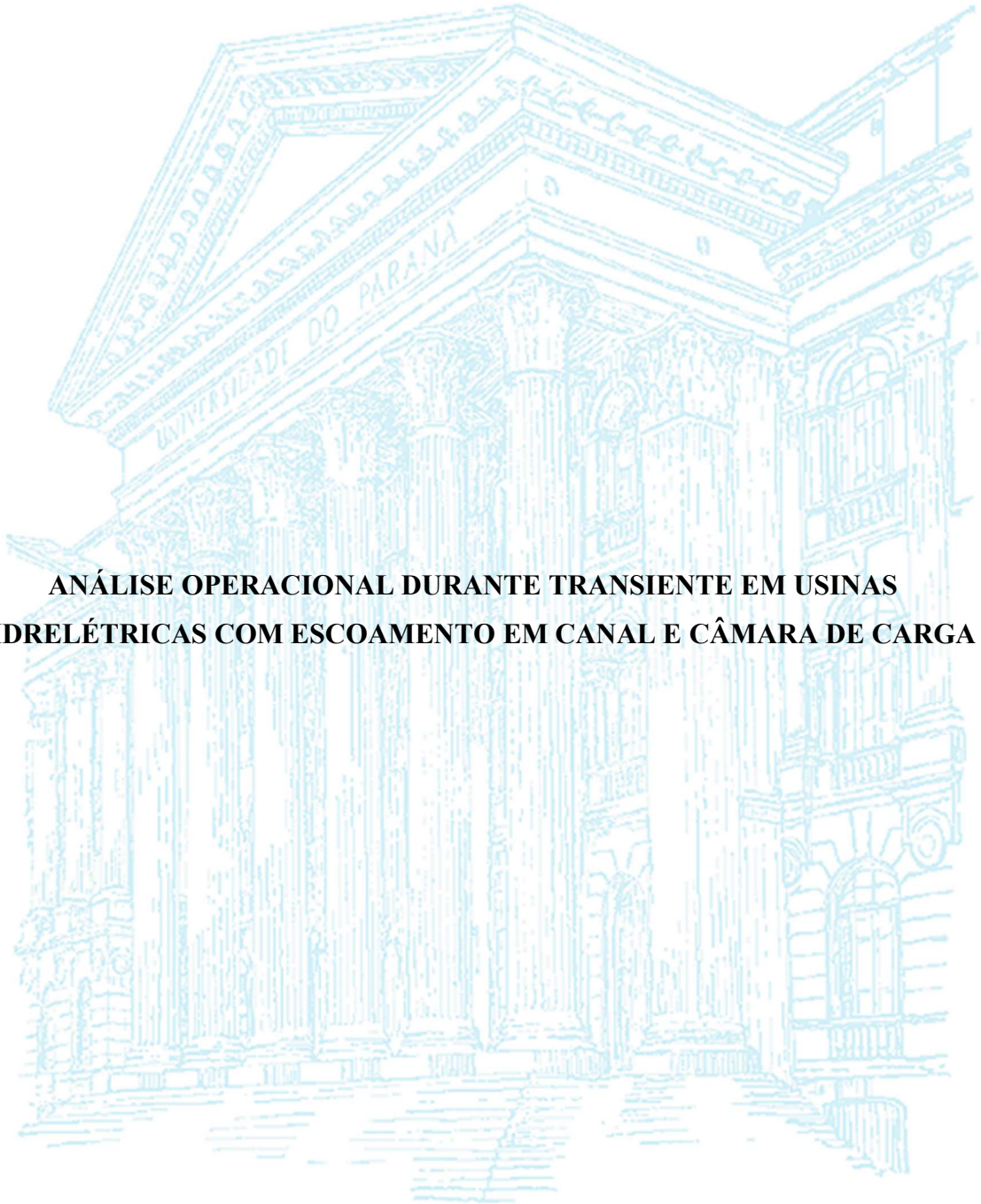
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HÉCTOR MAYOL NOVOA ANDÍA



ANÁLISE OPERACIONAL DURANTE TRANSIENTE EM USINAS HIDRELÉTRICAS COM ESCOAMENTO EM CANAL E CÂMARA DE CARGA

CURITIBA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HÉCTOR MAYOL NOVOA ANDÍA

ANÁLISE OPERACIONAL DURANTE TRANSIENTE EM USINAS HIDRELÉTRICAS COM ESCOAMENTO EM CANAL E CÂMARA DE CARGA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eloy Kaviski

CURITIBA

2017

A543a Andía, Héctor Mayol Novoa

Análise operacional durante transiente em usinas hidrelétricas com escoamento em canal e câmara de carga / Héctor Mayol Novoa Andía. – Curitiba, 2017.

98f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. 2017.

Orientador: Eloy Kaviski

1. Usinas hidrelétricas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Kaviski, Eloy. III. Título.

CDD: 621.2

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL
Código CAPES: 40001016021P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **HECTOR MAYOL NOVOA ANDIA**, intitulada: "**ANÁLISE OPERACIONAL DURANTE TRANSIENTE EM USINAS HIDRELÉTRICAS COM ESCOAMENTO EM CANAL E CÂMARA DE CARGA**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 20 de Fevereiro de 2017.

ELOY KAVISKI
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

Ausência por Vídeo conferência
ADILANDRI MÉRCIO LOBEIRO
Avaliador Externo (UTFPR)

JOSÉ JUNJI OTA
Avaliador Interno (UFPR)

MICHAEL MANNICH
Avaliador Interno (UFPR)

Gustavo J. S. Fernandes
Coordenador

A única coisa que importa é colocar em pratica, com sinceridade e seriedade, aquilo em que se acredita.

Dalaí Lama

Cada sonho que você deixa pra trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir.

Steve Jobs

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Héctor e Manuela (in memoriam) por me darem a vida e a condição para estudar e ser uma pessoa de bem.

Ao Professor Eloy Kaviski, pela orientação, compreensão e ajuda no desenvolvimento desta dissertação.

Aos Professores Cristóvão Fernandes e Tobias Bleninger pelos seus esforços na busca do aprimoramento do nosso curso de Mestrado.

A todos os professores do curso de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela dedicação e atenção dispensada.

À Organização dos Estados Americanos OEA, muito obrigado pela oportunidade de me conceder uma bolsa de estudos.

A Luz Marina Sória pela paciência e por saber compreender minha ausência quando mais precisava de mim. Aos meus filhos Alejandro e Mauricio por serem o melhor presente que Deus me deu e porque guardo a esperança de que sejam homens úteis para Deus e a sociedade.

Aos meus irmãos Cármen, Alcides e Humberto por confiarem sempre em mim.

María José Palma: é um privilégio quando temos ao nosso lado pessoas tão maravilhosas como você. Saiba que eu desejo que sua vida seja abençoada por momentos de paz e amor. Jamais esquecerei suas palavras confortadoras de fé. Obrigado pela amizade e os gratos momentos compartilhados com um cafezinho e palavras francas. Obrigado por tudo.

A meu amigo Orlando Duarte por ser exemplo de esforço, luta e perseverança.

A todos meus colegas do curso de Pós-graduação, em especial da minha sala de estudos, Elisa Stefan, Erika Sierra, Bruna Scipioni e Iverson Siebert, obrigado pelo companheirismo.

Aos meus colegas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidad Nacional de Agustín em Arequipa, Perú, em especial para um grande amigo Nestor Tupa, atual Decano, pela invalorável amizade.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a elaboração deste trabalho.

Querido Deus, desta vez não quero pedir nada, porque eu já pedi tanto e muita coisa me foi dada. Eu só quero agradecer: muito obrigado!

SUMÁRIO

SUMÁRIO v
LISTA DE FIGURAS vi
LISTA DE TABELAS viii
RESUMO ix
1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 2
1. 2. OBJETIVO 3
1.2.1 Específico 3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
3. CONCEITOS E DEFINIÇÕES 13
3.1. ESCOAMENTO NÃO-PERMANENTE EM CANAIS 13
3.2. PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO 16
3.3. MÉTODO DE RECOZIMENTO SIMULADO 17
3.3.1 Otimização Multiobjetivo 19
4. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT 21
4.1. SOLUÇÃO ANALÍTICA PELO MÉTODO DAS CARACTERISTICAS 21
4.2. SOLUÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS 25
4.2.1 Aplicação para um canal retangular 25
4.2.2 Aplicação para um canal qualquer 27
5. ESTUDO DE CASO 32
5.1. GERAL 32
5.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS CARACTERISTICAS 35
5.4. APLICAÇÃO DO METODO DE RECOZIMENTO SIMULADO 39
6. SIMULAÇÃO E RESULTADOS 42
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 50
REFERÊNCIAS 52
APÊNDICES 55
APÊNDICE A. DEDUÇÃO DAS EQUACOES DE SAINT-VENANT 55
APÊNDICE B. LISTAGEM DO PROGRAMA *Transiente* (c_carga8) 68
APÊNDICE C. LISTAGEM DO PROGRAMA *Otimização* (rs_c_ca2) 85
APÊNDICE D. COMPARAÇÃO DE DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA COM A MELHOR ABERTURA DE VÁLVULA OBTIDA COM O PROGRAMA *Otimização* 94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1-	CÂMARA DE CARGA COM ADUÇÃO EM BAIXA PRESSÃO NUM CANAL A CÉU ABERTO.....	4
FIGURA 2.2	CÂMARA DE CARGA COM ADUÇÃO EM BAIXA PRESSÃO NUM CANAL A CÉU ABERTO (ENTRADA COM DECLIVIDADE)	5
FIGURA 2.3	CÂMARA DE CARGA CASO DE ADUÇÃO ATRAVÉS DE TUBULAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO.....	6
FIGURA 2.4	CONFIGURAÇOES GERAIS PARA CÂMARAS DE CARGA.....	6
FIGURA 2.5	DIFERENTES SEÇÕES NUMA CÂMARA DE CARGA.....	7
FIGURA 2.6	DIMENSIONAMENTO DAS CÂMARAS DE CARGA.....	9
FIGURA 2.7	ALTURA MINIMA DE INMESÃO.....	12
FIGURA 3.1	ILUSTRA TRÊS PONTOS DE VISTA DO VOLUME DE CONTROLE: (a) UMA VISTA DE ELEVAÇÃO DO LADO, (b) UMA VISTA EM PLANTA DE CIMA, E (c) UM CORTE TRANSVERSAL DO CANAL.....	15
FIGURA 4.1	CÂMARA DE CARGA PARA UM CANAL DE ADUÇÃO DE SEÇÃO RETANGULAR.....	22
FIGURA 4.2	ESQUEMA DE UMA ONDA NEGATIVA NUMA CÂMARA DE CARGA.....	24
FIGURA 4.3	CARACTERÍSTICAS PARA ESCOAMENTO SUBCRÍTICO.....	26
FIGURA 4.4	CARACTERÍSTICAS PARA ESCOAMENTO SUPERCRÍTICO.....	26
FIGURA 4.5	MALHA RETANGULAR PARA O MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS....	28
FIGURA 4.6	MALHA RETANGULAR PARA JUSANTE NO REGIME SUPERCRÍTICO.	31
FIGURA 5.1	LIGAÇÕES ENTRE O CANAL DE ADUÇÃO E O CONDUTO FORÇADO ATRAVÉS DA CÂMARA DE CARGA	32
FIGURA 5.2	ESQUEMA E VARIAVEIS PARA OS CÁLCULOS	33
FIGURA 5.3	ESQUEMA GEOMÉTRICO DA SEÇÃO TRAPEZOIDAL DO CANAL DE ADUÇÃO.....	34
FIGURA 5.4	CARACTERÍSTICAS NO MONTANTE (À ESQUERDA x=0) E JUSANTE (À DIREITA x=L)	36
FIGURA 5.5	VARIÁVEIS PARA APLICAR A LEI DE CONSERVAÇÃO DE MASSA	37
FIGURA 5.6	PONTOS INTERIORES.....	38
FIGURA 5.7	DADOS PARA A PRIMEIRA SOLUCÃO VIÁVEL.....	40
FIGURA 6.1	VARIAÇÃO DA ALTURA DE ÁGUA NA CAMARA DE CARGA CONTRA O TEMPO.....	43
FIGURA 6.2	PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CAMARA DE CARGA PARA A ABERTURA DA VÁLVULA OTMIZADA.....	46

FIGURA A.1 MOSTRA TRÊS PONTOS DE VISTA DO VOLUME DE CONTROLE: (A) UMA VISTA DE ELEVAÇÃO DO LADO, (B) UMA VISTA EM PLANTA DE CIMA, E (C) UM CORTE TRANSVERSAL DO CANAL..... 56
FIGURA D.1 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA, A1, A2, A3..... 95
FIGURA D.2 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA..... 96
FIGURA D.3 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA..... 98

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	DIMENSÕES SUGERIDAS PELA ELETROBRÁS (2000) PARA CÂMARAS DE CARGA (FIG. 2.6).....	10
TABELA 5.1	DADOS PARA O ESTUDO DE CASO.....	34
TABELA 5.2	VAZÕES MÍNIMA E MÁXIMA DA TURBINA INSTALADA NA USINA HIDRELÉTRICA.....	34
TABELA 5.3	CURVA COTA-ÁREA-VOLUME DA CÂMARA DE CARGA.....	35
TABELA 5.4	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO (SOLUÇÃO VIÁVEL INICIAL)	40
TABELA 6.1	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	42
TABELA 6.2	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO. REGRA DE OPERAÇAO FINAL OBTIDO COM O METODO DE OTIMIZAÇÃO RECOZIMENTO SIMULADO.....	44
TABELA 6.3	RESULTADOS DE VAZÃO TURBINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO. REGRA DE OPERAÇAO FINAL OBTIDO COM O METODO DE OTIMIZAÇÃO RECOZIMENTO SIMULADO.....	45
TABELA 6.4	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 2].....	47
TABELA 6.5	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 3].....	47
TABELA 6.6	RESULTADOS DE VAZÃO TURBINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 2].....	48
TABELA 6.7	RESULTADOS DE VAZÃO TURBINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 3].....	49
TABELA A.1	SIGNIFICADO DOS TERMOS DA EQUAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR.....	66
TABELA A.2	MODELOS DE ONDA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR.....	67
TABELA D.1	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura A1], [Abertura A2], [Abertura A3].....	95
TABELA D.2	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura B1], [Abertura B2], [Abertura B3].....	96
TABELA D.3	FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura C1], [Abertura C2], [Abertura C3] [Abertura C4], [Abertura C5], [Abertura C6].....	97

RESUMO

Alguns dos circuitos hidráulicos de pequenas usinas hidrelétricas contemplam a construção de uma câmara de carga que serve de transição entre o escoamento à superfície livre no canal de adução e o escoamento sob pressão no conduto forçado. Uma das funções das câmaras de carga é criar volumes de reserva de água que permita satisfazer as necessidades das turbinas durante os momentos bruscos de demanda e manter sobre a entrada do conduto de força uma altura suficiente de água para evitar a entrada de ar. Na literatura especializada existem muitas recomendações para o dimensionamento de câmaras de carga instaladas em usinas hidrelétricas. No entanto não existem recomendações de dimensionamento considerando os efeitos do regime transiente em longos canais que ocorre no início da abertura das válvulas. A maioria deles sugerem dimensões em função do diâmetro do conduto forçado (MAHER; SMITH, 2001); (INEA, 1997); (ESHA, 2006) e da queda topográfica (ELETROBRÁS, 2000) sem fazer uma análise detalhada do regime hidráulico que acontece durante a operação da usina hidrelétrica. O presente trabalho tem por objetivo definir uma regra de operação da abertura das válvulas de turbinas instaladas numa usina hidrelétrica durante o período transiente. O método das Características é usado para solucionar as equações diferenciais parciais de Saint-Venant que governam o escoamento não permanente no canal de adução e na câmara de carga. Adicionalmente, para a busca da melhor solução, um método computacional foi desenvolvido. Sendo a busca da solução ótima da abertura das válvulas um problema de otimização multiobjetivo, por envolver minimização (ou maximização) simultânea de um conjunto de objetivos satisfazendo a um conjunto de restrições, o método de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) é utilizado para determinar a regra de operação procurada.

Palavras-chave: Usinas hidrelétricas, Escoamento não permanente em canais, Equacões de Saint-Venant, Método das Caracterísctcas.

ABSTRACT

Some hydraulic circuits of small hydropower plants contemplate the construction of a forebay tank that serves as a transition between the free surface flow in the adduction channel and the flow under pressure in the penstock. One of the functions of the forebays is to create volumes of water reserve to meet the needs of the turbines during the sudden moments of demand and maintain a sufficient height of water to prevent the entry of air in the penstock. In the specialized literature, there are many recommendations for the dimensioning of forebay tanks installed in hydroelectric plants. However, there are no sizing recommendations considering the effects of the transient regime on large channels that occurs at the beginning of valve opening. Most of them suggest dimensions depending on the diameter of the penstock (MAHER; SMITH, 2001); (INEA, 1997); (ESHA, 2006) and the topographic fall (ELETROBRÁS, 2000) without making a detailed analysis of the hydraulic regime that occurs during the operation of the hydroelectric plant. The present work aims to define a rule of operation for the opening of turbine valves installed in a hydroelectric plant during the transient period. The Characteristics method is used to solve the partial differential equations of Saint-Venant that govern the non-permanent flow in the adduction channel and in the forebay tank. Additionally, to search for the best solution, a computational method was developed. Since the search for the optimal valve opening solution is a multiobjective optimization problem, since it involves simultaneous minimization (or maximization) of a set of objectives satisfying a set of constraints, the Simulated Annealing method is used to determine the Operation rule.

Key words: Hydroelectric power plants, Transient flow in open channels, Saint-Venant equations, Characteristics method.

1. INTRODUÇÃO

O circuito hidráulico das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) geralmente é formado pelo reservatório, a estrutura de tomada de água, o canal de adução, a câmara de carga, o conduto forçado e a casa de máquinas. O dimensionamento da câmara de carga é de vital importância para o correto funcionamento das turbinas na casa de máquinas.

As câmaras de carga são destinadas para: i) Promover a transição entre o escoamento a superfície livre, no canal de adução, e o escoamento sob pressão no conduto forçado; ii) Aliviar o golpe de aríete que se processa no conduto forçado quando ocorre o fechamento brusco do dispositivo de controle de vazões turbinadas; e iii) Fornecer água ao conduto forçado quando ocorre uma abertura brusca desse mesmo dispositivo, até que se estabeleça, no canal de adução, o regime permanente de escoamento (ELETROBRÁS, 2000).

Na literatura especializada existem muitas recomendações para o dimensionamento de câmaras de carga instaladas em usinas hidrelétricas. No entanto não existem recomendações de dimensionamento considerando os efeitos do regime transiente. A maioria deles sugerem dimensões em função do diâmetro do conduto forçado (MAHER; SMITH, 2001); (INEA, 1997); (ESHA, 2006) e da queda topográfica (ELETROBRÁS, 2000) sem fazer uma análise detalhada do regime hidráulico que acontece durante a operação da usina hidrelétrica.

O dimensionamento das câmaras de carga depende do volume de água aduzido e do comprimento do canal de adução, pois deve possuir um volume de água suficiente para, numa abertura brusca da admissão das turbinas, atender a sua demanda mais rapidamente do que seria possível se fosse necessário fazê-lo através do canal, cujo tempo de resposta será tanto maior quanto mais longo for o canal (SCHEREIBER, 1978). No início da operação das turbinas ocorre um transiente sendo função do longo comprimento do canal de adução e do pequeno volume da câmara de carga e para que se possa atingir o regime permanente em tempo mínimo, devem ser estabelecidas regras de operação para estabelecer a quantidade de água turbinada. Além disso as câmaras de carga devem ser dimensionadas com volume suficiente para garantir níveis mínimos de água para cumprir os limites operacionais dos grupos geradores de energia e evitar a geração de vórtices.

Nesta dissertação consideram-se os casos de câmaras de carga em usinas hidrelétricas que não foram bem projetadas. Através do método computacional desenvolvido nesta

dissertação pretende-se proporcionar melhores dimensionamentos de canais e câmaras de carga em usinas hidrelétricas.

Para o dimensionamento da câmara de carga é necessário conhecer o nível estático do reservatório que representaria a energia total do escoamento a montante do circuito hidráulico sendo um parâmetro básico na definição de uma regra operativa. Nesta dissertação pretende-se mostrar estes conceitos através de um estudo de caso. Também é preciso para o dimensionamento da câmara de carga conhecer informações geométricas do canal de adução, assim como sua declividade e rugosidade (expressa pelo coeficiente de Manning), a curva Cota-Área-Volume da câmara de carga é também um dado importante para determinar a regra de operação das turbinas.

1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é apresentado em 7 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho ressaltando os objetivos da mesma. O capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica de dimensionamento de câmaras de carga. O capítulo 3 apresenta conceitos básicos sobre escoamento não permanente em canais e uma revisão de conceitos de otimização de funções multiobjetivo, fazendo ênfases no método de Recozimento Simulado. O capítulo 4 apresenta o método de solução para as equações de Saint-Venant, tanto analítico como numérico. Neste caso o método das Características se desenvolve em detalhe para um canal de seção retangular e de seção qualquer. O capítulo 5 apresenta o estudo de caso para o dimensionamento de uma câmara de carga existente em uma pequena central hidrelétrica, um programa computacional é desenvolvido para a busca da melhor regra de operação das válvulas nas turbinas instaladas na usina hidrelétrica. No capítulo 6 apresenta-se a simulação e resultados obtidos da simulação computacional. O sétimo e último capítulo reúne as principais conclusões da dissertação. Após das referências bibliográficas apresentam-se quatro apêndices, a primeira apresenta as deduções das equações de Saint-Venant e a segunda e terceira os programas computacionais em Linguagem Free Pascal-Lazarus para a determinação da solução ótima do problema em questão e a quarta uma análise de possíveis aberturas de válvula relacionadas com a solução ótima determinada.

1. 2. OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo geral definir uma regra de operação da abertura das válvulas de turbinas instaladas numa usina hidrelétrica garantindo a segurança operacional e sem causar danos às turbinas durante o período transiente que ocorre no momento em que as turbinas são ativadas.

1.2.1 Específico

Os objetivos específicos do presente estudo são:

- Propor regras de operação na fase transiente do escoamento no canal e câmara de carga para que possam atingir o regime permanente em tempo mínimo.
- Definir a vazão turbinada que maximiza a geração de energia, evitando o ingresso de ar nas turbinas, o que prejudicaria seu funcionamento.
- Otimizar de maneira indireta o dimensionamento das câmaras de carga para certos níveis operacionais das turbinas.
- Desenvolver um método para a otimização da busca da melhor regra de operação das turbinas instaladas numa usina hidrelétrica.
- Desenvolver método computacional para simular o escoamento transiente.

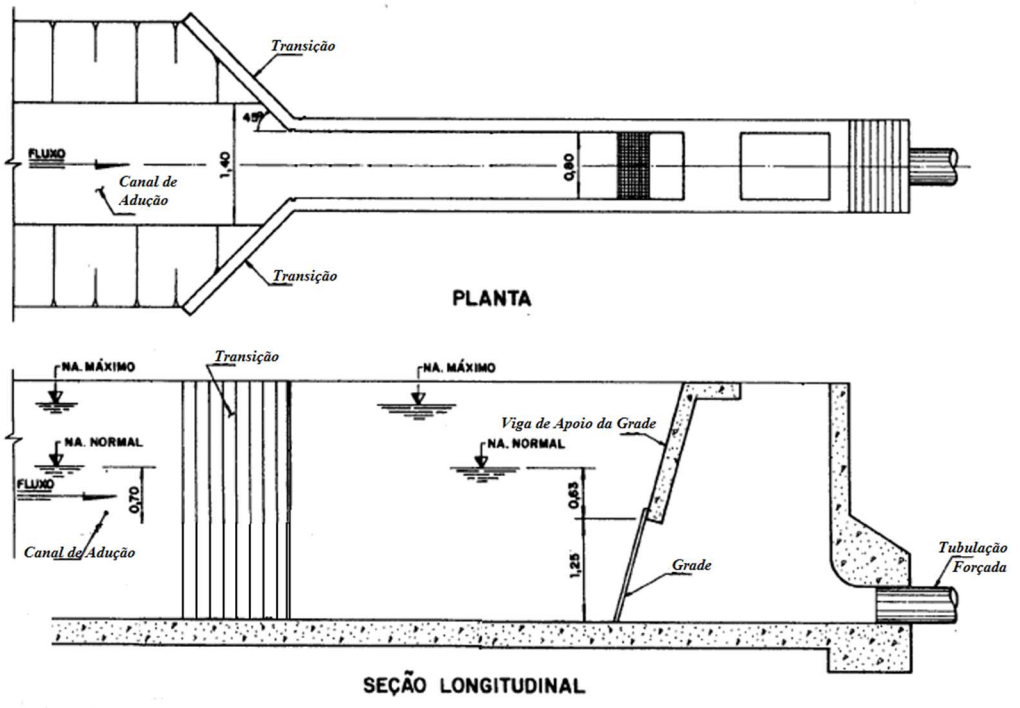
Estas questões serão solucionadas através da modelagem matemática do canal de adução em regime não-permanente pelas equações de Saint-Venant. Estas equações representam as leis de conservação de massa e da quantidade de movimento linear. São duas equações diferenciais parciais que relacionam a vazão escoada e a profundidade de água na seção transversal do canal em função do comprimento do canal e do tempo. A busca da melhor regra de operação é feita pelo algoritmo de otimização de funções multiobjetivo chamado de método de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As câmaras de carga são estruturas comuns em pequenas usinas hidrelétricas. Segundo INEA, (1997) e MAHER; SMITH, (2001) as câmaras de carga tem as seguintes funções: permitir a conexão entre o canal de adução e o conduto forçado; fornecer a sedimentação e a eliminação da mesma dos materiais sólidos que chegam desde o reservatório; impedir a entrada ao conduto forçado de materiais sólidos, de arrastro e flutuantes; evacuar o excesso de água nas horas em que a quantidade consumida pelas turbinas é inferior à vazão do projeto; criar volumes de reserva de água que permita satisfazer as necessidades das turbinas durante os momentos bruscos de demanda; e manter sobre a entrada do conduto de força uma altura suficiente de água para evitar a entrada de ar.

De acordo com ELETROBRÁS-DNAEE (1985), diferentes configurações para câmaras de carga com adução em baixa pressão e tubulação são apresentadas nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3. Na Figura 2.1 a seção do canal de adução é trapezoidal e é necessário a construção

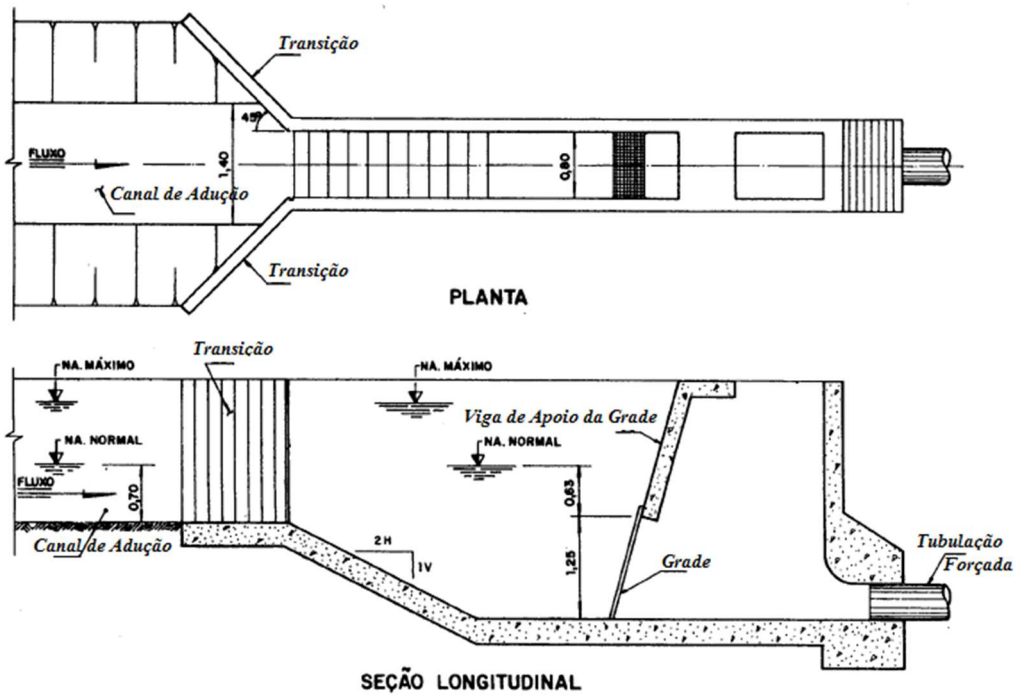
FIGURA 2.1: CÂMARA DE CARGA COM ADUÇÃO EM BAIXA PRESSÃO NUM CANAL A CÉU ABERTO.



FONTE: ELETROBRÁS-DNAEE (1985)

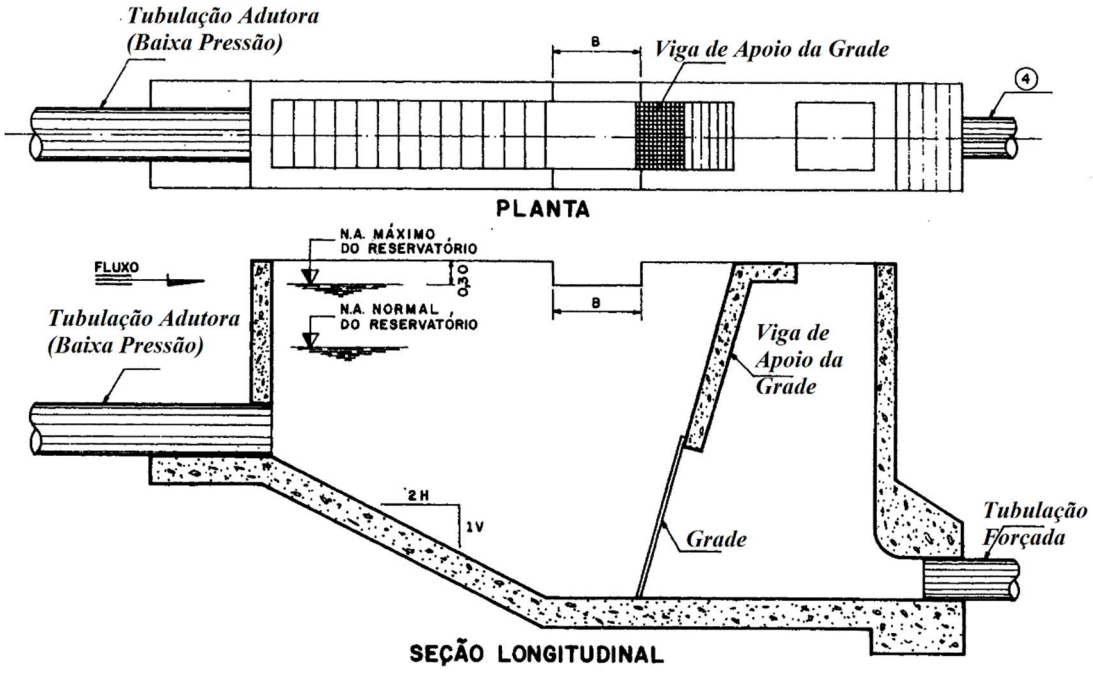
de uma transição de entrada para a mudança de seção trapezoidal para retangular. Na mesma Figura 2.1 a câmara de carga tem um volume pequeno, pois ele tem uma largura pequena mas sim um maior comprimento. Pode-se ter um maior volume na câmara de carga ao aumentar a profundidade da câmara de carga como se observa nas Figuras 2.2 e 2.3. Observe-se da Figura 2.1 que a declividade do fundo do canal de adução é a mesma que da câmara de carga. Isto é diferente para o caso das Figuras 2.2 e 2.3, onde as condições topográficas podem reger os níveis finais para o final do canal de adução e o fundo da câmara de carga. ELETROBRÁS (1985), recomenda que a transição entre o fundo do canal e o fundo da câmara de carga deve ser efetuada em rampa recomendando-se que não seja superior a 1V:2H. A maioria das câmaras de carga tem construído uma viga de apoio para a grade. A grade serve para impedir a entrada ao conduto forçado de materiais sólidos de arrastro e flutuantes. A grade tem que ser de material anticorrosivo. Quando a adução em baixa pressão for projetada através de uma tubulação, Figura 2.3, a câmara de carga será apenas um recipiente de transição à tubulação forçada, não sendo equipada com comporta e desarenador.

FIGURA 2.2: CÂMARA DE CARGA COM ADUÇÃO EM BAIXA PRESSÃO NUM CANAL A CÉU ABERTO (ENTRADA COM DECLIVIDADE).



FONTE: ELETROBRÁS-DNAEE (1985)

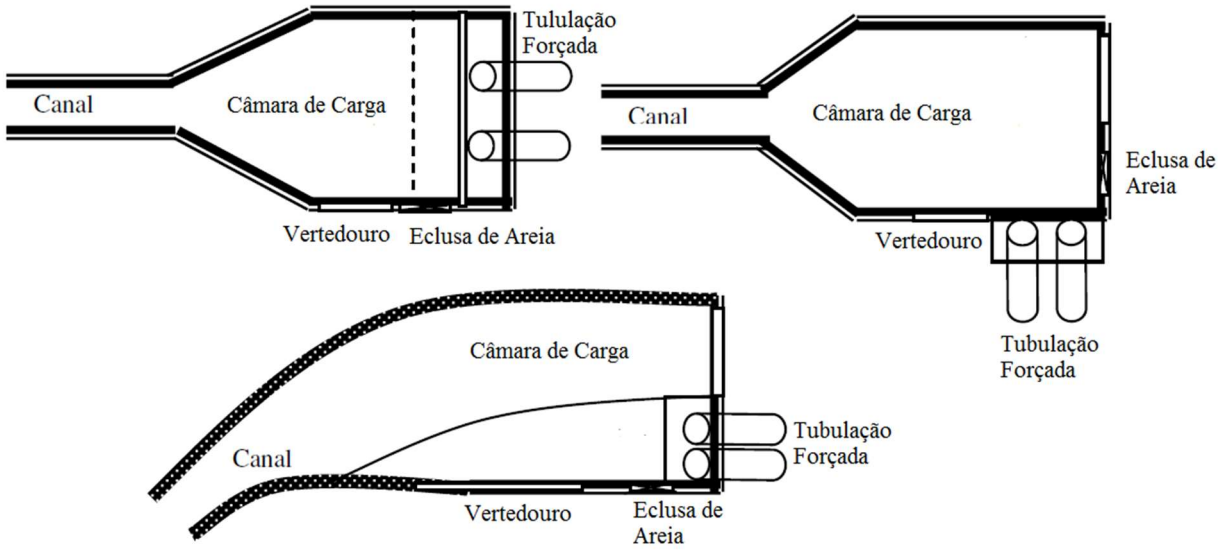
FIGURA 2.3: CÂMARA DE CARGA CASO DE ADUÇÃO ATRAVÉS DE TUBULAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO.



FONTE: ELETROBRÁS-DNAEE (1985)

Existem outras configurações para câmaras de carga como as apresentadas por RAMOS (2000) e mostrada na Figura 2.4. Observa-se da Figura 2.4 que as câmaras de

FIGURA 2.4: CONFIGURAÇOES GERAIS PARA CÂMARAS DE CARGA.

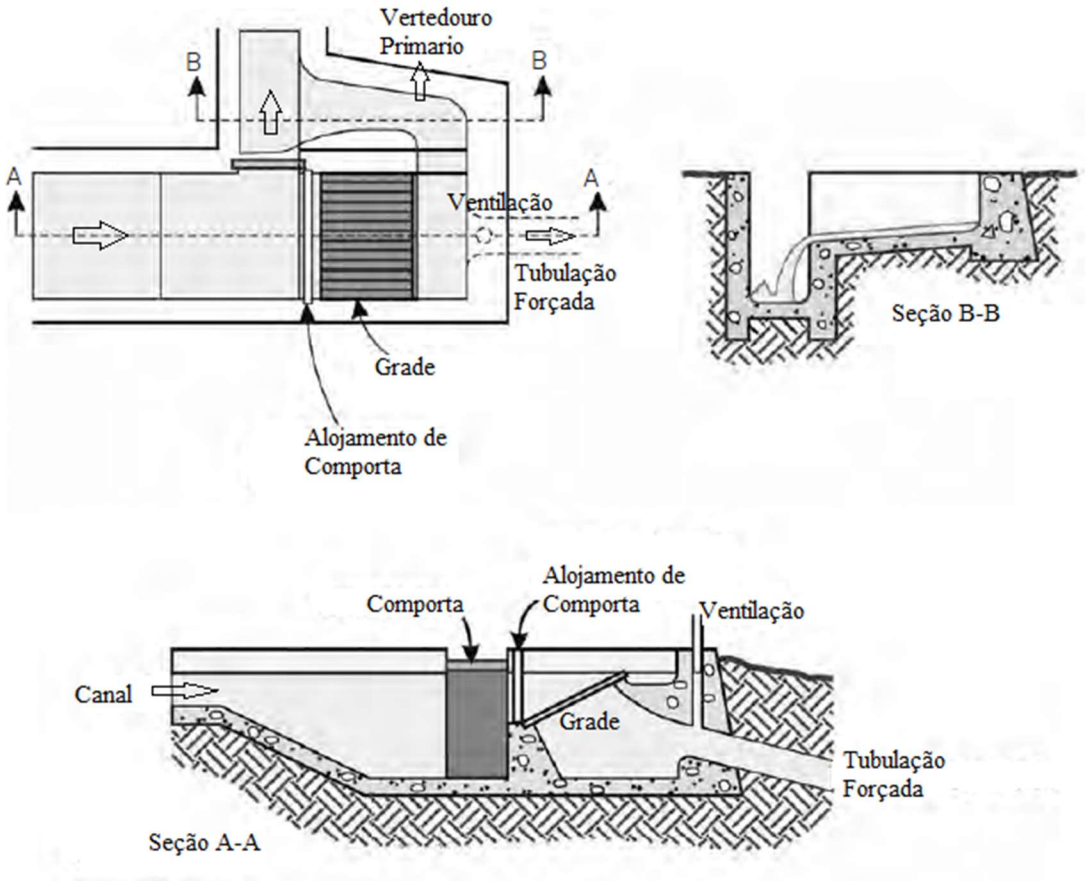


FONTE: RAMOS (2000)

carga são maiores com respeito à largura do canal de adução. Essa diferença observa-se nas Figuras 2.1 a 2.3 das câmaras de carga apresentadas por ELETROBRÁS (1985). Também observa-se da Figura 2.4 que a saída do conduto forçado tem três possíveis localizações e duas saídas para cada, isto deve-se as condições topográficas.

As câmaras de carga têm basicamente quatro vias de movimento do fluido (MUGUERZA, 2005). Como mostrado na Figura 2.5, a primeira é a entrada pelo canal que traz água desde o reservatório. A segunda é um vertedouro ou tubulação para eliminar os excedentes de vazão que não são turbinados. A terceira é um descarregador do fundo que permite o esvaziamento e a limpeza das partículas sedimentadas. A quarta é a alimentação para as turbinas através dos condutos forçados.

FIGURA 2.5: DIFERENTES SEÇÕES NUMA CÂMARA DE CARGA.



FONTE: MUGUERZA (2005)

Para o dimensionamento das câmaras de carga, INEA (1997) recomenda que para o caso de uma câmara de carga com entrada através de uma tubulação, o volume da câmara de carga será determinado como:

$$V = \frac{0{,}693\ A\ V_0^2}{ig}, \tag{2.1}$$

onde V é o volume teórico da câmara de carga em m^3, A é a área da tubulação em m^2, V_o é a velocidade na tubulação de chegada à câmara de carga em m/s, i é a declividade da tubulação de chegada à câmara de carga em m/m e g é a aceleração da gravidade em m/s^2.

Para evitar a formação de remoinhos acima da entrada do conduto forçado e que levam ar às turbinas, INEA (1997) recomenda que a altura mínima sobre a entrada do conduto forçado deve ser calculada por:

$$h_{min} = \frac{0{,}543VD}{2}, \tag{2.2}$$

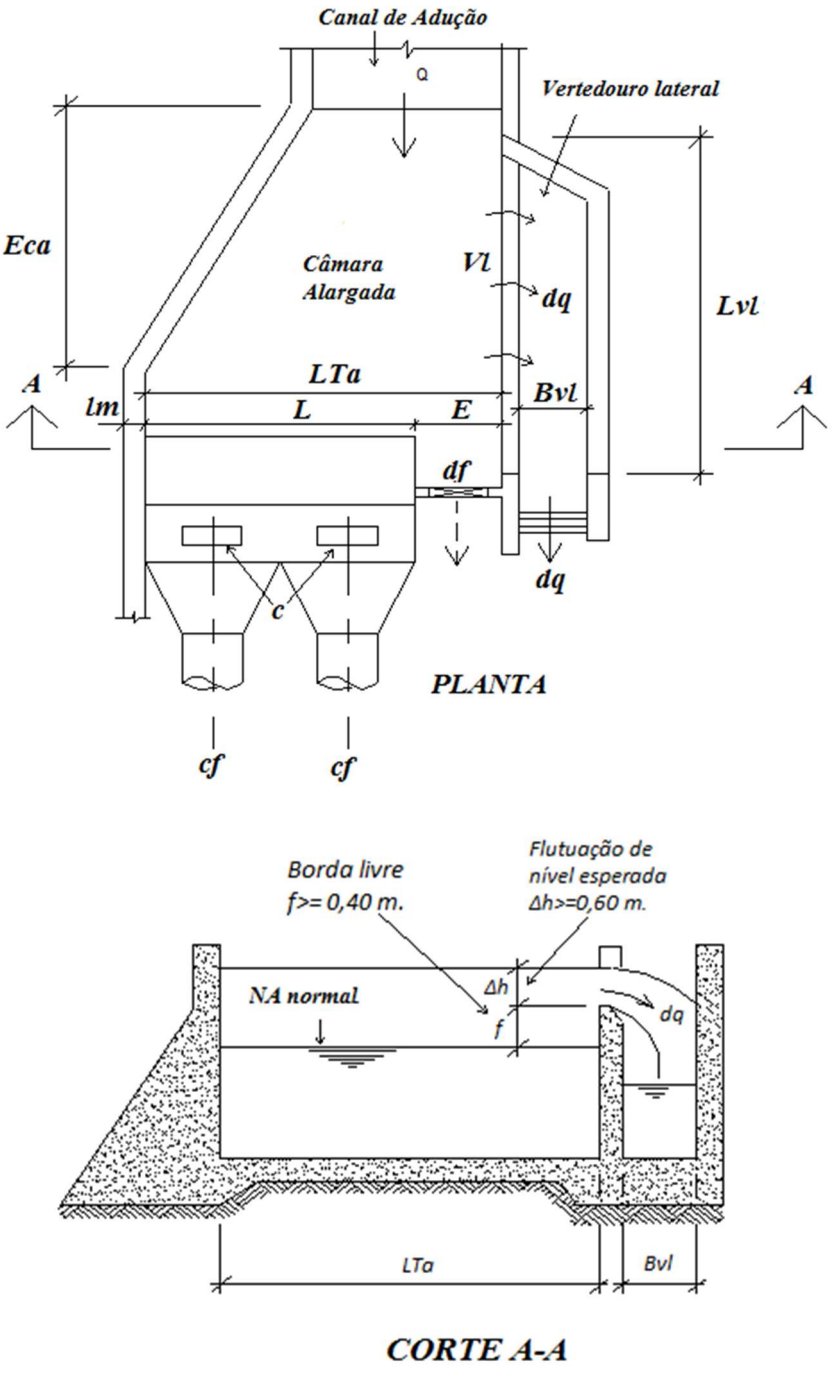
onde $h\ min$ é a altura mínima sobre o conduto forçado em m, V é a velocidade no conduto forçado em m/s e D é o diâmetro do conduto forçado em m.

Por outro lado, ELETROBRÁS (2000) recomenda para o dimensionamento do volume das câmaras de carga: com queda até 10 m (entre a câmara de carga e a casa de máquinas) a câmara de carga não precisa ter volume significativo. No entanto para alturas compreendidas entre 10 e 25 m, haverá a necessidade de se prever, por exemplo, um alargamento na transição entre o canal de adução e a tomada d'água propriamente dita, como mostrado na Figura 2.6. Para alturas de queda maiores que 25 m, a câmara de carga, como estimativa preliminar, deverá ter um volume de água suficiente para atender ao funcionamento pleno de uma turbina, com vazão de projeto, durante 60 segundos, aproximadamente. Esse período de tempo é o considerado necessário para que a inércia da massa d'água no interior do canal entre em regime de escoamento normal.

ELETROBRÁS (2000) destaca que o dimensionamento final da câmara de carga, para quedas elevadas, maiores que 25 m, deverá ser elaborado por engenheiros hidráulicos e

mecânicos, em conjunto, levando em consideração, evidentemente, as características da turbina definidas pelo fabricante. A Figura 2.6 mostra a configuração de uma câmara de carga sugerida por ELETROBRÁS (2000) e a Tabela 2.1 apresenta algumas dimensões sugeridas para a mesma câmara de carga.

FIGURA 2.6: DIMENSIONAMENTO DAS CÂMARAS DE CARGA.



FONTE: Adaptado de ELETROBRÁS (2000)

onde:

LTa : Largura máxima da câmara alargada
dq : Descarga pelo vertedouro lateral
Vl : Vertedouro lateral
df : Descarga de fundo
c : Comportas
cf : Tubulação forçada
Eca : Extensão da câmara alargada
Lvl : Comprimento da crista do vertedouro lateral de soleira fixa
Bvl : Largura do vertedouro lateral de soleira fixa

NOTA: Os valores de *Lvl*, *Bvl* e Eca deverão ser adotados em função da flutuação de nível esperada = Δh, conforme Tabela 2.1:

TABELA 2.1 - DIMENSÕES SUGERIDAS PELA ELETROBRÁS (2000) PARA CÂMARAS DE CARGA (FIG. 2.6).

FLUTUAÇÃO DE NÍVEL	DIMENSÕES (m)		
Δh (m)	*Lvl*	*Bvl*	*Eca*
0,6	20	1,2	30
0,8	14	1,6	21
1,0	10	2	15

FONTE: ELETROBRÁS (2000)

Segundo MAHER e SMITH (2001) o dimensionamento ou escolha da câmara de carga pode variar dependendo dos seguintes fatores: acessibilidade ao lugar onde ficara a câmara de carga, disponibilidade dos materiais para sua construção, tipo de solo e custos da mão de obra. No entanto, recomenda que todo os dimensionamentos incluam um vertedouro e algum meio de drenagem para permitir que a câmara de carga sempre esteja limpa. A profundidade de água na câmara de carga deveria ser suficiente para cobrir o conduto forçado em 4 vezes seu diâmetro.

Segundo o IITR (2008) para um dimensionamento preliminar do volume da câmara de carga é calculado com:

$$V = Q_P \, x \, 120 \, , \tag{2.3}$$

onde: V é o volume preliminar da câmara de carga em m^3 e Q_P é a vazão, capacidade de condução pelo conduto forçado em m^3/s. O mesmo estudo recomenda que a área da câmara de carga deveria ser calculada assumindo uma diferença de 1,0m a 2,0m entre o nível mínimo de operação da câmara de carga e o nível da crista do vertedouro.

Sob aspecto hidráulico, o dimensionamento de câmaras de carga segundo SOUZA et al (2009) deve atender duas condições críticas de operação da Central Hidrelétrica:

- Em partida brusca, isto é, quando se aberturam as válvulas, garantir que não entre ar no conduto forçado.
- Em parada brusca, garantir estabilidade funcional da câmara de carga e do canal adutor.

Eles estabelecem que para atender a primeira condição, é indispensável que o volume de água útil armazenado na câmara de carga seja compatível com a variação da vazão desde zero até seu valor máximo.

A segunda condição pode ser atendida com dimensionamento de um extravasor lateral no canal adutor o mais próximo possível da câmara de carga, que absorva as oscilações do nível na câmara de carga oriundas das variações de carga no grupo gerador, escoando a vazão em excesso.

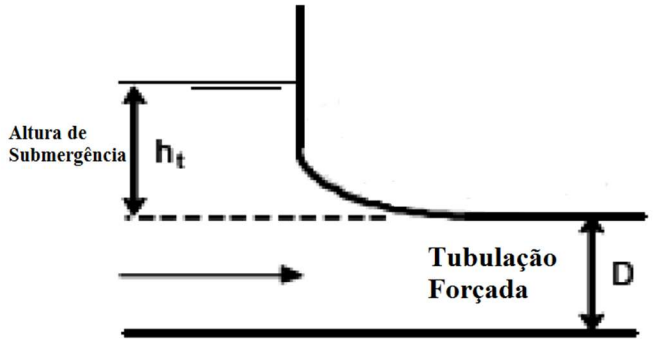
Um aspecto muito importante que os projetistas de estruturas hidráulicas têm em consideração é a vorticidade que são geradas nas câmaras de carga. Os vórtices nas câmaras de carga têm como resultado um escoamento de água não uniforme, introduzindo ar no escoamento de água que cria vibrações, cavitação e desequilíbrio nas turbinas; os vórtices também geram maiores perdas de carga e diminuem o desempenho das turbinas, mesmo assim eles arrastam maleza à câmara de carga (ESHA, 2006).

Os critérios para evitar a vorticidade não são bem definidas e não há fórmula que leva em conta todos os fatores que favorecem a sua formação. Segundo o Comitê ASCE em câmaras de carga (Committee on Hydropower Intakes), ASCE (1995), a vorticidade pode ser induzida por geometria assimétrica, imersão inadequada, velocidades superiores a 0,65 m/s e alterações bruscas de direção do escoamento.

A falta de imersão da tubulação forçada e uma geometria assimétrica são as principais

causas da formação de vórtices. Se o tubo está suficientemente submerso e o escoamento de água é simétrico, é muito pouco provável que os vórtices sejam formados. Há uma variedade de fórmulas empíricas para definir a imersão mínima necessária para evitar que os vórtices sejam formados, mas não há teoria alguma para explicar o problema completamente tendo em conta todos os parâmetros que o tornam possível. O grau mínimo de submergência é definido na Figura 2.7 como h_t.

FIGURA 2.7: ALTURA MINIMA DE SUBMERGÊNCIA.



FONTE: ESHA (2006)

A submergência é definida por h_t. As seguintes fórmulas podem ser utilizadas para calcular seu valor mínimo e assim evitar a vorticidade (ESHA, 2006):

Knauss
$$h_t \geq D\left(1 + 2{,}3\frac{V}{\sqrt{gD}}\right), \tag{2.4}$$

Nagarkar
$$h_t \geq 4{,}4\,(V\,D^{0{,}50})^{0{,}54}, \tag{2.5}$$

Rohan
$$h_t \geq 1{,}74\,V^{0{,}48}\,D^{0{,}76}, \tag{2.6}$$

Gordon
$$h_t \geq c\,V\,\sqrt{D}, \tag{2.7}$$

Com c = 0,7245 para a geometria assimétrica

e c = 0,5434 para a geometria simétrica

Onde, V é a velocidade média da corrente em m/s e D é o diâmetro hidráulico em m da tubulação.

3. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

3.1. ESCOAMENTO NÃO-PERMANENTE EM CANAIS

As condições de escoamento em canais variam geralmente com o tempo e com o espaço, portanto os escoamentos são chamados de não uniformes e não permanentes. Essas variações devem-se a processos naturais, ações humanas ou devido a acidentes ou incidentes (CHAUDHRY, 2008).

A análise do escoamento não permanente é mais complexa do que a análise do escoamento permanente. Para aplicações em uma dimensão os parâmetros mais importantes como a velocidade e a profundidade são funções do tempo e da distância. As equações diferenciais parciais de Saint-Venant descrevem os escoamentos não permanentes tendo em conta que as variáveis dependentes (profundidade e velocidade do escoamento) são funções das variáveis independentes (espaço e tempo). Soluções analíticas das equações básicas do escoamento não permanente são quase impossíveis devido a sua não linearidade (CHANSON, 2004a). As equações de Saint-Venant podem ser solucionadas mediante técnicas numéricas aproximadas para alguns casos específicos.

Existem vários métodos que podem ser utilizados para solucionar numericamente as equações de Saint-Venant (equações da continuidade e dinâmica), como por exemplo: método das características, diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos, etc.

No método das Características, as equações diferenciais parciais são convertidas em equações diferenciais ordinárias, as quais são resolvidas numericamente. No método de diferenças finitas, as derivadas parciais são substituídas por quocientes de diferenças finitas e as equações resultantes são resolvidas algebricamente. No método de Elementos Finitos, o sistema é dividido num número de elementos e as equações diferenciais parciais são integradas nos pontos nodais dos elementos. A forma integral da equação da conservação é utilizada como ponto de partida pelo método dos volumes finitos. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle (VC) contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada VC (CHAUDHRY, 1979).

Em um canal com escoamento de água em regime não permanente tanto as velocidades como as alturas mudam com o tempo e com o espaço. Baseado no teorema de transporte de Reynolds e aplicado a um volume de controle é possível obter duas equações diferenciais

parciais de segunda ordem, hiperbólicas, que descrevem o movimento da água no canal em estado transiente, estas equações são chamadas de equações de Saint-Venant.

Para a aplicação das equações de Saint-Venant é necessário ter em conta certas suposições básicas para sua aplicação, que são: (a) velocidade variável na direção longitudinal; (b) em cada seção utiliza-se a velocidade média; (c) a distribuição de pressões, ao longo da vertical, na seção transversal é hidrostática; (d) as acelerações verticais não são consideradas; (e) o escoamento é unidimensional (1D); (f) o fluido é considerado incompressível ou de densidade constante; (g) a declividade do leito do canal é suficientemente pequena para que se possa aproximar o seno do ângulo da declividade pela tangente; (h) perdas de energia são estimadas pela equação de Manning ou similar; (i) o canal deve ser aproximadamente retilíneo, com pequena declividade e leito estável (HENDERSON, 1966).

Considerando escoamento unidimensional e baseado na Figura 3.1, as equações de Saint-Venant são:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + V\frac{\partial A}{\partial x} + A\frac{\partial V}{\partial x} = q(t)\ , \tag{3.1}$$

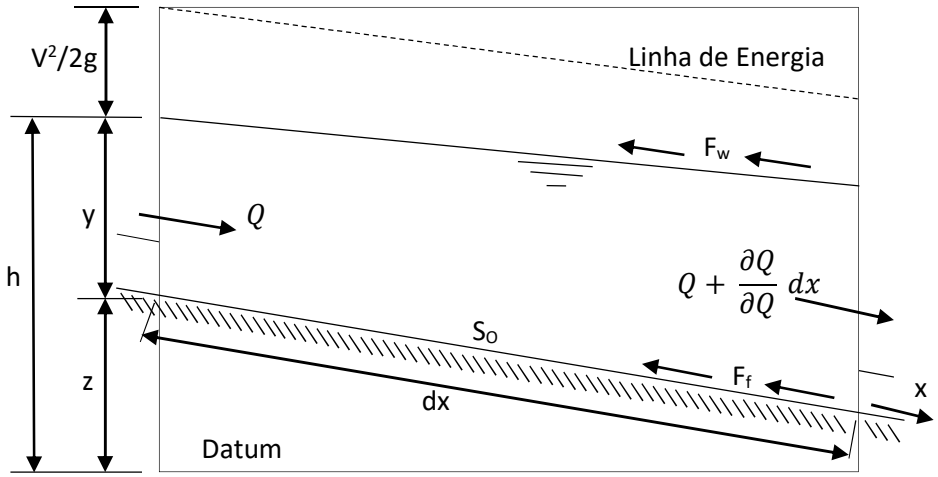
$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{A}q(t) + \frac{g}{B}\frac{\partial A}{\partial x} = g(S_o - S_f)\ , \tag{3.2}$$

onde, $A(x,t)$ é a área da seção transversal, $V(x,t)$ é a velocidade, $q(t)$ é o escoamento lateral uniforme distribuído ao longo ou em trechos do canal, x é a distância ao longo do canal, t é o tempo, B é a largura do canal na superfície da água, g é a aceleração devido à gravidade, S_o é a declividade do fundo e S_f é a declividade devido à resistência ao escoamento. Nota-se que $(V/A)q(t)$ é o termo de momento devido ao escoamento lateral. A declividade da linha de energia, S_f, pode ser obtido por meio da fórmula de Manning (MAHMOOD; YEVDJEVICH, 1975):

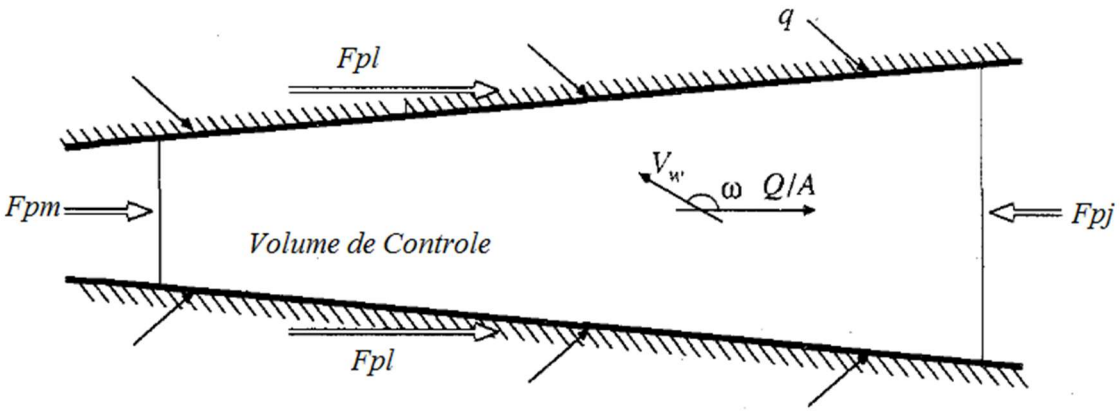
$$S_f = \frac{V|V|n^2}{R^{4/3}}\ , \tag{3.3}$$

onde, n é o coeficiente de Manning ou coeficiente de atrito; e R é o Raio hidráulico.

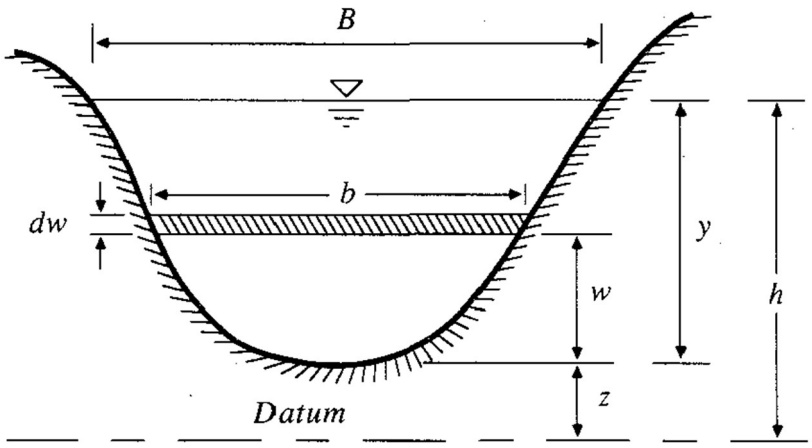
FIGURA 3.1: ILUSTRA TRÊS PONTOS DE VISTA DO VOLUME DE CONTROLE: (a) UMA VISTA DE ELEVAÇÃO DO LADO, (b) UMA VISTA EM PLANTA DE CIMA, E (c) UM CORTE TRANSVERSAL DO CANAL.



(a)



(b)



(c)

FONTE: Adaptado de VENT TE CHOW (1988)

No Apêndice A se faz uma dedução detalhada das equações de Saint-Venant.

Devido às dificuldades na obtenção de soluções analíticas a partir das equações de Saint-Venant, diferentes abordagens numéricas têm sido utilizadas para aproximar a solução das equações de Saint-Venant. Por exemplo, PONCE (1990) desenvolveu uma equação de onda de difusão generalizada, que inclui efeitos inerciais, e é baseada nos análogos lineares das equações completas de continuidade e movimento do escoamento de superfície livre (WANG, 2003).

Para resolver as equações diferenciais governantes (3.1) e (3.2) vários esquemas numéricos de primeira ordem (espaço e tempo) foram relatados na literatura (LIGGETT e WOOLHISER, 1967; LIGGETT e CUNGE, 1975; FREAD, 1974; CUNGE et al, 1980). Estes incluem métodos de diferenças finitas implícitos e explícitos e método das características.

3.2. PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Problemas de otimização são comuns e aparecem quando procura-se determinar os valores extremos de uma função, isto é, o maior ou menor valor que uma função pode assumir em um dado intervalo.

Nesta dissertação o problema em questão surge na determinação da regra de operação da abertura da válvula da turbina instalada na usina hidrelétrica. Para solucionar este problema

é necessário utilizar um método de otimização que maximize a geração de energia durante o período transiente e minimize o período transiente. Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, determinísticos ou probabilísticos (heurísticos).

Os métodos de otimização baseados nos algoritmos determinísticos – maioria dos métodos clássicos – geram uma sequência determinística de possíveis soluções requerendo, na maioria das vezes, o uso de pelo menos a primeira derivada da função objetivo em relação às variáveis de projeto. Nestes métodos, a função objetivo e as restrições são dadas como funções matemáticas e relações funcionais. Além disso, a função objetivo deve ser contínua e diferenciável no espaço de busca (BASTOS, 2004).

Os métodos probabilísticos ou heurísticos, também conhecidos como métodos naturais, se caracterizam pela busca da melhor solução através de regras de probabilidade, trabalhando de maneira "aleatória orientada". Tais métodos utilizam apenas as informações da função de otimização, não requerendo informações sobre suas derivadas ou possíveis descontinuidades (SARAMAGO; STEFFEN JR., 2008). Estas técnicas requerem um número elevado de avaliações do problema. Isto é necessário para que exista a possibilidade do método de explorar devidamente toda a região do espaço de busca em que está contida a solução ótima, resultando em um grande número de avaliações da função para encontrar a solução.

Os métodos naturais são procedimentos iterativos que tentam simular os processos usados na natureza para resolver problemas difíceis. Entre as técnicas mais conhecidas pode-se citar Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), Busca Tabu é um grupo de métodos baseados em população. Neste último grupo, destacam-se os Algoritmos Evolutivos ou Evolucionários (Algoritmos Genéticos, Estratégias de Evolução, Evolução Diferencial, etc.) e os algoritmos baseados na inteligência coletiva (otimização por enxame de partículas, colônias de formigas, etc.) (SARAMAGO; STEFFEN JR., 2008).

3.3. MÉTODO DE RECOZIMENTO SIMULADO

O método do Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) é uma técnica para solucionar problemas de otimização. É um tipo de método de busca local probabilística e se fundamenta numa analogia com a termodinâmica do processo de recozimento de metais

(METROPOLIS et al., 1953; EGLESE, 1990). Neste processo, os metais são aquecidos acima de seu ponto de fusão e resfriados lentamente, de forma a se organizarem em estruturas cristalinas de mínima energia. Em métodos de busca local clássicos, a partir da solução atual é gerada uma nova solução-tentativa, e esta substitui a anterior se o valor da função objetivo (energia) associada for menor. Na técnica de recozimento simulado, transições para soluções de maior energia são permitidas segundo uma certa probabilidade, evitando assim que o método fique preso na bacia de atração de um mínimo local.

O conceito foi introduzido por Metropolis et al. (1953) para solucionar problemas de mecânica estatística usando o método de Monte Carlo. Pelo algoritmo de Metropolis gera-se uma sequência de estágios. Se o valor da função objetivo (fob) no estágio inicial é E_i, então um mecanismo de perturbação é aplicado, gerando uma fob E_j no segundo estágio. Se $E_j < E_i$, então j será o segundo estágio. De outra forma, E_j pode ser aceito como o próximo estágio de acordo com probabilidade p, proporcional ao fator de Boltzmann:

$$p = e^{\frac{Ei-Ej}{kT}}, \tag{3.4}$$

sendo k a constante de Boltzmann, $k = 1{,}38064\text{x}10^{-23}$ J/K e T a temperatura do processo.

A probabilidade p é calculada e comparada com um número (r) aleatório e contínuo, uniformemente distribuído entre 0 e 1. A nova solução será aceita se $p > r$, caso contrário, ignorada. O parâmetro de controle T é a temperatura que se inicia com um valor alto e é gradativamente reduzida, no final do processo T é reduzida para um ponto onde somente as melhores soluções são aceitas. O algoritmo para quando um valor para o parâmetro T seja satisfeito ou quando a função objetivo é atendida.

O algoritmo do Recozimento Simulado (KAVISKI et al, 2007); (BURGER, 2014) pode ser descrito pelos seguintes passos:

(i) Escolha de uma configuração inicial.

(ii) Teste da viabilidade da configuração inicial e cálculo da fob: E_1. Esta configuração é chamada de configuração atual: E_a.

(iii) Estabelecimento de uma temperatura T e de um esquema de aquecimento.

(iv) Com *j* variando de *1* até o número de estagios, deve-se repetir os passos (v) e (vi).

(v) Imposição de uma pequena perturbação aleatória na configuração atual para obter uma solução candidata, com fob igual a E_{j+1};

(vi) Teste da viabilidade da solução candidata: Se $E_{j+1} < E_a$, então a solução candidata é aceita como atual (e também como candidata a ótima); senão o critério de Metropolis é testado: se $u < p$ então a solução candidata é aceita como atual. A variável u representa um número aleatório uniforme entre 0 e 1.

(vii) Repete-se os passos (v) e (vi) até que o número máximo de simulações atinja o valor máximo estipulado.

3.3.1 Otimização Multiobjetivo

Segundo TICONA (2003), citado por PANTUZA JR. (2011), a maior parte dos problemas reais encontrados na área de otimização envolve a obtenção de diversas metas que devem ser atingidas simultaneamente. Elas geralmente são conflitantes, ou seja, não existe uma solução única que otimize todas ao mesmo tempo. Conjunto de soluções eficientes são necessárias para a solução desta classe de problemas.

Problemas dessa natureza são chamados de problemas de otimização multiobjetivo por envolverem minimização (ou maximização) simultânea de um conjunto de objetivos satisfazendo a um conjunto de restrições. Para ARROYO (2002) neste caso, a tomada de decisão será de responsabilidade do analista, que deverá ponderar os objetivos globais do problema e escolher uma entre as soluções do conjunto de soluções eficientes.

Segundo HORN (1997), na solução de problemas multiobjetivos, dois problemas podem ser identificados: busca de soluções e tomada de decisões. O primeiro refere-se ao processo de otimização no qual o conjunto de soluções viáveis, ou factíveis, deve ser guiado para o encontro do conjunto de soluções Pareto-Ótimas. O segundo problema, de tomada de decisões, consiste na seleção de um critério apropriado para a escolha de uma solução do conjunto Pareto-Ótimo. Este critério será utilizado pelo responsável para a tomada de decisão, ou seja, ele poderá ponderar entre as diferentes soluções conflitantes.

Para PANTUZA JR. (2011), um problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado como:

$$minimizar \;\; z = f(x) = (f_1(x), f_2(x), ..., f_{OB}(x)) \tag{3.5}$$

$$\text{sujeito a : } \; g(x) = (g_1(x), g_2(x), g_3(x), ..., g_r(x) \leq b \tag{3.6}$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, ... x_n) \in X \tag{3.7}$$

$$z = (z_1, z_2, z_3, ... z_r) \in Z \tag{3.8}$$

na qual x é o vetor de decisão, OB o número de objetivos, z é o vetor objetivo, X denota o espaço de busca de decisões, e $z = f(x)$ é a imagem de X, denominada espaço objetivo.

O conjunto de restrições $g(x) \leq b \mid b \in R^+$ e o espaço X determinam o conjunto das soluções viáveis ou factíveis: $X^* = \{x \in X \mid g(x) \leq b\}$.

Portanto, o problema multiobjetivo pode ser escrito da forma:

$$minimizar \;\; z = (f_1(x), f_2(x), ..., f_r(x)) \tag{3.8}$$

$$\text{sujeito a : } x \in X^* \tag{3.9}$$

A imagem de X^* é denominada espaço objetivo factível e é denotada por $Z^* = f(X^*) = \{f(x) \mid x \in X^*\}$.

Geralmente adota-se:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{r} w_i \, f_i(x)$$

sendo, os w_i pesos escolhidos a priori.

4. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT

Neste capítulo estuda-se o método das Características para solução das equações de Saint-Venant. Para o problema em questão, as equações de Saint-Venant podem ser solucionadas numericamente.

As equações de Saint-Venant constituem um sistema de equações diferenciais parciais hiperbólicas e somente podem ser solucionadas analiticamente para casos particulares. Em geral são solucionadas por meio de métodos computacionais. Existem inúmeros métodos que podem ser utilizados para solucionar numericamente, entre eles o método das diferenças finitas, método elementos finitos, método de volumes finitos, método das características, etc. O método das Características é uma técnica matemática que partindo de duas equações diferenciais parciais chegam a quatro equações diferenciais ordinárias. Duas destas equações correspondem à Característica C+ e as outras duas ás Característica C−. Estas equações são resolvidas aplicando o esquema de diferenças finitas no plano x-t (MAHMOOD K., YEVDJEVICH, V., 1975).

Para ilustrar o uso do método das Características, apresenta-se um exemplo de estudo de câmara de carga de uma usina hidrelétrica para um problema particular simplificado.

4.1. SOLUÇÃO ANALÍTICA PELO MÉTODO DAS CARACTERISTICAS

O escoamento não permanente em canais geralmente é avaliado através de soluções numéricas principalmente pelo fato da dificuldade de obtenção de soluções analíticas da equação de Saint-Venant. Embora os métodos numéricos sejam poderosas ferramentas para resolver problemas complexos não-lineares, soluções analíticas, utilizando aproximações e simplificações razoáveis, fornecem informações qualitativas, permitem identificar relações entre as variáveis, realizar aproximações e simplificações, e podem ser ajustadas aos casos reais mediante uso de coeficientes apropriados (MANNICH, 2008). Mesmo assim as soluções analíticas também podem ser utilizadas para avaliar a precisão de esquemas numéricos.

As equações diferenciais parciais de Saint-Venant descrevem os escoamentos não permanentes tendo em conta que as variáveis dependentes (profundidade e velocidade do escoamento) são funções das variáveis independentes (espaço e tempo). Soluções analíticas

das equações básicas do escoamento não permanente são quase impossíveis devido a sua não linearidade (CHANSON, 2004). As equações de Saint-Venant somente podem ser solucionadas mediante técnicas numéricas aproximadas para alguns casos específicos ou problemas simplificados.

No estudo de ondas positivas e negativas existem casos particulares que podem ser solucionados utilizando técnicas numéricas. Assim, uma particular aplicação das ondas negativas estuda-se em câmaras de carga de usinas hidrelétricas. A propagação destas ondas pode estar associada a um incremento repentino na descarga no conduto forçado.

CHANSON (2004b) apresenta um exemplo sobre o funcionamento de uma câmara de carga instalada numa usina hidrelétrica. A seguir se faz uma análise detalhada de uma câmara de carga instalada em uma usina hidrelétrica utilizando o método das características.

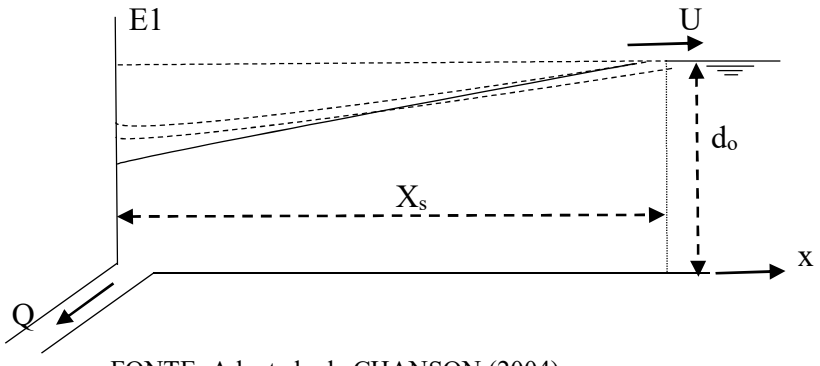
Por exemplo a descarga inicial, através do conduto forçado, de uma usina hidrelétrica abastecida por um canal de pequena declividade causa uma perturbação no nível da superfície de água inicialmente horizontal, surgindo uma onda negativa como mostrado na Figura 4.1.

O problema consiste em determinar qual é a vazão máxima que poderá suportar a câmara de carga segundo as necessidades das turbinas e em função do nível inicial de água, d_o, dentro da câmara de carga y a largura, B, da câmara de carga e fundo horizontal.

As condições iniciais de escoamento são:

$$d = d_o \text{ e } V_o = 0. \tag{4.1}$$

FIGURA 4.1: CÂMARA DE CARGA PARA UM CANAL DE ADUÇÃO DE SEÇÃO RETANGULAR.



FONTE: Adaptado de CHANSON (2004)

Considera-se um ponto E_1 localizado em x=0, ou seja, no início do conduto forçado, ver Figura 4.2, a característica negativa a partir deste ponto intercepta a característica positiva inicial, satisfazendo a seguinte condição:

$$V_{E1} - 2C_{E1} = V_o - 2C_o\,, \tag{4.2}$$

resultando:

$$V(x=0) = 2(C(x=0) - C_o), \tag{4.3}$$

onde *V* é negativo de acordo com a convenção de sinal utilizado na Figura 4.1, isto é, positivo para a direita. A vazão pode ser obtida para a câmara de carga retangular como:

$$Q = VA = V(Bd) = VBd(x=0), \tag{4.4}$$

onde, *B* é a largura da câmara de carga.

$$Q = 2Bd(x=0)\left(\sqrt{gd} - \sqrt{gd_o}\right). \tag{4.5}$$

Para determinar a descarga máxima deriva-se Q na equação anterior respeito a profundidade d, e igualamos a zero para obter a relação entre *d* e d_o.

$$Q = 2Bd(\sqrt{gd} - \sqrt{gd_o}) \tag{4.6}$$

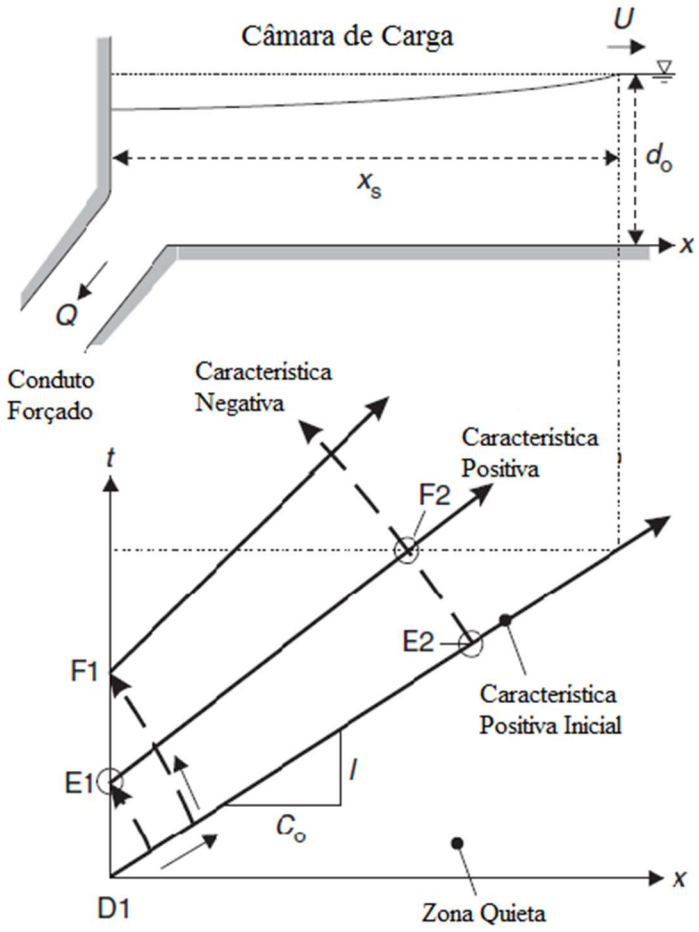
$$Q = 2Bd\,(gd)^{1/2} - 2Bd\,(gd_o)^{1/2} \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial d} = 2Bg^{\frac{1}{2}}\left(\frac{3}{2}\right)d^{\frac{1}{2}} - 2B\,g^{\frac{1}{2}}\,d_o^{\frac{1}{2}} = 0 \tag{4.8}$$

$$\left(\frac{3}{2}\right)d^{\frac{1}{2}} = d_o^{\frac{1}{2}} \tag{4.9}$$

$$\frac{9}{4}\,d = d_o \quad ou \quad d = \frac{4}{9}\,d_o. \tag{4.10}$$

FIGURA 4.2: ESQUEMA DE UMA ONDA NEGATIVA NUMA CÂMARA DE CARGA.



FONTE: CHANSON (2004)

Com o valor de d = 4/9d_o é possível determinar a vazão máxima:

$$Q_{max} = 2Bd(\sqrt{g(\frac{4}{9}\,d_o)} - \sqrt{gd_o}) \tag{4.11}$$

$$Q_{max} = 2B(\frac{4}{9}d_o)(-\frac{1}{3}\sqrt{gd_o}) \tag{4.12}$$

$$Q_{max} = \frac{8}{27}d_o\sqrt{gd_o})B \tag{4.13}$$

é a Vazão Máxima. Se a demanda de água excede a vazão máxima, Q_{maz}, a câmara de carga não poderá suportar as necessidades das turbinas, por em quanto uma nova câmara de carga deverá ser projetada.

4.2. SOLUÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

4.2.1 Aplicação para um canal retangular

Devido à ocorrência de uma pequena perturbação na superfície essa pode propagar-se tanto como para montante como para jusante. Para ondas em águas rasas a celeridade desta perturbação pode ser calculada como $C = \sqrt{g\,A/B}$ e para canal retangular como $C = \sqrt{gd}$ (CHAUDHRY, 2008) onde A [L^2] é a área da seção, B [L] é a base da seção (igual à largura no topo), d [L] é a profundidade do canal e g [L/T^2] é a aceleração da gravidade. Essa celeridade é a velocidade das perturbações em relação ao movimento do fluido. No entanto a velocidade do escoamento é chamada de V e a velocidade absoluta para um observador localizado na margem é (V+C).

Mediante um processo de derivação da equação de celeridade C em relação ao tempo e ao espaço e substituindo nas equações (A.38) e (A.40) do Apêndice A obteve-se as seguintes equações Características para canais retangulares:

Característica positiva

$$\frac{d}{dt}\,(V + 2C) = -g(Sf - S_o). \tag{4.14}$$

Característica negativa

$$\frac{d}{dt}\,(V - 2C) = -g(Sf - S_o). \tag{4.15}$$

Característica C+

$$\frac{dx}{dt} = V + C. \tag{4.16}$$

Característica C−

$$\frac{dx}{dt} = V - C. \tag{4.17}$$

Para um canal horizontal (S_o=*0*) e sem atrito (S_f =*0*), o sistema de equações característica (4.14) e (4.15) torna-se:

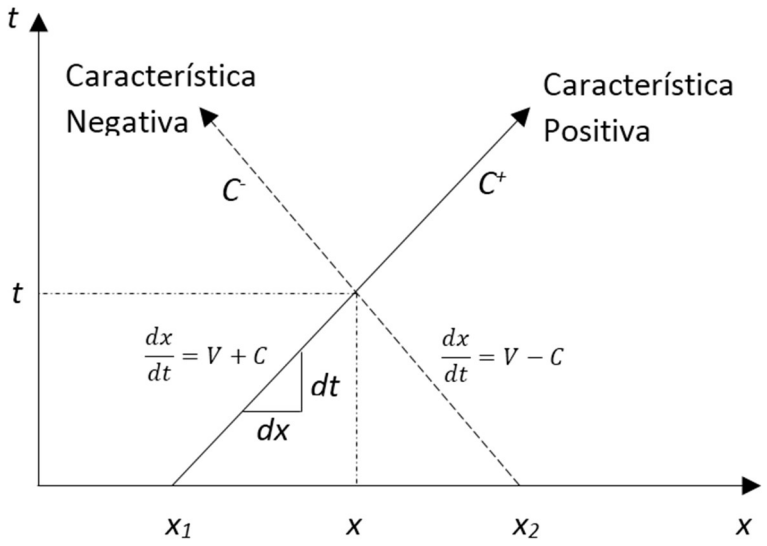
$V + 2C$ = constante,

$V - 2C$ = constante.

As constantes $(V + 2C)$ e $(V - 2C)$ são chamados de Invariantes de Riemann.

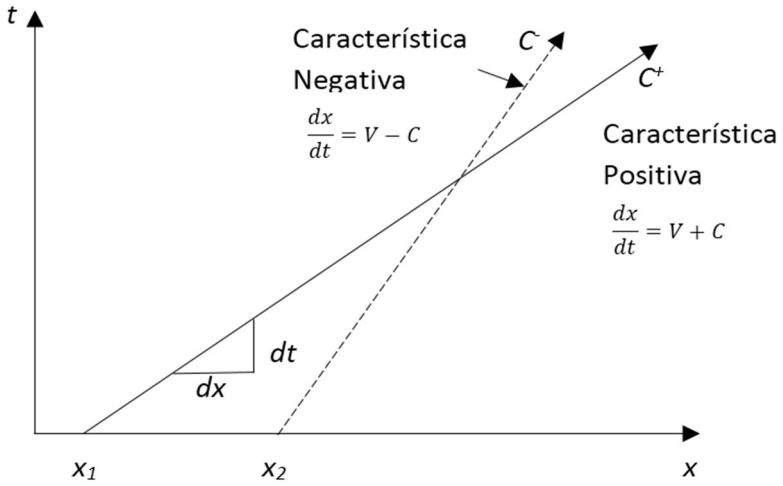
As equações (4.14) a (4.17) são equivalentes às equações (A.38) e (3.40) do Apêndice A. Nas Figuras 4.3 e 4.4 mostram-se as curvas características para escoamento subcrítico e supercrítico, respetivamente.

FIGURA 4.3: CARACTERÍSTICAS PARA ESCOAMENTO SUBCRÍTICO.



FONTE: CHANSON (2004)

FIGURA 4.4: CARACTERÍSTICAS PARA ESCOAMENTO SUPERCRÍTICO.



FONTE: CHANSON (2004)

4.2.2 Aplicação para um canal qualquer

As equações (A.38) e (A.40) do Apêndice A também podem ser expressas em outra forma de Características segundo SIVALOGANATHAN (1978):

$$\frac{1}{C}\frac{dy}{dt}+\frac{1}{g}\frac{dV}{dt}=S_o-Sf-\frac{q}{gA}\ (V-C)-\frac{VC}{gA}\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_V=G_f, \tag{4.18}$$

$$\frac{dx}{dt}=V+C, \tag{4.19}$$

$$-\frac{1}{C}\frac{dy}{dt}+\frac{1}{g}\frac{dV}{dt}=S_o-Sf-\frac{q}{gA}(V-C)-\frac{VC}{gA}\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_y=G_b, \tag{4.20}$$

$$\frac{dx}{dt}=V-C. \tag{4.21}$$

Os termos G_f e G_b são colocados por conveniência de cálculos e fazem referência aos termos em Inglês *f* = forward (jusante) e *b* = backward (montante)

Na literatura científica (SIVALOGANTHAN, 1978) existem basicamente dois métodos das Características para a solução das equações de Saint-Venant para a superfície livre. Eles são, o método de Características da malha retangular e o método de Características de distancias especificadas. Estes dois métodos aceitam formulação direta e formulação iterativa. A seguir explica-se o método da malha retangular e está fundamentado no método desenvolvido por SIVALOGANATHAN (1978).

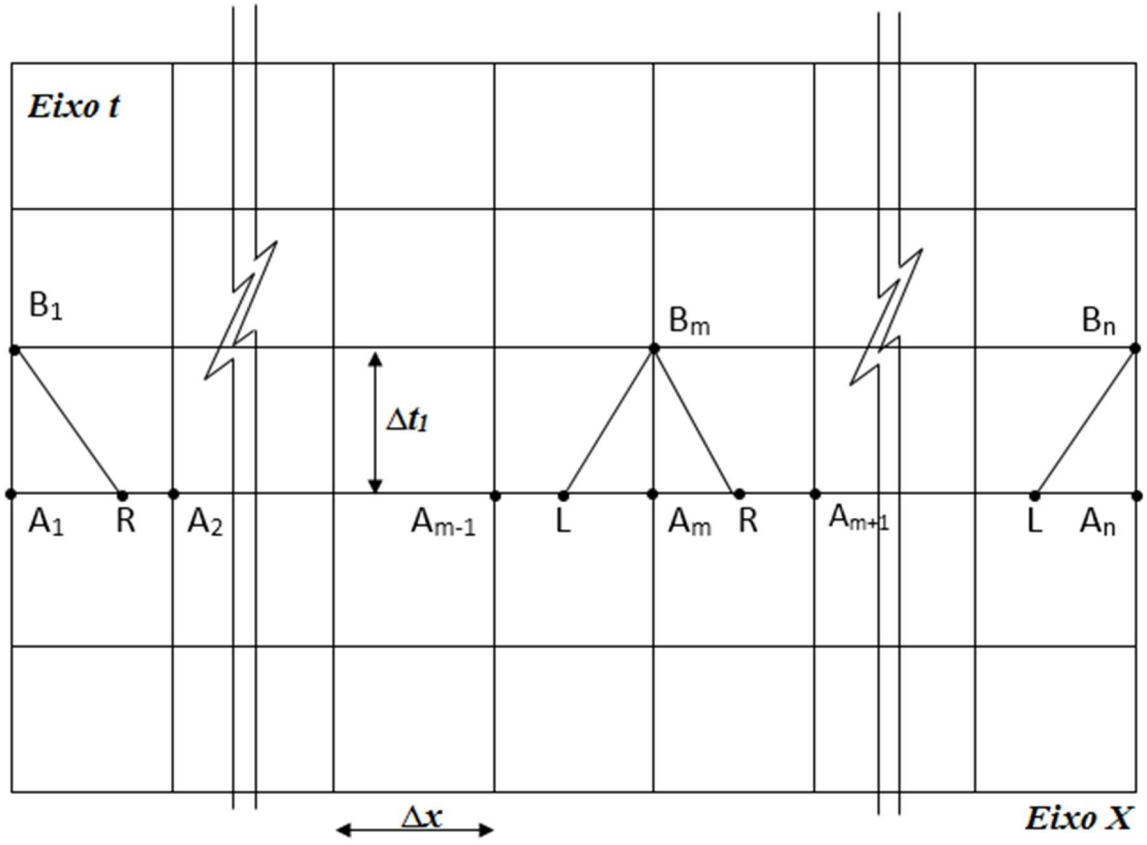
O esquema de cálculo do Método das Características da Malha Retangular é ilustrado na Figura 4.5, onde se mostra o plano *x*-*t* para os cálculos seguintes. No início dos cálculos, as distancias Δx são especificadas e permanecem os mesmos durante todo o processo de cálculo. Os intervalos do tempo no eixo vertical não são especificados no início dos cálculos, no entanto são determinados em cada etapa do cálculo. Para a determinação do intervalo do tempo seguinte, a condição de Courant pode ser utilizada e assim evitar instabilidades, ela estabelece que $\Delta t \leq \Delta x/\left| V+C \right|$.

Se os valores de profundidade *y*, e velocidade *V*, são conhecidos nos pontos da malha ao longo da linha do tempo $t = t_1$ (A_1 A_n) os cálculos são, o valor de Δt é escolhido para

satisfazer a condição de Courant e a solução é continuada para pontos da malha para a linha do tempo $t = t_1 + \Delta t_1$, isso é a linha B_1B_n. Desde a linha do tempo de B_1B_n os cálculos são seguidos para frente até um tempo desejado. O anterior significa que não há uniformidade em sucessivos intervalos do tempo. Tudo isso significa que para calcular a velocidade e a profundidade num determinado ponto, eles deverão ser obtidos com informação da linha do tempo anterior.

Os detalhes de cálculo estão estreitamente ligados as condições do regime de escoamento, seja subcrítico, crítico ou supercrítico, mesmo se eles ocorrem no contorno de montante ou de jusante ou entre eles.

FIGURA 4.5: MALHA RETANGULAR PARA O MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS.



FONTE: Adaptado de SIVALOGANATHAN (1978)

(i) Contorno de Montante

(a) Escoamento Subcrítico. A linha B_1R é uma Característica negativa que passa pelo ponto B_1. Para localizar o ponto R se assume que a declividade de B_1R é a mesma que a declividade da Característica negativa que passa por A_1. Quando já se tem localizado o ponto R, os valores de velocidade V_R e profundidade y_R que correspondem ao ponto R são determinados por interpolação linear utilizando-se os pontos próximos a R, neste caso A_1 e A_2. A equação de compatibilidade ao longo da Característica negativa B_1R é expressa em forma de diferenças finitas,

$$-\frac{y_{B1}-y_R}{C_b\Delta t}+\frac{V_{B1}-V_R}{g\Delta t}=G_b \tag{4.22}$$

onde C_b e G_b são avaliados em R. Se a condição de contorno de montante é o hidrograma de descarga resulta:

$$V_{B1}-\frac{Q(0,t_{B1})}{A(y_{B1},0)}=0 \tag{4.23}$$

Isolando V_{B1} das equações (4.22) e (4.23) resulta uma equação não linear em y_{B1} que pode ser resolvida pelo método de Newton Raphson.

(b) Escoamento Supercrítico. Quando as condições no contorno de montante são supercríticas y_{B1} ou V_{B1} são dados e o outro facilmente é obtido, isto é, se y_{B1} é dado então calcula-se V_{B1} e ao contrário.

(ii) Pontos interiores

As curvas B_mL e B_mR são Características positiva e negativa que passam pelo ponto B_m. Os valores da declividade de B_mL e B_mR são assumidos iguais as declividades das Características positiva e negativa que passam pelo ponto A_m. Os valores de velocidades V e profundidade y nos pontos L e R são obtidos por interpolação linear com valores próximos a L e R na linha A_1A_n. As equações de compatibilidade ao longo das Característica positiva LB_m e negativa

RB_m são expressas na forma de diferenças finitas,

$$-\frac{y_{Bm}-y_L}{C_f\Delta t}+\frac{V_{Bm}-V_L}{g\Delta t}=G_f \tag{4.24}$$

$$-\frac{y_{Bm}-y_R}{C_b\Delta t}+\frac{V_{Bm}-V_R}{g\Delta t}=G_b \tag{4.25}$$

onde C_b e G_b são avaliados em R e C_f e G_f são avaliados em L. As equações (4.24) e (4.25) são lineares em y_{Bm} e V_{Bm} e de fácil solução.

(iii) Contorno de Jusante

(a) Escoamento Subcrítico. A linha B_nL é a Característica positiva que passa pelo ponto B_n. Para localizar o ponto L é assumido que a declividade de LB_n é a mesma que a declividade da Característica positiva que passa pelo ponto A_n. Localizado o ponto L, os valores de profundidade y_L e a velocidade V_L são obtidos por interpolação sobre pontos da malha à esquerda ou direita de L se é usada interpolação linear. As equações de compatibilidade ao longo da Característica positiva LB_n é expressa na forma de diferenças finitas,

$$\frac{y_{Bn}-y_L}{C_f\Delta t}+\frac{V_{Bn}-V_L}{g\Delta t}=G_f \tag{4.26}$$

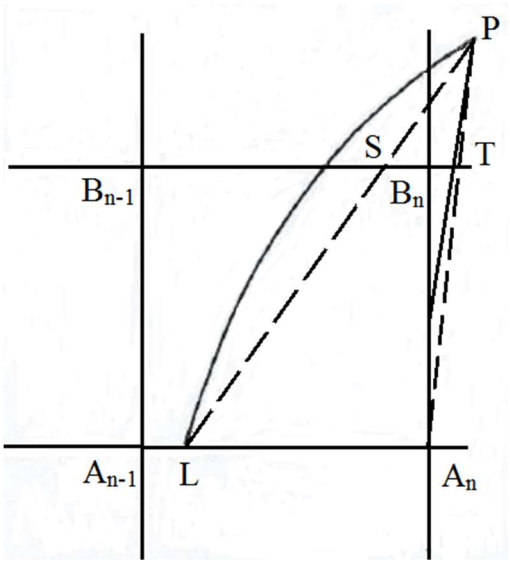
onde C_f e G_f são avaliados em L. Neste caso geralmente a condição de contorno de jusante é a curva profundidade-vazão resultando numa equação envolvendo y_{Bn} e V_{Bn}. Para uma condição de livre saída esta será,

$$C_{Bn}-V_{Bn}=0 \tag{4.27}$$

Isolando V_{Bn} das equações (4.26) e (4.27) resulta uma equação não linear em y_{Bn} que pode ser resolvida pelo método de Newton Raphson. Logo a equação (4.27) fornece V_{Bn}.

(b) Escoamento Supercrítico. Na Figura 4.6, o ponto L é localizado como nos casos anteriores assumindo a linha Característica positiva reta através no ponto B_n e com a declividade da Característica positiva que passa pelo ponto A_n. Os valores de profundidade y_L e velocidade V_L são também obtidos como nos casos anteriores por interpolação. A linha curva LP representa a curva Característica positiva que passa pelo ponto L e a linha curva A_nP representa a curva Característica negativa que passa pelo ponto A_n. Os valores da distância x_P, tempo t_P, profundidade y_P e velocidade V_P são agora determinados usando conceitos de "pontos interiores" no método de Características da Malha Retangular de Distancias Especificadas desenvolvido por SIVALONGATHAN (1978). Da Figura 4.6 se o ponto x_P está à esquerda do ponto x_{An} os cálculos se fazem como no caso (a). Se o ponto x_P está à direita do ponto x_{An} os seguintes cálculos deveram ser realizados: valores no ponto S, como a profundidade y_S, velocidade V_S e distância desde a origem x_S são determinados por interpolação linear entre valores em P e L. Valores de y_T, V_T e x_T são determinados por interpolação linear entre valores em P e An. Finalmente os valores de y_{Bn} e V_{Bn} são determinados por interpolação linear entre valores em *S* e T.

FIGURA 4.6: MALHA RETANGULAR PARA JUSANTE NO REGIME SUPERCRÍTICO.



FONTE: SIVALOGANATHAN (1978).

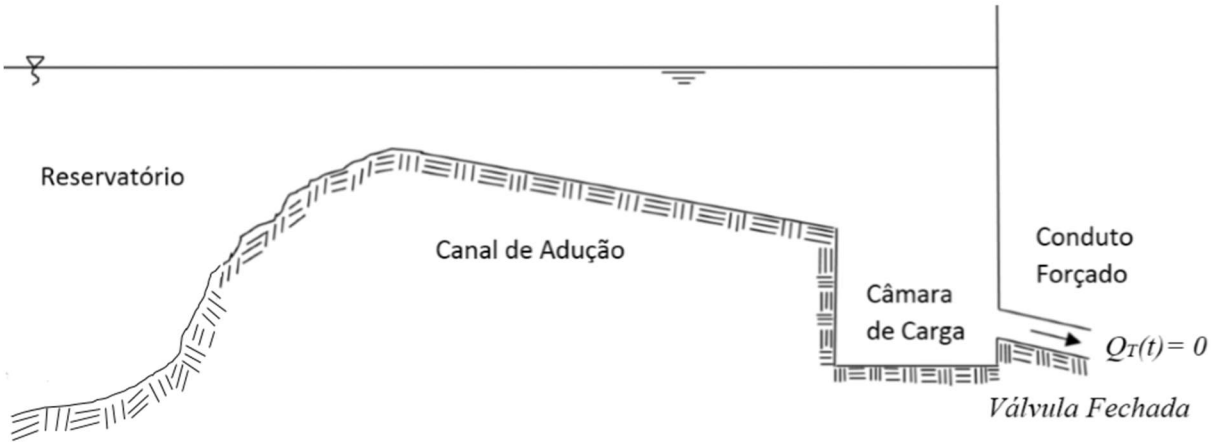
5. ESTUDO DE CASO

Apresenta-se um estudo de caso para ilustrar o método descrito nesta dissertação. A partir das características hidráulicas de uma usina hidrelétrica existente, pretende-se determinar mediante o método das Características e um método de otimização a regra de operação da abertura da válvula da turbina instalada na usina hidrelétrica. Essa regra de operação se traduz na busca ótima da vazão turbinada $Q_T(t)$, para diferentes aberturas da válvula. No item 5.1 descreve-se o esquema geral do reservatório, canal de adução, câmara de carga e o conduto forçado e as variáveis que intervirem para os cálculos. No item 5.2 apresentam-se as características hidráulicas do canal, como seu comprimento, seção transversal, declividade do fundo, o coeficiente de rugosidade e a tabela da curva cota-área-volume da câmara de carga. No item 5.3 se faz uma descrição do método das Características para o estudo de caso ressaltando as condições de contorno e as equações de celeridade da onda superficial no canal. E no item 5.4 descreve-se a aplicação do método de Recozimento Simulado para a obtenção da regra de operação ótima procurada.

5.1. GERAL

Para o estudo de caso serão usados os dados de uma usina hidrelétrica hipotética cuja câmara de carga será analisada com o método anteriormente descrito. A Figura 5.1 mostra um esquema com os componentes do circuito hidráulico em uma usina hidrelétrica com câmara de carga.

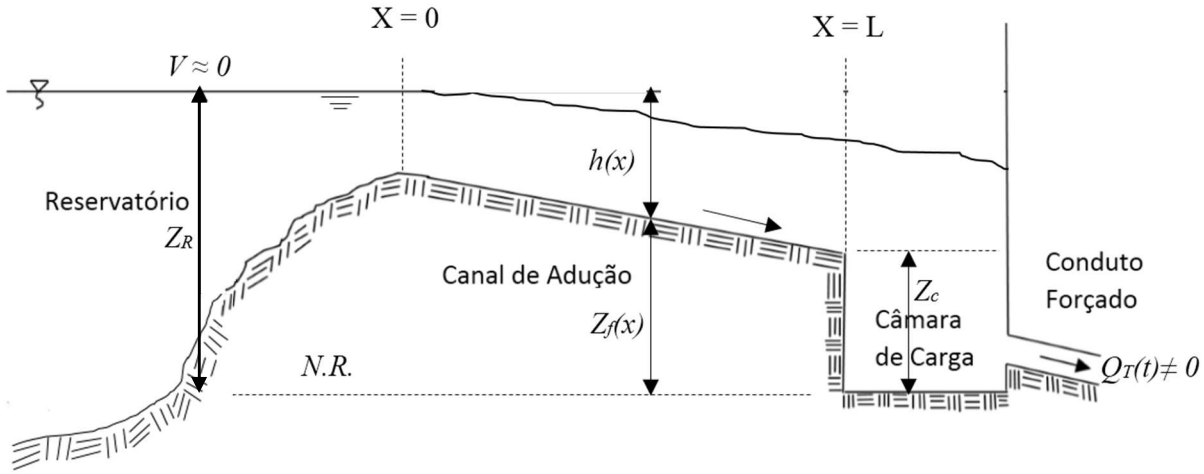
FIGURA 5.1: LIGAÇÃO ENTRE O CANAL DE ADUÇÃO E O CONDUTO FORÇADO ATRAVÉS DA CÂMARA DE CARGA.



A modelagem matemática do canal de adução em regime não permanente será resolvido utilizando as equações de Saint-Venant. As variáveis do problema são apresentadas na Figura 5.2. Na simulação considera-se o nível de água como constante na captação (x=0) e na entrada da câmara de carga (x=L) o nível de água é função da vazão turbinada e da vazão em x=L.

Para determinar as variáveis do escoamento pela condição de contorno na saída do canal (entrada na câmara de carga) a modelagem matemática é realizada através da lei de conservação de massa. Está lei é representada por uma equação diferencial ordinária, que relaciona o volume da câmara de carga em função do tempo. Esta equação será solucionada numericamente, e para tanto será usado o método de integração trapezoidal iterativo.

FIGURA 5.2: ESQUEMA E VARIAVEIS PARA OS CÁLCULOS.



5.2. DADOS E INFORMAÇÕES

Para o dimensionamento da câmara de carga é preciso conhecer o nível do reservatório que alimenta a usina hidrelétrica, esse nível representaria a energia total do escoamento a montante do circuito hidráulico e é um parâmetro básico na definição de uma regra operativa. Também é preciso para o dimensionamento da câmara de carga informações geométricas relativas ao canal de adução, assim como sua declividade e rugosidade, expressa pelo coeficiente de Manning. A curva Cota-Área-Volume da câmara de carga é necessária para

determinar a regra de operação das turbinas. Na Tabela 5.1 são descritos os dados para o estado de caso.

TABELA 5.1 DADOS PARA O ESTUDO DE CASO.

Parâmetro	Valor
Comprimento do canal (L)	4800 m.
Base da seção trapezoidal (b)	2,6 m
Inclinação dos taludes	1 V : 1,5 H
Declividade do fundo (S_o)	0,00024427 m/m
Coeficiente de Manning (n)	0,013 s/m$^{1/3}$ (Concreto alisado)

A turbina instalada na usina hidrelétrica tem uma vazão mínima para a abertura mínima e tem uma vazão máxima para a abertura máxima segundo indicado na Tabela 5.2. Na figura 5.3 apresenta-se a forma da seção transversal do canal de adução. A Curva Cota-Área-Volume da câmara de carga é apresentada na Tabela 5.3

TABELA 5.2 VAZÕES MÍNIMA E MÁXIMA DA TURBINA INSTALADA NA USINA HIDRELÉTRICA.

Vazão Turbinada Mínima $Q_T(t)$	0,6 (m^3/s)
Vazão Turbinada Máxima $Q_T(t)$	3,6 (m^3/s)

FIGURA 5.3: ESQUEMA GEOMÉTRICO DA SEÇÃO TRAPEZOIDAL DO CANAL DE ADUÇÃO.

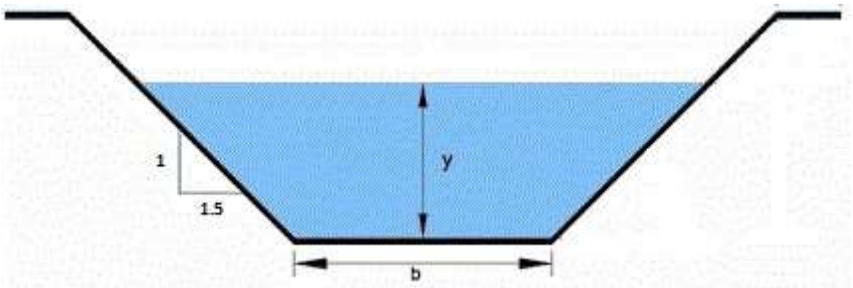


TABELA 5.3 CURVA COTA-ÁREA-VOLUME DA CÂMARA DE CARGA.

Câmara de Carga		
Cota (m)	Área (m^2)	Volume (m^3)
0	0,00	0,00
0,5	13,95	3,49
1,0	42,87	14,20
1,5	80,59	30,86
2,0	123,78	51,09
2,5	173,87	74,41
3,0	217,38	97,81
3,5	263,11	120,12
4,0	310,90	143,50
4,5	358,88	167,45
5,0	406,67	191,89
5,5	460,19	217,22

5.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS CARACTERISTICAS

As equações necessárias para a solução do estudo de caso são as equações de Saint-Venant para escoamento não-permanente. As equações 3.1 e 3.2, apresentadas na seção 3, representam as leis de conservação de massa e da quantidade de movimento linear.

Como condição de contorno considera-se a montante, o nível de água como constante na captação e na entrada ao canal de adução, e a jusante, uma função temporal de vazões turbinadas.

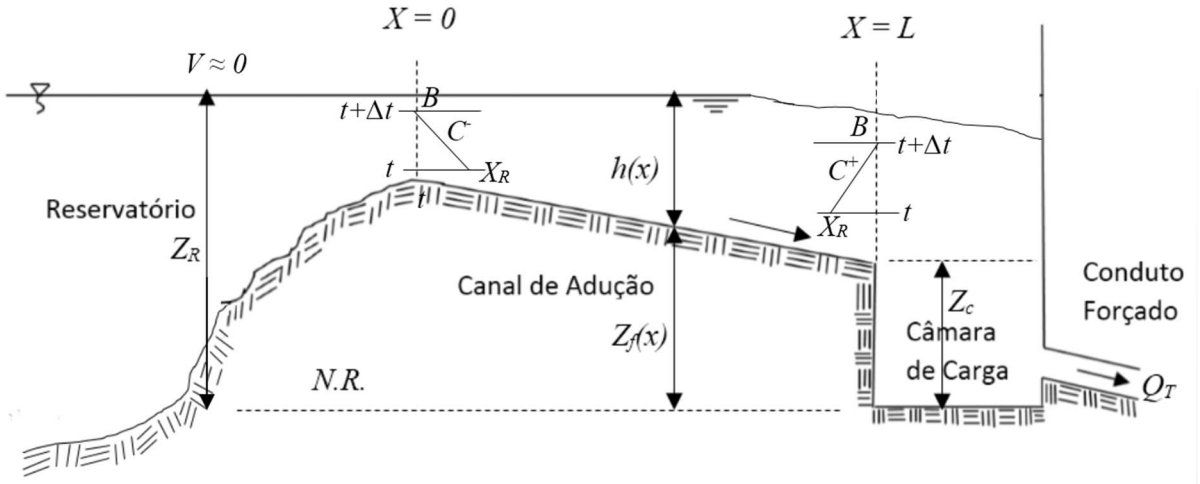
Na Figura 5.4 apresenta-se as seções do reservatório, canal de adução e câmara de carga. Nestas seções serão avaliadas as energias disponíveis para o cálculo das condições de contorno do problema. Observa-se da figura que no reservatório a velocidade de escoamento é zero e na entrada do canal de adução a velocidade é diferente de zero.

Inicialmente quando a válvula de ingresso ao conduto forçado está fechado o nível da superfície da água é horizontal.

Da Figura 5.4, a equação de energia entre uma seção no reservatório e uma seção no canal de adução resulta:

$$Z_R = Z_F(0,t) + h(0,t) + \frac{Q^2(0,t)}{2gA^2(0,t)}. \tag{5.1}$$

FIGURA 5.4: CARACTERÍSTICAS NO MONTANTE (À ESQUERDA *x=0*) E JUSANTE (À DIREITA *x=L*).



FONTE: O Autor (2016)

Utilizando-se o método das Características para a solução das equações de Saint-Venant. Na Figura 5.4 obtemos as Características em *x=0* e *x=L*, resultando as equações:

$$V_B - 2C_B = V_o - 2C_o, \tag{5.2}$$

$$V_B + 2C_B = V_o + 2C_o. \tag{5.3}$$

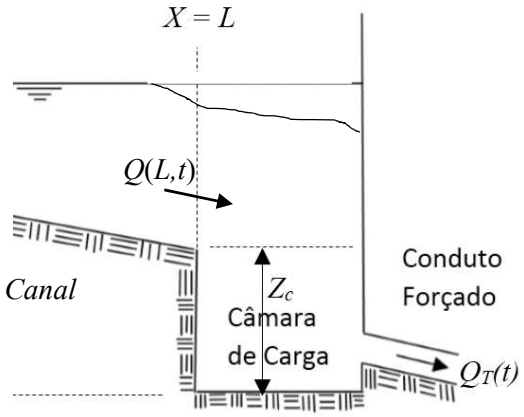
As variáveis do escoamento são determinadas pela condição de contorno na saída do canal (entrada na câmara de carga). A variável de interesse é a cota na câmara de carga para um correto funcionamento das turbinas. A lei de conservação de massa é utilizada na modelagem da câmara de carga de jusante. Esta lei é representada por uma equação diferencial ordinária, que relacionada o volume da câmara de carga em função do tempo. O método numérico de integração trapezoidal iterativo é utilizado para solucionar esta equação:

$$\frac{dV}{dt} = Q(L,t) - Q_T(t). \tag{5.4}$$

A Figura 5.5 apresenta um esquema da câmara de carga. Nela a vazão de entrada $Q(L,t)$

é necessária para realizar os cálculos de altura de água dentro da câmara de carga a partir de vazão turbinada $Q(t)$ que sai pelo conduto forçado.

FIGURA 5.5: VARIÁVEIS PARA APLICAR A LEI DE CONSERVAÇÃO DE MASSA.



FONTE: O AUTOR (2016)

A regra trapezoidal é utilizada no Método de Integração Trapezoidal Iterativo (FREAD, 1992) para integrar a equação de conservação de massa (5.4). O domínio do tempo consiste em linhas de tempo separado por intervalos Δt, exemplo t=0, Δt, 2Δt, …, jΔt, (j+1)Δt. O volume da câmara de carga em função do tempo é a área da superfície da câmara de carga *Sa* vezes a variação da altura da superfície de água *h* sobre o j-eximo passo do tempo:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{0{,}5(Sa^{j} + Sa^{j+1})(h^{j+1} - h^{j})}{\Delta t^{j}} \,. \tag{5.5}$$

A superfície da câmara de carga *Sa* é especificada como uma função conhecida de *h*. Usando valores médios para $Q(L,t)$ e $Q_T(t)$ sobre um intervalo de tempo e substituindo a equação (5.5) na equação (5.4) fornece a seguinte equação:

$$0{,}5\left(Q(L,t)^{j} + Q(L,t)^{j+1}\right) - 0{,}5(Q_T(t)^{j} + Q_T(t)^{j+1} - \frac{0{,}5\left(Sa^{j} + Sa^{j+1}\right)\left(h^{j+1} - h^{j}\right)}{\Delta t^{j}} = 0. \tag{5.6}$$

As entradas $Q(L,t)$ nos tempos *j* e *j+1* são conhecidos na vazão que vem do canal de adução; a vazão turbinada $Q_T(t)$, no tempo *j* podem ser computadas a partir a área conhecida

na altura h^j. A área Sa^j pode ser determinada a partir do valor conhecido de h^j. Os valores desconhecidos são h^{j+1}, Q_T^{j+1}, As^{j+1}, os dois últimos são conhecidos funciones não lineares de h^{j+1}. A equação (5.6) pode ser resolvido para h^{j+1} por um método iterativo como de Newton-Raphson,

$$h_{k+1}^{j+1} = h_k^{j+1} - \frac{f\left(h_k^{j+1}\right)}{f'\left(h_k^{j+1}\right)}\,, \tag{5.7}$$

onde k é um contador iterativo e h_k^{j+1}é o lado esquerdo da equação (5.6) avaliado para uma primeira estimação para h_k^{j+1}.

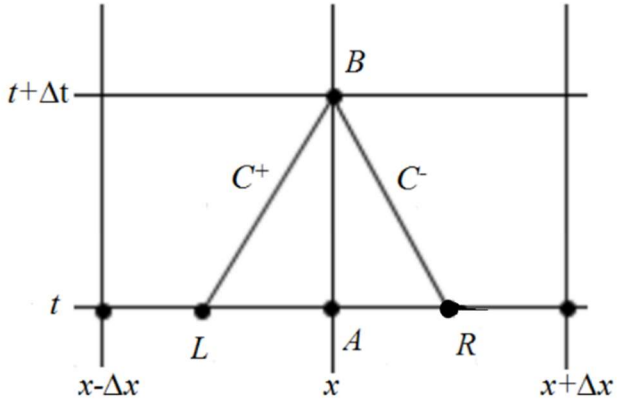
Os cálculos de velocidade e profundidade para pontos na montante e jusante se fazem seguindo o método das Características (C− e C+) considerando regime subcrítico, como mostrado na Figura 5.4 e resolvendo as equações apresentadas linhas arriba.

Para pontos no interior do canal, baseado na Figura 5.6 e as equações (4.14) e (4.15) é possível determinar relações entre os pontos no tempo t e no tempo t+Δt mediante as Características C+ e C−:

$$2C_B + V_B - (2C_L + V_L) = 0\,, \tag{5.8}$$

$$-2C_B + V_B - (-2C_R + V_R) = 0\,. \tag{5.9}$$

FIGURA 5.6: PONTOS INTERIORES.



FONTE: Adaptado de SIVALOGANATHAN (1978)

Logo mediante operações algébricas entre as equações (5.8) e (5.9) se calcula a celeridade da onda C_B:

$$C_B = \frac{1}{4}(V_L - V_R) + \frac{1}{2}(C_L + C_R)\,. \tag{5.10}$$

Com o valor determinado de C_B é possível achar a profundidade y_B a partir de $C = \sqrt{gy}$, ($y_B = C_B^2/g$). A velocidade V_B se calcula também entre as equações (5.8) e (5.9) assim:

$$V_B = \frac{1}{2}(V_L - V_R) + C_L + C_R\,, \tag{5.11}$$

$$C_B = \frac{1}{4}(V_L - V_R) + \frac{1}{2}(C_L + C_R)\,, \tag{5.12}$$

$$V_B = \frac{1}{2}(V_L - V_R) + C_L + C_R\,. \tag{5.13}$$

5.4. APLICAÇÃO DO METODO DE RECOZIMENTO SIMULADO

A aplicação do método de Recozimento Simulado tem como objetivo determinar uma solução ótima da regra de operação da abertura da válvula de uma turbina instalada numa usina hidrelétrica, isto é, determinar uma função de abertura da válvula em função do tempo procurando atingir o regime permanente em menor tempo possível. Com diferentes aberturas da válvula deve-se obter uma vazão turbinada mínima e uma vazão turbinada máxima $Q_T(t)$. A abertura total da válvula não deverá permitir que se seque a câmara de carga, mas sim, deverá garantir a maior profundidade de água na câmara de carga para não permitir o ingresso de ar pelo conduto forçado.

Para a aplicação do método de Recozimento Simulado para nosso estudo de caso será necessário a utilização do algoritmo apresentado na seção 3.3.

A regra de operação na fase transiente do escoamento na abertura da válvula da turbina instalada numa usina hidrelétrica é determinada por um programa de otimização não linear. O problema é solucionado por um módulo inicial de abertura da válvula que, partindo de uma solução viável, faz pequenas perturbações ou alterações nas soluções anteriores até alcançar a

solução ótima de minimização de tempo para que o escoamento possa atingir o regime permanente e maximização da profundidade do escoamento. A solução do modelo é efetuada através da metaheurística do recozimento simulado.

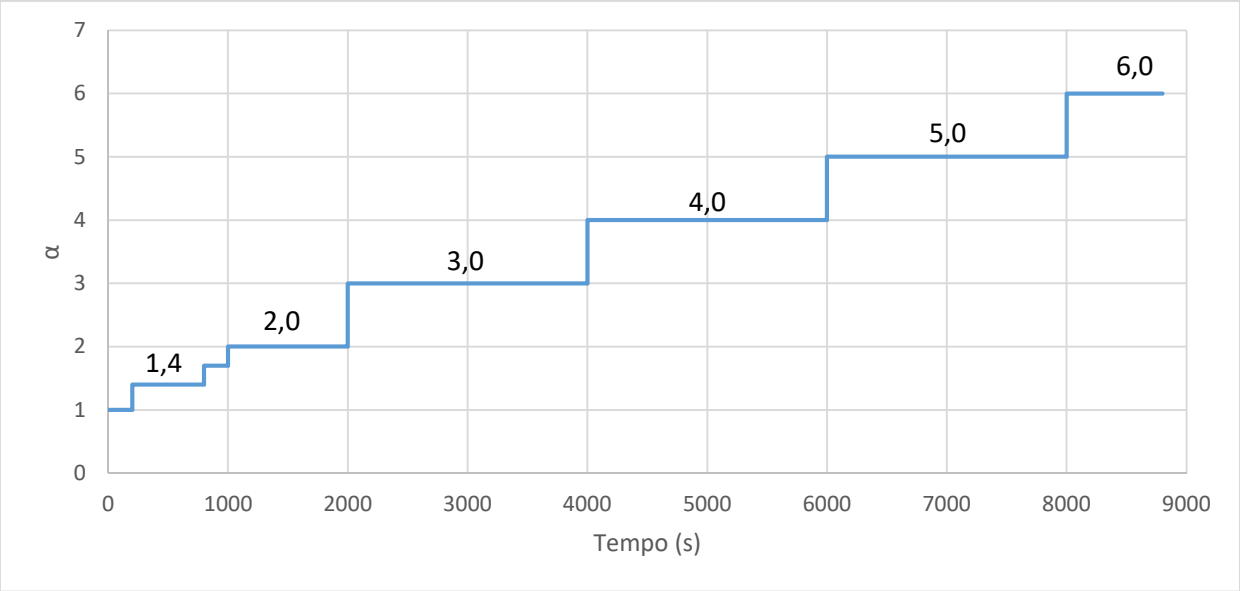
Para o problema em questão iniciou-se com uma solução viável de abertura de válvula para diferentes durações de tempo como mostrado na Tabela 5.4

TABELA 5.4 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO (SOLUÇÃO VIÁVEL INICIAL).

Tempo (s)	**Abertura da válvula (α)**
0	1,0
200	1,4
800	1,7
1000	2,0
2000	3,0
4000	4,0
6000	5,0
8000	6,0

Na Figura 5.7 apresenta-se a primeira solução viável, para iniciar os cálculos mediante o método de Recozimento Simulado. Os dados para elaborar a Figura 5.7 são aqueles da Tabela 5.4.

FIGURA 5.7: DADOS PARA A PRIMEIRA SOLUCÃO VIÁVEL.



Como apresentado na Tabela 5.2 a vazão mínima da turbina instalada na usina hidrelétrica é 0,6 m^3/s e a vazão máxima 3,6 m^3/s. Os valores da abertura (α) na Tabela 5.4 são escolhidos criteriosamente entre 1 e 6. O valor de 6 indica 6 vezes a vazão turbinada mínima, assim, $6(Q_T(t)\ min) = 6\ (0,6) = 3,6\ m^3/s$, que é a vazão máxima turbinada. A quantidade de valores escolhidos para (α) é arbitraria, sugerindo-se entre 6 e 12.

No Apêndice B apresenta-se a listagem do programa *Transiente* (c_carga8) para análise dinâmica do início da operação da câmara de carga de usinas hidrelétricas, esse programa simula o movimento transiente no canal de adução, desde o reservatorio até a câmara de carga. No Apêndice C apresenta-se a listagem do programa *Otimização* (rs_c_carga2) para busca da solução ótima, executa o método de recozimento simulado com o objetivo de determinar uma regra de operação ótima da abertura das válvulas da turbina na câmara de carga, isto é feito com o auxilio do programa *Transiente*. Com estes programas foram realizados os cálculos para determinar a regra de operação ótima das turbinas.

No Apêndice C a listagem do programa *Otimização*, para busca de solução ótima (recozimento simulado), tem parâmetros importantes a serem mencionados: N_α o número de possíveis aberturas da válvula, $50(N_\alpha)^2$ o número de simulações possíveis, $50N_\alpha$, o número de simulações com sucesso, ε a precisão na busca do tempo que atinge-se o estado estacionário e w o parâmetro da função multiobjetivo para a determinação do tempo até atingir o regime permanente. Os valores destes parâmetros são apresentados no Capítulo 6.

6. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Com o método computacional desenvolvido realizou-se a simulação na busca da regra de operação durante a fase transiente do escoamento no canal, buscando-se maximizar a energia gerada neste período, ou seja, no menor tempo possível e com a maior altura possível de água na câmara de carga. Para a simulação do modelo foram adotadas algumas premissas iniciais listadas na sequência:

a) Nível de Água no Reservatório (NAR) é considerado constante ao longo de todo o processo de simulação;
b) No instante inicial (t=0) todo o circuito hidráulico está com a água nivelada na mesma cota (=NAR), e por tanto com vazão nula;
c) As cotas do início e fim do canal são fixas independentemente do comprimento adotado para o trecho de canal;
d) A seção transversal do canal tem forma trapezoidal constante, alterando-se a área do escoamento com a profundidade da água na seção;
e) O coeficiente de rugosidade de Manning é considerado constante para todo o escoamento, independentemente de profundidade e seção;
f) Não são considerados vertimentos ao longo do canal.

O procedimento de cálculo inicia-se estabelecendo uma condição de abertura da válvula na turbina em função do tempo. Na Tabela 6.1 apresenta-se uma tentativa de abertura da válvula para diferentes tempos.

TABELA 6.1 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Tempo (s)	Abertura da válvula (α)
0	1,0
200	1,4
800	1,7
1000	2,0
2000	3,0
4000	4,0
6000	5,0
8000	6,0

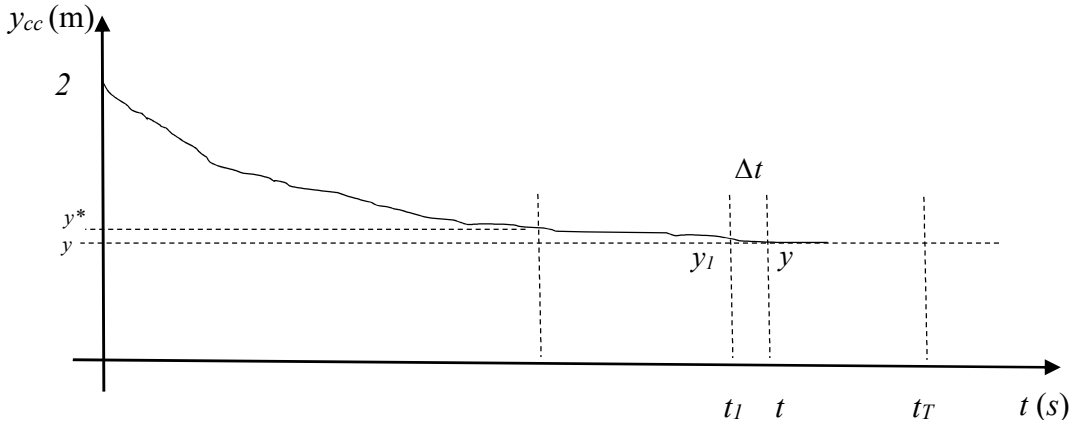
Da Tabela 6.1, o número de possíveis aberturas da válvula é $N_\alpha = 8$, por tanto o número de simulações possíveis é $50(N_\alpha)^2 = 50(8)^2 = 3.200$. O número de simulações com sucesso no máximo é $50N_\alpha$, = 50(8) = 400. A precisão na busca do tempo que atinge-se o estado estacionário é ε = 0.0005 m. A função multiobjetivo é:

$$F = w\,\frac{t - t^*}{t_T - t^*} + (1 - w)\,\frac{y^* - y}{y^*}, \tag{6.1}$$

onde, w é o peso para a determinação do tempo até atingir o regime permanente, com valor adotado de w = 0,4 e (1−w) é o peso para a determinação da profundidade de água dentro da câmara de carga, t é o tempo para atingir o regime permanente ($t > t^*$), t^* é o tempo até alcançar a abertura total da válvula (t^* é o valor de t para α = 6), y é a altura de água no tempo t, y^* é a altura no tempo t^* e t_T é o tempo total de análise.

A Figura 6.1 apresenta a variação típica da altura de água na câmara de carga, y_{cc}, contra o tempo $t(s)$ até atingir o estado estacionário quando $|y - y_1| < \varepsilon = 0.0005$ m, com $t_1 > t^*$ e $t = t_1 + 1000\Delta t$, $y_1 = y(t_1)$ e $y = y(t_1 + 1000\Delta t)$. O valor de ε pode ser aumentado segundo as necessidades da precisão procurada o que implicará em maior tempo de cálculo. O intervalo do tempo Δt para os cálculos é de 12 segundos.

FIGURA 6.1VARIAÇÃO DA ALTURA DE ÁGUA NA CAMARA DE CARGA CONTRA O TEMPO.



Partindo-se da vazão turbinada mínima, Qmin = 0,6 m^3/s, calcula-se a vazão turbinada, $Q_T = \alpha Q_{min}$, onde α é o fator de abertura da válvula apresentado na Tabela 6.1, para diferentes tempos. A vazão turbinada mínima deve-se às restrições estabelecidas pelo fabricante da

turbina.

Com o método das Características implementado computacionalmente analisou-se a operação na câmara de carga na fase transiente do escoamento até atingir o regime permanente.

Se os cálculos se fazem como o programa *Transiente* deve-se propor uma lista com fatores, α, de abertura da válvula (Ex. Tabela 6.1) e verificar se os resultados obtidos mediante o programa computacional atingem o regime permanente. Por tentativa, entre todas as listas propostas, pode-se escolher como solução aquela tentativa que resultar no regime permanente em tempo mínimo.

No entanto, utilizando o programa *Otimização* que inclui o método de Recozimento Simulado se faz a busca da melhor solução da abertura das válvulas.

A Tabela 6.2 apresenta (após executar o programa *Otimização*) o resultado final da melhor regra de operação para a abertura de válvula até atingir o regime permanente em menor tempo possível e com a maior profundidade de água na câmara de carga.

TABELA 6.2 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO. REGRA DE OPERAÇAO FINAL OBTIDO COM O METODO DE OTIMIZAÇÃO RECOZIMENTO SIMULADO.

Tempo (s)	**Abertura da válvula (α)**
0	1,00
148	2,20
847	2,30
1.170	2,40
1.670	3,70
2.850	4,50
5.760	4,50
8.021	6,00

FONTE: O Autor (2016)

Na Tabela 6.3 apresenta os resultados após processar o programa *Otimização* (Apêndice C). Nela pode-se observar o tempo para o qual o regime permanente foi atingido, assim como a vazão turbinada para diferentes aberturas da válvula. Na Tabela 6.3 os valores de profundidade, velocidade e vazão unitária são apresentados para o início [0] e o final do canal [n]. A profundidade dentro da câmara de carga y_{cc} e a abertura da válvula α também são apresentados.

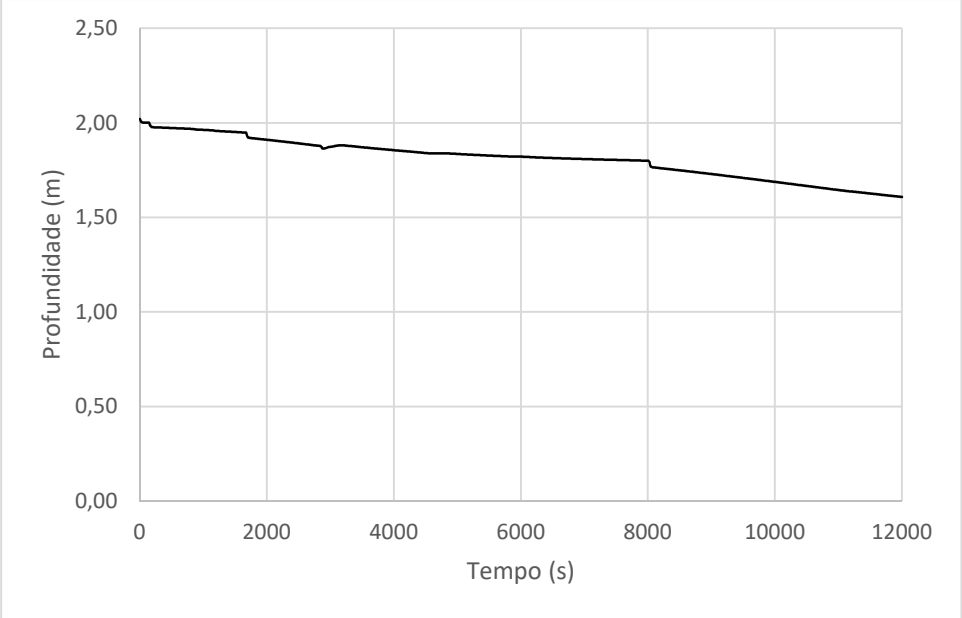
TABELA 6.3 RESULTADOS DE VAZÃO TURBINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO.

REGRA DE OPERAÇAO FINAL OBTIDO COM O METODO DE OTIMIZAÇÃO RECOZIMENTO SIMULADO.

Tempo (s)	***y*[0] (m)**	***v*[0] (m/s)**	***q*[0] (m2/s)**	***y*[n] (m)**	***v*[n] (m/s)**	***q*[n] (m2/s)**	**N.Froude (N)**	***ycc* (m)**	**Q.Turb. (m3/s)**	**Alfa (α)**
0.00	1.00	0.00	0.00	2.02	0.00	0.00	0.00	2.02105	0.00	0.00
11.95	1.00	0.00	0.00	2.01	0.03	0.38	0.01	2.00881	0.60	1.00
23.91	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.52	0.01	2.00421	0.60	1.00
35.86	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.57	0.01	2.00252	0.60	1.00
47.82	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.59	0.01	2.00186	0.60	1.00
59.77	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.59	0.01	2.00159	0.60	1.00
71.73	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00145	0.60	1.00
83.68	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00137	0.60	1.00
95.64	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00129	0.60	1.00
107.59	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00123	0.60	1.00
119.55	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00117	0.60	1.00
131.50	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00111	0.60	1.00
143.46	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00105	0.60	1.00
155.41	1.00	0.00	0.00	1.99	0.08	0.92	0.02	1.99033	1.32	2.20
167.37	1.00	0.00	0.00	1.98	0.11	1.17	0.03	1.98203	1.32	2.20
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
7997.76	0.98	0.63	2.50	1.80	0.28	2.70	0.08	1.79967	2.70	4.50
8009.72	0.98	0.63	2.50	1.80	0.28	2.70	0.08	1.79957	2.70	4.50
8021.67	**0.98**	**0.63**	**2.50**	**1.79**	**0.30**	**2.83**	**0.09**	**1.79446**	**3.60**	**6.00**
8033.63	0.98	0.63	2.50	1.77	0.35	3.30	0.10	1.77703	3.60	6.00
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11918.94	0.97	0.73	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.61106	3.60	6.00
11930.89	0.97	0.73	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.61063	3.60	6.00
11942.85	0.97	0.73	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.61019	3.60	6.00
11954.80	0.97	0.73	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.60976	3.60	6.00
11966.75	0.97	0.74	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.60933	3.60	6.00
11978.71	0.97	0.74	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.60890	3.60	6.00
11990.66	0.97	0.74	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.60846	3.60	6.00
12000.32	0.97	0.74	2.90	1.60	0.45	3.59	0.14	1.60813	3.60	6.00

A Figura 6.2 apresenta a curva de profundidade de água contra o tempo na câmara de carga, para a abertura da válvula otimizada. Os valores foram extraídos da Tabela 6.3. A profundidade máxima inicial foi de 2,00 m. e foi descendo até chegar ao regime permanente de 1,79446 m. aos 8.021 segundos.

FIGURA 6.2 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA A ABERTURA DA VÁLVULA OTIMIZADA.



As Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam outras combinações da abertura da válvula, eles são chamados de Abertura 2 e Abertura 3 respectivamente. Para estas aberturas, as Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam os resultados após processar o programa *Transiente* sem considerar o método de otimização Recozimento Simulado desenvolvido no programa *Otimização*.

Na Figura 6.3 apresenta-se os resultados da regra de operação obtida com o método de otimização (programa *Otimização*, Tabela 6.3) e os resultados para as aberturas, Abertura 2 e Abertura 3 sem considerar o método de otimização (programa *Transiente*). Na Figura 6.3 observa-se que quando não é usado um método de otimização não é possível atingir o estado estacionário no menor tempo possível, portanto é necessário usar um programa de otimização.

Da Figura 6.3 observa-se que a curva otimizada obtida com o programa *Otimização* atinge o regime permanente para o tempo de 8000 s, no entanto para as outras curvas a queda é mais rápida, por tanto a câmara de carga esvazia mais rápido.

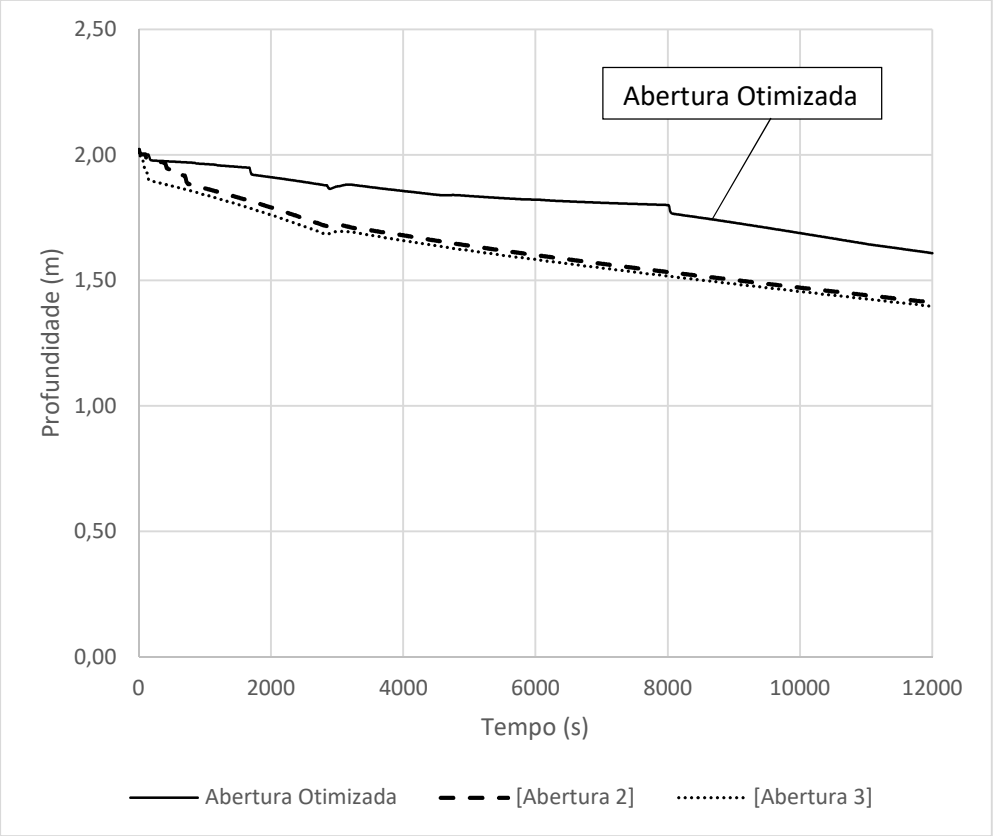
TABELA 6.4 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 2].

Tempo (s)	Abertura da válvula (α)
0	1,00
100	2,20
200	2,30
300	2,40
400	3,70
500	4,50
600	4,50
700	6,00

TABELA 6.5 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 3].

Tempo (s)	Abertura da válvula (α)
0	1,00
10	2,20
20	2,30
40	2,40
60	3,70
80	4,50
100	4,50
120	6,00

FIGURA 6.3 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DA CÂMARA DE CARGA.



No Apêndice D se faz uma comparação de diferentes aberturas de válvula com a melhor abertura de válvula obtida com o programa *Otimização*.

TABELA 6.6 RESULTADOS DE VAZÃO TURBINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 2].

Tempo (s)	***y*[0] (m)**	***v*[0] (m/s)**	***q*[0] (m2/s)**	***y*[n] (m)**	***v*[n] (m/s)**	***q*[n] (m2/s)**	**N.Froude (N)**	***ycc* (m)**	**Q.Turb. (m3/s)**	**Alfa (α)**
0.00	1.00	0.00	0.00	2.02	0.00	0.00	0.00	2.02105	0.00	0.00
11.95	1.00	0.00	0.00	2.01	0.03	0.38	0.01	2.00881	0.60	1.00
23.91	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.52	0.01	2.00421	0.60	1.00
35.86	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.57	0.01	2.00252	0.60	1.00
47.82	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.59	0.01	2.00186	0.60	1.00
59.77	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.59	0.01	2.00159	0.60	1.00
71.73	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00145	0.60	1.00
83.68	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00137	0.60	1.00
95.64	1.00	0.00	0.00	2.00	0.05	0.60	0.01	2.00129	0.60	1.00
107.59	1.00	0.00	0.00	1.99	0.08	0.94	0.02	1.99009	1.32	2.20
119.55	1.00	0.00	0.00	1.98	0.11	1.18	0.03	1.98210	1.32	2.20
131.50	1.00	0.00	0.00	1.98	0.11	1.27	0.03	1.97909	1.32	2.20
143.46	1.00	0.00	0.00	1.98	0.12	1.30	0.03	1.97790	1.32	2.20
155.41	1.00	0.00	0.00	1.98	0.12	1.31	0.03	1.97737	1.32	2.20
167.37	1.00	0.00	0.00	1.98	0.12	1.31	0.03	1.97707	1.32	2.20
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
681.42	1.00	0.00	0.00	1.91	0.26	2.69	0.07	1.91766	2.70	4.50
693.38	1.00	0.00	0.00	1.91	0.26	2.69	0.07	1.91717	2.70	4.50
705.33	**1.00**	**0.00**	**0.00**	**1.90**	**0.29**	**3.00**	**0.08**	**1.90577**	**3.60**	**6.00**
717.29	1.00	0.00	0.00	1.89	0.33	3.36	0.09	1.89263	3.60	6.00
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11918.94	0.97	0.81	3.16	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41356	3.60	6.00
11930.89	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41321	3.60	6.00
11942.85	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41286	3.60	6.00
11954.80	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41251	3.60	6.00
11966.75	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41216	3.60	6.00
11978.71	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41181	3.60	6.00
11990.66	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41146	3.60	6.00
12000.32	0.97	0.81	3.17	1.40	0.55	3.59	0.18	1.41119	3.60	6.00

TABELA 6.7 RESULTADOS DE VAZÃO TURBINADA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura 3].

Tempo (s)	***y*[0] (m)**	***v*[0] (m/s)**	***q*[0] (m2/s)**	***y*[n] (m)**	***v*[n] (m/s)**	***q*[n] (m2/s)**	**N.Froude (N)**	***ycc* (m)**	**Q.Turb. (m3/s)**	**Alfa (α)**
0.00	1.00	0.00	0.00	2.02	0.00	0.00	0.00	2.02105	0.00	0.00
11.95	1.00	0.00	0.00	2.00	0.04	0.49	0.01	2.00505	1.32	2.20
23.91	1.00	0.00	0.00	1.99	0.09	1.04	0.03	1.98732	1.38	2.30
35.86	1.00	0.00	0.00	1.98	0.11	1.25	0.03	1.98008	1.38	2.30
47.82	1.00	0.00	0.00	1.98	0.12	1.36	0.03	1.97636	1.44	2.40
59.77	1.00	0.00	0.00	1.97	0.13	1.41	0.04	1.97462	1.44	2.40
71.73	1.00	0.00	0.00	1.96	0.18	1.91	0.05	1.95764	2.22	3.70
83.68	1.00	0.00	0.00	1.94	0.21	2.23	0.06	1.94655	2.70	4.50
95.64	1.00	0.00	0.00	1.93	0.24	2.52	0.07	1.93653	2.70	4.50
107.59	1.00	0.00	0.00	1.93	0.25	2.63	0.07	1.93256	2.70	4.50
119.55	1.00	0.00	0.00	1.93	0.25	2.66	0.07	1.93082	2.70	4.50
131.50	**1.00**	**0.00**	**0.00**	**1.91**	**0.31**	**3.24**	**0.09**	**1.91080**	**3.60**	**6.00**
143.46	1.00	0.00	0.00	1.90	0.33	3.45	0.10	1.90270	3.60	6.00
155.41	1.00	0.00	0.00	1.89	0.34	3.53	0.10	1.89924	3.60	6.00
167.37	1.00	0.00	0.00	1.89	0.35	3.56	0.10	1.89750	3.60	6.00
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11847.21	0.97	0.81	3.17	1.39	0.55	3.59	0.18	1.40075	3.60	6.00
11859.16	0.97	0.81	3.17	1.38	0.55	3.59	0.18	1.40040	3.60	6.00
11871.12	0.97	0.81	3.18	1.38	0.55	3.59	0.18	1.40005	3.60	6.00
11883.07	0.97	0.81	3.18	1.38	0.55	3.59	0.18	1.39970	3.60	6.00
11895.03	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39935	3.60	6.00
11906.98	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39900	3.60	6.00
11918.94	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39865	3.60	6.00
11930.89	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39830	3.60	6.00
11942.85	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39795	3.60	6.00
11954.80	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39760	3.60	6.00
11966.75	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39725	3.60	6.00
11978.71	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39690	3.60	6.00
11990.66	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39655	3.60	6.00
12000.32	0.97	0.81	3.18	1.38	0.56	3.59	0.18	1.39629	3.60	6.00

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A maioria dos projetos de câmaras de carga em usinas hidrelétricas são projetadas sem considerar o regime transiente que ocorre no início da abertura das válvulas. Em muitos casos é necessário simular o funcionamento da câmara de carga considerando o regime transiente, principalmente quando os canais de adução são longos. O método desenvolvido neste trabalho contribui para a determinação de uma regra de operação da abertura da válvula de turbinas instaladas em pequenas centrais hidrelétricas com canal e câmara de carga durante o período transiente que ocorre no momento em que as turbinas são ativadas.

O processo transiente é analisado em detalhe para diferentes trechos dentro do canal de adução até a câmara de carga. Nesta pesquisa o método das Características da malha retangular foi aplicado para solucionar o problema de escoamento não permanente no canal de adução. Em canais com seção transversal uniforme o método das Características apresenta resultados exatos e não aproximados como os obtidos com os métodos dos elementos finitos ou volumes finitos que são preferidos para configurações mais complexas.

A aplicação do método de Recozimento Simulado nesta dissertação foi possível através de um programa computacional em Linguagem Pascal Free-Lazarus e que permitiu determinar a solução ótima da regra de operação da abertura da válvula da turbina instalada numa usina hidrelétrica. Este método exige uma solução inicial viável para que um algoritmo predefinido possa determinar a solução ótima.

O método desenvolvido nesta dissertação permite realizar dimensionamentos de câmaras de carga no caso de projetos que ainda não foram construídos e em aqueles projetos que já se tenham construídas estas estruturas permite fazer uma avaliação do seu funcionamento, para propor mudanças nas regras de operação.

No estudo de caso desta dissertação foi avaliado a câmara de carga de uma usina hidrelétrica existente e foram propostas regras de operação no início do seu funcionamento. Com o resultado determinado nesta dissertação obteve-se regras de operação que garantam a segurança operacional das turbinas da usina hidrelétrica analisada.

Para a otimização multiobjetivo foi preciso atribuir pesos relacionados com o tempo e à profundidade de água dentro da câmara de carga. O peso atribuído para minimizar o tempo para atingir o estado estacionanrio foi de 0,4 e o peso para minimizar a profundidade de água

0,6. Esses valores são opcionais e devem-se ás prioridades do problema.

A seguir apresenta-se sugestões para a realização de estudos futuros:

a) Realizar uma análise de sensibilidade dos resultados que seriam obtidos variando-se os parâmetros *w* e *y* na função multiobjetivo de otimização.

b) Melhorar o critério para atingir o estado estacionário que acontece durante a operação das válvulas da usina hidrelétrica.

c) Usar outras funções multiobjetivos.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, M. B. **An Introduction to the Method of Characteristics.** American Elsevier Co., New York, N.Y., 1996.

ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. Tese de doutorado, Unicamp, 2002.

ASCE – AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS **Guidelines for Design of Intakes for Hydroelectric Plants,** Committee on Hydropower Intakes, 1995, 498 pp

BASTOS, E. A. **Otimização de Seções Retangulares de Concreto Armado Submetidas à Flexo-compressão Oblíqua Utilizando Algoritmos Genéticos**, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Programa de Pôs Graduação em Engenharia, Tese para Obtenção do Título de Mestre em Ciências. 2004.

BURGER, L. C. **Adaptação e Análise do Método de Hershfield para Estimativa da Precipitação Máxima Provável (PMP).** Universidade Federal de Paraná, Programa de Pôs Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Tese para Obtenção do Grau do Mestre, 2014.

FREAD, D. L. **Flow Routing**. Handbook of Hydrology. Ed. R. Maidment. McGraw-Hill Book Company. New York. 1992.

CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction.** 1st ed., Linacre House, Jordan Hill, Oxford, UK 2004a.

CHANSON, H. **Environmental Hydraulics of Open Channel Flow.** 2nd ed., Oxford, UK 2004b.

CHAUDHRY, M. H. **Open Channel Flow.** 2nd ed. New York, N.Y. 2008.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transient.** 1rst ed. New York, N.Y. , pp. 382-395. 1979.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. **"Applied Hydrology**", McGraw Hill International Editions, 1988.

CUNGE, J.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**, Pitman, London, 1980.

DAILY, J. W.; HARLEMAN, D. R. F. Fluid Dynamics. Ed. Addison-Wesley, 1966.

ELETROBRÁS **Manual de Micro Centrais Hidrelétricas,** Junho 1985.

ELETROBRÁS **Diretrizes para Estudos e Projetos de Centrais Hidrelétricas,** Janeiro 2000.

ESHA - EUROPEAN SMALL HYDROPOWER ASSOCIATION, **Guía para el desarrollo de una pequena central hidroeléctrica,** Intelligent Energy Europe, Belgica, 2006

FREAD, D. L. **Numerical properties of implicit four-point finite difference equation of unsteady flow**, HRL-45, NOAA Tech. Memo NWS HYDRO- 18, Hydrol. Res. Lab., Natl. Weather Serv., Silver Spring, Md., 1974.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow.** The Macmillan Company, New York, N.Y., 1966.

HORN, J. **Handbook of Evolutionary Computation**, volume 1. Oxford University Press, Oxford, England, 1997.

INEA - INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA – COLOMBIA. **Guía de Diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.** Instituto de Ciencias Nucleares y Energias Alternativas. Santa Fe de Bogotá, 1997.

IITR - INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROORKEE – **Guidelines for Layout of Small Hydro Plants.** IIT Roorkee, 2008.

KAVISKI, E.; CUNHA, L. M.; LAMBROS, D.; GARCIA, C.S. **Parametrização de curvas de intensidade de precipitação pelo método do recozimento simulado**. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo.

LIGGETT, J. A.; WOOLHISER, D. A. **The use of the shallow water equations in runoff computation**, paper presented at Third Annual American Water Resources Conference, Am. Water Resources Assoc., San Francisco, 1967.

LIGGETT, J. A.; CUNGE, J. A. **Numerical methods of solution of the unsteady flow equations, in Unsteady Flow in Open Channels**, vol. 1, edited by K. Mahmood and V. Yevjevich, pp. 89–179, Water Resources Publ., Highlands Ranch, Colo., 1975.

LOBEIRO, A. M. **Solução das Equações de Saint-Venant em uma e duas Dimensões usando o Método das Características.** Universidade Federal de Paraná, Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Tese para Obtenção do Título de Doutor em Ciências. 2012.

MAHMOOD K.; YEVDJEVICH, V. **Unsteady Flow in Open Channels.** Water Resources Publications, Fort Collins, 1975.

MÄNNICH, M. **Desenvolvimento de Soluções Analíticas e Numéricas da Equação de Richards.** Universidade Federal de Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Tese para Obtenção do Grau de Mestre. 2008.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H. **Equation of state calculations by fast computing machines**. Journal of Chemical Physics, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953.

MORENO, S. R.; KAVISKI, E. **Daily Scheduling Hydroelectric Power Plants Dispacth**. Revista Pesquisa Operacional. Trabalho aceito para publicação, 2014.

MUGUENZA, D. **Micro Centrales Hidroeléctricas**. Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2004.

MAHER, P.; SMITH N., **Pico Hydro for Village Power.** A Practical Manual for Schemes up to 5 kW in Hilly Areas. 2001.

PANTUZA JR., G. **Métodos de Otimização Multiobjetivo e de Simulação Aplicados ao Problema de Planejamento Operacional de Lavra em Minas a Céu Aberto**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral. Ouro Preto, Março de 2011.

PEREIRA, G. W. **Aplicação da Técnica de Recozimento Simulado em Problemas de Planejamento Florestal Multiobjetivo**, Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, Tese para Obtenção do Grau de Mestre em Ciência da Computação, Belo Horizonte, 2004.

PONCE, V. M., **Generalized diffusion wave equation with inertial effects**, Water Resource. Res., 26(5), 1099–1101, 1990.

RAMOS, H. **Guidelines for Designs of Small Hydropower Plants**, WREAN (Western Regional Energy Agency & Network) and DED (Department of Economic Development), Belfast, North Ireland 2000. pp. 70

SARAMAGO, S. P., STEFFEN JR. V., **Introdução às Técnicas de Otimização em Engenharia**, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, MG, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tese para Obtenção do Título de Mestre em Ciências, 2008.

SCHEREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas.** Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo 1978.

SIVALOGANATHAN, K**. Flood Routing by Characteristics Methods,** Journal of The Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104, No. HY7, July 1978, pp.1075.

SOUZA DE, Z.; SANTOS, A. H.; BORTONI, E. **Centrais Hidrelétricas, Implantação e Comissionamento.** Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2009, pag. 255**.**

STEINSTRASSER, C.E. **Método difusivo de Lax aplicado na solução das** equações de Saint Venant, Curitiba: UFPR, CEHPAR. Dissertação de Mestrado, 2005.

TICONA, W. G. C. **Algoritmos evolutivos multi-objetivo para a reconstrução de árvores filogenéticas.** Tese de doutorado, ICMC, USP, São Carlos, S.P., 2003.

WANG, G. T.; CHEN, S. **A semianalytical solution of the Saint-Venant equations for channel flood routing,** Water Resources Research, VOL. 39, NO. 4, 1076, 2003

APÊNDICES

APÊNDICE A. DEDUÇÃO DAS EQUACOES DE SAINT-VENANT

Num canal com escoamento de água em regime não-permanente tanto as velocidades como as alturas mudam com o tempo e com o espaço. Baseado no teorema de transporte de Reynolds e aplicado a um volume de controle é possível obter duas equações diferenciais parciais de primeira ordem, hiperbólicas, que descrevem o movimento da água no canal em estado transiente, estas equações são chamadas de equações de Saint-Venant. Na dedução das equações de Saint-Venant são consideradas as seguintes suposições básicas (ABBOTT, 1996):

(a) velocidade variável na direção longitudinal; em cada seção utiliza-se a velocidade média;
(b) a distribuição de pressões, ao longo da vertical, na seção transversal é hidrostática;
(c) as acelerações verticais não são consideradas;
(d) o escoamento é unidimensional (1D);
(e) o fluido é considerado incompressível e homogêneo;
(f) a declividade do leito do canal é suficientemente pequena para que se possa aproximar o seno do ângulo de inclinação pela tangente;
(g) perdas de energia são estimadas pela equação de Manning ou similar;
(h) o canal deve ser aproximadamente retilíneo, com pequena declividade e leito estável.

A.1.1 Equação da continuidade

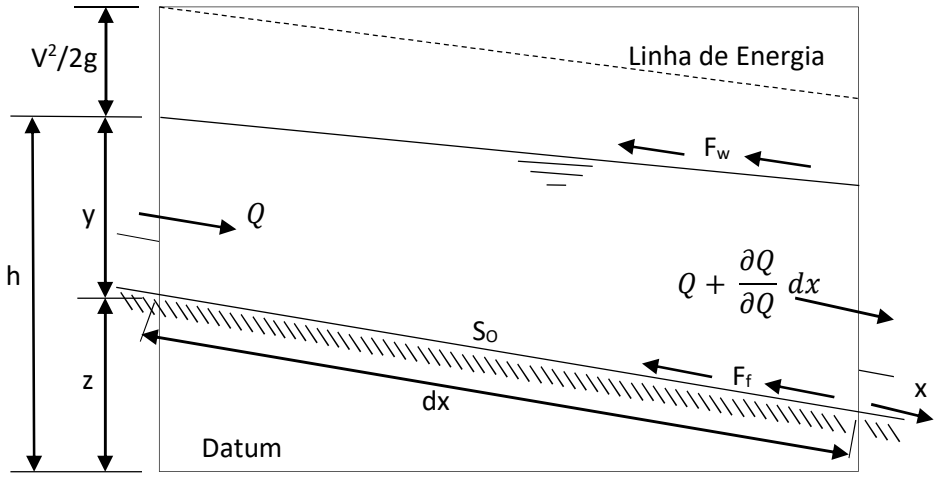
Segundo VEN TE CHOW (1994) e DAILY (1966), a equação de continuidade para um fluxo de densidade variável através de um volume de controle pode ser escrita como:

$$\frac{d}{dt}\iiint_{V.C.} \rho d\forall + \iint_{S.C.} \rho \boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA} = 0. \tag{A.1}$$

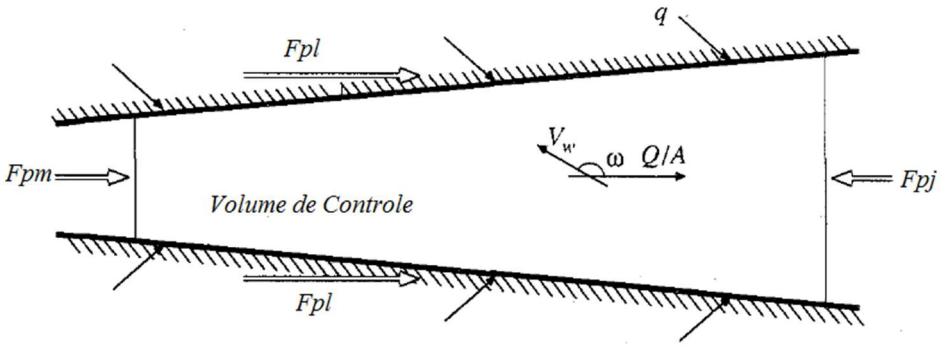
Considerando um volume de controle elementar num canal, com um comprimento fixo dx, conforme esquematizado nas Figuras A.1a. A.1b, A.1c. A vazão que entra no volume de controle é a soma da vazão Q que entra pela secção de montante com a $\mathrm{vazão}$ de percurso q que entra

lateralmente. A vazão q é dado em m^3/s/m assim a vazão total de percurso é dada por qdx, então a entrada de massa para o volume de controle é dada por:

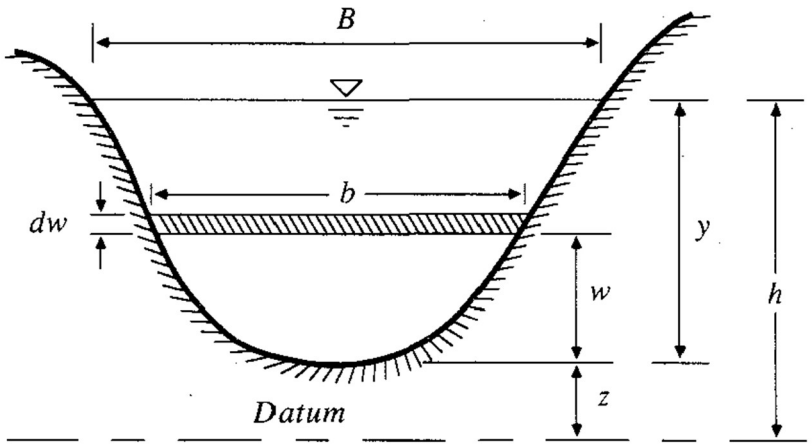
FIGURA A.1: MOSTRA TRÊS PONTOS DE VISTA DO VOLUME DE CONTROLE: (A) UMA VISTA DE ELEVAÇÃO DO LADO, (B) UMA VISTA EM PLANTA DE CIMA, E (C) UM CORTE TRANSVERSAL DO CANAL.



a)



b)



c)

FONTE: Adaptado de VENT TE CHOW (1988)

$$\iint_{entrada} \rho \, \boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA} \; = \; -\rho.(Q + q.dx). \tag{A.2}$$

De acordo com o teorema de transporte de Reynolds o sinal negativo aparece porque as vazões de entrada são consideradas negativos. A quantidade de massa que sai para fora do volume de controle é dada por:

$$\iint_{salida} \rho \, \boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA} \; = \; \rho \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \, dx\right), \tag{A.3}$$

em que $\partial Q/\partial x$ representa a variação da vazão no volume de controle em relação à distância. O volume do elemento é dado por Adx sendo A a área media da secção transversal. Assim a variação da massa armazenada no volume de controle é dada por:

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho \, d\forall = \frac{\partial(\rho \, A \, dx)}{\partial t}. \tag{A.4}$$

Substituindo as equações A.2, A.3 e A.4 em A.1, a saída de massa do volume de controle é calculada por:

$$\frac{\partial(\rho\, A\, dx)}{\partial t} - \rho(Q + q\, dx) + \rho\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x}\, dx\right) = 0. \quad \text{(A.5)}$$

Desta equação a soma da massa que sai com a variação no interior no volume de controle é igual à massa que entra.

Assumindo que a massa especifica do fluido ρ é constante, a equação (A.5) pode ser dividida por *ρ.dx*, de onde se obtém para uma secção transversal do canal a *forma conservativa* da equação de continuidade:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q. \quad \text{(A.6)}$$

Esta equação é válida para canais com secção transversal qualquer e variável ao longo do canal.

A *forma não conservativa* da equação de continuidade é muito utilizada por alguns métodos de solução das equações de Saint-Venant, aqui a velocidade média do escoamento *V* é uma variável independente, em vez de Q na equação (A.6). Esta forma da equação de continuidade pode ser derivada para uma unidade de largura de canal. Negligenciando a entrada lateral *q* para uma unidade de largura $A = y.1 = y$ e $Q = VA = Vy$. Substituindo em (A.6),

$$\frac{\partial(Vy)}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0, \quad \text{(A.7)}$$

$$V\frac{\partial y}{\partial x} + y\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0. \quad \text{(A.8)}$$

A equação (A.8) é a *forma não conservativa* da equação de continuidade.

A.1.2 Equação da quantidade de movimento linear

A segunda equação de Newton $F = \partial P/\partial t$ em que F= força; P= quantidade de

movimento e t= tempo, pode ser escrita na forma do teorema de Transporte de Reynolds (VEN TE CHOW, 1994):

$$\sum \boldsymbol{F} = \frac{d}{dt} \iint_{V.C.} \boldsymbol{V}\, \rho\, d\forall + \iint_{S.C.} \boldsymbol{V}\, \rho\, \boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA}\,. \tag{A.9}$$

A equação anterior mostra que o somatório das forças aplicadas na massa de fluido contida no interior do volume de controle é igual à variação da quantidade de movimento no interior do volume de controle mais a quantidade total de movimento que sai do referido volume.

Forças. - As forças que atuam sobre o fluido contido no volume de controle são:

$$\sum \boldsymbol{F} = F_g + F_f + F_e + F_w + F_P, \tag{A.10}$$

F_g = força devido à gravidade ao longo do canal do peso de água no volume de controle;
F_f = força de atrito com o fundo e laterais do volume de controle;
Fe = força de contração ou expansão causada por variações bruscas da geometria do canal
F_w = força do vento na superfície do fluido;
F_p = força de pressão.

Gravidade. - A componente da força de gravidade que atua sobre o fluido no interior do volume de controle segundo a direção do escoamento é determinada como o produto do peso $\rho gAdx$ pelo seno do ângulo θ que o fundo faz com a horizontal. Para inclinações pequenas, o seno é aproximadamente igual à tangente:

$$Fg = \rho\, g\, A\, dx\, sin\theta \approx \rho\, g\, A\, S_o\, dx, \tag{A.11}$$

onde a declividade do fundo do canal S_o é igual a $-\partial z/\partial x$.

Atrito. - A força de atrito causada pelo esforço transverso ao longo do fundo e lados do volume de controle é dada por: $-\tau_o P dx$ sendo τ_o = tensão tangencial ou de arrastamento; P = perímetro molhado; dx = comprimento do volume de controle. A tensão tangencial ou de arrastamento τ_o

é calculado por: $\tau_o = \gamma\ R\ S_f$ sendo: γ = peso especifico do fluido ($\gamma=\rho g$); R = raio hidráulico ($R=A/P$); Sf = declividade da linha de energia, então: $\tau_o = \rho\ g\ A/P\ S_f$ assim a fora resultante devido ao atrito é calculada por:

$$F_f = -\rho\ g\ A\ S_f\ dx. \tag{A.12}$$

Expansões/Contrações. - Expansões ou contrações bruscas do canal provocam perdas de energia devido a remoinhos. Essas perdas são proporcionais à variação da energia cinética ao longo do comprimento do canal e similares as perdas menores nos sistemas de tubulações. As perdas são uma função da altura de velocidade $V\text{^}2/2g = (Q/A)\text{^}2/2g$ ao longo do canal onde se fornecem as perdas:

As forças que causam essa perda de carga são calculadas por:

$$F_e = -\rho\ g\ A\ S_e\ dx, \tag{A.13}$$

sendo S_e a perda de carga devida à expansão ou contração. S_e é calculado pela seguinte expressão:

$$S_e = \frac{K_e}{2.g}\ \frac{\partial(\frac{Q}{A})^2}{\partial x}, \tag{A.14}$$

em que:

K_e = fator de expansão ou contração, negativo para expansões e positivo para contrações;

Força tangencial pelo vento. - O efeito do vento é causado pela fricção entre o ar e a superfície livre do volume de controle e é dado por:

$$F_w = \tau_w\ B\ dx, \tag{A.15}$$

sendo:

τ_w = tensão tangencial entre o ar e a superfície livre do volume de controle;

B = largura superficial da secção transversal.

A tensão tangencial numa fronteira de um fluido pode ser escrita como:

$$\tau_w = \frac{-\rho\ C_f\ |\ V_r\ |\ V_r}{2}, \tag{A.16}$$

sendo:

Vr = velocidade relativa entre o fluido e o ar;

C_f = coeficiente da tensão tangencial entre o fluido e o ar.

Como a velocidade média do escoamento é dada por Q/A e designando a velocidade do vento por V_w, a velocidade relativa entre o ar e o fluido é calculada por:

$$V_r = \frac{Q}{A} - V_w \ Cos(\omega), \tag{A.17}$$

em que ω é o ângulo formado entre a direção do vento e a direção do escoamento.

Assim a força resultante da ação do vento sobre o fluido contido no volume de controle é dada por:

$$F_w = \frac{-\rho \ C_f \ |V_r| V_r}{2} \ B \ dx \ = -W_f \ B \ \rho \ dx, \tag{A.18}$$

sendo W_f o fator tangencial do vento: $W_f = \frac{C_f \ |V_r| V_r}{2}$.

Pressões. - A resultante da força devido à diferença de pressões hidrostáticas entre a secção de montante a e secção de jusante do volume de controle e o contorno lateral do canal, é determinada por:

$$F_P = F_{Pm} - F_{Pj} + F_{Pl}, \tag{A.19}$$

sendo:

F_{Pm} = resultante da pressão hidrostática atuante na seção de montante;

F_{Pj} = resultante da pressão hidrostática atuante na seção de jusante;

F_{Pl} = resultante da pressão hidrostática segundo a direção do escoamento nas laterais do volume de controle.

De acordo com a Figura A.1c um elemento de altura dw a uma altura w medida a partir do fundo do canal e a uma profundidade (y-w), está sujeito a uma pressão hidrostática $\rho g(y-w)$ e consequentemente uma força hidrostática dada por $\rho g(y-w)bdw$ assim, a força hidrostática atuante na secção de montante do volume de controle é dada por:

$$F_{Pm} = \int_0^y \rho\, g\, (y - w)\, b\, dw. \tag{A.20}$$

Consequentemente a resultante das pressões hidrostáticas atuantes na secção de jusante do volume de controlo é dada por:

$$F_{Pj} = F_{Pm} + \frac{\partial F_{Pm}}{\partial x}\, dx. \tag{A.21}$$

Aplicando a regra de Leibniz para achar $\partial F_{Pm}/\partial x$ resulta:

$$\frac{\partial F_{Pm}}{\partial x} = \int_0^y \rho\, g\, \frac{\partial y}{\partial x}\, b\, dw + \int_0^y \rho\, g\, (y - w) \frac{\partial b}{\partial x}\, dw$$

$$\frac{\partial F_{Pm}}{\partial x} = \rho\, g\, \frac{\partial y}{\partial x} + \int_0^y \rho\, g\, (y - w)\, \frac{\partial b}{\partial x}\, dw \tag{A.22}$$

Como a área da secção transversal do escoamento é dada por $A = \int_0^y b dw$. A força resultante da pressão hidrostática atuante nas laterais do volume de controle está relacionada com a variação da largura do canal $\partial b/\partial x$ Ao longo do comprimento do volume de controle dx, e é dada por:

$$F_{Pl} = \left[\int_0^y \rho\, g\, (y - w)\, \frac{\partial b}{\partial x}\, dw\right] dx. \tag{A.23}$$

Substituindo a equação (A.21) na equação (A.19) obtém-se:

$$F_P = F_{Pm} - \left[F_{Pm} + \frac{\partial F_{Pm}}{\partial x}\, dw\right] + F_{Pl}$$

$$= -\frac{\partial F_{Pm}}{\partial x}\, dx + F_{Pb} \tag{A.24}$$

Substituindo as equações (A.22) e (A.23) em (A.24) e simplificando resulta:

$$F_P = -\rho\, g\, A\, \frac{\partial y}{\partial x}\, dx. \tag{A.25}$$

O somatório das forças atuantes no fluido contido no volume de controle, é dada por:

$$\sum F = \rho\, g\, A\, S_o\, dx - \rho\, g\, A\, S_f\, dx - \rho\, g\, A\, S_e dx - W_f B \rho dx - \rho\, gA \frac{\partial y}{\partial x} dx. \quad \text{(A.26)}$$

Quantidade de Movimento Linear. - Os dois termos de *momentum* do lado direito da equação (A.9) escrita na forma do teorema de transporte de Reynolds, representam a variação e a saída total da quantidade de movimento no volume de controlo respectivamente.

Escoamento total de Saída de Quantidade de Movimento Linear. - A entrada de massa no volume de controle é dada por $-\rho\,(Q + qdx)$ e representa as entradas no montante no eixo do canal e as entradas laterais. Para o cálculo do momentum correspondente multiplica-se as quantidades de massa que entram por suas velocidades e por um fator de correção de momentum β:

$$\iint_{entrada} \boldsymbol{V}.\rho.\boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA} = -\rho\,(\beta\, V\, Q + \beta\, v_x\, q\, dx\,, \quad \text{(A.27)}$$

onde $\rho\beta VQ$ e $\rho\beta v_x q dx$ são os momentos que entram na montante e lateral respetivamente. Sendo β um fator de correção da quantidade de movimento ou coeficiente de Boussinesq que toma em consideração a distribuição de velocidades na secção transversal:

$$\beta = \frac{1}{V^2 A} \iint v^2\, dA. \quad \text{(A.28)}$$

Segundo VEN TE CHOW (1959) e HENDERSON (1966), os valores de β variam entre 1.01 para canais prismáticos e 1.33 para canais naturais com margens de inundação.

Assim para a jusante o momentum que sai do volume de controle pode-se escrever:

$$\iint_{saída} \boldsymbol{V}\,\rho\,\boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA} = -\rho\left[\beta\, V\, Q + \frac{\partial(\beta\, V\, Q)}{\partial x}\, dx\right]. \quad \text{(A.29)}$$

O balanço da quantidade de movimento através da superfície de controle é a soma das equações (A.27) e (A.29):

$$\iint_{S.C.} \boldsymbol{V}\rho\,\boldsymbol{V}.\boldsymbol{dA} = -\rho\,[\beta\,V\,Q + \beta\,v_x\,q\,dx] + \rho\left[\beta\,V\,Q + \frac{\partial(\beta\,V\,Q)}{\partial x}\,dx\right]$$

Simplificando:

$$= -\rho\left[\beta\,v_x\,q - \frac{\partial(\beta\,V\,Q)}{\partial x}\right]dx. \tag{A.30}$$

Armazenamento de Quantidade de Movimento Linear. - Assim a variação da quantidade de movimento armazenada no volume de controle em ordem ao tempo é:

$$\frac{d}{dt}\iiint \boldsymbol{V}\,\rho\,d\forall = \rho\,\frac{\partial Q}{\partial t}\,dx\,. \tag{A.31}$$

Substituindo as forças atuantes no fluido contido no volume de controle (A.26) e os termos das quantidades de movimento (A.30) e (A.31) na equação (A.9) obtém-se:

$$\rho\,g\,A\,S_o\,dx - \rho\,g\,A\,S_f\,dx - \rho\,g\,A\,S_e\,dx - W_f\,B\,\rho\,dx - \rho\,g\,A\,\frac{\partial y}{\partial x}\,dx$$

$$= -\rho\left[\beta\,v_x - \frac{\partial(\beta\,v\,Q)}{\partial x}\right]dx + \rho\frac{\partial Q}{\partial t}\,dt\,. \tag{A.32}$$

Dividindo toda a equação por: $\rho.dx$ e substituindo V por Q/A obtém-se a equação da quantidade de movimento na sua forma conservativa:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g\,A\left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f + S_e\right) - \beta\,q\,v_x + W_f\,\beta = 0. \tag{A.33}$$

A equação de momentum (A.33) pode ser expressada em termos de *h* segundo a Figura A.1:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g\,A\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) - \beta\,q\,v_x + W_f\,\beta = 0. \tag{A.34}$$

As equações de Saint-Venant (A.6) para a *continuidade* e (A.34) para *momentum* são

as equações fundamentais para escoamento unidimensional e não permanente em canais abertos.

Como foi mencionado antes a *forma não conservativa* da equação de continuidade é muito utilizado por alguns métodos de solução das equações de Saint-Venant, de maneira similar à *forma não conservativa* da equação de momentum também pode ser achada. Desprezando as perdas de eddy ou remoinhos, os efeitos de esforço tangenciai por vento e a entrada lateral, a *forma não conservativa* da equação de momentum para uma largura unitária do canal é:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f) = 0. \tag{A.35}$$

Por outra parte na equação de momentum na sua *forma conservativa* admitindo que a vazão de percurso entra no canal numa direção perpendicular à direção do escoamento: $v_x = 0$ desprezando o efeito do vento: $W_f = 0$ e dividindo por A, obtém-se:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + g\,\frac{\partial y}{\partial x} - g\left(S_o - S_f\right) = 0. \tag{A.36}$$

Resumindo as equações de Saint-Venant são duas equações diferenciais às derivadas parciais, uma é a equação da continuidade (A.6) e outra a equação da quantidade de movimento (A.36).

Na Tabela A.1 apresenta-se o significado dos termos da equação (A.36):

TABELA A.1 SIGNIFICADO DOS TERMOS DA EQUAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR.

$\frac{1}{A}\ \frac{\partial Q}{\partial t}$	Representa a aceleração local que descreve a variação da quantidade de movimento devida a variação das velocidades em ordem do tempo
$\frac{1}{A}\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right)$	Representa a aceleração convectiva e descreve a variação da quantidade de movimento devida a uma mudança de velocidade do escoamento ao longo do canal
$g\ \frac{\partial y}{\partial x}$	Representa a diferença das resultantes das pressões hidrostáticas atuantes na fronteira do volume de controlo e é proporcional à variação da profundidade do escoamento ao longo do canal.
$g\ S_o$	Representa a ação da gravidade e é proporcional ao declive do fundo do canal
$g\ S_f$	Representa a ação do atrito com o fundo e as margens do canal

FONTE: O Autor (2016)

A.1.3 Fórmulas Conservativas e Não Conservativas

A seguir apresenta-se um resumo das formulas conservativas e não conservativas das Equações de Saint-Venant:

Equação de Continuidade:

Forma conservativa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{A.37}$$

Forma não conservativa:

$$V\frac{\partial y}{\partial x} + y\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = q \tag{A.38}$$

Equação de dinâmica:

Forma conservativa:

$$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A}\frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g\frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = q\frac{Q}{A^2} \quad \text{(A.39)}$$

Forma não conservativa:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{A}q + g\frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad \text{(A.40)}$$

Para o caso que a vazão lateral seja nula *q=0*, a forma não conservativa da equação de movimento fornece equações de onda. A partir das equações de continuidade e quantidade de movimento linear é possível obter modelos de transito distribuído. O modelo de distribuído mais simples é o modelo de onda cinemática, conforme mostrado na Tabela A.2. Neste caso não se tem em conta os termos de aceleração local, aceleração convectiva e pressão na equação de quantidade de movimento linear, A.40, isto é que $S_o = S_f$, onde as forças de atrito e as forças de gravidade se equilibram. O modelo de onda de difusão não considera os termos de aceleração local e aceleração convectiva e pressão mas se considera o termo de pressão. O modelo da onda dinâmica considera todos os termos de aceleração e pressão na equação A.40 (VEM TE CHOW, 1994)

TABELA A.2 MODELOS DE ONDA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO LINEAR.

$g(S_o - S_f) = 0$	Onda cinemática
$g\frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$	Onda de difusão
$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$	Onda dinâmica

FONTE: Adaptado de LOBEIRO (2012)

APÊNDICE B. LISTAGEM DO PROGRAMA *Transiente* (c_carga8)

ANÁLISE DINÂMICA DO INÍCIO DA OPERAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA DE USINAS HIDRELÉTRICAS.

```
program c_carga8;
{
  Análise dinâmica do início da operação
  da câmara de carga de usinas hidrelétricas.
  Executado pelo rs_c_ca2

  Versão: 01/2009 - 02/2009 - 03/2009 - 01/2017
  Autores: Eloy Kaviski - Héctor Novoa
}

{$mode objfpc}{$H+}

uses
  {$IFDEF UNIX}{$IFDEF UseCThreads}
   cthreads,
  {$ENDIF}{$ENDIF}
   Classes, SysUtils, CustApp,dos;

{$OPTIMIZATION OFF}

  type
    vetd1 = array[1..100]  of double;
    vetd2 = array[0..7500] of double;

 var
    arq   : text;
    bin   : file of double;
    nalfa : integer;  { tabela de ab. da válvula }
    alfa,
    talfa : ^vetd1;
    zr,               { Cota do reservatório      }
    flc,              { fração de acréscimo em lc }
    dx,dt,
    ttot,             { tempo total de análise    }
    qtmin,            { Vaz. turb. mínima         }
    qres,             { vazao na saída do res.    }
    kres,
    auxx,
    alfat : double;
    nx    : integer;  { tabela solução            }
    x,
    tmri  : ^vetd2;   { tempo max. regime inicial }
    y,v   : array[1..2] of ^vetd2;
    sc,                             { área alagada na cam. carga         }
    qu,vc,                        { vazao na ultima s.t. e vol. c.c.    }
    yc,qt : array[1..2] of double; { cota da cam.carga e vazão turbinada }
    snarq : string;
    i,idt,
    ndt   : integer;
```

```
    nttot : longint;

  const
    s0 : double = 2.4427e-4; { m/m }
    lc : double = 4.18e3;       { m  }
    ms : double = 1.5e0;     { m/m }
    bs : double = 2.6e0;      { m }
    ns : double = 0.013e0;  { m**(1/3)/s }
    ac : double = 2.531e0;  { m }
    zm : double = 4.20e0;   { m }
(*  bc : double = 3.5e0;      { m }
    cc : double = 3.0e0;       { m  }
    mc : double = 2.0e0;      { m/m }
    hc : double = 8.0e0;       { m }
    lf : double = 5.0e1;        { m  }
    df : double = 6.0e1;       { cm }
    kf : double = 47.586e0; { ?????????? }  *)
    g  : double = 9.807e0;  { m/s**2 }
    n    : integer = 12;
    z    : array[1..13] of double = (0.0e0, 0.5e0, 1.0e0, 1.5e0, 2.0e0,
2.5e0,
                                     3.0e0, 3.5e0, 4.0e0, 4.5e0, 5.0e0,
5.5e0,
                                     9.0e1);
    area : array[1..12] of double = (  0.0e0,     13.9529e0,  42.8654e0,
                                      80.5873e0, 123.7760e0, 173.8669e0,
                                     217.3816e0, 263.1126e0, 310.9029e0,
                                     358.8801e0, 408.6739e0, 460.1889e0);
    vol  : array[1..13] of double = (      0.0e0,   3.4882e0,  14.2046e0,
                                       30.8632e0,  51.0908e0,  74.4107e0,
                                       97.8121e0, 120.1236e0, 143.5039e0,
                                      167.4458e0, 191.8885e0, 217.2157e0,
                                     9000.0000e0);


function inter_areacc(var y:double):double;

  var
    i,j : byte;
    zc  : double;

  begin

    zc := y + ac;
    if zc <= z[1]
      then
        begin
          inter_areacc := area[1];
          exit;
          end;

    i := 1;
    repeat
      i := i + 1;
      until z[i] > zc;

    if i > n
```

```
      then
        i := n;

    j := i - 1;

    inter_areacc := area[j] + (area[i] - area[j])*(zc   - z[j])/
                                                  (z[i] - z[j]);
    end;


function inter_cotacc(var v:double):double;

  var
    i,j : byte;
    zc  : double;

  begin

    if v <= vol[1]
      then
        begin
          inter_cotacc := z[1] - ac;
          exit;
          end;

    i := 1;
    repeat
      i := i + 1;
      until vol[i] > v;

    if i > n
      then
        i := n;

    j := i - 1;

    inter_cotacc := z[j] - ac + (z[i] - z[j])*(v      - vol[j])/
                                              (vol[i] - vol[j]);
    end;

function inter_volcc(var y:double):double;

  var
    i,j : byte;
    zc  : double;

  begin

    zc := y + ac;
    if zc <= z[1]
      then
        begin
          inter_volcc := vol[1];
          exit;
          end;

    i := 1;
```

```
    repeat
      i := i + 1;
      until z[i] > zc;

    if i > n
      then
        i := n;

    j := i - 1;

    inter_volcc := vol[j] + (vol[i] - vol[j])*(zc   - z[j])/
                                                (z[i] - z[j]);
    end;


procedure siva;
{
  Aplicação do Método de K.Sivaloganathan - Malha retangular
  v.104 - n.HY7 - Jul 1978 - pg.1075
}
  var
    xr,yr,vr,
    xl,yl,vl,
    cl,gl,cr,
    gr,sst,
    erh,eps,
    udg,cqt,
    sca,eqt,
    usk,zrk,
    t,a,b,c,
    a1,b1,c1,
    ycm,nfr,
    tcalfa   : double;
    i,m1     : integer;
    nidt     : longint;

  const
    ini : integer = 1;

procedure constantes;

  begin

    eps := 1.0e-7;
{   eqt := 0.204e0/0.388e0; }
    sst := sqrt(1.0e0+ms*ms);
    erh := 4.0e0/3.0e0;
    udg := g + g;
{   cqt := exp(ln(df/kf)/0.388e0)*exp(-eqt*ln(lf)); }
    udg := 1.0e0/udg;
{   sca := 2.0e0*bc*(ac*mc + cc)/dt;  }
    usk := 1.0e0/(1.0e0 + kres);
    zrk := usk*zr;
    ycm := zm - ac;

    end;
```

```
function areast(var y:double):double;

  begin

    areast := (bs + ms*y)*y;

    end;

function bst(var y:double):double;

  var
    a : double;

  begin

    a   := ms*y;
    bst := bs + a + a;

    end;

function perst(var y:double):double;

  var
    a : double;

  begin

    a     := sst*y;
    perst := bs + a + a;

    end;

function g_r(var y,v:double):double;

  var
    r,sf,
    aux  : double;

  begin

    aux := ns*v;
    r   := areast(y)/perst(y);
    sf  := aux*aux/exp(erh*ln(r));
    g_r := s0 - sf;

    end;

function inter_alfa(var u:double; var ini:integer):double;

  var
    i : integer;

  begin

    i := ini;
    repeat
      i := i + 1;
```

```
      until talfa^[i] > u;

    ini := i - 1;

    inter_alfa := alfa^[ini];

    end;

procedure inter_yv(var u,yu,vu:double);

  var
    i,
    ini : integer;
    aux : double;

  begin

    i := 1 + trunc(u/dx);
    if i > nx
      then
        i := nx;

    ini := i - 1;
    aux := (u - x^[ini])/(x^[i] - x^[ini]);

    yu := y[1]^[ini] + (y[1]^[i] - y[1]^[ini])*aux;
    vu := v[1]^[ini] + (v[1]^[i] - v[1]^[ini])*aux;

    end;
(*
function vol_cc(z:double):double;

  begin

    vol_cc := bc*(ac*(cc + 0.5e0*mc*ac) + z*(mc*ac + cc));

    end;

function cota_cc(v:double):double;

  begin

    cota_cc := (v - bc*(ac*(cc + 0.5e0*mc*ac))/(mc*ac + cc));

    end;

function vaz_tb(z:double):double;
{
  Fórmula de Scobey - Manual ELETROBRÁS - pg. 197
}
  var
    carga : double;

  begin

    carga  := z + hc;
    vaz_tb := cqt*alfat*exp(eqt*ln(carga));
```

```
    end;
*)
function vaz_tb(z:double):double;

  begin

    if z < ycm
      then
        begin
          tcalfa := 0.0e0;
          alfat  := 0.0e0;
          ini    :=     1;
          end;

    vaz_tb := alfat*qtmin;

    end;

function celer(y:double):double;

  begin

    celer := sqrt(g*areast(y)/bst(y));

    end;

procedure det_tmri;

  var
    i     : integer;
    c0,c1,
    ddx   : double;

  begin

    ddx := dx + dx;

    i := 0;
    repeat
      i := i + 1;
      until alfa^[i] <> 0.0e0;

    if i = 1
      then
        tmri^[nx] := 0.0e0
      else
        tmri^[nx] := talfa^[i-1];

    c1 := celer(y[2]^[nx]);
    for i := nx-1 downto 0 do
      begin
        c0       := c1;
        c1       := celer(y[2]^[i]);
        tmri^[i] := tmri^[i+1] + ddx/(c0+c1);
        end;
```

```
    end;

function ver_tmri(var m1:integer):integer;

  var
    m : integer;

  begin

    for m := m1 downto 0 do
      if tmri^[m] > t
        then
          begin
            ver_tmri := m;
            exit;
            end;

    ver_tmri := -1;

    end;

procedure reservatorio;

  begin

    xr := dt*(celer(y[1]^[0]) - v[1]^[0]);

    inter_yv(xr,yr,vr);

    b1 := g/celer(yr);
    a1 := vr + g*g_r(yr,vr)*dt - yr*b1;

    c := udg*a1*a1 - zrk;
    b := usk + a1*b1/g;
    a := udg*b1*b1;

    y[2]^[0] := 0.5e0*(sqrt(b*b - 4.0e0*a*c) - b)/a;
    v[2]^[0] := a1 + b1*y[2]^[0];

    qres := areast(y[2]^[0])*v[2]^[0];

    end;

procedure p_interior(m:integer);

  var
    cm,
    aux : double;

  begin

    cm := celer(y[1]^[m]);
    xr := x^[m] - dt*(v[1]^[m] - cm);
    xl := x^[m] - dt*(v[1]^[m] + cm);

    inter_yv(xr,yr,vr);
    inter_yv(xl,yl,vl);
```

```
    cl := celer(yl);
    cr := celer(yr);
    gl := g_r(yl,vl);
    gr := g_r(yr,vr);

    aux := g*(dt*(cl*gl + cr*gr) + yl - yr) + cl*vl + cr*vr;

    v[2]^[m] := aux/(cl + cr);
    y[2]^[m] := yl + cl*(dt*gl + (vl - v[2]^[m])/g);

    end;

procedure canal(var m1:integer);

  var
    m : integer;

  begin

    if m1 < 0
      then
        m := 1
      else
        m := m1 + 1;

    while m < nx do
      begin

        p_interior(m);

        m := m + 1;
        end;

    end;

procedure camara;

  var
    y0,y1,y2,
    f0,f1,f2,
    dy       : double;
    n        : integer;
    rc       : byte;

function fcc(var y:double):double;
{
  Propagação na câmara de carga.
  Sol. da eq. (10.2.2)
  Maidment,D.R. - Handbook of Hydrology - 1993
}
  begin

    v[2]^[nx] := a1 - b1*y;

    yc[2] := y + udg*v[2]^[nx]*v[2]^[nx];
{   qt[2] := vaz_tb(yc[2]); }
```

```
    sc[2] := inter_areacc(yc[2]);

    sca := (sc[1] + sc[2])/dt;

    fcc := v[2]^[nx]*areast(y) - qt[2] + sca*(yc[1] - yc[2]) + c1;

    end;

procedure buscalim(var rc:byte);

  var
    i : integer;

  begin

    f1 := f0;
    f2 := f0;
    y1 := y0;
    y2 := y0;

    for i := 1 to n do
      begin

        if abs(f2) < eps
          then
            begin
              rc := 1;
              y[2]^[nx] := y2;
              qu[2]     := areast(y[2]^[nx])*v[2]^[nx];
              vc[2]     := inter_volcc(yc[2]);
              exit;
              end;

        if f1*f2 < 0.0e0
          then
            begin
              rc := 2;
              exit;
              end;

        y1 := y2;
        f1 := f2;
        y2 := y2 + dy;
        f2 := fcc(y2);

        end;

    rc := 99;

    end;

procedure falsapos;

  var
    i : integer;

  begin
```

```
    i := 0;
    repeat

      y0 := y1 - (y2 - y1)*f1/(f2 - f1);
      f0 := fcc(y0);

      if f0*f2 < 0.0e0
        then
          begin
            y1 := y0;
            f1 := f0;
            end
        else
          begin
            y2 := y0;
            f2 := f0;
            end;

      i := i + 1;
      until (abs(f0) < eps) or (i > 100);

    y[2]^[nx] := y0;
    qu[2]     := areast(y[2]^[nx])*v[2]^[nx];
    vc[2]     := inter_volcc(yc[2]);

    end;

procedure critico;

  var
    vn,cm,
    xl,yl,vl,
    cl,gl,
    yn0,yn1 : double;
    it      : byte;

  const
    erro : double = 1.0e-4;
    nit  : byte   =     20;

  begin

    cm := celer(y[1]^[nx]);
    xl := x^[nx] - dt*(v[1]^[nx] + cm);

    inter_yv(xl,yl,vl);

    cl := celer(yl);
    gl := g_r(yl,vl);

    yn1 := y[2]^[nx-1];
    it  := 0;
    repeat
      yn0 := yn1;
      vn  := celer(yn0);
      yn1 := yl + cl*(dt*gl + (vl - vn)/g);
```

```
      it  := it + 1;
      until (abs(yn1-yn0) < erro) or (it > nit);

    y[2]^[nx] := yn1;
    v[2]^[nx] := celer(yn1);

    end;

procedure supcrit;

  begin
(*
    if v[1]^[nx] > celer(y[1]^[nx])
      then
        begin
          p_interior(nx);
          exit;
          end;

    critico;
*)
    p_interior(nx);

    qu[2] := areast(y[2]^[nx])*v[2]^[nx];
    vc[2] := vc[1] + 0.5e0*dt*(qu[1] + qu[2] - qt[1] - qt[2]);
    yc[2] := inter_cotacc(vc[2]);

    end;

  begin { camara }

    if v[2]^[nx-1] > celer(y[2]^[nx-1])
      then
        begin
          supcrit;
          exit;
          end;

    xl := lc - dt*(v[1]^[nx] + celer(y[1]^[nx]));

    inter_yv(xl,yl,vl);

    b1 := g/celer(yl);
    a1 := vl + g*g_r(yl,vl)*dt + yl*b1;
    c1 := v[1]^[nx]*areast(y[1]^[nx]) - qt[1];

    y0 := y[2]^[nx-1];
    f0 := fcc(y0);
    dy := -0.01*y0;
    n  := 90;

    buscalim(rc);

    if rc = 1
      then
        exit;
```

```
    if rc = 2
      then
        begin
          falsapos;
          exit;
          end;

    dy := -dy;
    n  := 150;

    buscalim(rc);

    if rc = 1
      then
        exit;

    if rc = 2
      then
        begin
          falsapos;
          exit;
          end;

    critico;
(*
    writeln('Sem solução na CC');
    writeln(arq,t,1.0e20,1.0e20,alfat);
    writeln(arq,ttot);
    close(arq);
    halt;
*)
    end;

  begin { siva }

    constantes;

    det_tmri;

    assign (arq,'casob'+snarq+'.txt');
    rewrite(arq);

    assign (bin,'casob'+snarq+'.bin');
    rewrite(bin);

    writeln(arq,zr,qtmin,kres,ttot,nalfa:5);
    writeln(arq,flc,nx:10,ns,zm);
    writeln(arq,s0,lc);
    for i := 1 to nalfa do
      writeln(arq,i:5,' ',talfa^[i],alfa^[i]);

    writeln(arq);
    writeln(arq,' ----------------------------------------------',
                '----------------------------------------------',
                '----------------------------------------------',
                '----------------------------------------------',
                '----------------------------------------------',
```

```
                '---------------------------------');
    writeln(arq,'        Tempo (s)               y[0] (m)       ',
                '        v[0] (m/s)               q[0] (m)       ',
                '        y[n] (m/s)               v[n] (m)       ',
                '        q[n] (m/s)             N. Froude (n)    ',
                '         ycc (m)        ',
                '      Q.Turb. (m3/s)               alfa');
    writeln(arq,' ---------------------- ----------------------',
                ' ---------------------- ----------------------',
                ' ---------------------- ----------------------',
                ' ---------------------- ----------------------',
                ' ----------------------',
                ' ---------------------- ----------------------');

    writeln(arq,0.0e0,' ',y[2]^[0],' ',v[2]^[0],' ',qres,' ',y[2]^[nx],' ',
                         v[2]^[nx],' ',qu[2],' ',0.0e0,' ',yc[2],' ',
                         qt[2],' ',0.0e0);

    m1     := nx;
    t      := dt;
    tcalfa := dt;
    idt    := 0;
    nidt   := 0;
    repeat

      y[1]^ := y[2]^;
      v[1]^ := v[2]^;
      qu[1] := qu[2];
      yc[1] := yc[2];
      vc[1] := vc[2];
      sc[1] := sc[2];
      qt[1] := qt[2];
      alfat := inter_alfa(tcalfa,ini);
      qt[2] := vaz_tb(yc[1]);

      m1 := ver_tmri(m1);     { de 0 até m1: Cond. iniciais }

      if m1 < 0
        then
          reservatorio;

      canal(m1);

      if m1 < nx
        then
          camara;

      idt := idt + 1;
      if idt >= ndt
        then
          begin

            nidt := nidt + ndt;
{           writeln(nidt,' de ',nttot); }
            nfr := v[2]^[nx]/celer(y[2]^[nx]);
```

```
            writeln(arq,t,' ',y[2]^[0],' ',v[2]^[0],' ',qres,'
',y[2]^[nx],' ',
                                v[2]^[nx],' ',qu[2],' ',nfr,' ',yc[2],' ',
                                qt[2],' ',alfat);

            if t > talfa^[nalfa]
              then
                begin
                  write(bin,t);
                  write(bin,y[2]^[nx]);
                  end;

            idt := 0;
            end;

      t      := t + dt;
      tcalfa := tcalfa + dt;
      until t > ttot;

    if idt <> 0
      then
        begin
          nfr := v[2]^[nx]/celer(y[2]^[nx]);
          writeln(arq,t,' ',y[2]^[0],' ',v[2]^[0],' ',qres,' ',y[2]^[nx],'
',
                                v[2]^[nx],' ',qu[2],' ',nfr,' ',yc[2],' ',
                                qt[2],' ',alfat);
          end;

    close(arq);
    close(bin);

    end;

procedure lerdad;

  var
    i : integer;

  begin

    new(alfa);
    new(talfa);

    assign(arq,'c_carga8.txt');
    reset (arq);

    readln(arq,zr,qtmin,kres,ttot,nalfa,i);
    readln(arq,flc,nx,ns,zm);
    str(i,snarq);
    for i := 1 to nalfa do
      readln(arq,talfa^[i],alfa^[i]);

    talfa^[nalfa+1] := 1.0e50;
    alfa^ [nalfa+1] :=    6.0;

    close(arq);
```

```
  end;

begin

  writeln('Executando c_carga8...');

  new(x);
  new(tmri);
  for i := 1 to 2 do
    begin
      new(y[i]);
      new(v[i]);
      end;

  lerdad;

  if abs(flc) > 1.0e-5
    then
      begin
        auxx := s0*lc;
        lc   := (1.0e0 + flc)*lc;
        s0   := auxx/lc;
        end;

  if (nx < 1) or (nx > 7000)
    then
      nx  := 7000;

  writeln('Caso: ',snarq);
  writeln('Nx=',nx:5,'   lc=',lc:9:2,'   kr=',kres:8:5,'   n=',ns:8:5);

  dx  := lc/nx;
  dt  := 0.1e0*dx;

  nttot := trunc(ttot/dt);
  ndt   := nttot div 1000;

  for i := 0 to nx do
    begin
      x^[i]    := i*dx;
      v[2]^[i] := 0.0e0;          { CI }
      y[2]^[i] := zr + s0*x^[i];
      end;

  yc[2] := y[2]^[nx];             { CI }
  qu[2] := 0.0e0;
  qres  := 0.0e0;
  vc[2] := inter_volcc(yc[2]);
  qt[2] := 0.0e0;
  sc[2] := inter_areacc(yc[2]);

  siva;

  writeln('Fim do processamento.');
  writeln('Ver os resultados no arquivo: caso'+snarq+'.txt');
```

```
end.
```

APÊNDICE C. LISTAGEM DO PROGRAMA *Otimização* (rs_c_ca2)

BUSCA DA SOLUÇÃO OTIMA (RECOZIMENTO SIMULADO) ANÁLISE DINÂMICA DO INÍCIO DA OPERAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA DE USINAS HIDRELÉTRICAS.

```
program rs_c_ca2;
{
  Busca de solução ótima (Recozimento simulado):
  Análise dinâmica do início da operação
  da câmara de carga de usinas hidrelétricas (c_carga8).

  Versão: 01/2017 Autor: Eloy Kaviski
  }

{$mode objfpc}{$H+}

uses
  {$IFDEF UNIX}{$IFDEF UseCThreads}
   cthreads,
  {$ENDIF}{$ENDIF}
   Classes, SysUtils, CustApp,dos;

{$OPTIMIZATION OFF}

  type
    vetd1 = array[1..100]  of double;

  var
    arq1,
    arq2  : text;
    bin   : file of double;
    niter,
    nsuc,
    nalfa : integer;  { tabela de ab. da válvula }
    alfa,
    talfa : array[1..5] of vetd1;  { variáves de decisão }
    tnc,
    ync,
    znc   : array[1..5] of double; { Fob }
    sol_a,
    sol_o,
    sol_p : byte;
    s1    : string;
    peso1,
    peso2,
    a,b,c,
    prec,
    ttot  : double;

  const
    det_sol_p : array[1..3,1..3] of byte = ((2,3,2),(3,1,1),(2,1,1));

procedure lerdad;
```

```
  var
    i : byte;

  begin

    assign(arq1,'rs_c_ca2.txt');
    reset (arq1);

    readln(arq1,niter,nsuc,prec,peso1);
    readln(arq1,a,b,c,ttot,nalfa);
    readln(arq1,s1);

    peso2 := 1.0 - peso1;

    for i := 1 to nalfa do
      readln(arq1,talfa[4,i],alfa[4,i]);

    close(arq1);

    i := nalfa + 1;

    talfa[4,i] :=          ttot;
    alfa [4,i] := alfa[4,nalfa];

    end;

procedure gravar1;

  var
    i : byte;

  begin

    assign (arq1,'c_carga8.txt');
    rewrite(arq1);

    writeln(arq1,a,' ',b,' ',c,' ',ttot,' ',nalfa,' ',sol_p);
    writeln(arq1,s1);

    for i := 1 to nalfa do
      writeln(arq1,talfa[sol_p,i],' ',alfa[sol_p,i]);

    close(arq1);

    end;

procedure fob;

  var
    i   : byte;
    z1,
    z2,
    ymx,
    t,d : double;
    y   : array[0..1] of double;

  begin
```

```
    assign(bin,'casob'+chr(sol_p+48)+'.bin');
    reset (bin);

    znc[sol_p] := 1.0e100;

    if eof(bin)
      then
        begin
          close(bin);
          exit;
          end;

    i := 0;

    read(bin,t);
    read(bin,y[i]);

    ymx := y[i];
    repeat

      i := 1 - i;

      read(bin,t);
      read(bin,y[i]);

      d := abs(y[i] - y[1-i]);

      if d < prec
        then
          begin

            z1 := (t-talfa[sol_p,nalfa])/(ttot-talfa[sol_p,nalfa]);
            z2 := (ymx-y[i])/ymx;

            znc[sol_p] := peso1*z1 + peso2*z2;
            ync[sol_p] := y[i];
            tnc[sol_p] := t;

            close(bin);
            exit;
            end;

      until eof(bin);

    close(bin);

    end;

procedure cop_sol;

  var
    i : integer;

  begin

    for i := 1 to nalfa+1 do
```

```
      begin
        alfa [sol_p,i] := alfa [sol_a,i];
        talfa[sol_p,i] := talfa[sol_a,i];
        end;

    end;

procedure sol_inic;

  var
    i     : byte;
    t,tt  : double;
    j,
    k,it  : integer;

  begin

    it    := 0;
    sol_a := 4;
    sol_p := 1;
    sol_o := 1;

    cop_sol;

    repeat
(*
      for i := 1 to nalfa+1 do
        writeln(i:3,talfa[sol_p,i],' ',alfa[sol_p,i]);
*)
      gravar1;

      swapvectors;

      exec('c:\hector\c_carga8','  ');

      swapvectors;

      repeat
        until doserror = 0;

      fob;

      writeln('sol_inic ',znc[sol_p]);

      if znc[sol_p] < 1.0
        then
          exit;

      it := it + 1;

      tt := (0.1+0.5*random)*ttot;
      t  := tt;
      for i := 2 to nalfa-1 do
        begin

          talfa[sol_p,i] := talfa[sol_p,i-1] + 0.8*random*t;
```

```
          t := tt - talfa[sol_p,i];

          end;

       alfa [sol_p,nalfa] := 6.0;
       talfa[sol_p,nalfa] :=  tt;

       j := 50;
       for i := 2 to nalfa-1 do
         begin

          k := random(j+1);
          j := j - k;

          alfa[sol_p,i] := alfa[sol_p,i-1] + 0.1*k;

          end;

       until it > niter;

     writeln(arq2,'Solução inicial não encontrada.');

     readln;

     halt;

     end;

procedure otimo;
{
  Método do recozimento simulado
}
  var
    j       : word;
    ksim,
    ksuc,
    simmax,
    sucmax  : longint;
    t,df    : double;

  const
    fat  : double  =  0.9;
    nt   : integer =    5;
    t0   : double  =  0.5;

procedure sorte;

  var
    i : integer;

  begin

    i := 2 + random(nalfa-1);

    talfa[sol_p,i] := talfa[sol_a,i]*(0.95 + 0.1*random);

    if talfa[sol_p,i] < talfa[sol_p,i-1]
```

```
      then
        talfa[sol_p,i] := 0.5*(talfa[sol_p,i-1] + talfa[sol_a,i])
      else
        if talfa[sol_p,i] > talfa[sol_p,i+1]
          then
            talfa[sol_p,i] := 0.5*(talfa[sol_p,i+1] + talfa[sol_a,i]);

    if i = nalfa
      then
        exit;

    if random < 0.5
      then
        begin

          alfa[sol_p,i] := alfa[sol_p,i] - 0.1;

          if alfa[sol_p,i] < alfa[sol_p,i-1]
            then
              alfa[sol_p,i] := alfa[sol_p,i-1];

          exit;
          end;

    alfa[sol_p,i] := alfa[sol_p,i] + 0.1;

    if alfa[sol_p,i] > alfa[sol_p,i+1]
      then
        alfa[sol_p,i] := alfa[sol_p,i+1];

    end;

function metropolis:boolean;

  var
    aux : double;

  begin

    metropolis := true;

    if df < 0.0
      then
        exit;

    aux := df/t;
    if aux < 200.0
      then
        if random < exp(-aux)
          then
            exit;

    metropolis := false;

    end;

procedure gravar2;
```

```
  var
    i : byte;

  begin

    writeln(arq2,znc[sol_o],' ver no arquivo: casob'+chr(sol_o+48)+'.txt');
    writeln(arq2,tnc[sol_o],ync[sol_o]);
    writeln(     znc[sol_o]);
    for i := 1 to nalfa do
      writeln(arq2,i:5,' ',talfa[sol_o,i],alfa[sol_o,i]);

    end;

  begin        { otimo }

    sol_inic;  { saída em sol_o }

    sol_a := sol_o;
    sol_p := det_sol_p[sol_a,sol_o];

    cop_sol; { sol_p = sol_a }

    sucmax := nsuc*nalfa;
    simmax := sucmax*nalfa;

    t    := t0;
    ksuc := 0;
    ksim := 0;

    assign (arq2,'rs_c_ca2.lst');
    rewrite(arq2);

    gravar2;

    for j := 1 to nt do
      begin

        writeln(j:10);

        repeat

          ksim := ksim + 1;

          sorte; { perturba sol_a - saída em sol_p }
(*
          for i := 1 to nalfa+1 do
            writeln(i:3,talfa[sol_p,i],' ',alfa[sol_p,i]);
*)
          gravar1;

          swapvectors;

          exec('c:\hector\c_carga8','  ');

          swapvectors;
```

```
          repeat
            until doserror = 0;

(*
          swapvectors;

          executeprocess('c:\hector\c_carga8','   ');

          swapvectors;

          repeat
            until errorcode = 0;
*)
          fob;

          writeln('otimo ',znc[sol_p]);

          df := znc[sol_p] - znc[sol_a];

          if metropolis
            then
              begin

                ksuc := ksuc + 1;
{
                writeln(j,' ',ksim,' ',ksuc,' ',sol_p,' ',znc[sol_p]);
}
                sol_a := sol_p;

                if znc[sol_p] < znc[sol_o]
                  then
                    begin

                      sol_o := sol_p;

                      gravar2;

                      end;

                sol_p := det_sol_p[sol_a,sol_o];

                end;

          cop_sol;  { de sol_a p/ sol_p }

          until (ksim > simmax) or (ksuc > sucmax);

        writeln(j:5,ksim:10,ksuc:10);

        t    := t*fat;
        ksuc := 0;
        ksim := 0;

        end;

    close(arq2);
```

```
  end;

begin

  writeln('Executando rs_c_ca2...');

  randomize;

  lerdad;

  otimo;

  writeln('Fim do processamento.');
  writeln('Ver os parâmetros da solução ótima no arquivo: rs_c_ca2.lst');

  end.
```

APÊNDICE D. COMPARAÇÃO DE DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA COM A MELHOR ABERTURA DE VÁLVULA OBTIDA COM O PROGRAMA *Otimização*.

Para o entendimento das seguintes tabelas e figuras, é necessário saber que nesta dissertação foram desenvolvidos dois programas computacionais: O programa *Transiente* (c_carga8) listado no Apêndices B, simula o movimento transiente no canal de adução, desde o reservatório até a câmara de carga. O programa *Otimização* (rs_c_carga2) listado no Apêndice C, executa o método do recozimento simulado, com o objetivo de determinar uma regra de operação ótima da abertura das válvulas da turbina na câmara de carga. Isto é feito com o auxílio do programa listado no Apêndice B.

A seguir, se faz a análise do fenômeno transiente para diferentes aberturas de válvula e diferentes tempos de abertura.

Abertura total até 120 s:

A Tabela D.1 apresenta diferentes aberturas de válvula para três diferentes tempos até 120 s de abertura total de válvula. Esses resultados são comparados com a obtida mediante o método de otimização e mostrado na Figura D.1.

TABELA D.1 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO
[Abertura A1], [Abertura A2], [Abertura A3].

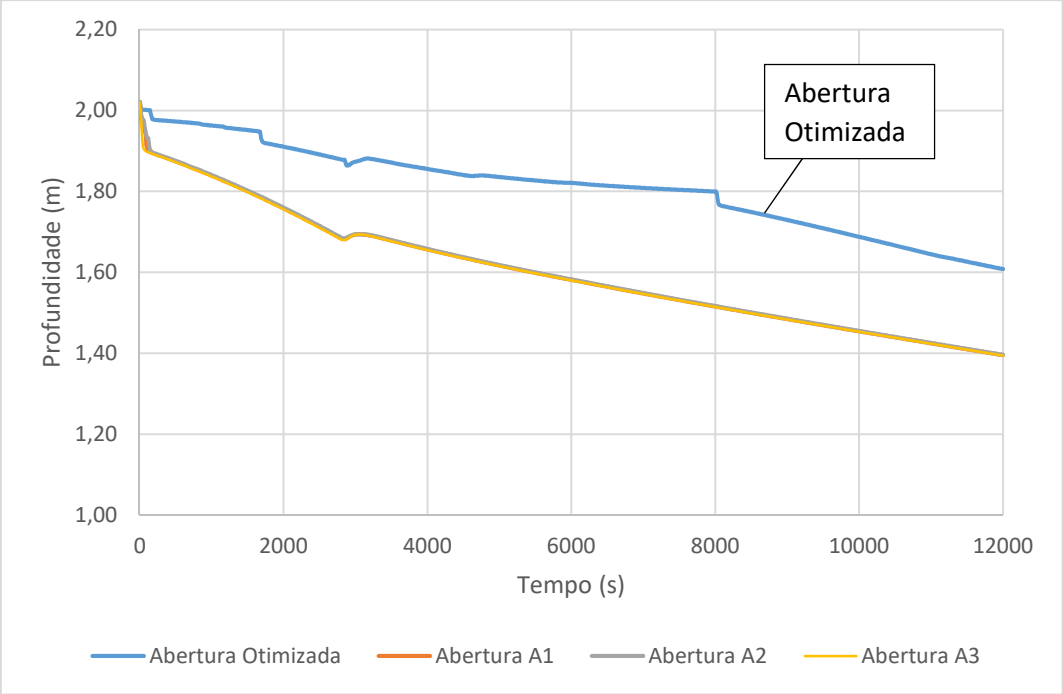
Abertura A1			Abertura A2			Abertura A3		
Tempo (s)	α	% abertura	Tempo (s)	α	% abertura	Tempo (s)	α	% abertura
0.00	1.80	30.00	0.00	1.00	16.67	0.00	1.80	30.00
10.00	1.80	30.00	10.00	2.20	36.67	10.00	1.80	30.00
20.00	3.60	60.00	20.00	2.30	38.33	20.00	6.00	100.00
40.00	3.60	60.00	40.00	2.40	40.00			
60.00	3.60	60.00	60.00	3.70	61.67			
80.00	6.00	100.00	80.00	4.50	75.00			
			100.00	4.50	75.00			
			120.00	6.00	100.00			

Observe-se da Tabela D.1 que para a Abertura A1 o tempo máximo para a abertura do 100% da válvula é de 80 s, para a Abertura A2, 120 s e para a Abertura A3, 20 s.

A Figura D.1 mostra que as curvas obtidas para as aberturas de válvula da Tabela D.1

tem uma queda rápida para os tempos totais de abertura da válvula e a tendência de queda é a mesma com o decorrer do tempo. No entanto para a curva obtida com o programa de otimização rs_c_ca2 os valores de altura de queda de água são menos significativos comparado com as outras aberturas. Também da Figura D.1 observa-se que as curvas para as três aberturas analisadas de confundem numa mesma. Isto quer dizer que as mudanças da abertura de válvula não alteram a variação da altura de água na câmara de carga.

FIGURA D.1 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA, A1, A2, A3.



Abertura total até 8000 s:

A Tabela D.2 apresenta duas aberturas de válvula para dois tempos totais de abertura de válvula, de 8000 s e 7300 s para a Abertura B1 e Abertura B2 respectivamente. Esses resultados são comparados com a obtida mediante o método de otimização e mostrado na Figura D.2.

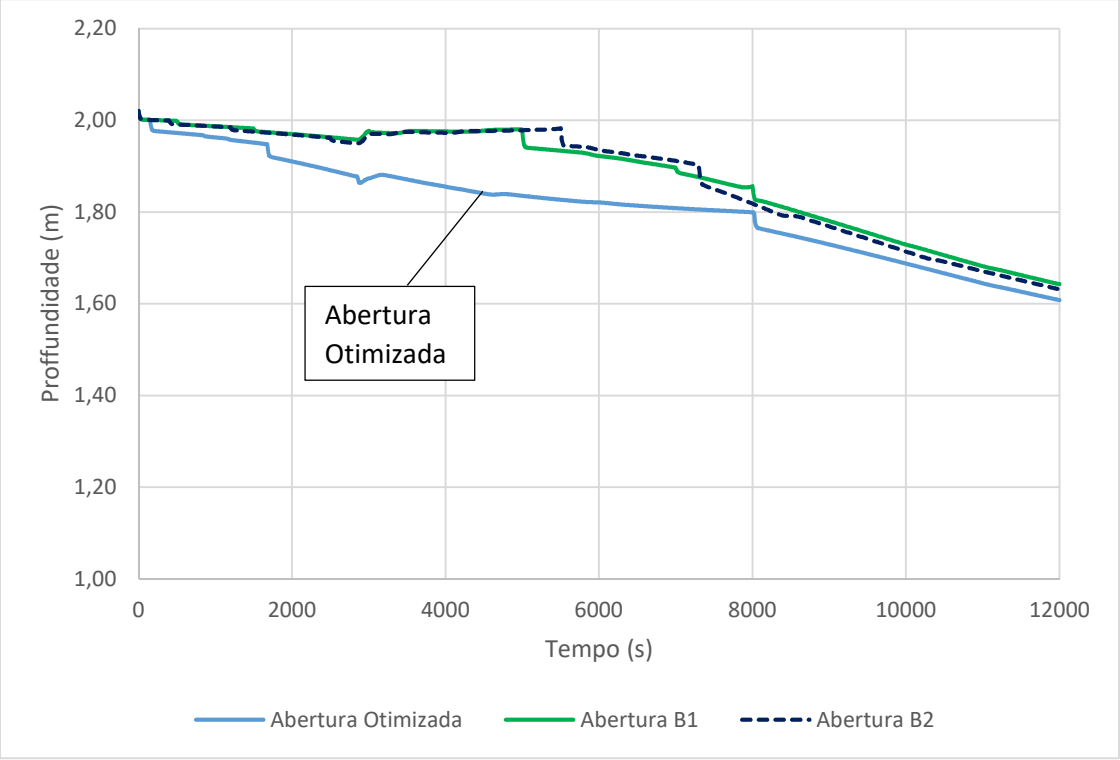
Da Figura D.2, as curvas para as aberturas apresentadas na Tabela D.2 estão acima da curva obtida com o método de otimização. Observa-se que antes dos 8000 s o fenômeno transiente é bem marcado para as aberturas de válvula proposta na Tabela D.2. A partir dos 8000 s a declividade das curvas é maior que para a curva obtida com o método de otimização,

o que indica uma maior tendência de esvaziar a câmara de carga com o passo do tempo.

TABELA D.2 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO [Abertura B1], [Abertura B2], [Abertura B3].

Abertura B1			Abertura B2		
Tempo (s)	α	% abertura	Tempo (s)	α	% abertura
0.00	1.00	16.60	0.00	1.00	16.60
200.00	1.00	16.60	300.00	1.00	16.60
500.00	1.40	23..30	400.00	1.40	23..30
1000.00	1.40	23.30	600.00	1.40	23.30
1500.00	1.70	28.33	1200.00	1.70	28.33
2000.00	1.70	28.33	1500.00	1.70	28.33
3000.00	2.00	33.33	2500.00	2.00	33.33
4000.00	2.00	33.33	4500.00	2.00	33.33
5000.00	4.00	66.67	5500.00	4.00	66.67
6000.00	4.00	66.67	6200.00	4.00	66.67
7000.00	4.50	75.00	7300.00	6.00	100.00
8000.00	6.00	100.00			

FIGURA D.2 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA.



Abertura total menores de 2000 s:

A Tabela D.3 apresenta diferentes aberturas de válvula para diferentes tempos até 2000 s de abertura total de válvula. Na Figura D.3 observa-se a comparação dos resultados para as aberturas propostas com a obtida mediante o método de otimização. Observa-se da Figura D.3 que as aberturas propostas na Tabela D.3 fazem esvaziar a câmara de carga rapidamente com o decorrer do tempo, o que não são recomendados. No em tanto a regra de operação obtida com o método de otimização é a mais recomendada para a operação das válvulas.

TABELA D.3 FATORES DE ABERTURA DA VÁLVULA EM FUNÇÃO DO TEMPO
[Abertura C1], [Abertura C2], [Abertura C3] [Abertura C4], [Abertura C5], [Abertura C6].

Abertura C1		Abertura C2		Abertura C3	
Tempo (s)	α	Tempo (s)	α	Tempo (s)	α
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
20.00	1.00	150.00	1.00	50.00	1.00
20.00	1.40	300.00	1.40	100.00	1.40
80.00	1.40	450.00	1.40	200.00	1.40
80.00	1.70	600.00	1.70	500.00	1.70
110.00	1.70	750.00	1.70	800.00	1.70
110.00	2.00	900.00	2.00	1200.00	2.00
900.00	2.00	1050.00	2.00	1500.00	2.00
1000.00	4.00	1200.00	4.00	1600.00	4.00
1500.00	4.00	1350.00	4.00	1800.00	4.00
1500.00	4.50	1500.00	6.00	1950.00	6.00
2000.00	6.00		6.00		6.00

Abertura C4		Abertura C5		Abertura C6	
Tempo (s)	α	Tempo (s)	α	Tempo (s)	α
0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
20.00	1.00	20.00	1.00	20.00	1.00
80.00	1.40	30.00	1.40	30.00	1.40
200.00	1.40	80.00	1.40	50.00	1.40
400.00	1.70	90.00	1.70	80.00	1.70
700.00	1.70	110.00	1.70	100.00	1.70
900.00	2.00	400.00	2.00	120.00	2.00
1100.00	2.00	900.00	2.00	300.00	2.00
1400.00	4.00	1000.00	4.00	400.00	4.00
1600.00	4.00	1200.00	4.00	450.00	4.00
1700.00	6.00	1300.00	6.00	500.00	6.00

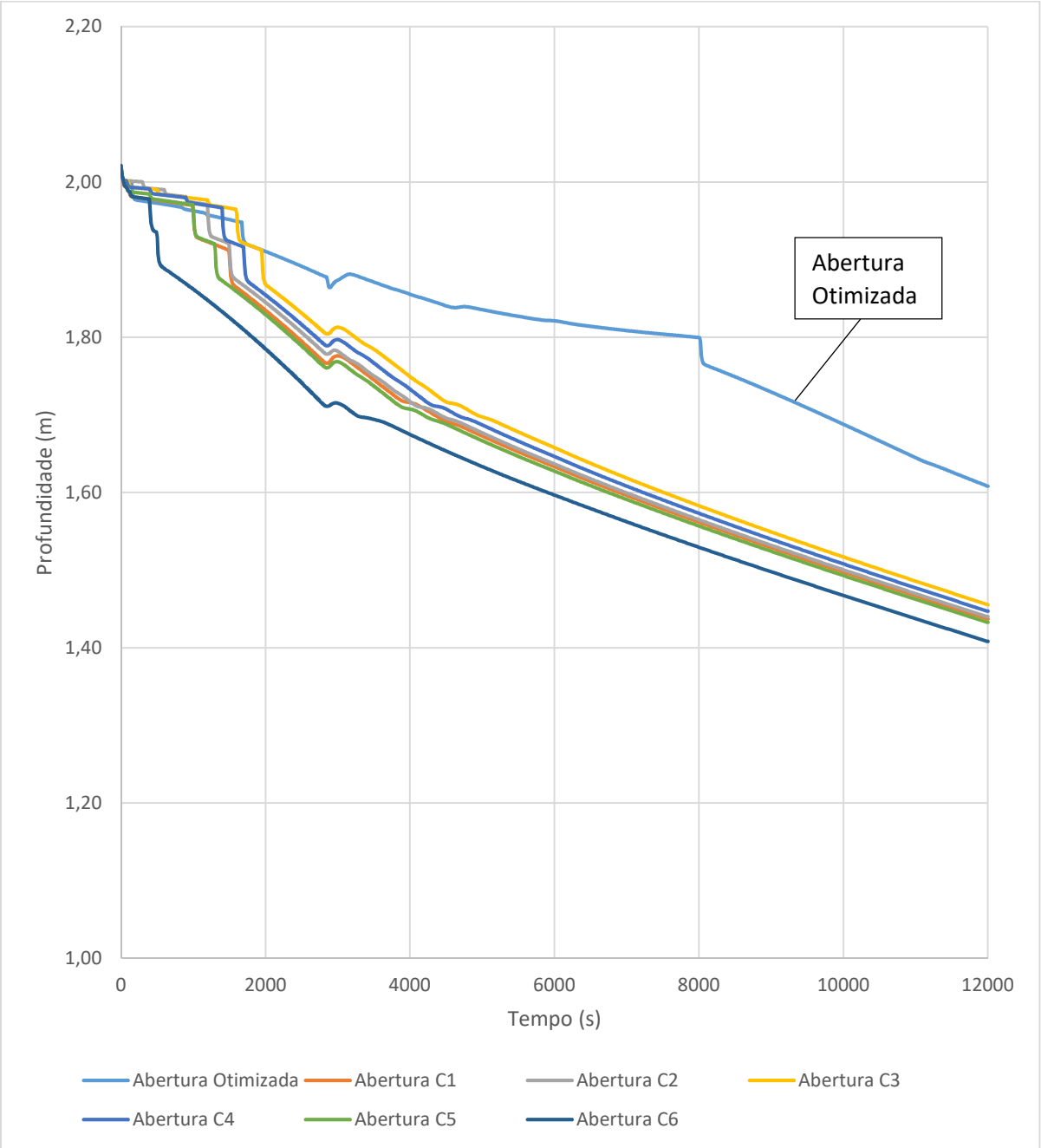



FIGURA D.3 PROFUNDIDADE DE ÁGUA CONTRA TEMPO NA CÂMARA DE CARGA PARA DIFERENTES ABERTURAS DE VÁLVULA.