_2 v_{20}^2}{H_0 Q_0} \cdot \frac{A_{T1}}{L_1} \cdot \frac{A_{T2}}{L_2} \left(\frac{1}{A_{S1}} + \frac{1}{A_{S2}} \right) \quad (3.33)$$

$$\alpha_4 = \frac{g^2 A_{T1} A_{T1}}{A_{S1} A_{S2} L_1 L_2} \left(1 - \frac{2p_1 v_{10}^2}{H_0} - \frac{2p_2 v_{20}^2}{H_0} \right) \quad (3.34)$$

Quando a central está equipada com grupos Pelton, o nível da CE de jusante não influi na regulação da turbina pois a queda é definida pela cota à saída dos injectores.

Será de seguida analisado o exemplo estudado por Escande e Huron, apresentado de forma esquemática na Figura 3.14.

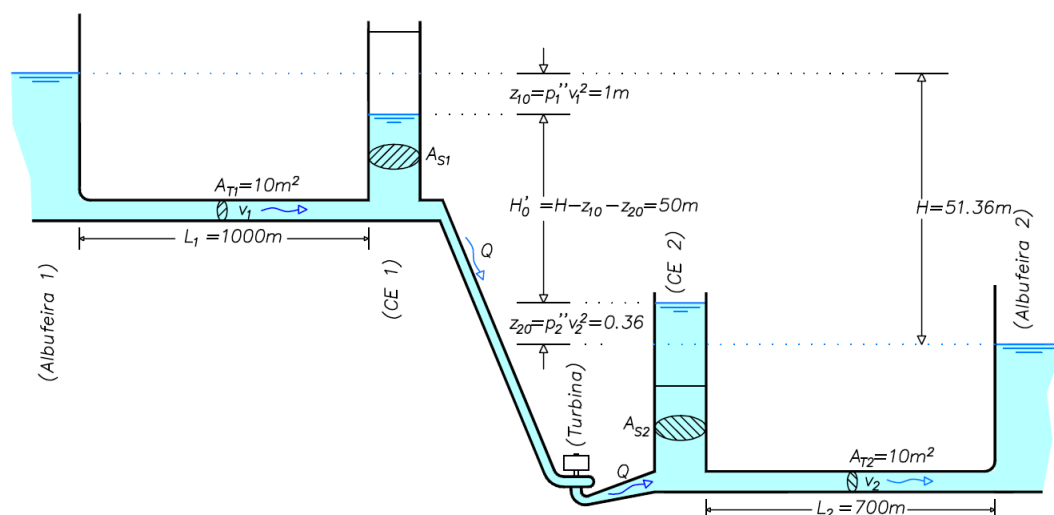


Figura 3.14 - Exemplo de AH apresentado por Escande e Huron, [57].

Para este AH, apresenta-se na Tabela 3.6 o cálculo de A_{Th} para as duas CE.

Tabela 3.6 - Cálculo de A_{Th} para a CE de Montante (índice 1) e de Jusante (índice 2)

		Montante (1)	Jusante (2)
Q_0	(m ³ /s)	20	
A_T	(m ²)	10	10
v_0	(m/s)	2	2
$p'' v_0^2$	(m)	1	0.36
p''	(m/s ²)	0.25	0.09
L	(m)	1000	700
H	(m)	51.36	51.36
H_0	(m)	50	
A_{Th}	(m ²)	40.8	79.3

Estas áreas garantiriam a estabilidade hidráulica das oscilações nas CE, se cada uma funcionasse isoladamente.

Na Tabela 3.7 apresentam-se os valores calculados de α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e Γ .

Tabela 3.7 - Cálculo das Condições de estabilidade de Routh-Wurwitz

α_1	7.09E-06	>0
α_2	4.00E-03	>0
α_3	-7.22E-07	<0
α_3	4.02E-06	>0
Γ	5.42E-13	>0

Duas das condições de estabilidade de Routh-Wurwitz não são cumpridas e, como tal, as oscilações nas chaminés não serão estáveis.

Nestes casos a instabilidade das oscilações também pode ser visualizada graficamente, através da simulação numérica.

Partindo da equação para o cálculo da potência e incluindo no rendimento (η) as perdas do grupo turbina-alternador, transformador e as perdas na conduta forçada e circuito de restituição entre a turbina e a CE de jusante, podemos estabelecer a seguinte relação:

$$P_0 = \eta Q_0 H'_0 = \eta Q (H + z_1 - z_2), \quad (3.35)$$

$$\text{em que: } H_0 = H - p_1''' v_0^2 - p_2''' v_0^2$$

Se, para pequenas variações de caudal, se admitir rendimento constante, pode-se escrever:

$$Q = \frac{Q_0 (H - p_1''' v_0^2 - p_2''' v_0^2)}{H + z_1 - z_2}; \quad (3.36)$$

Na Figura 3.15 apresenta-se o resultado da simulação numérica considerando $Q^* = 21 \text{ m}^3/\text{s}$ em que a admissão de caudal na turbina é feita de acordo com a expressão (3.36).

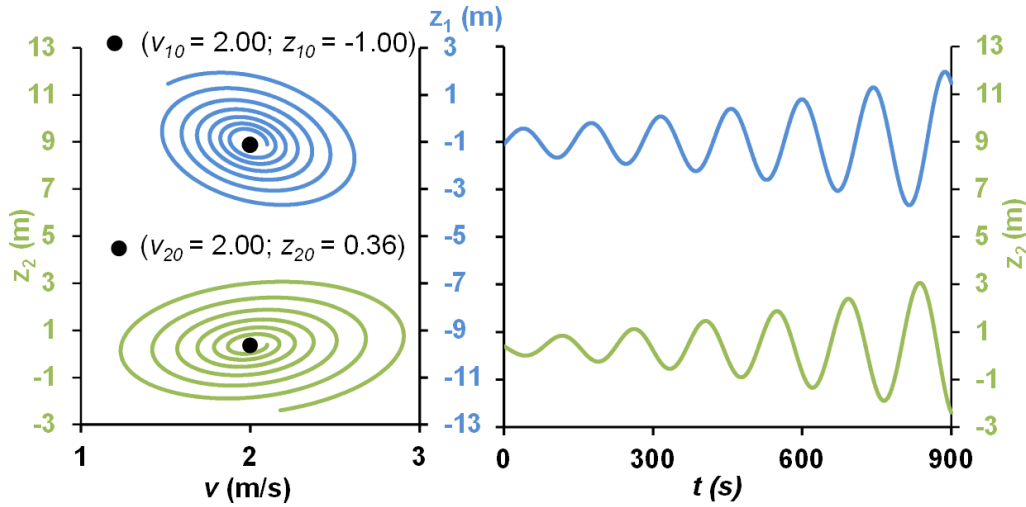


Figura 3.15 - Resultados da simulação numérica, considerando $A_{S1} = A_{Th1}$ e $A_{S2} = A_{Th2}$.

Como se pode observar, quando considerada a área igual a A_{Th} para as secções das chaminés, as oscilações não são estáveis, tal como era de esperar.

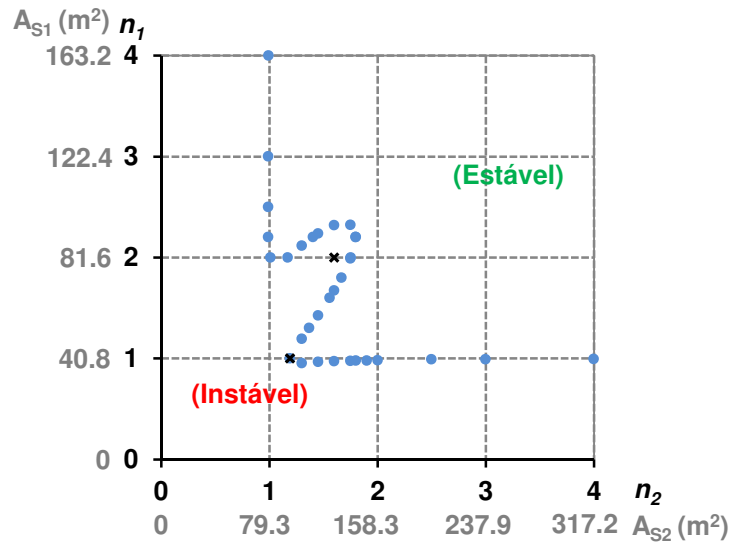
Jaeger [2], considerando a mesma teoria de base, apresenta uma metodologia que permite à partida estudar as gamas de valores possíveis para as áreas das CE de montante e de jusante através dos factores de segurança n_1 e n_2 relativos a A_{Th1} e A_{Th2} respectivamente.

Na grande maioria dos casos a condição de estabilidade condicionante é $\Gamma > 0$. Assim, se definirmos num gráfico a curva de $\Gamma = 0$ em função de n_1 e n_2 , estamos, na prática, a estabelecer a fronteira entre o conjunto de valores que originam oscilações estáveis ou instáveis.

No presente documento a abordagem proposta por Jaeger foi adaptada às ferramentas de cálculo actuais da seguinte forma:

- nas equações para o cálculo de $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ e α_4 , definiu-se $A_{S1} = n_1 A_{Th1}$ e $A_{S2} = n_2 A_{Th2}$.
- para diferentes valores de n_1 ou n_2 procuram-se, respectivamente, os valores de n_2 e n_1 , que satisfazem a condição $\Gamma = 0$.
- as soluções encontradas, definidas em termos de n_2 e n_1 , são colocadas num gráfico.

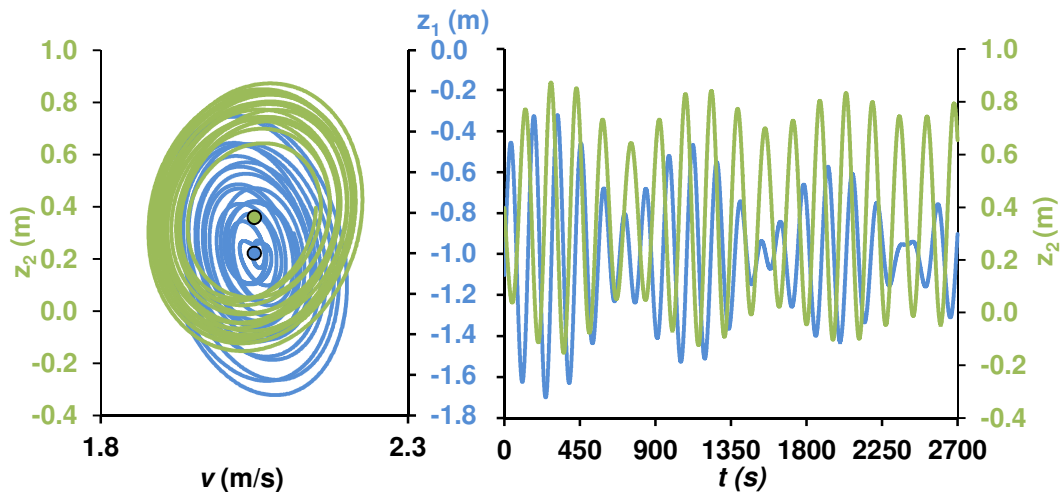
Para o exemplo da Figura 3.14, apresenta-se na Figura 3.16 o gráfico com os diferentes pontos calculados que satisfazem a condição $\Gamma = 0$.


 Figura 3.16 - Representação gráfica dos pontos que satisfazem a condição $\Gamma = 0$.

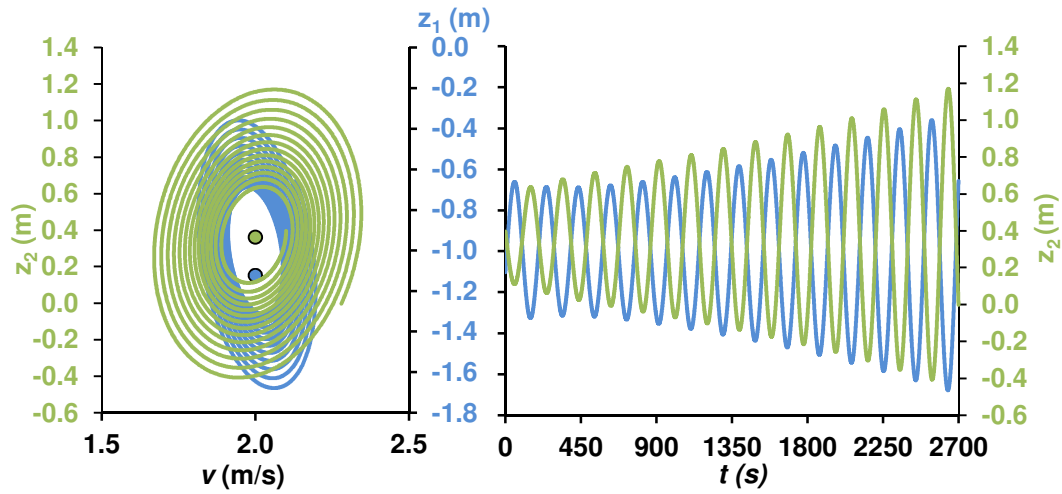
As oscilações serão estáveis em ambas as chaminés se o ponto definido por n_1 e n_2 estiver do lado de dentro da curva definida pelos pontos a azul e serão instáveis se o ponto estiver do lado de fora dessa curva.

Na Figura 3.16 apresentam-se também as áreas correspondentes aos respectivos factores de segurança n_1 e n_2 . Como A_{Th1} e A_{Th2} são significativamente diferentes interessa escolher o ponto que minimize os volumes de escavação. No presente caso, o ponto que minimiza as áreas das secções corresponderá ao ponto $n_2=1.19$ e $n_1=1$.

Através da simulação numérica vai-se comprovar a validade da curva atrás definida, testando as áreas correspondentes a este ponto que minimiza as secções das CE, e as áreas de outro ponto, correspondente a secções maiores, mas na zona instável do gráfico da Figura 3.16. Na Figura 3.17 e na Figura 3.18 apresentam-se os resultados da simulação numérica para os pontos marcados com uma cruz (x) na Figura 3.16, respectivamente, para $(n_1=1.0, n_2=1.19)$ e $(n_1=2, n_2=1.6)$.


 Figura 3.17 - Resultados da simulação considerando $n_1=1.0$ e $n_2=1.19$

Apesar de apresentarem um comportamento um pouco “errante”, as oscilações não são instáveis.


 Figura 3.18 - Resultados da simulação considerando $n_1=2$ e $n_2=1.6$

Apesar de se ter considerado valores de n_1 e n_2 mais elevados do que na simulação anterior, as oscilações neste caso são claramente instáveis, tal como seria de esperar, tendo em conta a localização deste ponto (n_2, n_1) no gráfico da Figura 3.16.

Para uma CE com estrangulamento na base, as condições de estabilidade de Routh-Wurwitz, tal como apresentadas por Escande e Huron, não têm em conta os factores referidos no ponto 3.4. Assim, a avaliação da estabilidade das oscilações, tendo em conta esses factores apenas poderá ser realizada através da simulação numérica, considerando para tal uma lei de admissão de caudal adequada.

A expressão para modelar o caudal turbinado, tendo em conta os efeitos da curva de rendimento da turbina, das perdas de carga conduta forçada e nos orifícios e bifurcações para as CE e do funcionamento em paralelo do AH com outras unidades produtoras é idêntica à equação (3.28). No entanto para o cálculo de H'_0 e H' deverão ser consideradas as seguintes expressões:

$$H'_0 = H - p_1'^+ v_0'^2 - p_2'^+ v_0'^2 - p_c v_c^2 \quad (3.37)$$

$$H' = H + z_1 + \Delta H_{\beta 1} + v_{d1} |v_{d1}| p_{d1}^{\pm} - z_2 - \Delta H_{\beta 2} - v_{d2} |v_{d2}| p_{d2}^{\pm} - p_c v_c^2 \quad (3.38)$$

4

FERRAMENTAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

No âmbito da presente dissertação desenvolveram-se ferramentas de cálculo automático em Excel que permitiram calcular as oscilações nos diferentes casos de estudo apresentados.

Estas ferramentas foram desenvolvidas separadamente para CE com estrangulamento localizadas a montante e a jusante da turbina.

De seguida listam-se as características e funcionalidades das ferramentas desenvolvidas:

- As equações fundamentais que descrevem o fenómeno da oscilação em massa apresentadas nos pontos 2.5.3.1 e 2.5.3.2, respectivamente para as CE localizadas a montante e a jusante, são resolvidas através do método de Runge Kutta, apresentado no ponto 2.7.2.2., considerando um determinando intervalo de cálculo. Foi também criada uma versão da alternativa folha de cálculo que utiliza método aritmético, apresentado no ponto 2.7.2.1.
- As condições iniciais podem ser escolhidas, mas, por defeito, é considerado que a velocidade no túnel ($v_{(t=0)}$) e o nível na chaminé ($z_{(t=0)}$) correspondem às condições em regime permanente para o caudal inicial ($Q_{(t=0)}$). Os níveis nas CE em regime permanente são calculados de acordo com as equações (2.10) e (2.12), respectivamente para as CE localizadas a montante e a jusante.
- A área da CE de equilíbrio é definida em função da altura, permitindo assim analisar as oscilações em CE com câmaras de expansão laterais.
- No túnel, as perdas de carga contínuas são calculadas através da fórmula de Manning-Strickler (2.51). As perdas de carga localizadas são calculadas através da velocidade no túnel (v), sendo possível considerar coeficientes de perda de carga localizada ($K^{\pm}$) diferentes em função do sentido de escoamento.
- As perdas de carga localizadas na bifurcação para a CE são calculadas em cada instante de cálculo de acordo com o apresentado no ponto 2.8.2.2. No ponto de inserção da CE é possível considerar uma redução no diâmetro do túnel, bem como considerar diversos ângulos para a forma da inserção.
- A seguir à bifurcação, as perdas de carga contínuas no troço de ligação à CE de equilíbrio são também calculadas através da fórmula de Manning-Stricker (2.51). As perdas de carga localizadas no orifício de ligação à CE são calculadas através da velocidade no troço de ligação (v_d), sendo possível considerar coeficientes de perda de carga localizada ($K_d^{\pm}$) diferentes em função do sentido de escoamento.
- Os caudais turbinados são modelados através de uma lei da admissão de caudais pré-definida em função do tempo e/ou considerando que regulação da turbina é feita de modo a gerar potência constante, tendo em conta as perdas de carga na bifurcação e orifício de ligação, perdas de carga na conduta forçada, curva de rendimento da turbina, funcionamento em paralelo com outras unidades produtoras de acordo com a equação (3.28). Nesta equação, o caudal em cada instante é calculado através dos parâmetros intervenientes no instante de cálculo anterior.

Para o cálculo oscilações em CE simples podem ser utilizadas as mesmas ferramentas de cálculo, definindo como nulas as perdas de carga na bifurcação e orifício de ligação à CE. A perda de carga na ligação à CE deverá ser incluída nas perdas de carga localizadas do túnel.

Num sistema com uma CE a montante e outra a jusante da turbina as oscilações são calculadas através de duas folhas de cálculo para cada uma das chaminés. Estas duas folhas estão acopladas e consideram o mesmo valor para o caudal turbinado em cada instante de tempo. Quando interessa simular a regulação automática da turbina, o caudal em cada instante é calculado através da fórmula (3.28), com a queda útil em regime permanente e em cada instante calculadas através das equações (3.37) e (3.38).

No Anexo 2, apresenta-se, como exemplo, o layout das folhas de cálculo utilizadas para a determinação das oscilações num sistema com CE a montante e a jusante da turbina, mais concretamente, para a cálculo das oscilações apresentadas na Figura 5.7.

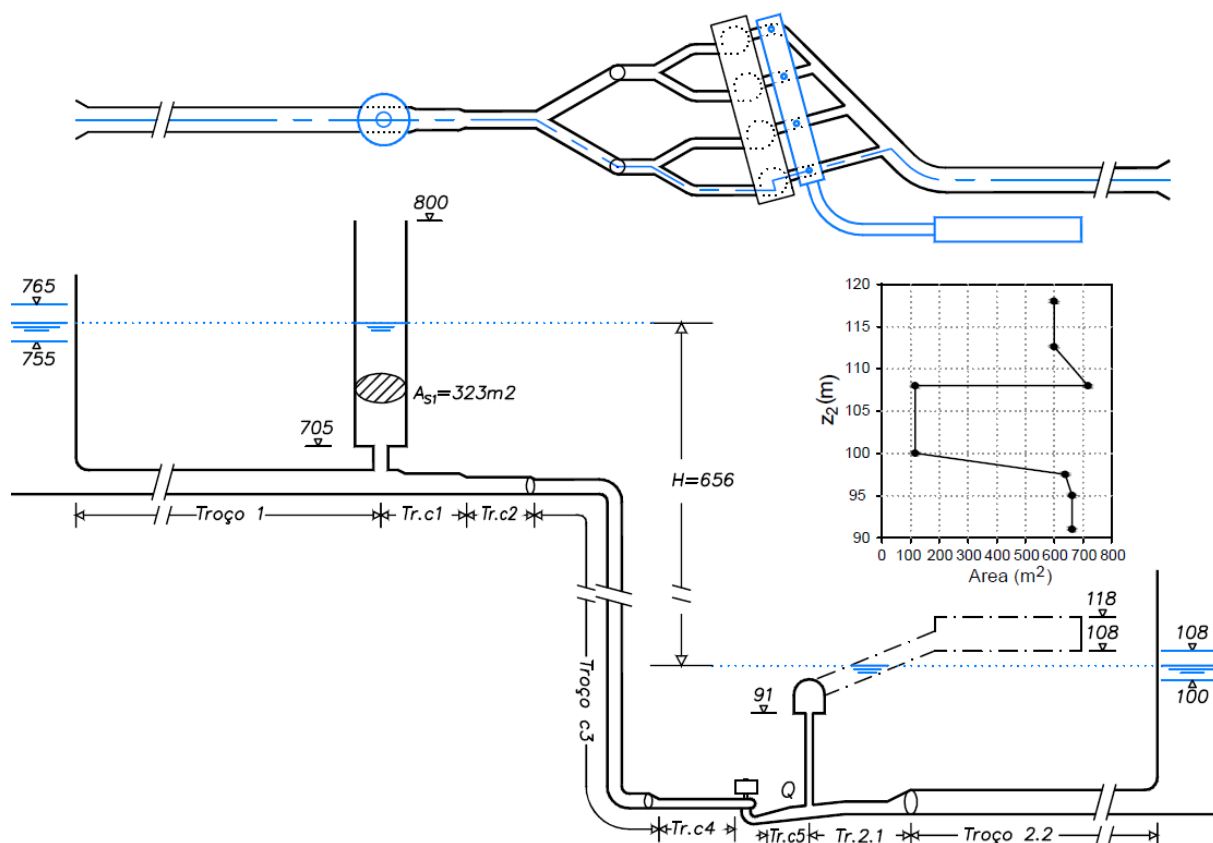
5

ESTUDO DE UM SISTEMA DE DUAS CE, UMA EM CADA LADO DA CENTRAL EQUIPADA COM GRUPOS FRANCIS

5.1 INTRODUÇÃO

Pretende-se estudar um caso de um AH, pondo em prática algumas das metodologias desenvolvidas e apresentadas no capítulo 2.

Na Figura 5.1 apresenta-se de forma esquemática a planta e o perfil longitudinal do AH a analisar.



A central deste AH está equipada com 4 grupos idênticos. Apesar de não ser inteiramente verdade, visto que os circuitos para os grupos não são exactamente iguais, considerou-se que os 4 circuitos funcionarão com o mesmo caudal e queda.

Para simplificar a análise e exposição dos resultados vai-se considerar apenas um cenário relativo às perdas de carga e simular também apenas o valor de caudal máximo considerado, $146.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Vai-se admitir que este é o caudal correspondente à queda média com os 4 grupos em funcionamento.

Conservativamente considerou-se que o aproveitamento analisado pode, em determinadas circunstâncias, fornecer toda a potência requerida pela rede.

5.2 PERDAS DE CARGA

Na Tabela 5.1 apresentam-se, para cada um dos troços representados no perfil longitudinal da Figura 5.1, as características geométricas, as perdas de carga ($Q=146.7 \text{ m}^3/\text{s}$) e os factores de perda de carga calculados (p'). O índice “tr” diz respeito apenas a um troço de uma ramificação e o índice “T” diz respeito à totalidade dos troços.

Tabela 5.1 - Características geométricas e perdas de carga do circuito analisado

		Adução (1)		Conduta Forçada (c)						Restituição (2)	
		Troço 1		Troço c.1	Troço c.2	Troço c.3	Troço c.4	Troço c.5	Troço 2.1		Troço 2.2
L	(m)	4666.2		300.00	1490.95	318.07	51.24	72.50	41.8		671.9
D	(m)	7.00		6.00	5.40	3.60	2.80	3.50	3.50		7.00
Q_{tr}/Q_T	(-)	1.00		1.00	1.00	0.50	0.25	0.25	0.25		1.00
v	(m/s)	3.81		5.19	6.41	7.21	5.96	3.81	3.81		3.81
ΔH_c	(m)	5.60		0.62	5.25	2.27	0.34	0.22	0.13		0.81
ΔH_L	(m)	0.16		1.21	0.86	3.31	0.18	0.44	0.89		0.37
p'	(m/s ²)	0.40		0.07	0.23	0.21	0.02	0.02	0.07		0.08
Totais	(s ² /m)	$p_1^{'+}=0.396^*$		$p_c=0.546$						$p_2^{'+}=0.151^*$	

(*) quando o sentido da velocidade no túnel é negativo, $p_1^{'-}=0.398$ e $p_2^{'-}=0.149$.

Para o cálculo dos factores de perda de carga de cada troço da conduta forçada, considerou-se sempre o valor da velocidade no Troço c.1.

O túnel de restituição é composto por 2 troços com áreas e caudais diferentes. Como no Troço 2.1 apenas passa ¼ do caudal do túnel, na equação (2.3) para o cálculo da A_m , considerou-se a relação Q_T/v_{tr} para este troço.

$$A_m = \frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{A_i}} = \frac{41.8 + 671.93}{\frac{41.8}{146.7/3.81} + \frac{671.93}{3.5^2 \pi}} = 38.48 \text{ m}^2$$

O valor obtido corresponde exactamente à área de uma tubagem com um diâmetro de 7 m. Este resultado era expectável, visto que, os dois troços funcionam exactamente com a mesma velocidade.

Para a CE de montante e de jusante, no cálculo das perdas de carga na bifurcação, troço e orifício de ligação, consideraram-se as características apresentadas na Figura 5.2:

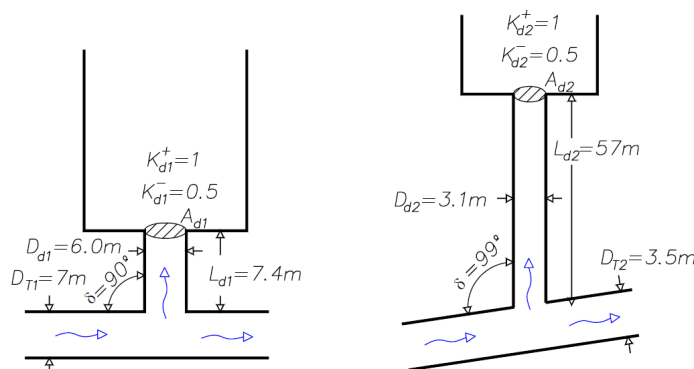


Figura 5.2 - Ligação entre o túnel e a CE. CE de montante e de Jusante

Relativamente à CE de jusante, foi sempre considerado ¼ do caudal, admitindo-se portanto que os 4 poços de ligação à CE de jusante têm comportamento idêntico.

5.3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Primeiramente calcula-se a área de Thoma (A_{Th}) para cada uma das CE. Para tal, considerou-se a queda mínima e o caudal de 146.7 m³/s.

Tabela 5.2 - Cálculo de A_{Th1} e A_{Th2}

		CE de Montante (1)	CE de Jusante (2)
H	(m)	647.00	
Q_0	(m ³ /s)	146.70	
A_{T1}	(m ²)	38.48	38.48
v_0	(m/s)	3.81	3.81
$p^{'+}$	(s ² /m)	0.396	0.151
$p^{'+} v_0^2$	(m)	5.76	2.20
H'_0	(m)	639.05	
L	(m)	4666.2	41.8+671.9
A_{Th}	(m ²)	36.167	14.49

Admitindo que cada uma das CE funciona isoladamente, vai-se calcular através dos respectivos coeficientes de segurança, o efeito dos outros factores que também afectam a estabilidade das oscilações e, consequentemente, o valor mínimo da área a adoptar.

Tabela 5.3 - Cálculo dos factores de segurança n_a , n_b , n_c , n_d e n_e

		CE de Montante (1)	CE de Jusante (2)
a) Ef. da Energia Cinética			
v_0	(m/s)	3.81	3.81
E_0	(m)	0.74	0.74
λ	(-)	0.65	
$\overline{\sigma}$	(-)		2.10
$n_a)$	(-)	0.92	0.98
b) Ef. das perdas de carga na conduta forçada			
v_{c0}	(m/s)	5.19	
p_c	(s ² /m)	0.55	
$n_b)$	(-)	1.07	
c) Amortecimento			
A	(-)	0.30	
$n_c)$	(-)	1.55	
d) Ef. da curva de rendimento			
$\tan \sigma = \tan \rho$	(-)	-0.20	
$n_d)$	(-)	1.30	
e) Ef. do funcionamento em rede c)			
K	(-)	1.00	
$n_e)$	(-)	1.00	
$n_a).n_b).n_c).n_d).n_e) = n$	(-)	2.00	2.14
$A_{s_min} = n.A_{Th}$	(m ²)	72.44	30.94

Os valores obtidos para a área mínima são bastante mais baixos do que os considerados no projecto.

Interessa agora averiguar a estabilidade das oscilações quando as duas chaminés funcionam em conjunto, como é o caso. Para tal calcularam-se as condições de estabilidade de Routh-Wurwitz, considerando a secção da CE de montante (323 m^2) e a área do poço da CE de jusante (115.9 m^2).

Tabela 5.4 - Cálculo das Condições de estabilidade de Routh-Wurwitz

α_1	1.95E-02	>0
α_2	4.86E-03	>0
α_3	2.89E-05	>0
α_3	1.11E-06	>0
Γ	-1.48E-09	<0

Como se pode observar, são satisfeitas todas as condições de estabilidade de Routh-Wurwitz, podendo concluir-se que as oscilações nas duas CE serão estáveis.

De modo a enquadrar as áreas adoptadas para as secções das chaminés face ao limite de estabilidade, apresenta-se na Figura 5.3, conjuntamente com a curva definida pelos pontos (n_1, n_2) que satisfazem a condição $\Gamma=0$, o ponto que representa as áreas das CE deste aproveitamento. Este ponto é definido em função de n_1 e n_2 ou seja: $n_1 = A_{S1}/A_{Th1} = 8.93$ e $n_2 = A_{S2}/A_{Th2} = 8.00$.

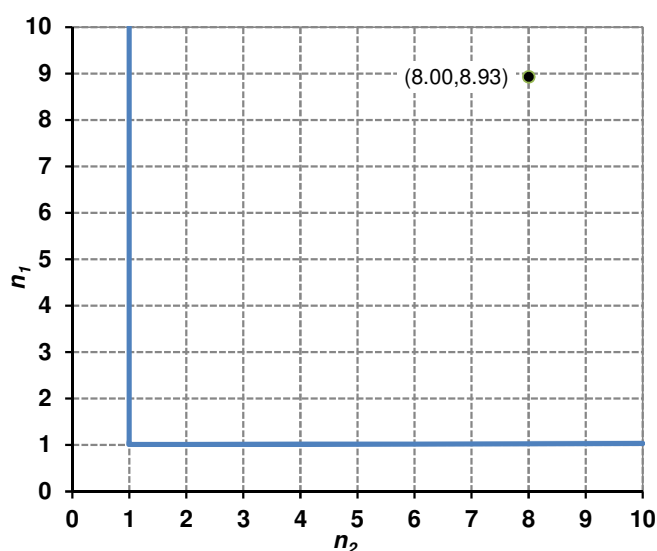


Figura 5.3 - Representação da curva que contém os pontos n_1 e n_2 que satisfazem a condição $\Gamma=0$.

O ponto correspondente às áreas adoptadas está muito longe da linha azul que representa o limite de estabilidade ($\Gamma=0$).

Deve notar-se que esta metodologia utilizada para aferir a estabilidade das oscilações nas duas CE, não tem em conta os factores listados na Tabela 5.3. A análise da estabilidade das oscilações tendo em conta estes factores será feita através da simulação numérica apresentada no ponto seguinte.

5.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

5.4.1 MODELO DE CÁLCULO

As equações fundamentais para este sistema equipado com CE do tipo estrangulado a montante e a jusante são as seguintes:

CE de montante:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = -\frac{g}{L_1} (v_1 |v_1| p_1'^{\pm} + z_1 + \Delta H_{\beta 1} + v_{d1} |v_{d1}| p_{d1}^{\pm}) \\ \frac{dz_1}{dt} A_{S1} = v_1 A_{T1} - Q \end{cases} \quad (5.1)$$

CE de jusante:

$$\begin{cases} \frac{dv_2}{dt} = -\frac{g}{L_2} (v_2 |v_2| p_2'^{\pm} - z_2 - \Delta H_{\beta 2} - v_{d2} |v_{d2}| p_{d2}^{\pm}) \\ \frac{dz_2}{dt} A_{S2} = -v_2 A_{T2} + Q \end{cases} \quad (5.2)$$

Estes dois sistemas de equações foram resolvidos pelo método de Runge Kutta ($\Delta t = 0.1s$), considerando os níveis iniciais em regime permanente calculados através das seguintes expressões:

$$z_{10} = -p_1'^+ v_{10}^2 - \Delta H_{\beta 10} \quad (5.3)$$

$$z_{20} = p_2'^+ v_{20}^2 - \Delta H_{\beta 20} \quad (5.4)$$

Na simulação numérica, as perdas de carga na bifurcação em cada instante, foram calculadas através da metodologia apresentada no ponto 2.8, considerando a geometria apresentada na Figura 5.2.

A expressão (5.5) define a lei de admissão de caudais na turbina, admitido que a regulação é feita de modo a gerar potência constante e considerando o efeito da curva de rendimento da turbina, funcionamento em rede, perdas de carga na bifurcação e conduta forçada.

$$Q_{t+1} = \frac{1}{\tan \rho' \left(\frac{Q_t}{Q_0} \sqrt{\frac{H'_0}{H'_t}} - 1 \right) + 1} \cdot \frac{Q_0 H_0}{H'_t} \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \frac{H'_t - H'_0}{H_0} (1 - K) \right); \quad (5.5)$$

em que H'_0 e H'_t são calculados através das seguintes expressões:

$$H'_0 = H - p_1'^+ v_0^2 - p_2'^+ v_0^2 - p_c v_{c0}^2$$

$$H'_t = H + z_{1t} + \Delta H_{\beta 1t} + v_{d1t} |v_{d1t}| p_{d1t}^{\pm} - z_{2t} - \Delta H_{\beta 2t} - v_{d2t} |v_{d2t}| p_{d2t}^{\pm} - p_c v_{ct}^2$$

Como foi referido, vai-se considerar $K=1$, ou seja este aproveitamento poderá fornecer em certas circunstâncias toda a potência requerida pela rede.

Relativamente à curva de rendimento da turbina consideram-se os valores “frequentes” referidos na Tabela 3.5, pelo que $\tan \sigma = \tan \rho = -0.2$. Deste modo através da expressão (3.22) calculou-se $\tan \rho' = -0.17$.

5.4.2 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Nas Figuras 3.4 e 3.5 apresentam-se os resultados da simulação numérica para aferir a estabilidade das oscilações nas duas CE, considerando $Q^*=140 \text{ m}^3/\text{s}$ e que no instante zero é realizada uma manobra instantânea de modo a passar a produzir a potência correspondente a um caudal de $146.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

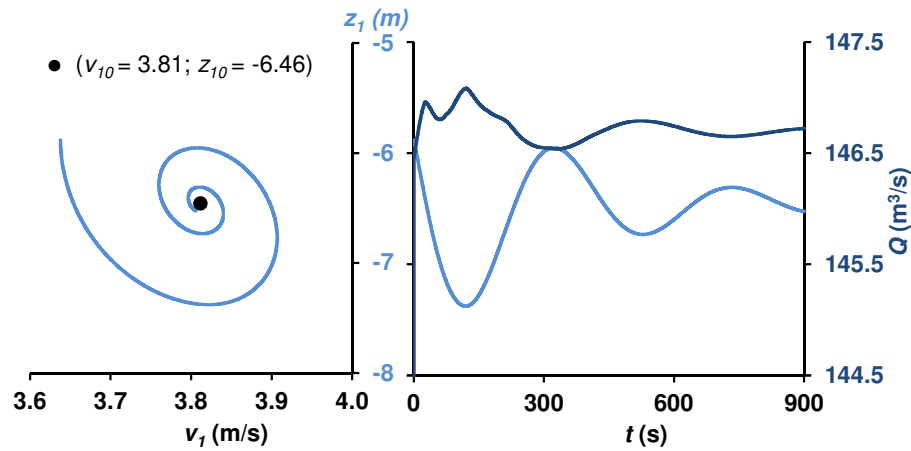


Figura 5.4 – Verificação da estabilidade das oscilações. CE de Montante

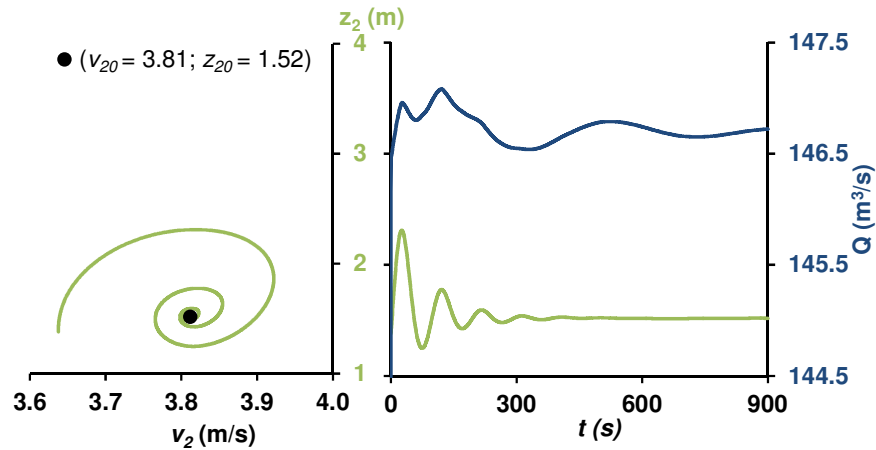


Figura 5.5 - Verificação da estabilidade das oscilações. CE de Jusante

Como era esperado, face ao apresentado no ponto anterior, as oscilações são estáveis em ambas as chaminés.

5.4.3 AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS MÁXIMOS ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a averiguação dos níveis máximos e mínimos nas duas CE, vão-se simular os cenários apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Cenários simulados para averiguação dos níveis nas CE.

Nível a averiguar		Caso de carga		Nível na Albufeira	
				Montante	Jusante
CE de Montante	Nível máximo	1	Fecho	Máximo	Máximo
		2	Abertura seguido do fecho (215s)		
	Nível mínimo	3	Abertura	Mínimo	Mínimo
		4	Fecho seguido de abertura (215s)		
CE de Jusante	Nível máximo	5	Abertura	Máximo	Máximo
		6	Fecho seguido de abertura (80s)		
	Nível mínimo	7	Fecho	Mínimo	Mínimo
		8	Abertura seguido do fecho (80s)		

Nos casos de carga com duas manobras, o momento crítico para a execução da segunda manobra é no segundo 215 para os casos de carga associados à CE de montante e no segundo 80, para os casos de carga associados à CE de jusante.

Foram considerados tempos de abertura e de fecho idênticos, de 40 s.

Depois da manobra de abertura estar completa admite-se que a regulação da turbina é realizada de modo a gerar potência constante, com a lei de admissão de caudais a ser feita de acordo com a equação (5.5).

Nas Figuras 5.6 a 5.13 apresentam-se os resultados das diferentes simulações numéricas para a avaliação dos níveis máximos e mínimos nas duas CE.

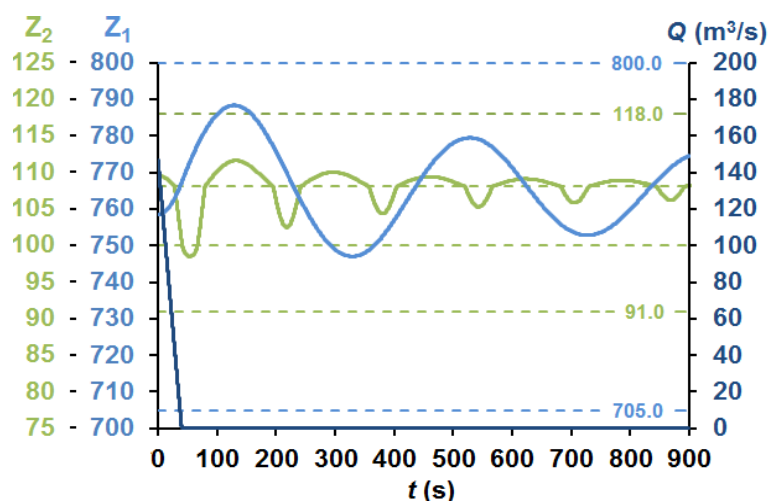


Figura 5.6 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de montante. Caso de Carga 1.

No caso de carga 1 o nível máximo obtido na CE de montante é de 788.3 m.

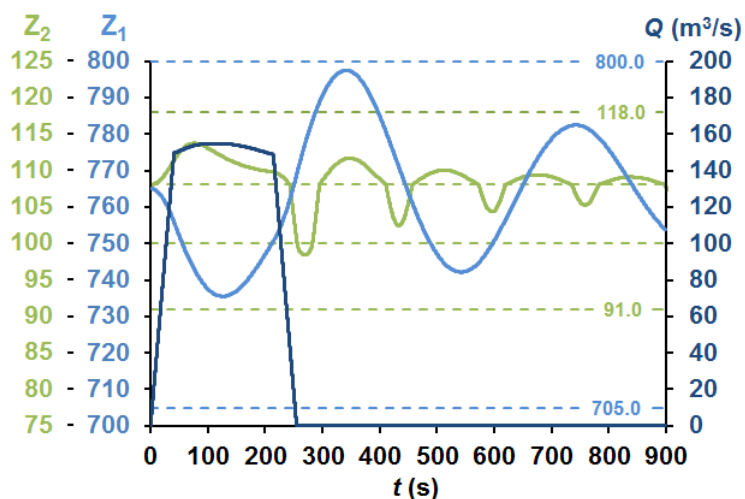


Figura 5.7 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de montante. Caso de Carga 2.

No caso de carga 2 o nível máximo obtido na CE de montante é de 797.5 m.

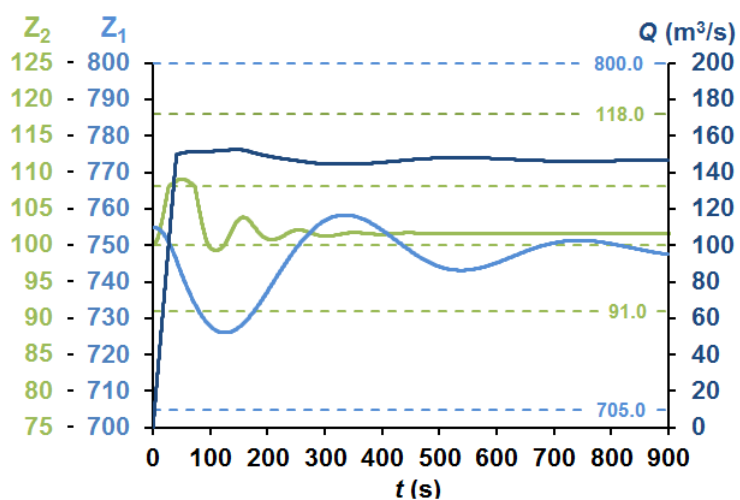


Figura 5.8 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de montante. Caso de Carga 3.

No caso de carga 3 o nível mínimo obtido na CE de montante é de 726.0 m.

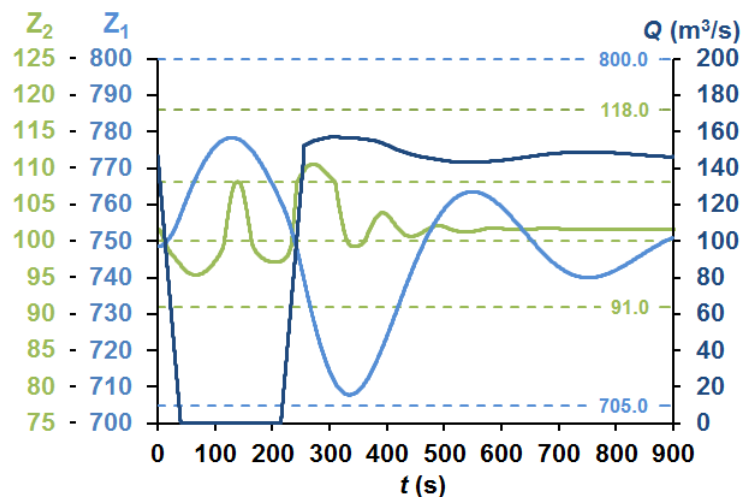


Figura 5.9 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de montante. Caso de Carga 4.

No caso de carga 4 o nível mínimo obtido na CE de montante é de 707.8 m.

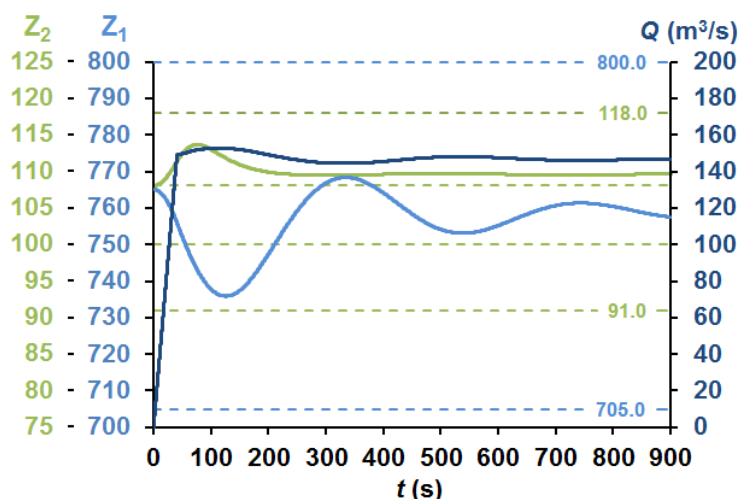


Figura 5.10 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de jusante. Caso de Carga 5.

No caso de carga 5 o nível máximo obtido na CE de jusante é de 113.6. m.

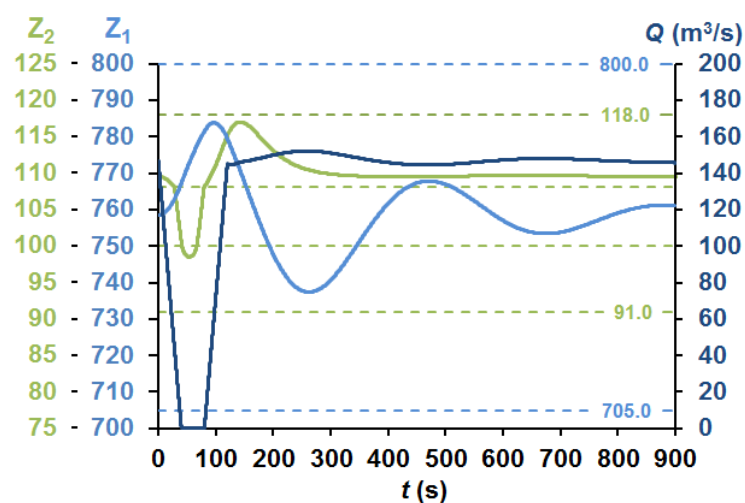


Figura 5.11 - Resultados. Avaliação do nível máximo na CE de jusante. Caso de Carga 6.

No caso de carga 6 o nível máximo obtido na CE de jusante é de 116.9 m.

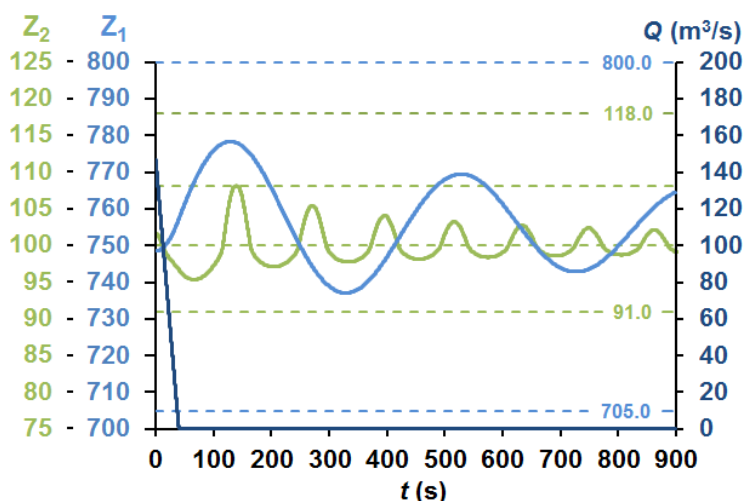


Figura 5.12 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de jusante. Caso de Carga 7.

No caso de carga 7 o nível mínimo obtido na CE de jusante é de 95.3 m m.

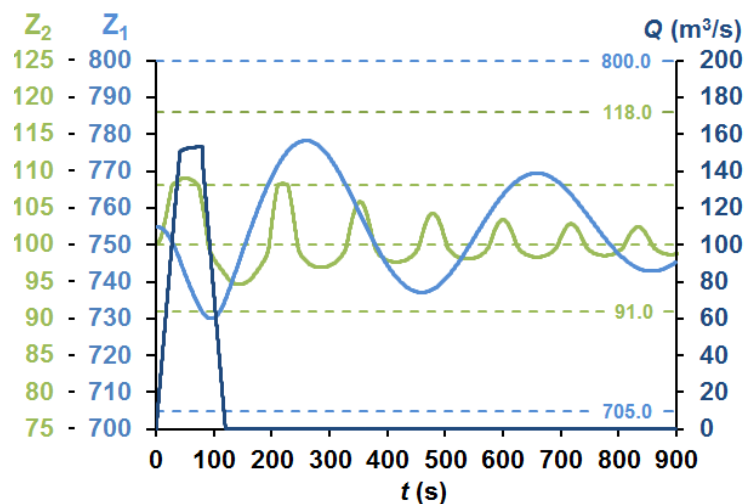


Figura 5.13 - Resultados. Avaliação do nível mínimo na CE de jusante. Caso de Carga 8

No caso de carga 8 o nível mínimo obtido na CE de jusante é de 94.6 m.

A análise das Figuras 5.6 a 5.13 permite verificar que as oscilações máximas e mínimas são sempre contidas pelas CE para os diferentes casos de carga simulados.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Partindo da mesma teoria de base considerada na dedução das formulações mais clássicas relativas ao cálculo e estabilidade hidráulica das oscilações no interior das CE, foi possível através da simulação numérica chegar às mesmas conclusões, em exemplos concretos.

Para tal, nas ferramentas de cálculo desenvolvidas para a resolução das equações fundamentais que caracterizam o fenómeno da oscilação em massa, foi necessário por um lado, modelar as perdas de carga na bifurcação para a CE e, na lei de admissão de caudais turbinados, por outro, considerar os efeitos dessas perdas, das que ocorrem na conduta forçada, bem como, os efeitos da curva de rendimento da turbina e do funcionamento em rede do AH.

Estas ferramentas permitiram modelar o comportamento das oscilações em CE de diferentes tipos, localizadas a montante e/ou a jusante da turbina.

Com este tipo de ferramentas é possível ir até um pouco mais longe do que com as formulações clássicas, pois permitem analisar o efeito do estrangulamento, no orifício de ligação à CE e, em sistemas com CE localizadas a montante e a jusante; permite também aferir a estabilidade hidráulica, tendo em conta os factores que não entram para o cálculo da A_{Th} .

Estas ferramentas serão bastante úteis para o estudo e dimensionamento das CE nas fases preliminares dos projectos, quando a informação relativa aos equipamentos a instalar é ainda limitada.

Estes estudos deverão ser sempre complementados com a análise dos efeitos do choque hidráulico, tendo em conta também as características dos equipamentos, de modo a avaliar as pressões máximas ao longo do circuito hidráulico, bem como os tempos de fecho e abertura do distribuidor e ainda o comportamento dos caudais admitidos na turbina a seguir à rejeição de carga.

Na bibliografia, podem-se encontrar exemplos de estudos em que foram utilizadas metodologias semelhantes às apresentadas nesta dissertação para o dimensionamento de CE. A Hidrotécnica Portuguesa, no AH de Alto de Malema (Moçambique) considerou igualmente o método de Runge-Kutta para a resolução das equações diferenciais e as formulações desenvolvidas por Gardel para o cálculo de perdas de carga na bifurcação [1]. Mais recentemente, a EDP para o cálculo das oscilações e averiguação da estabilidade dos AH de Venda Nova II e III, adoptou metodologias semelhantes às implementadas nas ferramentas de cálculo desenvolvidas, [13].

Na presente dissertação, houve alguns aspectos que não foi possível abordar ou aprofundar devidamente, nomeadamente:

- O funcionamento em modo de bombagem e CE associadas a condutas elevatórias.
- O estudo de outros factores com influência na estabilidade como o choque hidráulico, o tempo de manobra do distribuidor, ou o caso limite descrito por Chaudry [17], em que, estando o distribuidor totalmente aberto, não será possível realizar a regulação automática da turbina, de modo a gerar potência constante, visto que o distribuidor já não pode abrir mais.
- Análise das oscilações nas CE diferenciais com estrangulamento do tipo austríaco, de modo a perceber melhor o efeito desse estrangulamento na estabilidade das oscilações. Este tipo de

solução permite, em aproveitamentos com grande queda e túneis longos, adoptar soluções para a CE com volumes de escavação bastante menores.

- O uso do conceito de impedância para a simulação dos transitórios hidráulicos. Nos últimos anos esta abordagem tem sido profundamente estudada e posta em prática através do software “SIMSEN”, que permite integrar no mesmo modelo numérico as componentes hidráulicas, mecânicas e eléctricas de um sistema, [59].

Seria também interessante para um AH existente, comparar os resultados obtidos utilizando o modelo de cálculo apresentado, com as medições dos níveis de água efectuadas a seguir a um determinado caso de carga.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Almeida A. *Seminário 238. O Golpe de Aríete em Conduitas*. LNEC, Lisboa, 1979.
- [2] Jaeger C.. *Fluid Transients in Hydro-Electric Engineering Practice*. Blackie Glasgow and London, 1977.
- [3] Schleiss, A.. *Mitteilungen 78. Bemessung von Druckstollen*. VAW, Zurich, 1985. (em alemão)
- [4] *Aproveitamento Hidroeléctrico do Alto Rabagão*. Hidroeléctrica do Cávado, Porto, 1966.
- [5] *Aproveitamento Hidroeléctrico dos rios Cávado e Rabagão-Escalão de Venda Nova*. Hidroeléctrica do Cávado, Brochura, 1950.
- [6] *Aproveitamento Hidroeléctrico dos rios Cávado e Rabagão - Escalão de Salamonde*, Hidroeléctrica do Cávado, 1950.
- [7] Liberal, A., Alves J., Ribeiro, V. e Morais, J. *Alqueva II and Salamonde II repowering projects*, Hydro 2010, Lisbon, 2010.
- [8] Ferreira, R. *Acompanhamento do Reforço de potência de Salamonde II*. Dissertação de Mestrado do ISEL, 2013.
- [9] *Escalão de Caniçada*. Hidroeléctrica do Cávado, Brochura, sem data.
- [10] *Caniçada-Túnel de Restituição das Águas Turbinadas*. Hidroeléctrica do Cávado, 1954
- [11] *Vilarinho das Furnas*. Companhia Portuguesa de Electricidade/CPE-S.A.R.L, 1972
- [12] *Aproveitamentos Hidroeléctricos. Alto Lindoso Touvedo*, EDP, Brochura, 2009
- [13] Pinto P., Ribeiro V.. *Two Surge Tanks Hydropower Schemes. Design Criteria and Case Studies*. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, 2012
- [14] *Reforço de Potência Venda Nova II*, EDP/CPPE, Brochura, sem data.
- [15] *Aprovechamientos del Sistema Duero. Salto de Villarino. Obras definitivas*. Iberduero, Bilbao, Brochura, 1970.
- [16] Giesecke J., Mosonyi E. *Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb*. 5.. Springer 2009. (em alemão)
- [17] Chaudhry M. *Applied Hydraulic Transients*. 3rd Edition. Springer. 2014.
- [18] Stucky A. *Cours d'Aménagement des Chutes d'Eau. Chambres d'Équilibre*. Sciences&Technique. Paul Feissly, libraire-éditeur. Lausanne, 1958.
- [19] Ribeiro A.. *Hidráulica Aplicada. Câmaras ou Chaminés de Equilíbrio*. FEUP. 1971.
- [20] Schleiss A. *MAS in Hydraulic Engineering. Submodule C23.3-Pressurized Waterway Structures*. EPFL Lausanne, sem data.
- [21] <http://worldofporr.porr-group.com/index.php?id=4245&L=1#/page/17>. 15/01/2014.
- [22] Klansinc R., Bilus I. *Experimental and Numerical Approach to Surge Tank Improvements*. International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Ohrid. 2009.
- [23] <http://worldofporr.porr-group.com/index.php?id=4245&L=1#/page/9>. 15/01/2014.

- [24] Pickford J. *Analysis of Surge*. Macmillan, London, 1969.
- [25] Ziparro V., Hasen H. *Davis' Handbook of Applied Hydraulics*. 4th Edition. McGraw-Hill, 1993.
- [26] Brock E. *Tunnels and Underground Works for Hydropower Projects. Lessons learned in home country and from projects worldwiderock*. ITA. Muir Lecture 2010.
- [27] Palmstrom A. http://www.rockmass.net/files/air_cushion_surge_chambers.pdf.
- [28] Mosonyi E. *Water Power Development. Volume 2A. High Head Powerplants*. 3rd Edition. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
- [29] http://www.kopswerk2.at/downloads/Maschinenkaverne_Querschnitt_Detail.jpg. 15/01/2014
- [30] Rich G. *Hydraulic Transients*. 2nd Edition. Dover. New York. 1963 .
- [31] Larcher M. *Das Dreikammerwasserschloss – als neue Bauform für den Unterwasserbereich von Pumpspeicherkraftwerken*. Tese de Doutoramento, Universidade de Graz, 2008. (em alemão)
- [32] Bonath V., Larsson M., Pettersson A. *Numerical Study on the Characteristics of Transient Flow in the Jinping II Hydropower System with a Differential Surge Shaft*. Master's Thesis. Lulea University of Technology, 2009.
- [33] Steyrer, P. *Economic Surge Tank Design by Sophisticated Hydraulic Throttling*. Proceedings of the 28th IAHR Congress, Graz, 1999
- [34] RICHTER W.. *3D-numerische Strömungssimulation von hydraulischen Rückstromdrosseln in Wasserschlössern*. Master Thesis. Innsbruck, 2010.(em alemão)
- [35] Wegelar G., Gerstner R. *Das hochdruckseitige Wasserschloss des Kopswerks II – bauliche Planung, Konzeption und technische Ausführung*. Geomechanik und Tunnelbau 1 Heft 5, Berlin, 2008. (em alemão)
- [36] <http://www.phy.davidson.edu/fachome/dmb/py200/RungeKuttaMethod.htm>. 15/01/2014.
- [37] Quintela A.. *Hidráulica*, 6^a Edição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1998.
- [38] *Design Standards n°3. Water conveyance systems. Tunnels, Shafts and Caverns*. United States Bureau of Reclamation, Denver, 1989.
- [39] *Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments. Volume 2. Waterways*. American Society of Civil Engineers, 1989
- [40] Lysne D., Glover B., Stole H., Tesaker E. *Hydropower Development. Volume N°8 . Hydraulic Design*. Norwegian University of Science and Technology. 2003.
- [41] *Hydraulic Design Criteria. Sheets 224-1/5 and 224-1/6. Resistance Coefficients. Unlined Tunnels*. United States Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station, 1968.
- [42] Hákonardóttira K., Tómassonb G., Kaelinc J., Stefánssond B., *The hydraulic roughness of unlined and shotcreted TBM-bored tunnels in volcanic rock: In situ observations and measurements at Kárahnjúkar Iceland*. Tunnelling and Underground Space Technology n°24, 2009.
- [43] Benson P. *Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels*. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 4 N°2, 1989.

- [44] Brekke T., Ripley B. *Design Guidelines for Pressure Tunnels and Shafts*. Electronic Power Research Institute, 1987.
- [45] Pennington M. *Hydraulic roughness of Bored Tunnels*. IPENZ Transactions, Vol.25 N°1. 1998.
- [46] EM 1110-2-291. *Tunnels and Shafts in Rock*. United States Corps of Engineers. Washington. 1997.
- [47] Martins R. *Memória do LNEC n° 738. Condições de Semelhança do Fenómeno da Oscilação em Massa*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. 1989.
- [48] ASCE Task committee on Design and Performance of Reversible Flow Trashracks. *Hydraulic Design of Reversible Flow trashracks*. American Society of Civil Engineers. 1993
- [49] Gardel A. *Chambres d'équilibre. Analyse de quelques hypothèses usuelles. Méthodes de calcul rapide* Thèse pour l'obtention du grade de docteur ès sciences techniques. EPFL, Lausanne. 1964.
- [50] Penino B., Hecker G. *A Synthesis of Model Data for Pumped Storage Intake*. ASME-CSME Applied Mechanics, Fluids Engineering and Bioengineering Conference. New York, 1979.
- [51] Kahn Hussain M. *Chambres d'équilibre. Méthodes de calculs détaillés à l'aide d'une calculatrice digitale*. Thèse pour l'obtention du grade de docteur ès sciences techniques. EPFL, Lausanne. 1956.
- [52] Gardel, A., Rechsteiner F. *Les pertes de charge dans les branchements en T de conduites de section circulaire*. Bulletin technique de la Suisse romande ano 96, n°25, 1970.
- [53] Gardel, A. *Stabilité de réglage des chambres d'équilibre: étude théorique et expérimentale de l'influence de l'énergie cinétique de la galerie au droit de la chambre*. Bulletin technique de la Suisse romande, ano 95, n°1, 1969.
- [54] Lai X., Yang J., Chen J. *Effects of velocity Head and Momentum Exchange on Critical Stable Sectional Area of Downstream Throttled Surge Tank*. ASCE Journal of Engineering, Dezembro 2003
- [55] Gardel, A. *Influence de la partie de l'aménagement située à l'aval de la chambre d'équilibre sur les petites oscillations avec réglage automatique*. Bulletin technique de la Suisse romande, ano 83, n°20, 1957.
- [56] Calame J. Gaden D. *De la stabilité des installations hydrauliques munies de chambres d'équilibre*. Schweizerische Bauzeitung, Julho. 1927.
- [57] Escande L., Huron R. *Estabilidad de dos chimineas de equilibrio respectivamente solidarias a las galerias de llegada y desagüe*. Revista de Obras Públicas, n°2866. 1954.
- [58] EM20. *Selecting Hydraulic Turbines*. United States Bureau of Reclamation. Denver. 1976.
- [59] Nicolet C., Avellan F., Allenbach P., Sapin A., Simond J. *New Tool for the simulation of transient phenomena in Francis turbine powerplants*. IAHR Symposium, Lausanne, 2002.

ANEXO I

De seguida apresenta-se a dedução das condições de Thoma, seguindo, de uma maneira geral, a exposição feita por Jaeger [2].

Nesta análise sublinha-se que, por se tratar de uma CE simples, será considerado o factor p'' . Como, durante a regulação, o escoamento no túnel se processa sempre no sentido da chaminé de equilíbrio, deverá ser sempre considerado o factor p''^+ .

Partindo das equações fundamentais e da equação para o cálculo da potência.

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + z + p''^+ v^2 = 0 \quad (1)$$

$$Q = v.A_T - A_S \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

$$Q(H + z) = Q_0 H'_0 = C = \frac{P_0}{\eta \cdot \gamma} \quad (3)$$

Assumido que o rendimento (η) e a área da chaminé (A_S) se mantêm constantes, quando se derivam as equações (2) e (3), obtém-se:

$$\frac{dQ}{dt} = A_T \frac{dv}{dt} - A_S \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (4)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{C}{(H + z)^2} \frac{dz}{dt} \quad (5)$$

Igualando as equações (4) e (5), obtém-se:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{A_S}{A_T} \frac{d^2 z}{dt^2} - \frac{C}{A_T (H + z)^2} \frac{dz}{dt} \quad (6)$$

Substituindo (6) na equação (1) e considerando o integral da equação (6) para o termo v^2 , obtém-se:

$$\frac{L}{g} \left(\frac{A_S}{A_T} \frac{d^2 z}{dt^2} - \frac{C}{A_T (H + z)^2} \frac{dz}{dt} \right) + z + p \left(\frac{A_S}{A_T} \frac{dz}{dt} + \frac{C}{A_T (H + z)} \right)^2 = 0 \quad (7)$$

Multiplicando por $(gA_T)/(A_S L)$, a equação pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{gp''A_S}{A_T L} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + \frac{dz}{dt} \left(\frac{2gp''C}{A_T L(H + z)} - \frac{C}{A_S (H + z)^2} \right) + \frac{gA_T}{LA_S} z = -\frac{p''C^2 g}{LA_S A_T (H + z)^2} \quad (8)$$

A equação (8) representa uma oscilação. O eixo sobre o qual ocorre a oscilação pode ser determinado, substituindo pelas condições iniciais em regime permanente, isto é $z = z_0$, $dz/dt = 0$ e $d^2 z/d^2 t = 0$.

Na equação (8), é conveniente mover o eixo horizontal $z_0 = -p''v_0^2$, de modo a que $z = z_0 + s$.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{gp'' A_s}{A_T L} \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{ds}{dt} \left(\frac{2gp'' C}{A_T L(H + z_0 + s)} - \frac{C}{A_s (H + z_0 + s)^2} \right) \\ + \frac{gA_T}{LA_s} (z_0 + s) + \frac{gp'' C^2}{LA_s A_T (H + z_0 + s)^2} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

sabendo que:

$$z_0 = -p'' v_0^2 = \frac{-p'' C^2}{A_T^2 (H + z_0)^2} \quad (10)$$

e desenvolvendo as séries: $\frac{1}{(H + z_0) - (-s)} = \frac{1}{(H + z_0)} + \frac{-s}{(H + z_0)^2} + \frac{s^2}{(H + z_0)^3} \dots$ e

$$\frac{1}{((H + z_0) - (-s))^2} = \frac{1}{(H + z_0)^2} + \frac{2(-s)}{(H + z_0)^3} + \frac{3(-s)^2}{(H + z_0)^4} + \dots$$

A equação (8) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{gp'' A_s}{A_T L} \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{ds}{dt} \left(\frac{2gp'' C}{A_T L} \left(\frac{1}{(H + z_0)} + \frac{-s}{(H + z_0)^2} + \dots \right) - \frac{C}{A_s} \left(\frac{1}{(H + z_0)^2} + \frac{2(-s)}{(H + z_0)^3} + \dots \right) \right) \\ + \frac{gA_T}{LA_s} (z_0 + s) + \frac{gp'' C^2}{LA_s A_T} \left(\frac{1}{(H + z_0)^2} + \frac{2(-s)}{(H + z_0)^3} + \dots \right) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

ou

$$\begin{aligned} \frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{gp'' A_s}{A_T L} \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{ds}{dt} \left(\frac{2gp'' C}{A_T L} \left(\frac{1}{(H + z_0)} + \frac{-s}{(H + z_0)^2} + \dots \right) - \frac{C}{A_s} \left(\frac{1}{(H + z_0)^2} + \frac{2(-s)}{(H + z_0)^3} + \dots \right) \right) \\ + \left(\frac{gA_T}{LA_s} - \frac{gp'' C^2}{LA_s A_T} \frac{1}{(H + z_0)^2} \left(\frac{2}{(H + z_0)} - \frac{3(s)}{(H + z_0)^2} + \dots \right) \right) s = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Para pequenas oscilações, os termos de ordem elevada e $\left(\frac{ds}{dt} \right)^2$ poderão ser desprezados.

Considerando (10) na equação (12) pode-se escrever:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{ds}{dt} \left(\frac{2gp'' C}{A_T L} \left(\frac{1}{(H + z_0)} \right) - \frac{C}{A_s} \left(\frac{1}{(H + z_0)^2} \right) \right) + \left(\frac{gA_T (H + 3z_0)}{LA_s (H + z_0)} \right) s = 0 \quad (13)$$

Esta é equação diferencial e linear de segunda ordem do tipo:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2a \frac{ds}{dt} + bs = 0$$

A solução desta equação depende das raízes da seguinte equação de segunda ordem:

$$r^2 + 2ar + b = 0$$

Para $b > 0$ e $a^2 < b$ oscilação periódica

$a > 0$ oscilação amortecida

$a = 0$ oscilação sinusoidal pura

$a < 0$ oscilação forçadas ou auto-induzidas

Desta forma para se ter oscilações amortecidas é necessário que: $b > 0$ e $a \geq 0$, logo:

$$\frac{(H + 3z_0)}{(H + z_0)} > 0, \text{ como } (H + z_0) > 0, (H + 3z_0) > 0, \text{ ou}$$

$$\boxed{-z_0 < \frac{H}{3}} = > 1^{\text{a}} \text{ condição de Thoma} \quad (14)$$

$$\frac{2gp''C}{A_T L(H + z_0)} \geq \frac{C}{A_S (H + z_0)^2}, \text{ ou}$$

$$\boxed{A_{S \min} \geq \frac{LA_T}{2gp''H_0}} = > 2^{\text{a}} \text{ condição de Thoma} \quad (15)$$

ANEXO II

SISTEMA COM CE A MONTANTE E A JUSANTE DA TURBINA

Cálculo das oscilações na CE de montante

CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL	
L	4666.2 m
D_T	7 m
A_T	38.5 m ²
$Q(t=0)$	0.00 m ³ /s
$v(t=0)$	0.00 m/s
Nível Estático	765 masl

INTERVALO DE CALCULO	
Δt	0.1 s

PERDAS DE CARGA (PC)			
Túnel			
Contínuas			
K_s	75.77 m ^{1/3} /s		
p	0.385 m/s ²		
Localizadas	Sent. (+)	Sent. (-)	
K	0.21	0.25 (-)	
$p'-p$	0.01	0.01	s ² /m
p'	0.396	0.398	s ² /m
Ligação à CE			
Contínuas			
D_d	6 m		
A_d	28.3 m ²		
L_d	8 m		
K_s	75.77 m ^{1/3} /s		
p_d	0.0008 m/s ²		
Localizadas	Sent. (+)	Sent. (-)	
K_d	1	0.5 (-)	
p'_d-p_d	0.05	0.03	s ² /m
p'_d	0.052	0.026	s ² /m

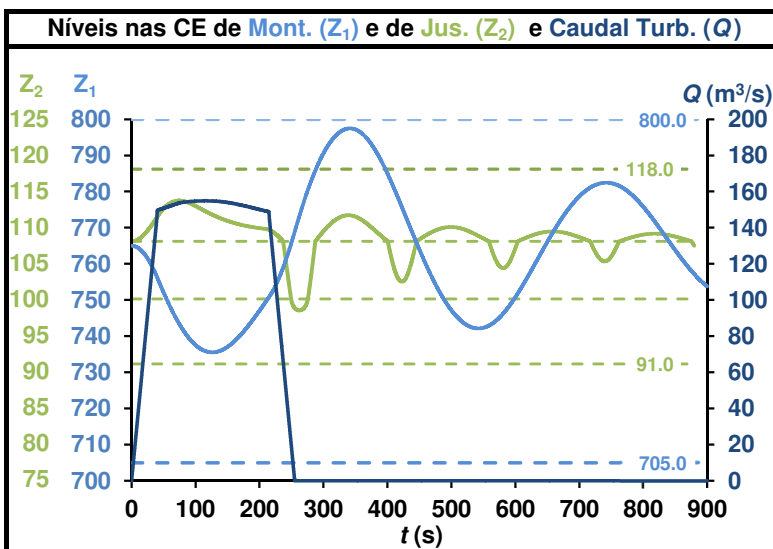
CARACT.DA BIFURCAÇÃO PARA CE	
dv	7 m
d''	6 m
F_v	38.5 m ²
F''	28.3 m ²
δ	1.57 rad
r	0 m
φ	0.73 -
ρ	0 -

COEF. PARA CALC. DAS PC NA BIF.		
	'	''
k_a	-0.95	-0.03
k_f	-0.95	-0.03
k_c	-0.92	0.03
l_a	-1.60	-0.35
l_f	1.16	-0.72
l_c	1.88	0.52
m_a	0.94	-0.2
m_f	0	-1.27
m_c	-1.27	-1.27

CARACT. DA CE		
Base	705.00 m	
Topo	800.00 m	
Altura	z (m)	A_s (m ²)
0	-60	323.00
95.00	35	323.00

MANOBRAS	
t (s)	Q (m ³ /s)
0	0.0
40.00	146.7
215	146.7
255.00	0.0

REGULAÇÃO AUT.			
	Início	Fim	
Per.1	40	215	s
Per. 2	0	0	s
Par. lei de admissão de Q			
H	657.0	m	
Q_0	146.7	m	
PC em regime permanente			
Túnel	Mont.	(Jus.(2)	
v_0	3.81	3.81	m/s
p'	0.396	0.15	s ² /m
$p'v_0^2$	5.76	2.20	m
PC na Conduta Forçada			
D_c	6.00	m	
v_{c0}	5.19	m/s	
p_c	0.55	s ² /m	
$p_c v_{c0}^2$	14.70	m	
H'_0	634.3	m	
k	1.00	(-)	
$\tan p'$	-0.17	(-)	



nota: os níveis da CE de jus apresentados no gráfico foram calculados noutra folha

TEMPO		CALCULO DAS PC NA BIFURCAÇÃO ($\Delta\beta$)							RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS - MÉTODO DE RUNGE KUTTA																		AUX REG		GRAF.			
t	Δt	tipo	Q_{max}	q''	k'	v_{max}	$\Delta\beta$	$Q(t)$	z_i	v_i	v_d	$As(z)$	K_1	L_1	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_1/2$	$v_i+K_1/2$	K_2	L_2	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_2/2$	$v_i+K_2/2$	K_3	L_3	$t+\Delta t/2$	z_i+L_3	v_i+K_3	K_4	L_4	H'	v_c	$Z(m)$
0	0.1	a	0.00	0.00	-0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	323.0	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.00	765.00
0.10	0.1	f	0.37	1.00	1.161	0.01	0.00	0.37	0.00	0.00	0.0	323.0	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.01	765.00
0.20	0.1	f	0.73	1.00	1.161	0.02	0.00	0.73	0.00	0.00	0.0	323.0	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.03	765.00
0.30	0.1	f	1.10	1.00	1.161	0.03	0.00	1.10	0.00	0.00	0.0	323.0	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.04	765.00
0.40	0.1	f	1.47	1.00	1.161	0.04	0.00	1.47	0.00	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.05	765.00
0.50	0.1	f	1.83	1.00	1.161	0.05	0.00	1.83	0.00	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.06	765.00
0.60	0.1	f	2.20	1.00	1.161	0.06	0.00	2.20	0.00	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.08	765.00
0.70	0.1	f	2.57	1.00	1.161	0.07	0.00	2.57	0.00	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.09	765.00
0.80	0.1	f	2.93	1.00	1.161	0.08	0.00	2.93	0.00	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	657.0	0.10	765.00
0.90	0.1	f	3.30	1.00	1.161	0.09	0.00	3.30	0.00	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	657.0	0.12	765.00
1.00	0.1	f	3.67	1.00	1.161	0.10	0.00	3.67	-0.01	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	1.05	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.05	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.10	-0.01	0.00	0.00	0.00	657.0	0.13	764.99
1.10	0.1	f	4.03	1.00	1.161	0.10	0.00	4.03	-0.01	0.00	-0.1	323.0	0.00	0.00	1.15	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.15	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.20	-0.01	0.00	0.00	0.00	657.0	0.14	764.99
1.20	0.1	f	4.40	1.00	1.161	0.11	0.00	4.40	-0.01	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.25	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.25	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.30	-0.01	0.00	0.00	0.00	657.0	0.16	764.99
1.30	0.1	f	4.77	1.00	1.161	0.12	0.00	4.77	-0.01	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.35	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.35	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.40	-0.01	0.00	0.00	0.00	657.0	0.17	764.99
1.40	0.1	f	5.13	1.00	1.161	0.13	0.00	5.13	-0.01	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.45	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.45	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.50	-0.01	0.00	0.00	0.00	657.0	0.18	764.99
1.50	0.1	f	5.50	1.00	1.161	0.14	0.00	5.50	-0.01	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.55	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.55	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.60	-0.01	0.00	0.00	0.00	656.9	0.19	764.99
1.60	0.1	f	5.87	1.00	1.161	0.15	0.00	5.87	-0.01	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.65	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.65	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.70	-0.02	0.00	0.00	0.00	656.9	0.21	764.99
1.70	0.1	f	6.23	1.00	1.161	0.16	0.00	6.23	-0.02	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.75	-0.02	0.00	0.00	0.00	1.75	-0.02	0.00	0.00	0.00	1.80	-0.02	0.00	0.00	0.00	656.9	0.22	764.98
1.80	0.1	f	6.60	1.00	1.161	0.17	0.00	6.60	-0.02	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.85	-0.02	0.00	0.00	0.00	1.85	-0.02	0.00	0.00	0.00	1.90	-0.02	0.00	0.00	0.00	656.9	0.23	764.98
1.90	0.1	f	6.97	1.00	1.161	0.18	0.00	6.97	-0.02	0.00	-0.2	323.0	0.00	0.00	1.95	-0.02	0.00	0.00	0.00	1.95	-0.02	0.00	0.00	0.00	2.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	656.9	0.25	764.98
2.00	0.1	f	7.34	1.00	1.161	0.19	0.00	7.34	-0.02	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.05	-0.02	0.00	0.00	0.00	2.05	-0.02	0.00	0.00	0.00	2.10	-0.02	0.00	0.00	0.00	656.9	0.26	764.98
2.10	0.1	f	7.70	1.00	1.161	0.20	0.00	7.70	-0.02	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.15	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.15	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.20	-0.03	0.00	0.00	0.00	656.9	0.27	764.98
2.20	0.1	f	8.07	1.00	1.161	0.21	0.00	8.07	-0.03	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.25	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.25	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.30	-0.03	0.00	0.00	0.00	656.9	0.29	764.97
2.30	0.1	f	8.44	1.00	1.161	0.22	0.00	8.44	-0.03	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.35	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.35	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.40	-0.03	0.00	0.00	0.00	656.9	0.30	764.97
2.40	0.1	f	8.80	1.00	1.161	0.23	0.00	8.80	-0.03	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.45	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.45	-0.03	0.00	0.00	0.00	2.50	-0.03	0.00	0.00	0.00	656.9	0.31	764.97
2.50	0.1	f	9.17	1.00	1.161	0.24	0.00	9.17	-0.03	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.55	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.55	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.60	-0.04	0.00	0.00	0.00	656.8	0.32	764.97
2.60	0.1	f	9.54	1.00	1.161	0.25	0.00	9.54	-0.04	0.00	-0.3	323.0	0.00	0.00	2.65	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.65	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.70	-0.04	0.00	0.00	0.00	656.8	0.34	764.96
2.70	0.1	f	9.90	1.00	1.160	0.26	0.00	9.90	-0.04	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	2.75	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.75	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.80	-0.04	0.00	0.00	0.00	656.8	0.35	764.96
2.80	0.1	f	10.27	1.00	1.160	0.27	0.00	10.27	-0.04	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	2.85	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.85	-0.04	0.00	0.00	0.00	2.90	-0.05	0.00	0.00	0.00	656.8	0.36	764.96
2.90	0.1	f	10.64	1.00	1.160	0.28	0.00	10.64	-0.05	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	2.95	-0.05	0.00	0.00	0.00	2.95	-0.05	0.00	0.00	0.00	3.00	-0.05	0.00	0.00	0.00	656.8	0.38	764.95
3.00	0.1	f	11.00	1.00	1.160	0.29	0.00	11.00	-0.05	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	3.05	-0.05	0.00	0.00	0.00	3.05	-0.05	0.00	0.00	0.00	3.10	-0.05	0.00	0.00	0.00	656.8	0.39	764.95
3.10	0.1	f	11.37	1.00	1.160	0.30	-0.01	11.37	-0.05	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	3.15	-0.05	0.00	0.00	0.00	3.15	-0.05	0.00	0.00	0.00	3.20	-0.06	0.00	0.00	0.00	656.8	0.40	764.95
3.20	0.1	f	11.74	1.00	1.160	0.30	-0.01	11.74	-0.06	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	3.25	-0.06	0.00	0.00	0.00	3.25	-0.06	0.00	0.00	0.00	3.30	-0.06	0.00	0.00	0.00	656.7	0.42	764.94
3.30	0.1	f	12.10	1.00	1.160	0.31	-0.01	12.10	-0.06	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	3.35	-0.06	0.00	0.00	0.00	3.35	-0.06	0.00	0.00	0.00	3.40	-0.06	0.00	0.00	0.00	656.7	0.43	764.94
3.40	0.1	f	12.47	1.00	1.160	0.32	-0.01	12.47	-0.06	0.00	-0.4	323.0	0.00	0.00	3.45	-0.07	0.00	0.00	0.00	3.45	-0.07	0.00	0.00	0.00	3.50	-0.07	0.00	0.00	0.00	656.7	0.44	764.94
3.50	0.1	f	12.84	1.00	1.160	0.33	-0.01	12.84	-0.07	0.00	-0.5	323.0	0.00	0.00	3.55	-0.07	0.00	0.00	0.00	3.55	-0.07	0.00	0.00	0.00	3.60	-0.07	0.00	0.00	0.00	656.7	0.45	764.93
3.60	0.1	f	13.20	1.00	1.160	0.34	-0.01	13.20	-0.07	0.00	-0.5	323.0	0.00	0.00	3.65	-0.07	0.00	0.00	0.00	3.65	-0.07	0.00	0.00	0.00	3.70	-0.08	0.00	0.00	0.00	656.7	0.47	764.93
3.70	0.1	f	13.57	1.00	1.160	0.35	-0.01	13.57	-0.08	0.00	-0.5	323.0	0.00	0.00	3.75	-0.08	0.00	0.00	0.00	3.75	-0.08	0.00	0.00	0.00	3.80	-0.08	0.00	0.00	0.00	656.7	0.48	764.92
3.80	0.1	f	13.94	1.00	1.160	0.36	-0.01	13.94	-0.08	0.00	-0.5	323.0	0.00	0.00	3.85	-0.08	0.00	0.00	0.00	3.85	-0.08	0.00	0.00	0.00	3.90							

TEMPO		CALCULO DAS PC NA BIFURCAÇÃO ($\Delta\beta$)							RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS - MÉTODO DE RUNGE KUTTA																				AUX REG		GRAF.	
t	Δt	tipo	Q_{max}	q''	k'	v_{max}	$\Delta\beta$	$Q(t)$	z_i	v_i	v_d	$As(z)$	K_1	L_1	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_1/2$	$v_i+K_1/2$	K_2	L_2	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_2/2$	$v_i+K_2/2$	K_3	L_3	$t+\Delta t/2$	z_i+L_3	v_i+K_3	K_4	L_4	H'	v_c	$Z(m)$
5.70	0.1	f	20.90	1.00	1.158	0.54	-0.02	20.90	-0.181	0.00	-0.7	323.0	0.00	-0.01	5.75	-0.18	0.00	0.00	-0.01	5.75	-0.184	0.00	0.00	-0.01	5.80	-0.19	0.00	0.00	-0.01	656.2	0.74	764.82
5.80	0.1	f	21.27	1.00	1.158	0.55	-0.02	21.27	-0.188	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	5.85	-0.19	0.00	0.00	-0.01	5.85	-0.191	0.00	0.00	-0.01	5.90	-0.19	0.00	0.00	-0.01	656.2	0.75	764.81
5.90	0.1	f	21.64	1.00	1.157	0.56	-0.02	21.64	-0.194	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	5.95	-0.20	0.00	0.00	-0.01	5.95	-0.197	0.00	0.00	-0.01	6.00	-0.20	0.00	0.00	-0.01	656.1	0.77	764.81
6.00	0.1	f	22.01	1.00	1.157	0.57	-0.02	22.01	-0.201	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	6.05	-0.20	0.00	0.00	-0.01	6.05	-0.204	0.00	0.00	-0.01	6.10	-0.21	0.00	0.00	-0.01	656.1	0.78	764.80
6.10	0.1	f	22.37	1.00	1.157	0.58	-0.02	22.37	-0.208	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	6.15	-0.21	0.00	0.00	-0.01	6.15	-0.211	0.00	0.00	-0.01	6.20	-0.21	0.00	0.00	-0.01	656.1	0.79	764.79
6.20	0.1	f	22.74	1.00	1.157	0.59	-0.02	22.74	-0.215	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	6.25	-0.22	0.00	0.00	-0.01	6.25	-0.218	0.00	0.00	-0.01	6.30	-0.22	0.00	0.00	-0.01	656.1	0.80	764.79
6.30	0.1	f	23.11	1.00	1.157	0.60	-0.02	23.11	-0.222	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	6.35	-0.23	0.00	0.00	-0.01	6.35	-0.225	0.00	0.00	-0.01	6.40	-0.23	0.00	0.00	-0.01	656.0	0.82	764.78
6.40	0.1	f	23.47	1.00	1.157	0.61	-0.02	23.47	-0.229	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	6.45	-0.23	0.00	0.00	-0.01	6.45	-0.232	0.00	0.00	-0.01	6.50	-0.24	0.00	0.00	-0.01	656.0	0.83	764.77
6.50	0.1	f	23.84	1.00	1.157	0.62	-0.02	23.84	-0.236	0.00	-0.8	323.0	0.00	-0.01	6.55	-0.24	0.00	0.00	-0.01	6.55	-0.24	0.00	0.00	-0.01	6.60	-0.24	0.00	0.00	-0.01	656.0	0.84	764.76
6.60	0.1	f	24.21	1.00	1.156	0.63	-0.02	24.21	-0.243	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	6.65	-0.25	0.00	0.00	-0.01	6.65	-0.247	0.00	0.00	-0.01	6.70	-0.25	0.00	0.00	-0.01	655.9	0.86	764.76
6.70	0.1	f	24.57	1.00	1.156	0.64	-0.02	24.57	-0.251	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	6.75	-0.25	0.00	0.00	-0.01	6.75	-0.255	0.00	0.00	-0.01	6.80	-0.26	0.00	0.00	-0.01	655.9	0.87	764.75
6.80	0.1	f	24.94	1.00	1.156	0.65	-0.02	24.94	-0.258	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	6.85	-0.26	0.00	0.00	-0.01	6.85	-0.262	0.00	0.00	-0.01	6.90	-0.27	0.00	0.00	-0.01	655.9	0.88	764.74
6.90	0.1	f	25.31	1.00	1.156	0.66	-0.03	25.31	-0.266	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	6.95	-0.27	0.00	0.00	-0.01	6.95	-0.27	0.00	0.00	-0.01	7.00	-0.27	0.00	0.00	-0.01	655.8	0.90	764.73
7.00	0.1	f	25.67	1.00	1.156	0.67	-0.03	25.67	-0.274	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	7.05	-0.28	0.00	0.00	-0.01	7.05	-0.278	0.00	0.00	-0.01	7.10	-0.28	0.00	0.00	-0.01	655.8	0.91	764.73
7.10	0.1	f	26.04	1.00	1.156	0.68	-0.03	26.04	-0.282	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	7.15	-0.29	0.00	0.00	-0.01	7.15	-0.286	0.00	0.00	-0.01	7.20	-0.29	0.00	0.00	-0.01	655.8	0.92	764.72
7.20	0.1	f	26.41	1.00	1.156	0.69	-0.03	26.41	-0.290	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	7.25	-0.29	0.00	0.00	-0.01	7.25	-0.294	0.00	0.00	-0.01	7.30	-0.30	0.00	0.00	-0.01	655.7	0.93	764.71
7.30	0.1	f	26.77	1.00	1.155	0.70	-0.03	26.77	-0.298	0.00	-0.9	323.0	0.00	-0.01	7.35	-0.30	0.00	0.00	-0.01	7.35	-0.302	0.00	0.00	-0.01	7.40	-0.31	0.00	0.00	-0.01	655.7	0.95	764.70
7.40	0.1	f	27.14	1.00	1.155	0.71	-0.03	27.14	-0.306	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	7.45	-0.31	0.00	0.00	-0.01	7.45	-0.31	0.00	0.00	-0.01	7.50	-0.31	0.00	0.00	-0.01	655.7	0.96	764.69
7.50	0.1	f	27.51	1.00	1.155	0.71	-0.03	27.51	-0.315	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	7.55	-0.32	0.00	0.00	-0.01	7.55	-0.319	0.00	0.00	-0.01	7.60	-0.32	0.00	0.00	-0.01	655.6	0.97	764.69
7.60	0.1	f	27.87	1.00	1.155	0.72	-0.03	27.87	-0.323	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	7.65	-0.33	0.00	0.00	-0.01	7.65	-0.327	0.00	0.00	-0.01	7.70	-0.33	0.00	0.00	-0.01	655.6	0.99	764.68
7.70	0.1	f	28.24	1.00	1.155	0.73	-0.03	28.24	-0.332	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	7.75	-0.34	0.00	0.00	-0.01	7.75	-0.336	0.00	0.00	-0.01	7.80	-0.34	0.00	0.00	-0.01	655.5	1.00	764.67
7.80	0.1	f	28.61	1.00	1.155	0.74	-0.03	28.61	-0.340	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	7.85	-0.34	0.00	0.00	-0.01	7.85	-0.345	0.00	0.00	-0.01	7.90	-0.35	0.00	0.00	-0.01	655.5	1.01	764.66
7.90	0.1	f	28.97	1.00	1.154	0.75	-0.03	28.97	-0.349	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	7.95	-0.35	0.00	0.00	-0.01	7.95	-0.354	0.00	0.00	-0.01	8.00	-0.36	0.00	0.00	-0.01	655.5	1.02	764.65
8.00	0.1	f	29.34	1.00	1.154	0.76	-0.03	29.34	-0.358	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	8.05	-0.36	0.00	0.00	-0.01	8.05	-0.363	0.00	0.00	-0.01	8.10	-0.37	0.00	0.00	-0.01	655.4	1.04	764.64
8.10	0.1	f	29.71	1.00	1.154	0.77	-0.04	29.71	-0.367	0.00	-1.0	323.0	0.00	-0.01	8.15	-0.37	0.00	0.00	-0.01	8.15	-0.372	0.00	0.00	-0.01	8.20	-0.38	0.00	0.00	-0.01	655.4	1.05	764.63
8.20	0.1	f	30.07	1.00	1.154	0.78	-0.04	30.07	-0.376	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.25	-0.38	0.00	0.00	-0.01	8.25	-0.381	0.00	0.00	-0.01	8.30	-0.39	0.00	0.00	-0.01	655.4	1.06	764.62
8.30	0.1	f	30.44	1.00	1.154	0.79	-0.04	30.44	-0.386	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.35	-0.39	0.00	0.00	-0.01	8.35	-0.39	0.00	0.00	-0.01	8.40	-0.40	0.00	0.00	-0.01	655.3	1.08	764.61
8.40	0.1	f	30.81	1.00	1.153	0.80	-0.04	30.81	-0.395	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.45	-0.40	0.00	0.00	-0.01	8.45	-0.4	0.00	0.00	-0.01	8.50	-0.40	0.00	0.00	-0.01	655.3	1.09	764.60
8.50	0.1	f	31.17	1.00	1.153	0.81	-0.04	31.17	-0.405	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.55	-0.41	0.00	0.00	-0.01	8.55	-0.409	0.00	0.00	-0.01	8.60	-0.41	0.00	0.00	-0.01	655.2	1.10	764.60
8.60	0.1	f	31.54	1.00	1.153	0.82	-0.04	31.54	-0.414	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.65	-0.42	0.00	0.00	-0.01	8.65	-0.419	0.00	0.00	-0.01	8.70	-0.42	0.00	0.00	-0.01	655.2	1.12	764.59
8.70	0.1	f	31.91	1.00	1.153	0.83	-0.04	31.91	-0.424	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.75	-0.43	0.00	0.00	-0.01	8.75	-0.429	0.00	0.00	-0.01	8.80	-0.43	0.00	0.00	-0.01	655.1	1.13	764.58
8.80	0.1	f	32.27	1.00	1.153	0.84	-0.04	32.27	-0.434	0.00	-1.1	323.0	0.00	-0.01	8.85	-0.44	0.00	0.00	-0.01	8.85	-0.439	0.00	0.00	-0.01	8.90	-0.44	0.00	0.00	-0.01	655.1	1.14	764.57
8.90	0.1	f	32.64	1.00	1.152	0.85	-0.04	32.64	-0.444	0.00	-1.2	323.0	0.00	-0.01	8.95	-0.45	0.00	0.00	-0.01	8.95	-0.449	0.00	0.00	-0.01	9.00	-0.45	0.00	0.00	-0.01	655.1	1.15	764.56
9.00	0.1	f	33.01	1.00	1.152	0.86	-0.04	33.01	-0.454	0.00	-1.2	323.0	0.00	-0.01	9.05	-0.46	0.00	0.00	-0.01	9.05	-0.459	0.00	0.00	-0.01	9.10	-0.46	0.00	0.00	-0.01	655.0	1.17	764.55
9.10	0.1	f	33.37	1.00	1.152	0.87	-0.04	33.37	-0.464	0.00	-1.2	323.0	0.00	-0.01	9.15	-0.47	0.00	0.00	-0.01	9.15	-0.469	0.00	0.00	-0.01	9.20	-0.47	0.00	0.00	-0.01	655.0	1.18	764.54
9.20	0.1	f	33.74	1.00	1.152	0.88	-0.05	33.74	-0.474	0.00	-1.2	323.0	0.00	-0.01	9.25	-0.48	0.00	0.00	-0.01	9.25	-0.48	0.00	0.00	-0.01	9.30	-0.48	0.00	0.00	-0.01	654.9	1.19	764.53
9.30	0.1	f	34.11	1.00	1.152	0.89	-0.05	34.11	-0.485	0.00	-1.2	323.0	0.00	-0.01	9.35	-0.49	0.00	0.00	-0.01	9.35	-0.49	0.00	0.00	-0.01	9.40	-0.50	0.00	0.00	-0.01	654.9	1.21	764.52
9.40	0.1	f	34.47	1.00	1.151	0.90	-0.05	34.47	-0.495	0.00	-1.2	323.0	0.00	-0.01	9.45	-0.50	0.00	0.00	-0.01	9.45	-0.501	0.00	0.00	-0.01	9.50	-0.51	0.00	0.00	-0.01	654.8	1.22	764.50
9.50	0.1	f	34.84	1.00	1																											

SISTEMA COM CE A MONTANTE E A JUSANTE DA TURBINA

Cálculo das oscilações na CE de jusante

CARACTERÍSTICAS DO TUNEL	
L	713.73 m
D_T	7 m
A_T	38.5 m ²
$Q(t=0)$	0.00 m ³ /s
$v(t=0)$	0.00 m/s
Nível Estático	108 masl

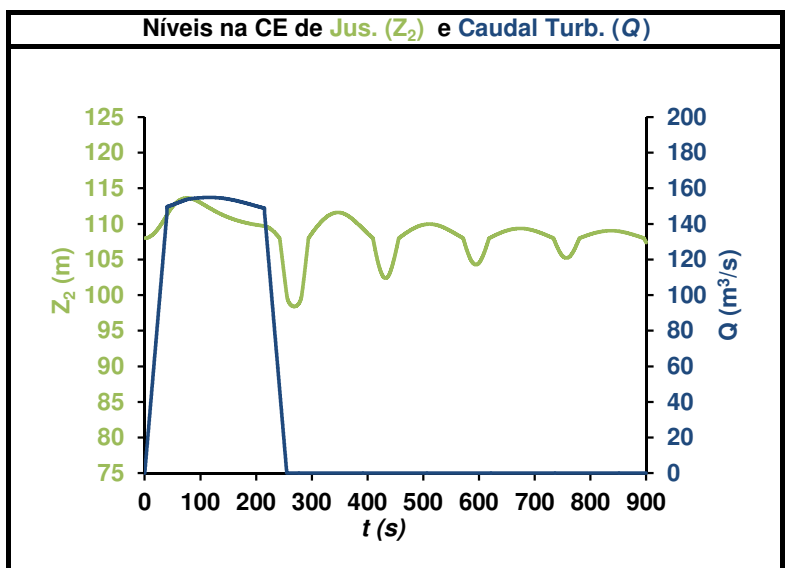
INTERVALO DE CALCULO	
Δt	0.1 s

PERDAS DE CARGA (PC)		
Túnel		
Contínuas		
K_s	72.42 m ^{1/3} /s	
p	0.065 s ² /m	
Localizadas	Sent. (+)	Sent. (-)
K	1.701	1.661 -
$p'-p$	0.087	0.085 s ² /m
p'	0.151	0.149 s ² /m
Ligação à CE		
Contínuas		
D_d	3.1 m	
A_d	7.5 m ²	
L_d	54 m	
K_s	72.42 m ^{1/3} /s	
p_d	0.014 s ² /m	
Localizadas	Sent. (+)	Sent. (-)
K_d	1	0.5 -
p'_d-p_d	0.05	0.03 s ² /m
p'_d	0.004	0.002 s ² /m

CARACT. DA CE		
Base	91.00 m	
Topo	118.00 m	
Altura	z (m)	A_s (m ²)
0	-17	660.0
4	-13	660.0
6.5	-10.5	636.7
9	-8	115.9
16.99	-0.01	115.9
17	0	715.9
19.8	2.8	645.4
21	4	616.3
22.1	5.0787	600.0
24	7	600.0
25	8	600.0
25.5	8.5	600.0
26	9	600.0

CARACT. DA BIFURCAÇÃO PARA CE	
dv	3.5 (-)
d''	3.1 (-)
F_v	9.6 (-)
F''	7.5 (-)
δ	1.73 (-)
r	0 (-)
ϕ	0.78 (-)
ρ	0 (-)
Nº de ligações	4 (-)

COEF. PARA CALC. DAS PC NA BIF.		
	'	''
k_a	-0.95	-0.03
k_f	-0.95	-0.03
k_c	-0.92	0.03
l_a	-1.33	-0.35
l_f	0.87	-1.02
l_c	1.50	0.22
l_d	-1.39	0.35
m_a	0.78	-0.20
m_f	0.00	-1.22
m_c	-1.22	-1.22



nota: os caudais turbinados são os mesmos que na CE de montante

TEMPO		CALCULO DAS PC NA BIFURCAÇÃO ($\Delta\beta$)						RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS RUNGE KUTTA																				AUX REG		GRAF.	
t	Δt	tipo	Q_{max}	q''	k'''	y_{max}	$\Delta\beta$	$Q(t)$	z_i	v_i	v_d	$As(z)$	$K1$	$L1$	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_1/2$	$v_i+K_1/2$	$K2$	$L2$	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_2/2$	$v_i+K_2/2$	$K3$	$L3$	$t+\Delta t$	z_i+L_3	v_i+K_3	$K4$	$L4$	$-z-\Delta\beta-\Delta H_d$	$Z(m)$
0	0.1	a	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	715.9	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.10	0.1	a	0.09	-4.00	12.28	0.01	0.00	0.37	0.00	0.00	0.05	715.9	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.20	0.1	a	0.18	-4.00	12.28	0.02	0.00	0.73	0.00	0.00	0.10	715.9	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.30	0.1	a	0.28	-4.00	12.28	0.03	0.00	1.10	0.00	0.00	0.15	715.9	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.40	0.1	a	0.37	-4.00	12.28	0.04	0.00	1.47	0.00	0.00	0.19	715.9	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.50	0.1	a	0.46	-4.00	12.28	0.05	0.00	1.83	0.00	0.00	0.24	715.9	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.60	0.1	a	0.55	-4.00	12.28	0.06	0.00	2.20	0.00	0.00	0.29	715.9	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.70	0.1	a	0.64	-4.00	12.27	0.07	0.00	2.57	0.00	0.00	0.34	715.9	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.80	0.1	a	0.73	-4.00	12.27	0.08	0.00	2.93	0.00	0.00	0.39	715.9	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
0.90	0.1	a	0.83	-4.00	12.27	0.09	0.00	3.30	0.00	0.00	0.44	715.9	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.00	0.1	a	0.92	-4.00	12.27	0.10	0.01	3.67	0.00	0.00	0.49	715.9	0.00	0.00	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.10	0.1	a	1.01	-4.00	12.27	0.10	0.01	4.03	0.00	0.00	0.53	715.9	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.20	0.1	a	1.10	-4.00	12.26	0.11	0.01	4.40	0.00	0.00	0.58	715.8	0.00	0.00	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.30	0.1	a	1.19	-4.00	12.26	0.12	0.01	4.77	0.00	0.00	0.63	715.8	0.00	0.00	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	1.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.40	0.1	a	1.28	-4.00	12.26	0.13	0.01	5.13	0.00	0.00	0.68	715.8	0.00	0.00	1.45	0.01	0.00	0.00	0.00	1.45	0.01	0.00	0.00	0.00	1.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.50	0.1	a	1.38	-4.00	12.26	0.14	0.01	5.50	0.01	0.00	0.73	715.8	0.00	0.00	1.55	0.01	0.00	0.00	0.00	1.55	0.01	0.00	0.00	0.00	1.6	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.60	0.1	a	1.47	-4.00	12.25	0.15	0.01	5.87	0.01	0.00	0.78	715.8	0.00	0.00	1.65	0.01	0.00	0.00	0.00	1.65	0.01	0.00	0.00	0.00	1.7	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.70	0.1	a	1.56	-4.00	12.25	0.16	0.02	6.23	0.01	0.00	0.83	715.8	0.00	0.00	1.75	0.01	0.00	0.00	0.00	1.75	0.01	0.00	0.00	0.00	1.8	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.80	0.1	a	1.65	-3.99	12.24	0.17	0.02	6.60	0.01	0.00	0.87	715.7	0.00	0.00	1.85	0.01	0.00	0.00	0.00	1.85	0.01	0.00	0.00	0.00	1.9	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
1.90	0.1	a	1.74	-3.99	12.24	0.18	0.02	6.97	0.01	0.00	0.92	715.7	0.00	0.00	1.95	0.01	0.00	0.00	0.00	1.95	0.01	0.00	0.00	0.00	2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.00	0.1	a	1.83	-3.99	12.24	0.19	0.02	7.34	0.01	0.00	0.97	715.7	0.00	0.00	2.05	0.01	0.00	0.00	0.00	2.05	0.01	0.00	0.00	0.00	2.1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.10	0.1	a	1.93	-3.99	12.23	0.20	0.02	7.70	0.01	0.00	1.02	715.7	0.00	0.00	2.15	0.01	0.00	0.00	0.00	2.15	0.01	0.00	0.00	0.00	2.2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.20	0.1	a	2.02	-3.99	12.23	0.21	0.03	8.07	0.01	0.00	1.07	715.6	0.00	0.00	2.25	0.01	0.00	0.00	0.00	2.25	0.01	0.00	0.00	0.00	2.3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.30	0.1	a	2.11	-3.99	12.22	0.22	0.03	8.44	0.01	0.00	1.12	715.6	0.00	0.00	2.35	0.01	0.00	0.00	0.00	2.35	0.01	0.00	0.00	0.00	2.4	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.40	0.1	a	2.20	-3.99	12.22	0.23	0.03	8.80	0.01	0.00	1.16	715.6	0.00	0.00	2.45	0.01	0.00	0.00	0.00	2.45	0.01	0.00	0.00	0.00	2.5	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.50	0.1	a	2.29	-3.99	12.21	0.24	0.04	9.17	0.02	0.00	1.21	715.5	0.00	0.00	2.55	0.02	0.00	0.00	0.00	2.55	0.02	0.00	0.00	0.00	2.6	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.60	0.1	a	2.38	-3.99	12.21	0.25	0.04	9.54	0.02	0.00	1.26	715.5	0.00	0.00	2.65	0.02	0.00	0.00	0.00	2.65	0.02	0.00	0.00	0.00	2.7	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.70	0.1	a	2.48	-3.99	12.20	0.26	0.04	9.90	0.02	0.00	1.31	715.5	0.00	0.00	2.75	0.02	0.00	0.00	0.00	2.75	0.02	0.00	0.00	0.00	2.8	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.80	0.1	a	2.57	-3.99	12.19	0.27	0.04	10.27	0.02	0.00	1.36	715.4	0.00	0.00	2.85	0.02	0.00	0.00	0.00	2.85	0.02	0.00	0.00	0.00	2.9	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
2.90	0.1	a	2.66	-3.99	12.19	0.28	0.05	10.64	0.02	0.00	1.40	715.4	0.00	0.00	2.95	0.02	0.00	0.00	0.00	2.95	0.02	0.00	0.00	0.00	3	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.00	0.1	a	2.75	-3.98	12.18	0.29	0.05	11.00	0.02	0.00	1.45	715.4	0.00	0.00	3.05	0.02	0.00	0.00	0.00	3.05	0.02	0.00	0.00	0.00	3.1	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.10	0.1	a	2.84	-3.98	12.17	0.30	0.05	11.37	0.02	0.00	1.50	715.3	0.00	0.00	3.15	0.02	0.00	0.00	0.00	3.15	0.02	0.00	0.00	0.00	3.2	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.20	0.1	a	2.93	-3.98	12.17	0.30	0.06	11.74	0.03	0.00	1.55	715.3	0.00	0.00	3.25	0.03	0.00	0.00	0.00	3.25	0.03	0.00	0.00	0.00	3.3	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.30	0.1	a	3.03	-3.98	12.16	0.31	0.06	12.10	0.03	0.00	1.60	715.2	0.00	0.00	3.35	0.03	0.00	0.00	0.00	3.35	0.03	0.00	0.00	0.00	3.4	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.40	0.1	a	3.12	-3.98	12.15	0.32	0.07	12.47	0.03	0.00	1.64	715.2	0.00	0.00	3.45	0.03	0.00	0.00	0.00	3.45	0.03	0.00	0.00	0.00	3.5	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.50	0.1	a	3.21	-3.98	12.14	0.33	0.07	12.84	0.03	0.00	1.69	715.2	0.00	0.00	3.55	0.03	0.00	0.00	0.00	3.55	0.03	0.00	0.00	0.00	3.6	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.60	0.1	a	3.30	-3.98	12.14	0.34	0.07	13.20	0.03	0.00	1.74	715.1	0.00	0.00	3.65	0.03	0.00	0.00	0.00	3.65	0.03	0.00	0.00	0.00	3.7	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.70	0.1	a	3.39	-3.98	12.13	0.35	0.08	13.57	0.03	0.00	1.79	715.1	0.00	0.00	3.75	0.03	0.00	0.00	0.00	3.75	0.03	0.00	0.00	0.00	3.8	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.80	0.1	a	3.48	-3.98	12.12	0.36	0.08	13.94	0.04	0.00	1.84	715	0.00	0.00	3.85	0.04	0.00	0.00	0.00	3.85	0.04	0.00	0.00	0.00	3.9	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
3.90	0.1	a	3.58	-3.97	12.11	0.37	0.09	14.30	0.04	0.00	1.88	715	0.00	0.00	3.95	0.04	0.00	0.00	0.00	3.95	0.04	0.00	0.00	0.00	4	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	108.0
4.00	0.1	a	3.67	-3.97	12.10	0.38	0.09	14.67	0.04	0.00																					

TEMPO		CALCULO DAS PC NA BIFURCAÇÃO ($\Delta\beta$)							RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS RUNGE KUTTA																		AUX REG GRAF.				
t	Δt	tipo	Q_{max}	q''	k'''	v_{max}	$A\beta$	$Q(t)$	z_i	v_i	v_d	$As(z)$	$K1$	$L1$	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_1/2$	$v_i+K_1/2$	$K2$	$L2$	$t+\Delta t/2$	$z_i+L_2/2$	$v_i+K_2/2$	$K3$	$L3$	$t+\Delta t$	z_i+L_3	v_i+K_3	$K4$	$L4$	$-z-A\beta-\Delta H_d$	$Z(m)$
5.50	0.1	a	5.04	-3.95	11.94	0.52	0.17	20.17	0.08	0.01	2.64	714	0.00	0.00	5.55	0.08	0.01	0.00	0.00	5.55	0.08	0.01	0.00	0.00	5.6	0.08	0.01	0.00	0.00	-0.27	108.1
5.60	0.1	a	5.13	-3.95	11.93	0.53	0.17	20.54	0.08	0.01	2.68	713.9	0.00	0.00	5.65	0.08	0.01	0.00	0.00	5.65	0.08	0.01	0.00	0.00	5.7	0.08	0.01	0.00	0.00	-0.28	108.1
5.70	0.1	a	5.23	-3.94	11.92	0.54	0.18	20.90	0.08	0.01	2.73	713.9	0.00	0.00	5.75	0.08	0.01	0.00	0.00	5.75	0.08	0.01	0.00	0.00	5.8	0.08	0.01	0.00	0.00	-0.29	108.1
5.80	0.1	a	5.32	-3.94	11.91	0.55	0.19	21.27	0.08	0.01	2.78	713.8	0.00	0.00	5.85	0.09	0.01	0.00	0.00	5.85	0.09	0.01	0.00	0.00	5.9	0.09	0.01	0.00	0.00	-0.30	108.1
5.90	0.1	a	5.41	-3.94	11.89	0.56	0.19	21.64	0.09	0.01	2.82	713.7	0.00	0.00	5.95	0.09	0.01	0.00	0.00	5.95	0.09	0.01	0.00	0.00	6	0.09	0.01	0.00	0.00	-0.31	108.1
6.00	0.1	a	5.50	-3.94	11.88	0.57	0.20	22.01	0.09	0.01	2.87	713.7	0.00	0.00	6.05	0.09	0.01	0.00	0.00	6.05	0.09	0.01	0.00	0.00	6.1	0.09	0.01	0.00	0.00	-0.32	108.1
6.10	0.1	a	5.59	-3.94	11.87	0.58	0.20	22.37	0.09	0.01	2.92	713.6	0.00	0.00	6.15	0.09	0.01	0.00	0.00	6.15	0.09	0.01	0.00	0.00	6.2	0.10	0.01	0.00	0.00	-0.33	108.1
6.20	0.1	a	5.68	-3.93	11.86	0.59	0.21	22.74	0.10	0.01	2.96	713.5	0.00	0.00	6.25	0.10	0.01	0.00	0.00	6.25	0.10	0.01	0.00	0.00	6.3	0.10	0.01	0.00	0.00	-0.34	108.1
6.30	0.1	a	5.78	-3.93	11.84	0.60	0.22	23.11	0.10	0.01	3.01	713.4	0.00	0.00	6.35	0.10	0.01	0.00	0.00	6.35	0.10	0.01	0.00	0.00	6.4	0.10	0.01	0.00	0.00	-0.35	108.1
6.40	0.1	a	5.87	-3.93	11.83	0.61	0.22	23.47	0.10	0.01	3.06	713.3	0.00	0.00	6.45	0.10	0.01	0.00	0.00	6.45	0.10	0.01	0.00	0.00	6.5	0.11	0.01	0.00	0.00	-0.37	108.1
6.50	0.1	a	5.96	-3.93	11.81	0.62	0.23	23.84	0.11	0.01	3.10	713.3	0.00	0.00	6.55	0.11	0.01	0.00	0.00	6.55	0.11	0.01	0.00	0.00	6.6	0.11	0.01	0.00	0.00	-0.38	108.1
6.60	0.1	a	6.05	-3.93	11.80	0.63	0.24	24.21	0.11	0.01	3.15	713.2	0.00	0.00	6.65	0.11	0.01	0.00	0.00	6.65	0.11	0.01	0.00	0.00	6.7	0.11	0.01	0.00	0.00	-0.39	108.1
6.70	0.1	a	6.14	-3.92	11.79	0.64	0.24	24.57	0.11	0.01	3.19	713.1	0.00	0.00	6.75	0.11	0.01	0.00	0.00	6.75	0.11	0.01	0.00	0.00	6.8	0.12	0.01	0.00	0.00	-0.40	108.1
6.80	0.1	a	6.23	-3.92	11.77	0.65	0.25	24.94	0.12	0.01	3.24	713	0.00	0.00	6.85	0.12	0.01	0.00	0.00	6.85	0.12	0.01	0.00	0.00	6.9	0.12	0.01	0.00	0.00	-0.41	108.1
6.90	0.1	a	6.33	-3.92	11.76	0.66	0.26	25.31	0.12	0.01	3.28	712.9	0.00	0.00	6.95	0.12	0.01	0.00	0.00	6.95	0.12	0.01	0.00	0.00	7	0.12	0.01	0.00	0.00	-0.42	108.1
7.00	0.1	a	6.42	-3.92	11.74	0.67	0.27	25.67	0.12	0.01	3.33	712.8	0.00	0.00	7.05	0.12	0.01	0.00	0.00	7.05	0.12	0.01	0.00	0.00	7.1	0.13	0.01	0.00	0.00	-0.43	108.1
7.10	0.1	a	6.51	-3.91	11.73	0.68	0.27	26.04	0.13	0.01	3.38	712.7	0.00	0.00	7.15	0.13	0.01	0.00	0.00	7.15	0.13	0.01	0.00	0.00	7.2	0.13	0.02	0.00	0.00	-0.45	108.1
7.20	0.1	a	6.60	-3.91	11.71	0.69	0.28	26.41	0.13	0.02	3.42	712.7	0.00	0.00	7.25	0.13	0.02	0.00	0.00	7.25	0.13	0.02	0.00	0.00	7.3	0.13	0.02	0.00	0.00	-0.46	108.1
7.30	0.1	a	6.69	-3.91	11.70	0.70	0.29	26.77	0.13	0.02	3.47	712.6	0.00	0.00	7.35	0.14	0.02	0.00	0.00	7.35	0.14	0.02	0.00	0.00	7.4	0.14	0.02	0.00	0.00	-0.47	108.1
7.40	0.1	a	6.78	-3.91	11.68	0.71	0.30	27.14	0.14	0.02	3.51	712.5	0.00	0.00	7.45	0.14	0.02	0.00	0.00	7.45	0.14	0.02	0.00	0.00	7.5	0.14	0.02	0.00	0.00	-0.48	108.1
7.50	0.1	a	6.88	-3.90	11.66	0.71	0.30	27.51	0.14	0.02	3.56	712.4	0.00	0.00	7.55	0.14	0.02	0.00	0.00	7.55	0.14	0.02	0.00	0.00	7.6	0.14	0.02	0.00	0.00	-0.50	108.1
7.60	0.1	a	6.97	-3.90	11.65	0.72	0.31	27.87	0.14	0.02	3.60	712.3	0.00	0.00	7.65	0.15	0.02	0.00	0.00	7.65	0.15	0.02	0.00	0.00	7.7	0.15	0.02	0.00	0.00	-0.51	108.1
7.70	0.1	a	7.06	-3.90	11.63	0.73	0.32	28.24	0.15	0.02	3.65	712.2	0.00	0.00	7.75	0.15	0.02	0.00	0.00	7.75	0.15	0.02	0.00	0.00	7.8	0.15	0.02	0.00	0.00	-0.52	108.2
7.80	0.1	a	7.15	-3.90	11.61	0.74	0.33	28.61	0.15	0.02	3.69	712.1	0.00	0.00	7.85	0.15	0.02	0.00	0.00	7.85	0.15	0.02	0.00	0.00	7.9	0.16	0.02	0.00	0.00	-0.54	108.2
7.90	0.1	a	7.24	-3.89	11.60	0.75	0.34	28.97	0.16	0.02	3.74	712	0.00	0.00	7.95	0.16	0.02	0.00	0.00	7.95	0.16	0.02	0.00	0.00	8	0.16	0.02	0.00	0.00	-0.55	108.2
8.00	0.1	a	7.33	-3.89	11.58	0.76	0.34	29.34	0.16	0.02	3.78	711.9	0.00	0.00	8.05	0.16	0.02	0.00	0.00	8.05	0.16	0.02	0.00	0.00	8.1	0.16	0.02	0.00	0.00	-0.56	108.2
8.10	0.1	a	7.43	-3.89	11.56	0.77	0.35	29.71	0.16	0.02	3.83	711.8	0.00	0.00	8.15	0.17	0.02	0.00	0.00	8.15	0.17	0.02	0.00	0.00	8.2	0.17	0.02	0.00	0.00	-0.58	108.2
8.20	0.1	a	7.52	-3.89	11.55	0.78	0.36	30.07	0.17	0.02	3.87	711.7	0.00	0.00	8.25	0.17	0.02	0.00	0.00	8.25	0.17	0.02	0.00	0.00	8.3	0.17	0.02	0.00	0.00	-0.59	108.2
8.30	0.1	a	7.61	-3.88	11.53	0.79	0.37	30.44	0.17	0.02	3.92	711.6	0.00	0.00	8.35	0.17	0.02	0.00	0.00	8.35	0.17	0.02	0.00	0.00	8.4	0.18	0.02	0.00	0.00	-0.60	108.2
8.40	0.1	a	7.70	-3.88	11.51	0.80	0.38	30.81	0.18	0.02	3.96	711.5	0.00	0.00	8.45	0.18	0.02	0.00	0.00	8.45	0.18	0.02	0.00	0.00	8.5	0.18	0.02	0.00	0.00	-0.62	108.2
8.50	0.1	a	7.79	-3.88	11.49	0.81	0.38	31.17	0.18	0.02	4.00	711.4	0.00	0.00	8.55	0.18	0.03	0.00	0.00	8.55	0.18	0.03	0.00	0.00	8.6	0.18	0.03	0.00	0.00	-0.63	108.2
8.60	0.1	a	7.89	-3.88	11.48	0.82	0.39	31.54	0.18	0.03	4.05	711.3	0.00	0.00	8.65	0.19	0.03	0.00	0.00	8.65	0.19	0.03	0.00	0.00	8.7	0.19	0.03	0.00	0.00	-0.64	108.2
8.70	0.1	a	7.98	-3.87	11.46	0.83	0.40	31.91	0.19	0.03	4.09	711.2	0.00	0.00	8.75	0.19	0.03	0.00	0.00	8.75	0.19	0.03	0.00	0.00	8.8	0.19	0.03	0.00	0.00	-0.66	108.2
8.80	0.1	a	8.07	-3.87	11.44	0.84	0.41	32.27	0.19	0.03	4.14	711	0.00	0.00	8.85	0.20	0.03	0.00	0.00	8.85	0.20	0.03	0.00	0.00	8.9	0.20	0.03	0.00	0.00	-0.67	108.2
8.90	0.1	a	8.16	-3.87	11.42	0.85	0.42	32.64	0.20	0.03	4.18	710.9	0.00	0.00	8.95	0.20	0.03	0.00	0.00	8.95	0.20	0.03	0.00	0.00	9	0.20	0.03	0.00	0.00	-0.69	108.2
9.00	0.1	a	8.25	-3.86	11.40	0.86	0.43	33.01	0.20	0.03	4.22	710.8	0.00	0.00	9.05	0.20	0.03	0.00	0.00	9.05	0.20	0.03	0.00	0.00	9.1	0.21	0.03	0.00	0.00	-0.70	108.2
9.10	0.1	a	8.34	-3.86	11.39	0.87	0.44	33.37	0.21	0.03	4.27	710.7	0.00	0.00	9.15	0.21	0.03	0.00	0.00	9.15	0.21	0.03	0.00	0.00	9.2	0.21	0.03	0.00	0.00	-0.72	108.2
9.20	0.1	a	8.44	-3.86	11.37	0.88	0.45	33.74	0.21	0.03	4.31	710.6	0.00	0.00	9.25	0.21	0.03	0.00	0.00	9.25	0.21	0.03	0.00	0.00	9.3	0.22	0.03	0.00	0.00	-0.73	108.2
9.30	0.1	a	8.53	-3.85	11.35	0.89	0.45	34.11	0.22	0.03	4.35	710.5	0.00	0.00	9.35	0.22	0.03	0.00	0.00	9.35	0.22	0.03	0.00	0.00	9.4	0.22	0.03	0.00	0.00	-0.75	108.2
9.40	0.1	a	8.62	-3.85	11.33	0.90	0.46	34.47	0.22	0.03	4.40	710.4	0.00	0.00	9.45	0.22	0.03	0.00	0.00	9.45	0.22	0.03	0.00	0.00	9.5	0.23	0.03	0.00	0.00	-0.76	108.2
9.50	0.1	a	8.71	-3.85	11.31	0.91	0.47	34.84	0.23																						