RICARDO AHOUGI CARNEIRO JUNHO

**MIGRAÇÕES ASCENDENTES DE PEIXES NEOTROPICAIS E
HIDRELÉTRICAS: PROTEÇÃO A JUSANTE DE TURBINAS E
VERTEDOUROS E SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO**

São Paulo

2008

RICARDO AHOUGI CARNEIRO JUNHO

**MIGRAÇÕES ASCENDENTES DE PEIXES NEOTROPICAIS E
HIDRELÉTRICAS: PROTEÇÃO A JUSANTE DE TURBINAS E
VERTEDOUROS E SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para Obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia
Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Kikuo Tamada

São Paulo

2008

RICARDO AHOUGI CARNEIRO JUNHO

**MIGRAÇÕES ASCENDENTES DE PEIXES NEOTROPICAIS E
HIDRELÉTRICAS: PROTEÇÃO A JUSANTE DE TURBINAS E
VERTEDOUROS E SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para Obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia
Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Kikuo Tamada

São Paulo

2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de dezembro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Junho, Ricardo Ahouagi Carneiro

**Migrações ascendentes de peixes neotropicais e hidrelétricas : proteção a jusante de turbinas e vertedouros e sistemas de transposição / R.A.C. Junho. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.
216 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Usinas hidrelétricas 2.Peixes tropicais 3.Escada para peixes 4.Impactos ambientais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Priscila e aos meus filhos
Paula, João Pedro e Carolina.

Aos meus pais, Rubens e Rosa, e aos
meus irmãos, Rosane e Rogério.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Kikuo Tamada, pelos conhecimentos compartilhados, pela disponibilidade, incentivo e confiança e, sobretudo, por sua amizade;

Aos professores, colegas e funcionários do curso de pós-graduação em Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica da USP;

Aos engenheiros, técnicos e funcionários da FCTH;

À Atiaia Energia, à CEMIG Geração e Transmissão, ao Consórcio da Hidrelétrica de Aimorés, ao Consórcio Hidrelétrico do Funil e ao Consórcio da Usina Hidrelétrica de Igarapava, pela autorização para apresentação de dados e informações referentes às suas usinas;

Aos colegas e amigos Alexandre Lima Godinho, Ana Paula Peres, Boyd Kynard, Cláudio Antônio da Silva, Edelvânio dos Anjos Ferraz, Edevaldo e Idevaldo, Eliana Campos de Figueiredo Vieira, Eugênio Moreira Braga Filho, Fernanda Tavares Ribeiro de Oliveira, Fernando Augusto Mesquita Ferreira, Gleusa Jesué, Ivan Arauz, Jairo Martins Borges Filho, Karine Oliveira, Luis Augusto Barcelos de Almeida, Márcio Carneiro, Marcus Felipe Matos Trindade, Maria Cláudia Pires Mendes da Silva, Michael Antônio Bonilla Denes, Nelson Luis Ferreira Porto, Vasco Campos Torquato, Vladimir Woldainsky, Volney Vono, Wilmar Fredi Vitol e a todos que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

... Jesus levantou-se e disse em alta voz:
“Se alguém tem sede, venha a mim e
beba. Quem crer em mim, como diz a
Escritura, do seu interior fluirão rios de
água viva”.

(João 7. 37b-39)

Tomando os cinco pães e dois peixes, e
olhando para o céu, (Jesus) deu graças e
os partiu. Em seguida, entregou-os aos
discípulos para que os servissem ao povo.
Todos comeram e ficaram satisfeitos, e os
discípulos recolheram doze cestos cheios
de pedaços que sobraram.

(Lucas 9 .16-17)

RESUMO

Este trabalho se propõe a examinar aspectos de engenharia, particularmente da engenharia hidráulica, referentes aos impactos dos aproveitamentos hidrelétricos sobre deslocamentos migratórios ascendentes de peixes, buscando identificar medidas para a redução da eventual mortalidade de peixes, em tubos de sucção de turbinas e em regiões de restituição do escoamento de vertedouros, e descrever os sistemas de transposição de peixes usuais, com destaque para escadas de peixes tipo ranhura vertical. A revisão bibliográfica se inicia abordando migrações de peixes e o impacto causado pela implantação de usinas hidrelétricas, vindo, em seguida, aspectos hidráulicos relativos a barreiras para o impedimento da entrada de peixes em tomadas d'água e sua possível aplicação para tubos de sucção de turbinas. São relatados estudos de casos relativos à implantação de canais de restituição em vertedouros, para evitar a mortalidade de peixes, eventualmente aprisionados em poços e depressões na região de restituição do escoamento vertido, quando esta não possui água permanentemente, após o fechamento das comportas. A revisão da literatura prossegue tratando de sistemas usuais de transposição de peixes para montante, de acordo com a experiência internacional e, também, com a experiência nacional recente. Em seguida, são apresentados estudos em modelo reduzido realizados para a avaliação e caracterização de escoamentos em tanques de algumas escadas de peixes tipo ranhura vertical, tanto com seção transversal retangular, que constituem solução clássica, quanto com seção transversal trapezoidal, com caráter inédito na literatura, que possui, comparativamente, menores custos de implantação, descrevendo-se as instalações experimentais utilizadas, os ensaios realizados e os resultados obtidos, com a discussão de aspectos hidráulicos e de ictiofauna. Conclui-se que as soluções mais promissoras para reduzir a mortalidade de peixes são grades metálicas e barreiras comportamentais sonoras e elétricas, na saída de tubos de sucção, bem como a implantação de canais de restituição do escoamento de vertedouros. Conclui-se, também, que escadas de peixe tipo ranhura vertical com seção transversal trapezoidal fornecem condições de escoamento adequadas, compatíveis com os supostos requisitos natatórios

das diferentes espécies de peixes em suas migrações ascendentes, além de exigirem menores investimentos de implantação, quando comparadas com escadas com seção transversal retangular. Recomenda-se que sejam feitos estudos e monitoramentos de ictiofauna específicos para subsidiar projetos de engenharia nessa área.

Palavras-chave: barragens, usinas hidrelétricas, peixes, proteção, sistemas de transposição, escadas de peixes.

ABSTRACT

This work aims to examine engineering, mainly hydraulic engineering, aspects related to the effects of hydroelectric dams on upstream fish migration, identifying possible measures for the reduction of fish mortality, inside turbines draft tubes and in the region downstream from spillways, and describing the most common upstream fish passages, mainly vertical slot fishways. The literature review starts with fish migrations and the effects of dams and reservoir on fishes, followed by hydraulic aspects of barriers to prevent fish entrance in water intakes and their possible application to turbine draft tubes. Case studies are reported concerning the construction of spillway exit channels to avoid the possible mortality of fish entrapped in depressions and pools in the old riverbed, when it's not permanently flooded, after the closure of the spillway gates. The literature review proceeds with the most common upstream fish passages, according to the international experience and to the recent Brazilian's experience. Next, the hydraulic model studies developed for evaluation and characterization of flow inside pools of vertical slot fishways are described, for the classical rectangular cross section, as well as for trapezoidal ones, not presented in the literature so far, which have comparatively lower costs, detailing the experimental arrangements, the experiments and experimental results, with discussions on hydraulic and ichthyofauna aspects. It's concluded that the most promising solutions to reduce fish mortality are fish screens and sound and electric behavioural barriers, at the exit of draft tubes, and the construction of spillway exit channels. It's also concluded that vertical slot fishways with trapezoidal cross sections provide good flow conditions, meeting the supposed swimming requirements of different fish species on their upstream migrations, with lower capital costs than classical fishways, with rectangular cross sections. It's recommended that specific ichthyofauna studies and monitoring be developed to subsidize engineering design in this field.

Key words: dams, hydroelectric power plants, fish, fish protection, fish passages, fish ladders.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Padrão Migratório entre Três Sítios Básicos realizado por Peixes de Água Doce Adultos	5
Figura 2.2 – Classificação das Espécies de Peixes em Função dos Padrões Migratórios	6
Figura 2.3 – Modelo Conceitual Geral da Migração de Peixes Brasileiros	12
Figura 3.1 – Esquema de Barreira Elétrica em Canal de Fuga.....	22
Figura 3.2 – Barreira Elétrica em Canal de Fuga	22
Figura 3.3 – Grade Anti-Cardume Tipo Gaveta para Tubo de Sucção (Vista).....	24
Figura 3.4 - Grade Anti-Cardume Tipo Gaveta para Tubo de Sucção (Localização)	24
Figura 3.5 – Grade Anti-Cardume com Painéis Giratórios Múltiplos para Tubo de Sucção	25
Figura 3.6 - Vista Geral da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Itutinga	30
Figura 3.7 – Vista da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Itutinga ..	30
Figura 3.8 - Vista do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga	32
Figura 3.9 - Vista Geral do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga	32
Figura 3.10 - Vista Geral da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Jaguará	33
Figura 3.11 – Vista da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Jaguará ..	34
Figura 3.12 - Vista do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará	35
Figura 3.13 - Vista Geral do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará	35
Figura 4.1 – Exemplo de Canal Semi-Natural.....	39
Figura 4.2 – Exemplo de Canal Semi-Natural.....	39
Figura 4.3 – Vista Geral da Escada de Peixes da UHE Igarapava.....	43
Figura 4.4 - Escoamento em Tanque de Escada de Peixes Tipo Ranhura Vertical (UHE Igarapava)	43
Figura 4.5 – Esquema de Eclusa tipo <i>Borland</i>	44
Figura 4.6 – Esquema da Eclusa da Barragem de Ardnacrusha, Irlanda.....	45
Figura 4.7– Esquema da Eclusa da Barragem de Volzhskaya, Rússia	46
Figura 4.8 - Vista Geral do Elevador de Peixes da UHE Funil.....	47
Figura 4.9 – Vista do Sistema de Captura e Transporte da UHE Santa Clara.....	47
Figura 5.1 - Alternativa 1 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos	76
Figura 5.2 - Alternativa 1 - Canal de Ensaios e Sistema de Medição de Vazão	77
Figura 5.3 - Alternativa 1 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão	78
Figura 5.4 - Alternativa 2 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos	79

Figura 5.5 - Alternativa 2 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão	80
Figura 5.6 - Alternativa 2 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão	81
Figura 5.7 - Alternativa 3 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos	82
Figura 5.8 - Alternativa 3 – Perfil Longitudinal Esquemático do Canal de Ensaio	83
Figura 5.9 - Alternativa 3 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão	83
Figura 5.10 - Alternativa 3 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão.....	84
Figura 5.11 - Alternativa 3 – Detalhe da Comporta de Jusante.....	84
Figura 5.12 - Alternativa 3 – Geometria dos Defletores de Montante	85
Figura 5.13 - Alternativa 4 – Geometria dos Tanques de Montante.....	87
Figura 5.14 - Alternativa 4 – Seção Transversal dos Tanques Típicos	87
Figura 5.15 – Alternativa 4 – Perfil Longitudinal e Planta Esquemáticos do Canal de Ensaio	88
Figura 5.16 - Alternativa 4 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão	89
Figura 5.17 - Alternativa 4 – Detalhe da Comporta de Jusante.....	89
Figura 5.18 - Alternativa 5 – Geometria dos Tanques de Montante.....	91
Figura 5.19 - Alternativa 5 – Perfil Longitudinal e Planta Esquemáticos do Canal de Ensaio	92
Figura 5.20 - Alternativa 5 - Canal de Ensaio	93
Figura 5.21 - Alternativa 5 – Esquema de Redução Provisória da Largura das Ranhuras	93
Figura 5.22 - Alternativa 5 – Redução Provisória da Largura das Ranhuras.....	94
Figura 5.23 - Instalação de Pontas Capacitivas no Modelo	96
Figura 5.24 – Detalhe das Pontas Capacitivas no Modelo	96
Figura 6.1 - Alternativa 1 – Escoamento em Perfil - Vazão 1,5 m ³ /s	100
Figura 6.2 - Alternativa 1 – Escoamento em Planta - Vazão 1,5 m ³ /s	101
Figura 6.3 - Alternativa 1 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água.....	102
Figura 6.4 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,4 m ³ /s – Ponto 1	104
Figura 6.5 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,4 m ³ /s – Ponto 2	104
Figura 6.6 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,4 m ³ /s – Ponto 3	105
Figura 6.7 – Alternativa 2 – Escoamento em Perfil - Vazão 1,0 m ³ /s	109
Figura 6.8 – Alternativa 2 – Escoamento em Planta - Vazão 1,0 m ³ /s.....	109
Figura 6.9 - Alternativa 2 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água.....	111
Figura 6.10 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m ³ /s – Ponto 1 ..	112
Figura 6.11 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m ³ /s – Ponto 2 ..	113
Figura 6.12 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m ³ /s – Ponto 3 ..	113

Figura 6.13 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento no Defletor de Montante - Vazão 2,5 m ³ /s	117
Figura 6.14 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento no Defletor de Montante - Detalhe - Vazão 2,5 m ³ /s	117
Figura 6.15 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento em Tanque Típico - Vazão 2,5 m ³ /s	118
Figura 6.16 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento em Tanque Típico - Detalhe - Vazão 2,5 m ³ /s	118
Figura 6.17 – Alternativa 3 – Condição 3 – Escoamento no Tanque de Montante	120
Figura 6.18 – Alternativa 3 – Condição 3 – Escoamento no Tanque de Montante	120
Figura 6.19 – Alternativa 3 – Condição 7 – Escoamento no Tanque de Montante	122
Figura 6.20 - Alternativa 3 – Condição 7 – Escoamento no Tanque de Montante	122
Figura 6.21 – Alternativa 3 – Condição 7A - Escoamento em Tanque Típico - Vazão 2,5 m ³ /s	124
Figura 6.22 – Alternativa 3 – Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água	125
Figura 6.23 – Alternativa 3 – Pontos de Medição de Velocidades e Direcionamento do Escoamento.....	126
Figura 6.24 - Alternativa 4 – Escoamento nos Tanques de Montante – Vazão 2,61 m ³ /s	130
Figura 6.25 - Alternativa 4 – Escoamento em Tanques Típicos – Vazão 2,61 m ³ /s	131
Figura 6.26 - Alternativa 4 - Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água	132
Figura 6.27 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m ³ /s – Ponto 1	133
Figura 6.28 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m ³ /s – Ponto 2	134
Figura 6.29 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m ³ /s – Ponto 3	134
Figura 6.30 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m ³ /s – Ponto 4	134
Figura 6.31 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m ³ /s – Ponto 5	135
Figura 6.32 – Alternativa 4 – Pontos de Medição de Velocidades e de Direcionamento do Escoamento	135
Figura 6.33 - Alternativa 5 – Condição 3 – Geometria da Soleira de Fundo	139
Figura 6.34 – Alternativa 5 – Condição 3 – Soleira de Fundo	139
Figura 6.35 – Alternativa 5 – Condição 3 – Escoamento em Tanque Típico – Vazão 1,5 m ³ /s	140
Figura 6.36 - Alternativa 5 – Condição 4 – Geometria da Placa das Ranhuras.....	141
Figura 6.37 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazões Superiores a 1,5 m ³ /s	142
Figura 6.38 - Alternativa 5 – Escoamento em Tanques Típicos.....	143
Figura 6.39 - Alternativa 5 – Escoamento em Tanques Típicos – Detalhe.....	143
Figura 6.40 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água	145

Figura 6.41 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m ³ /s – Ponto 1	146
Figura 6.42 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m ³ /s – Ponto 2	146
Figura 6.43 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m ³ /s – Ponto 3	146
Figura 6.44 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m ³ /s – Ponto 4	147
Figura 6.45 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m ³ /s – Ponto 5	147
Figura 6.46 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Velocidades.....	148
Figura 6.47 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Velocidades nas Verticais 9 e 11	148
Figura 6.48 – Relação Q* x y _o /b _o para a Alternativa 1	154
Figura 6.49 – Relação Q* x y _o /b _o para a Alternativa 2	155
Figura 6.50 – Relação Q* x y _o /b _o para o Conjunto das Alternativas 1, 2 e R	155
Figura 6.51 – Relação Q* x y _o /b _o para a Alternativa 3	156
Figura 6.52 – Relação Q* x y _o /b _o para a Alternativa 4	156
Figura 6.53 – Relação Q* x y _o /b _o para a Alternativa 5	157
Figura 6.54 – Relação Q* x y _o /b _o para as Alternativas	157
Figura 6.55 – Coeficientes de Descarga para Escoamento Tipo Orifício.....	158
Figura 6.56 – Alternativa 1 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 1,5 m ³ /s	163
Figura 6.57 – Alternativa 2 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 1,4 m ³ /s	163
Figura 6.58 – Alternativa 3 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 2,65 m ³ /s	164
Figura 6.59 – Alternativa 4 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 2,61 m ³ /s	164
Figura 6.60 – Alternativa 5 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 1,4 m ³ /s	165
Figura 6.61 – Alternativa 1 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 1,5 m ³ /s	168
Figura 6.62 – Alternativa 2 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 1,4 m ³ /s	168
Figura 6.63 – Alternativa 3 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 2,65 m ³ /s	169
Figura 6.64 – Alternativa 4 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 2,61 m ³ /s	169
Figura 6.65 – Alternativa 5 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 1,4 m ³ /s	170
Figura 6.66 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da UHE Igarapava	172
Figura 6.67 – Vista da Escada de Peixes da UHE Aimorés	176
Figura 6.68 – Vista da Escada de Peixes da PCH Paranatinga II	180
Figura 6.69 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da PCH Paranatinga II	180
Figura 6.70 – Vista da Escada de Peixes da PCH Canoa Quebrada	183
Figura 6.71 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da PCH Canoa Quebrada	183

Figura 6.72 – Profundidade Média x Presença de Espécies Migradoras em Escadas	
Tipo Ranhura Vertical	188
Figura 6.73 – Carga Hidráulica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo	
Ranhura Vertical.....	188
Figura 6.74 – Vazão pela Escada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo	
Ranhura Vertical.....	189
Figura 6.75 – Percentual de Vazão Total x Presença de Espécies Migradoras em	
Escadas Tipo Ranhura Vertical.....	189
Figura 6.76 – Potência Específica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo	
Ranhura Vertical.....	190
Figura 6.77 – Profundidade Média x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de	
Peixes Recentes.....	192
Figura 6.78 – Carga Hidráulica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de	
Peixes Recentes.....	193
Figura 6.79 – Vazão pela Escada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de	
Peixes Recentes.....	193
Figura 6.80 –Percentual da Vazão Turbinada x Presença de Espécies Migradoras em	
Escadas de Peixes Recentes	194
Figura 6.81 – Potência Específica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de	
Peixes Recentes.....	194

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características Hidráulicas de Escadas Tipo Orifício e Vertedouro	66
Tabela 4.2 – Vazões em Escada Tipo Orifício e Vertedouro e Vazões Turbinadas	66
Tabela 4.3 – Presença de Espécies em Escadas Tipo Orifício e Vertedouro.....	66
Tabela 6.1 – Alternativa 1 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água	101
Tabela 6.2 – Alternativa 1 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical	102
Tabela 6.3 – Alternativa 1 - Oscilação de Nível d'Água	103
Tabela 6.4 – Alternativa 1 - Velocidades Medidas na Superfície	106
Tabela 6.5 - Alternativa 1 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade.....	106
Tabela 6.6 - Alternativa 1 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo.....	107
Tabela 6.7 – Alternativa 1A – Vazão 1,5 m ³ /s - Velocidades Medidas.....	108
Tabela 6.8 – Alternativa 2 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água	110
Tabela 6.9 – Alternativa 2 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical	110
Tabela 6.10 – Alternativa 2 - Oscilação de Nível d'Água	112
Tabela 6.11 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas na Superfície	114
Tabela 6.12 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade.....	115
Tabela 6.13 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo	115
Tabela 6.14 – Alternativa 3 – Condição 1 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água	119
Tabela 6.15 - Alternativa 3 - Condições 1 a 3 - Largura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m ³ /s	119
Tabela 6.16 – Abertura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m ³ /s.....	123
Tabela 6.17 – Alternativa 3 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água	124
Tabela 6.18 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,65 m ³ /s.....	125
Tabela 6.19 - Alternativa 3 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 2,65 m ³ /s....	127
Tabela 6.20 - Alternativa 3 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 2,65 m ³ /s	127
Tabela 6.21 – Alternativa 3 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo - Vazão 2,65 m ³ /s	128
Tabela 6.22 - Alternativa 4 – Largura dos Defletores e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m ³ /s	130
Tabela 6.23 – Alternativa 4 - Vazão e Lâmina d'Água.....	131
Tabela 6.24 – Alternativa 4 - Vazão e Carga Hidráulica Junto ao Defletor	132
Tabela 6.25 – Alternativa 4 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m ³ /s.....	133
Tabela 6.26 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 2,61 m ³ /s...	136
Tabela 6.27 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 2,61 m ³ /s	136

Tabela 6.28 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo – Vazão 2,61 m³/s	137
Tabela 6.29 – Alternativa 5 – Largura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 1,5 m³/s	142
Tabela 6.30 – Alternativa 5 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água	144
Tabela 6.31 – Alternativa 5 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical	144
Tabela 6.32 – Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água – Vazão 1,4 m³/s	145
Tabela 6.33 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 1,4 m³/s	149
Tabela 6.34 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 1,4 m³/s	149
Tabela 6.35 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo - Vazão 1,4 m³/s	150
Tabela 6.36 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas nos Pontos A,B,C e D - Vazão 1,4 m³/s	150
Tabela 6.37 - Parâmetros Hidráulicos Característicos do Escoamento nos Tanques	153
Tabela 6.38 – Constantes da Equação 2 para as Alternativas	154
Tabela 6.39 – Cargas Hidráulicas Medidas e Teóricas para as Alternativas	161
Tabela 6.40 – Oscilação de Nível d'Água nos Tanques para as Alternativas	162
Tabela 6.41 – Velocidades Teórica e Máxima Medida para as Alternativas	167
Tabela 6.42 – UHE Igarapava - Espécies Registradas na Escada de Peixes – Junho de 2000 a Maio de 2004	174
Tabela 6.43 – UHE Aimorés - Espécies de Peixes Capturadas na Escada - Março a Maio de 2007	177
Tabela 6.44 – PCH Paranatinga II – Espécies de Peixes Capturados na Escada – Dezembro de 2007	181
Tabela 6.45 – PCH Canoa Quebrada - Espécies de Peixes Capturados na Escada - Dezembro de 2007	184
Tabela 6.46 – Presença de Espécies em Escadas Tipo Ranhura Vertical	185
Tabela 6.47 - Características Hidráulicas de Escadas Tipo Ranhura Vertical	186
Tabela 6.48 – Vazões Totais em Escada Tipo Ranhura Vertical e Vazões Turbinadas	186
Tabela 6.49 – Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas Tipo Ranhura Vertical	187
Tabela 6.50 – Correlação entre Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas Tipo Ranhura Vertical	190
Tabela 6.51 - Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas de Peixes	192
Tabela 6.52 - Correlação entre Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas de Peixes	195

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2	MIGRAÇÕES DE PEIXES E HIDRELÉTRICAS.....	4
2.1	MIGRAÇÕES DE PEIXES.....	4
2.2	IMPACTOS DE BARRAGENS SOBRE PEIXES	12
3	PROTEÇÃO A JUSANTE DE TURBINAS E VERTEDOUROS	18
3.1	PEIXES EM TUBOS DE SUCÇÃO DE TURBINAS	18
3.2	PEIXES A JUSANTE DE VERTEDOUROS.....	26
3.2.1	Canais de Restituição dos Vertedouros das UHE`s Itutinga e Jaguará..	27
4	SISTEMAS DE TRANSPosição DE PEIXES PARA MONTANTE	37
4.1	PRINCIPAIS TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSPosição.....	37
4.1.1	Aspectos Gerais	37
4.1.2	Canais Semi-Naturais	38
4.1.3	Escadas de Peixes.....	40
4.1.4	Eclusas de Peixes.....	44
4.1.5	Elevadores de Peixes	46
4.2	COMPONENTES DOS SISTEMAS DE TRANSPosição MODERNOS	49
4.3	SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPosição.....	51
4.4	CRITÉRIOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSPosição.....	53
4.4.1	Escadas de Peixes.....	53
4.4.2	Canal de Entrada	55
4.4.3	Canal de Saída	56
4.5	TRANSPosição PARA JUSANTE	57
4.6	EXPERIÊNCIA NACIONAL EM SISTEMAS DE TRANSPosição DE PEIXES...	60
5	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E ENSAIOS REALIZADOS	73
5.1	ASPECTOS GERAIS	73
5.2	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	76
5.2.1	Alternativa 1	76
5.2.2	Alternativa 2	79
5.2.3	Alternativa 3	81
5.2.4	Alternativa 4	86
5.2.5	Alternativa 5	90
5.3	MEDIÇÕES DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	94
5.3.1	Profundidade Média do Escoamento	95

5.3.2	Carga Hidráulica Junto ao Defletor	95
5.3.3	Oscilação de Nível d'Água no Tanque	95
5.3.4	Velocidades do Escoamento no Tanque.....	97
6	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	98
6.1	ASPECTOS HIDRÁULICOS.....	98
6.1.1	Alternativa 1	100
6.1.2	Alternativa 2	108
6.1.3	Alternativa 3	116
6.1.4	Alternativa 4	128
6.1.5	Alternativa 5	137
6.1.6	Discussão.....	151
6.2	ASPECTOS DE ICTIOFAUNA.....	171
6.2.1	UHE IGARAPAVA – ALTERNATIVA 1	171
6.2.2	UHE AIMORÉS – ALTERNATIVA 2.....	175
6.2.3	PCH PARANATINGA II – ALTERNATIVA 4	178
6.2.4	PCH CANOA QUEBRADA – ALTERNATIVA 5	181
6.2.5	DISCUSSÃO	185
7	CONCLUSÕES	199
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	203

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A matriz energética brasileira é predominantemente hidrelétrica. Apesar dos avanços na produção de energia elétrica por fontes alternativas, elas não possuem escala para atender as crescentes necessidades do país, tornando imprescindível a implantação de novas usinas hidrelétricas a curto e médio prazo.

Apesar de seus incontestáveis benefícios energéticos, aos aproveitamentos hidrelétricos estão associados, necessariamente, impactos ambientais, dentre os quais merece destaque sua interferência com as populações de peixes, especialmente de espécies migratórias. Este fato se reveste de importância ainda maior quando se leva em conta a mega diversidade de espécies de peixes nos rios brasileiros, e sua importância na cultura e subsistência das populações ribeirinhas e na economia do país.

A implantação de barragens em rios pode causar a interrupção das rotas migratórias de peixes, sendo que os sistemas para transposição de peixes constituem solução clássica na tentativa de restaurar a conectividade longitudinal entre sítios de alimentação e desova em rios.

No Brasil, várias medidas legislativas têm sido tomadas ao longo do tempo, exigindo, predominantemente, a implantação de apenas um dos tipos de sistema de transposição possíveis, a saber, escadas de peixes. O objetivo é atenuar os impactos de barramentos sobre as espécies migradoras, a partir do relativo sucesso de tais estruturas para espécies salmonídeas no hemisfério Norte.

Como consequência, inúmeras escadas de peixes foram construídas no Brasil, a grande maioria do tipo orifício e vertedouro (*pool and orifice weir*) (Quirós, 1988), e, a partir do final da década de 90, também algumas do tipo ranhura vertical (*vertical slot*). Essas são consideradas, atualmente, as que apresentam os melhores aspectos técnicos (Rainey, 1991, Clay, 1995), com

grande potencial de aplicação para espécies não salmonídeas (Pasche *et al.*, 1995, Stuart e Mallen-Cooper, 1999, FAO/DVWK, 2002).

As escadas de peixes em geral, inclusive as do tipo ranhura vertical (*vertical slot*), possuem seção transversal retangular. Isso não significa, entretanto, que seja esta a única geometria possível, ensejando a possibilidade de análise da funcionalidade de outras geometrias, dentre as quais a trapezoidal, por seu amplo uso em obras que requeiram escavação em solo.

Estudos de monitoramento e avaliação de aspectos de ictiofauna foram realizados, infelizmente, apenas para um pequeno número de escadas de peixes dentre as construídas no país (Godinho *et al.*, 1991, Agostinho *et al.*, 2002). Com base nos resultados desse poucos estudos, existe uma certa controvérsia com relação aos efeitos da implantação de sistemas para transposição de peixes sobre as populações de espécies migradoras neotropicais (Pelicice e Agostinho, 2008, Godinho e Kynard, 2007).

Apesar dessa discussão, é evidente a importância do conhecimento das características dos diversos sistemas de transposição de peixes, tanto nos aspectos de engenharia quanto de ictiofauna, particularmente para espécies neotropicais, para aqueles casos, cada vez mais freqüentes, em que sua implantação for necessária, seja por motivos de conservação e manejo, seja por exigências legais.

Outro aspecto a considerar é o comportamento reofílico dos peixes, ou seja, a orientação e o movimento contra o escoamento (Pavlov, 1989), mais acentuado em algumas espécies migradoras, que leva indivíduos a se concentrarem junto aos tubos de sucção das turbinas e à região de restituição do escoamento de vertedouros em aproveitamentos hidrelétricos.

Em decorrência desse comportamento reofílico, algumas operações de manutenção e de reversão do modo de operação das turbinas podem ocasionar, eventualmente, mortalidade de peixes. Isso também pode ocorrer naqueles aproveitamentos cuja região de restituição do escoamento vertido não possui água na maior parte do ano, ocasionando o aprisionamento de

indivíduos em poços ali formados, após a operação de fechamento das comportas do vertedouro. Estes aspectos, dificilmente encontrados na literatura, podem ocasionar impactos sobre populações de peixes a jusante, dependendo da sua magnitude.

Nesse contexto, os objetivos principais deste trabalho são:

- Apresentar possíveis soluções para reduzir ou impedir a entrada de peixes em tubos de sucção de usinas;
- Apresentar possíveis soluções para reduzir ou eliminar o aprisionamento de peixes na região de restituição do escoamento vertido, após operações de fechamento de comportas de vertedouro, quando for o caso;
- Apresentar estudos experimentais em modelo reduzido com a avaliação e caracterização de escoamentos em tanques de escadas de peixes tipo ranhura vertical, com seção transversal retangular, que constituem solução clássica;
- Apresentar estudos experimentais em modelo reduzido que comprovem a viabilidade técnica de implantação de escadas de peixes tipo ranhura vertical, com seção transversal trapezoidal, proposta neste trabalho, com caráter inédito na literatura, que apresentam, comparativamente, menores custos de implantação.

Ressalte-se que, embora sejam mencionados aspectos relativos à conservação e manejo de ictiofauna, este trabalho se concentra nos aspectos de engenharia, particularmente da engenharia hidráulica.

2 MIGRAÇÕES DE PEIXES E HIDRELÉTRICAS

2.1 MIGRAÇÕES DE PEIXES

Migrações são observadas nos mais diferentes grupos animais (Dingle, 1996), sendo realizadas por peixes de diferentes espécies. Constituem, em geral, uma estratégia para escapar das restrições do sítio de reprodução quanto à disponibilidade de alimentos, freqüentemente conduzindo a aumento de crescimento, fecundidade, sobrevivência e produção (Northcote, 1978).

A migração, no sentido definido por Northcote (1978) e adotado neste trabalho, é o deslocamento entre dois ou mais sítios disjuntos, com eventual retorno ao sítio original, que ocorre com periodicidade regular e que envolve a maior parte da população de espécies de peixes.

Ainda de acordo com Northcote (1978), vários são os padrões migratórios conhecidos para peixes de água doce. O padrão migratório básico de adultos inclui o deslocamento entre dois sítios principais, o de alimentação e o de reprodução. Algumas espécies apresentam padrões mais complexos que incluem um terceiro sítio, o de invernada, para onde os peixes se deslocam para escapar de condições desfavoráveis ou adversas durante o inverno, como apresentado na Figura 2.1 - Padrão Migratório entre Três Sítios Básicos realizado por Peixes de Água Doce Adultos.

A migração é denominada reprodutiva quando ocorre em direção ao sítio de reprodução, e alimentar, ou trófica, quando em direção ao sítio de alimentação. A direção da migração depende das condições locais e pode ser descendente, ou seja, para jusante (rio baixo) ou ascendente, ou seja, para montante (rio acima). A migração reprodutiva, por exemplo, pode tanto ser descendente quanto ascendente.

Figura 2.1 - Padrão Migratório entre Três Sítios Básicos realizado por Peixes de Água Doce Adultos –
Fonte: Adaptado de Northcote (1968)

Conforme Larinier (2001), é usual classificar as espécies de peixes como potamódromas, diádromas ou anfidromas.

Nas espécies potamódromas, todo o ciclo de vida ocorre em águas doces de sistemas fluviais. Os sítios de reprodução e alimentação podem estar separados por distâncias de até centenas de quilômetros.

O ciclo de vida de espécies diádromas ocorre parte em águas doces e parte em águas salgadas, com distâncias entre os sítios de reprodução e alimentação de até alguns milhares de quilômetros. Nessa categoria se distinguem dois grupos: as espécies anádromas, como o salmão, em que a

reprodução ocorre em águas doces e a fase de crescimento no mar; e as espécies catádromas, como a enguia, que possuem ciclo de vida contrário, ou seja, a reprodução ocorre no mar e o crescimento em águas doces.

As espécies anfídromas passam parte de seu ciclo de vida tanto em águas doces quanto em águas salgadas, e as suas migrações ocorrem em busca de alimento ou refúgio e não para fins de reprodução.

Alguns desses movimentos são ilustrados na Figura 2.2 – Classificação das Espécies de Peixes em Função dos Padrões Migratórios.

Figura 2.2 – Classificação das Espécies de Peixes em Função dos Padrões Migratórios –
Fonte: Pavlov (1989)

Nessa figura, os deslocamentos das espécies fluviais (potamódromas) são representados pela letra A, os das espécies anádromas por B e os das semi-anádromas por C. As linhas contínuas se referem a migrações reprodutivas e as tracejadas a deslocamentos passivos, em que ovos e larvas são conduzidos pelo escoamento.

São muito conhecidas, talvez por serem mais divulgadas, as espetaculares migrações do salmão do Pacífico (*Pacific salmon*), na costa Oeste dos Estados Unidos da América (EUA) e Canadá. Os adultos migram, por milhares de quilômetros, do oceano para as cabeceiras dos rios em que nasceram, onde desovam uma primeira e única vez (Harden Jones, 1968) para morrerem, logo em seguida. A desova ocorre no outono e inverno, e os ovos são liberados sobre os fundos de cascalho dos leitos dos rios ou de lagos, e geralmente levam 60 dias para eclodir, dependendo da temperatura. Os alevinos crescem até se tornarem peixes juvenis (*smolts*), com comprimentos de cerca de 10 a 15 cm, e, então, migram, rio abaixo, em direção ao mar, na primavera e verão.

O salmão do Atlântico (*Atlantic salmon*), na costa Leste dos EUA e Canadá, apresenta ciclo de vida similar, embora possa sobreviver à primeira desova e migrar para os sítios de desova uma segunda ou terceira vez (Harden Jones, 1968). Aliás, este é um aspecto do comportamento migratório do salmão e, também, de outras espécies anádromas muito pouco divulgado.

De acordo com Kynard (2003), os indivíduos adultos da maior parte das espécies anádromas da costa Leste dos EUA migram do Oceano Atlântico para os rios durante os meses de março a junho para desovar. Muitos adultos dessas espécies sobrevivem à desova e retornam ao mar durante os meses de junho e julho, exceto a lampreia do mar (*sea lamprey*), que morre após a desova. Após algumas semanas ou anos, dependendo da espécie, larvas ou juvenis, estes mais comuns, migram para jusante em direção ao mar.

Muitas espécies de peixes potamódromos realizam migrações ascendentes e descendentes durante seu ciclo de vida. Esses movimentos apresentam variações sazonais e anuais e são mais bem documentados na Europa, como apresentado em Jungwirth *et al.* (1998).

Entretanto, Kynard (2003) observa que as migrações no rio Connecticut, EUA, do esturjão de nariz pequeno (*shortnose sturgeon*), uma espécie anfídroma que passa a maior parte de sua vida em rios de água doce, são

bem estudadas e podem representar um comportamento típico de muitas espécies potamódromas de vida longa em grandes rios.

Adultos em estágio de pré-desova realizam migrações reprodutivas ascendentes em abril e maio e, em seguida, migrações tróficas descendentes durante o verão. Adultos em estágio não reprodutivo realizam migrações tróficas ascendentes e descendentes nos meses de abril a junho, permanecem nos sítios de alimentação durante o verão e depois realizam novas migrações ascendentes e descendentes, de agosto a outubro, para sítios de hibernação, juntamente com adultos em estágio de pós desova. Fêmeas adultas maduras realizam migrações tróficas ascendentes durante o verão para sítios de alimentação próximos aos sítios de desova, para onde se dirigirão no inverno seguinte para a desova. Juvenis de 2 anos ou mais de vida também participam em migrações de hibernação para sítios de alimentação. Em seu estágio inicial de vida, realizam migrações descendentes curtas, com 3 dias de duração, como larvas, a partir do sítio de desova e, depois, migrações longas durante a primavera/outono, como alevinos que se dispersam a jusante. A cada mês, durante os meses de março a novembro, indivíduos de esturjão em diferentes estágios de vida estão realizando migrações ascendentes e descendentes.

Observa-se, então, uma complexa série de migrações dos mais variados tipos que, presume-se, deve ocorrer, de forma similar, com outras espécies potamódromas de vida longa em outras regiões, países e continentes, como na Austrália e, por extensão, na América do Sul, incluindo o Brasil.

Enquanto que as migrações reprodutivas dos salmões são conhecidas em todo o mundo, poucas pessoas fora da América do Sul já ouviram falar do dourado, surubim, pacu ou tambaqui e de dezenas de outras espécies que fazem parte da vida de milhares ou mesmo milhões de pessoas, cujas migrações ascendentes e descendentes de milhares de quilômetros são tão carismáticas quanto as do salmão (Harvey e Carolsfeld, 2003).

As migrações dos peixes brasileiros são pouco conhecidas em comparação ao conhecimento sobre migração dos peixes do hemisfério norte, de acordo

com Godinho e Kynard (2007). No sudeste brasileiro, as pessoas, em geral, estão familiarizadas apenas com a migração reprodutiva ascendente, denominada piracema, embora a migração reprodutiva descendente também já tenha sido detectada nos poucos estudos conduzidos sobre o assunto (Godoy, 1975).

Os peixes brasileiros de piracema, de importância incontestável em nossa cultura e economia, carecem de estudos relacionados à sua migração (Godinho e Godinho, 1994). Para pouquíssimas espécies (cerca de 10 a 15), a migração foi estabelecida em bases científicas e, infelizmente, grande parte das observações sobre este comportamento provém de programas instituídos com outros objetivos, de acordo com Petrere Jr. (1985).

O primeiro estudo sobre a migração de peixes brasileiros foi conduzido nas décadas de 1950 e 1960 no sistema composto pelos rios Mogi Guaçu, Pardo e Grande nos estados de São Paulo e Minas Gerais. A migração foi estabelecida para cerca de uma dezena de espécies utilizando-se da técnica de marcação e recaptura de indivíduos (Godoy, 1975).

De acordo com os estudos realizados por Godoy (1959), em que 5.437 indivíduos de curimatás (*Prochilodus scrofa*) foram marcados, entre 1954 e 1958, logo abaixo da Cachoeira de Emas no rio Mogi Guaçu, curimatás de ambos os sexos começavam a chegar ao local ao final de agosto, aos milhares, muitas vezes em grandes cardumes. Sempre estavam sexualmente desenvolvidos, a maior parte deles com bom peso, com atividade diária e noturna, ambas de mesma intensidade.

A desova ocorria entre a Cachoeira de Emas e a Cachoeira de Cima, distantes cerca de 130 km, em locais propícios, entre o início de novembro e meados de fevereiro, sempre quando o nível do rio estava subindo e ao final da tarde e à noite. Estímulo migratório similar também foi observado para peixes de diversas espécies da família *Characidae*.

Após a desova, praticamente todos os curimatás realizavam migrações descendentes pelo rio Mogi Guaçu, entravam no rio Pardo até à sua foz e

entravam no rio Grande e seus tributários, permanecendo neste rio entre Cachoeira dos Patos e Marimbondo. Desta forma, para o curimbatá, o rio Grande e a porção inferior do rio Pardo foram identificados como sítios de alimentação, e o rio Mogi Guaçu, entre Cachoeira de Emas e Cachoeira de Cima, como sítio de desova. Em seus movimentos migratórios ascendentes e descendentes, o curimbatá chega a percorrer distâncias de 1.100 km em um ano, tendo sido possível identificar que o curimbatá apresenta um comportamento de volta para casa (*homing*), ou seja, de retornarem, para desovar, ao local em que seus pais desovaram.

Também de acordo com Godoy (1959), em janeiro de 1959 foi observada uma migração ascendente de curimbatás já desovados. Vários indivíduos foram marcados tendo-se constatado que eles realizaram migrações ascendente e descendente com motivação diferente da reprodução.

Outro importante estudo de migrações de peixes neotropicais foi realizado com os grandes siluriformes da bacia amazônica, apresentado em Barthem e Goulding (1997). Estas espécies são consideradas grandes migradoras e, de acordo com a classificação apresentada anteriormente, são consideradas potamódromas, por viverem unicamente em águas doces, observando-se a presença de indivíduos dessas espécies no estuário do rio Amazonas, não entrando na água salgada do Oceano Atlântico.

Tomando como exemplo a dourada (*Brachyplatystoma flavicans*), juvenis e indivíduos pré-adultos são comuns no estuário, enquanto adultos são raros ou ausentes, conforme Barthem e Goulding (1997).

Informações de pescadores, confirmadas por dados dos mercados de peixes de Belém e Santarém, mostram que douradas realizam migrações ascendentes, no baixo rio Amazonas, de agosto a outubro. Na Cachoeira do Teotônio, no rio Madeira, localizada 3.100 km a montante do estuário do rio Amazonas, também são observadas migrações ascendentes nos meses de dezembro a fevereiro. Se essa grande distância fosse percorrida de uma única vez ao longo daqueles cinco meses, a velocidade de deslocamento ao longo do percurso seria de 15 a 19 km/h, correspondendo às maiores

velocidades de migração dentre as espécies da América do Sul (Barthem e Goulding, 1997). E, também, peixes se deslocando nesta velocidade não teriam tempo para se alimentar, o que não ocorre, uma vez que os peixes que chegam à Cachoeira do Teotônio apresentam tamanho superior àqueles que são capturados no estuário e baixo rio Amazonas.

Dessa forma, Barthem e Goulding (1997) apresentam o seguinte modelo de migração para as douradas. Cardumes de jovens migram do estuário do rio Amazonas para a Amazônia Central. Eles permanecem de um a dois anos neste amplo sítio de alimentação. No início das chuvas anuais, cardumes de douradas jovens que permaneceram no sítio de alimentação por, pelo menos, um ano, realizam uma segunda migração ascendente, que ainda não é reprodutiva, como se depreende do estágio de maturação gonadal dos indivíduos capturados na Cachoeira do Teotônio.

Aparentemente a desova só deve ocorrer dali a um ano, em alguma região a jusante dos sítios permanentes dos adultos, localizados nos formadores ocidentais do rio Amazonas. A cidade de Pucallpa, no Peru, numa distância de aproximadamente 4.500 km da foz, é o local mais distante onde se dispõe de dados de mercado de peixe para a dourada, próximo à cidade de Letícia na Colômbia. Nessas regiões, peixes adultos, que não retornam ao estuário, são capturados durante todo o ano, com tamanhos superiores a 1,10 m.

Os ovos e larvas, então, são levados pela corrente para jusante, num percurso que deve durar de 13 a 20 dias. Pequenos indivíduos de dourada, o menor deles com 6 cm de comprimento, supostamente com 15 dias de vida, foram capturados no estuário do rio Amazonas entre abril e junho.

Apesar do relativamente pouco conhecimento sobre as migrações dos peixes brasileiros, de acordo com Godinho e Kynard (no prelo), a informação disponível sugere o modelo apresentado na Figura 2.3 – Modelo Conceitual Geral da Migração de Peixes Brasileiros.

O modelo indica um complexo padrão de migração. Os peixes migratórios brasileiros migram (ou se dispersam) ao longo dos rios durante todos os

estágios de suas vidas, ou seja, ovos, larvas, alevinos e adultos. Ovos e larvas movem-se somente para jusante, em migrações passivas, e em algum ponto os jovens migram rio acima. Os jovens, possivelmente, também migram rio abaixo. Adultos em estágio de pré-desova, pós-desova ou apenas à procura de alimentação podem tanto subir quanto descer o rio. A migração rio acima é o movimento pré-desova mais comum já encontrado entre os peixes brasileiros.

Figura 2.3 – Modelo Conceitual Geral da Migração de Peixes Brasileiros – Fonte: Godinho e Kynard (no prelo)

2.2 IMPACTOS DE BARRAGENS SOBRE PEIXES

A implantação de barragens ao longo de rotas migratórias é um grave problema para as populações de peixes, tanto em outros países (Bernacsek, 1984; Pavlov, 1989), quanto no Brasil, e as alterações nas rotas migratórias impostas por esses obstáculos ainda não são bem conhecidas (Godinho e Godinho, 1994).

De acordo com Larinier (2001), no que concerne à região a jusante das barragens, um dos maiores efeitos sobre as populações de peixes é o declínio das espécies anádromas, pois as barragens impedem as migrações reprodutivas ascendentes. Os efeitos podem ser severos, levando à extinção de espécies, quando não há sítios de desova no rio ou em seus tributários, a jusante da barragem.

A modificação do regime hidrológico, através da regularização das vazões, e da qualidade da água a jusante de reservatórios pode causar diferentes impactos sobre as espécies de peixes.

Cabe ressaltar que os impactos estão diretamente associados ao volume do reservatório e ao grau de regularização do rio a jusante, imposto pelo reservatório. Reservatórios a fio d'água e com pequeno volume tendem a apresentar impactos bem menores.

A redução do regime de cheias a jusante das barragens pode privar muitas espécies de sítios de desova e de fontes de alimentos, o que pode levar a mudanças na composição das espécies, com perdas das espécies que desovam em planícies de inundação. A regularização das vazões, por outro lado, pode alterar a dinâmica sazonal ou diária da migração, reduzindo a atratividade de um determinado trecho de rio, podendo induzir algumas espécies a migrarem para afluentes, a jusante, não afetados pela regularização. De modo similar, flutuações diárias de alguns poucos metros nos níveis de água a jusante de barragens podem inibir o comportamento reprodutivo de algumas espécies.

Os reservatórios podem modificar as características térmicas e químicas da água. Enquanto aqueles com tomadas d'água de superfície funcionam armazenando nutrientes e liberando águas mais quentes, os com tomadas d'água profundas liberam nutrientes e águas mais frias. Mudanças na temperatura da água a jusante das barragens tem sido freqüentemente identificadas como causa da redução de espécies nativas. Em grandes reservatórios, a captação e liberação de águas do hipolímio do reservatório,

com baixos teores de oxigênio, ou de águas vertidas supersaturadas com oxigênio e nitrogênio podem causar mortandades de peixes a jusante.

A concentração de peixes a jusante de barragens, incluindo indivíduos desorientados por escoamentos turbulentos dos vertedouros ou pela passagem pelas turbinas, quando provenientes do reservatório, aumenta sua exposição e vulnerabilidade à predação por outros peixes ou pássaros.

Em resumo, os efeitos cumulativos de redução de picos de cheias, de estabilização de níveis de água, de redução de velocidade de escoamento e de temperatura da água podem levar a mudança nas composições das espécies e a reduções significativas das populações a jusante de barragens.

Como apresentado em Sato *et al.* (2003), os principais impactos sobre os peixes a jusante de reservatórios parecem ocorrer em seu processo reprodutivo. Espécies que dependem de cheias e de condições de temperatura específicas como gatilho para a desova são as mais afetadas, devido às alterações introduzidas pelos reservatórios no regime hidrológico, com a atenuação e retardamento das cheias, e nas temperaturas da água. Diversos impactos sobre populações de peixes a jusante de reservatórios são apresentados, dentre os quais, a interrupção do processo migratório, a inibição da reprodução, o aumento na vulnerabilidade à predação, a interferência nas áreas de alimentação e recrutamento de filhotes, e a modificação na composição da ictiofauna.

Com relação aos efeitos a montante de barragens, também conforme Larinier (2001), a formação de reservatórios pode afetar de forma dramática o *habitat* de espécies migradoras, pela transformação de ambientes lóticos, ou seja, de água corrente, em ambientes lênticos, com águas em baixas velocidades. Assim, independente das questões associadas à livre passagem de peixes pela barragem, espécies que desovam em águas correntes podem ser eliminadas, devido à perda de áreas de desova por alagamento.

Aspecto também relevante é a significativa redução das chances de ovos e larvas provenientes da eventual desova a montante alcançarem os sítios de alimentação a jusante e, em consequência, de completarem seu ciclo de vida, devido ao aumento da exposição à predação por outros peixes e pássaros, ou mesmo da deposição no substrato do reservatório, pela redução da velocidade do escoamento e pelo aumento da transparência das águas, de acordo com Agostinho, A. *et al.* (2007).

Quirós (1988) conclui que a construção de barragens na parte superior de rios da América Latina pode ter levado ao desaparecimento de estoques de peixes migradores nos reservatórios e nos trechos de rio a montante daquelas estruturas. E que o mesmo ocorreu em trechos de rio onde várias barragens foram construídas em série.

A construção de barragens pode provocar, também, uma acentuada queda da produção pesqueira. Espécies de piracema, que tendem a ser mais abundantes no rio, na condição anterior ao barramento, são paulatinamente substituídas por espécies não migratórias de baixo valor comercial (Godinho, 1993). Essa modificação leva à alteração acentuada nas condições socioeconômicas dos pescadores, conforme Sato e Osório (1988), e nas atividades comerciais relacionadas à pesca.

Outro aspecto especialmente importante para peixes neotropicais se refere aos seus comportamentos de se orientarem ou se moverem contra o escoamento denominados, respectivamente, de reofilia e reotaxia. De acordo com Pavlov (1989), este comportamento é denominado de reoreação (*rheoreaction*), e todos os outros comportamentos que os peixes exibem em respostas a escoamentos foram desenvolvidos a partir desta reação. Reoreação inclui componentes locomotores e de orientação. A orientação contra a corrente se baseia no estímulo de órgãos sensórias tácteis e visuais. Em escoamentos típicos de rios, com recirculações e gradientes de velocidade, os peixes também usam os órgãos da linha lateral e órgãos de equilíbrio, o canal horizontal do labirinto, para orientação.

A reação optomotora, que se manifesta no movimento do peixe seguindo sinais no campo da visão, é o componente visual da reoreação. Este comportamento pode fazer com que mesmo peixes não migradores se orientem e se desloquem contra o escoamento.

Durante as migrações ascendentes, ao seguirem esta habilidade inata de se deslocarem contra a corrente, peixes de comportamento de reotaxia mais acentuado poderão se deparar com outras ameaças mais imediatas à sua sobrevivência ao encontrarem um aproveitamento hidrelétrico.

Por um lado, a atração causada pelo escoamento proveniente das turbinas fará com que indivíduos se concentrem no interior dos tubos de sucção, onde poderá ocorrer, eventualmente, mortalidade em operações de manutenção das máquinas, com o esvaziamento do tubo de sucção, ou em operações de reversão do modo de operação das máquinas de síncrono (ou reativo) para geração (CEA, 2001).

Por outro lado, em aproveitamentos hidrelétricos particulares, com arranjo geral das estruturas onde o vertedouro se localize junto ao antigo leito do rio, que permaneça seco durante a maior parte do ano, a atração causada pelo escoamento proveniente do vertedouro, poderá fazer com que indivíduos se aglomerem na região de restituição das águas desta estrutura.

Após a operação de fechamento das comportas, com o conseqüente redução de água naquela região, poderá, eventualmente, ocorrer mortalidade de peixes aprisionados em poços formados junto ao fundo do rio, pela redução do oxigênio dissolvido na água.

Sistemas de transposição de peixes podem fornecer, para indivíduos de diferentes espécies, um caminho seguro para o reservatório e trechos de rio a montante, onde poderão encontrar locais adequados para alimentação e desova. Ao mesmo tempo em que constituem alternativas viáveis para a redução da possível mortalidade de peixes naquelas regiões de perigo, pela redução do número de indivíduos a jusante.

Alguns aspectos relacionados à redução da mortalidade em tubos de sucção e na região de restituição do escoamento de vertedouros são apresentados no Capítulo 3, a seguir. Aspectos relativos a sistemas de transposição de Peixes são apresentados no Capítulo 4.

3 PROTEÇÃO A JUSANTE DE TURBINAS E VERTEDEOUROS

3.1 PEIXES EM TUBOS DE SUCÇÃO DE TURBINAS

Uma busca na literatura técnica sobre a questão da mortalidade de peixes em turbinas durante migrações ascendentes fornecerá poucos resultados. Embora a entrada de peixes em migrações ascendentes em tubos de sucção de turbinas ocorra como resultado do comportamento reofílico, há poucos trabalhos relativos a este assunto para peixes de espécies salmonídeas, dentre os quais Turnpenny (1999) e CEA (2001), talvez devido à rápida localização por peixes anádromos da entrada de sistemas de transposição de peixes para montante. Para peixes de espécies neotropicais, trabalhos similares são raros.

Todavia, existem informações abundantes na literatura relativas a estruturas, equipamentos e outras medidas para a prevenção da entrada de peixes juvenis, durante migrações descentes, em tomadas d'água de aproveitamentos de recursos hídricos, tais como projetos de irrigação, sistemas de abastecimento urbano e usinas hidrelétricas, com o objetivo último de redução da mortalidade. Tais dispositivos são associados, usualmente, a estruturas de contorno (*bypasses*), que permitem a transposição de peixes também para jusante.

Essas informações podem constituir subsídios valiosos para sugerir soluções que venham a reduzir ou mesmo evitar a entrada de peixes neotropicais em tubos de sucção de turbinas de aproveitamentos hidrelétricos.

De acordo com OTA (1995), os principais tipos de tecnologias presentes em transposição para jusante são as barreiras físicas e os dispositivos para direcionamento, que podem ser estruturais ou comportamentais.

As barreiras físicas são constituídas essencialmente por telas (metálicas ou plásticas) e são consideradas o meio mais efetivo e confiável para evitar a entrada de peixes nas tomadas d'água. Podem ser de diversos tipos, sendo as mais comuns as do tipo rotatório (*rotating drum screen*), deslizante (*travelling screen*) ou fixo (*fixed screen*). As telas do tipo *Eicher* e modular inclinada são consideradas experimentais.

Uma vantagem destes sistemas é que eles são efetivos para qualquer espécie, do tamanho e características natatórias consideradas em seu projeto. Contudo, a despeito de sua efetividade, estão sujeitos a obstruções por materiais flutuantes, de acordo com Boubée e Haro (2003), que podem ser reduzidas com a utilização de sistemas para limpeza do tipo ar comprimido, mas os custos de implantação e operação são altos, tornando-os inviáveis para tomada d'água de grandes dimensões.

Em muitos países, segundo Turnpenny (1999), é exigida por lei a colocação de telas em tubos de sucção, para evitar a entrada de peixes nas turbinas e evitar possíveis injúrias. Na Inglaterra, o usual é a utilização de telas com malha de 50 mm para salmão do Atlântico ou 38 mm para truta do mar.

Redes também são barreiras físicas do tipo experimental, que constituem um modo efetivo de evitar a entrada de peixes em tomadas d'água. O custo de instalação é comparativamente baixo, porém os custos de operação e manutenção são altos. Na prática, somente podem ser utilizadas em rios ou reservatórios onde há pouco material flutuante, devendo ser abaixadas ou retiradas nos períodos de vazões elevadas.

Os dispositivos estruturais de direcionamento de peixes mais comuns são as grades, em ângulo (*angled bar*) ou perpendiculares (*trash rack*); e os sistemas tipo persiana (*louver*), que possuem, também, aspectos comportamentais, por alterar as características do escoamento a que os peixes respondem.

Barreiras comportamentais utilizam a rejeição dos peixes a diversos estímulos externos como um meio de protegê-los das tomadas d'água,

conforme Boubée e Haro (2003). Os tipos mais comuns são luzes, som, campos elétricos, cortinas de bolhas e/ou combinações deles.

Como muitos peixes migram preferencialmente à noite e evitam luzes neste período, baterias de lâmpadas de mercúrio ou estroboscópicas, tanto superficiais quanto submersas, têm sido utilizadas como barreiras na tentativa de evitar a entrada de peixes em tomadas d'água.

Contudo, a eficácia destes sistemas depende de baixas velocidades do escoamento e de baixos níveis de turbidez, para a manutenção da intensidade de iluminação. Como os peixes tendem a se habituar com a iluminação artificial, as barreiras com luzes podem se tornar ineficazes se os peixes permanecerem na área iluminada por algum tempo.

Apesar do baixo custo de implantação, os custos de manutenção associados à limpeza de algas das lâmpadas, de material flutuante dos cabos de fixação e da alimentação elétrica podem tornar o sistema impraticável.

No que concerne a barreiras sonoras, vários estudos têm sido realizados com o objetivo de modificar padrões de movimento de peixes. Neste aspecto, o som possui várias características favoráveis como, por exemplo, a capacidade de ser direcionado, a reduzida atenuação com a profundidade, a independência da turbidez e da luminosidade, etc. Por outro lado, locais com altos níveis de ruído, como tomadas d'água e tubos de sucção, podem dificultar a percepção pelos peixes de sons gerados de forma artificial, enquanto que sons de alta intensidade podem ser prejudiciais aos peixes.

O escoamento através de turbinas, escadas de peixes e outras estruturas hidráulicas gera sons subaquáticos de baixa frequência, menores que 1.000 Hz. Dados da literatura parecem indicar que peixes salmonídeos detectam apenas sons de baixa frequência, entre 10 e 1.000 Hz (Hawinks, 1986). O salmão do Atlântico parece ser mais sensível a sons da ordem de 160 Hz.

Sons de baixa frequência são percebidos apenas a pequenas distâncias e os resultados disponíveis se referem a experimentos em pequena escala. Por

outro lado, a repulsa de clupeídeos adultos a sons subaquáticos de alta frequência, 120 e 160 kHz, foi relatada nos anos 80, conforme Kynard e O'Leary (1990). Entretanto, muitas espécies de peixes não respondem a sons de alta frequência.

Estudos de campo demonstram que a resposta de peixes a sons subaquáticos pode ser afetada por variáveis ambientais tais como temperatura da água e velocidade do escoamento. E, também, pelo estágio de vida dos indivíduos, pelos horários, do dia ou da noite, dependendo da espécie de peixes em estudo.

Barreiras elétricas têm se mostrado úteis em instalações de menor porte, para peixes em migrações ascendentes, segundo Boubée e Haro (2003). Em experimentos em laboratórios, indivíduos adultos de *American shad* mostravam repulsa a campos de corrente alternada com 0,02 V/cm, enquanto que em testes de campo não foram constatados efeitos de repulsa para campos mais intensos, de 0,25 V/cm (Kynard e O'Leary, 1990).

De forma geral, não existem dados conclusivos sobre sua eficiência com relação a peixes em migrações descendentes sugerindo sua dependência de fatores do escoamento como profundidade e velocidade e, também, da resposta específica de determinadas espécies e do tamanho dos indivíduos, mesmo para uma mesma espécie (OTA, 1995).

Poucos exemplos estão disponíveis sobre a utilização de barreiras elétricas no hemisfério norte para evitar a entrada de peixes em canais de fuga, podendo-se citar a usina hidrelétrica de Beeston, na Inglaterra, de acordo com Turnpenny (1999). Exemplos de barreiras elétricas, fornecidas por fabricante de equipamento, são apresentados na Figura 3.1 – Esquema de Barreira Elétrica em Canal de Fuga e na Figura 3.2 – Barreira Elétrica em Canal de Fuga.

TAILRACE BARRIER

Adult fish can be injured by swimming far enough into a powerhouse draft tube to contact turbine runners. This results in lacerations, paralysis, or immediate death. To protect fish from turbine draft tubes, many fishery agencies require placement of an exclusion barrier.

31. Tailrace Barrier Installation

Figura 3.1 – Esquema de Barreira Elétrica em Canal de Fuga – Fonte: Smith-root.com

Figura 3.2 – Barreira Elétrica em Canal de Fuga – Fonte: Smith-root.com

Cortinas de bolhas foram testadas em laboratório, mas não se provaram eficazes no bloqueio ou no direcionamento de peixes em aplicações de campo. Alguns pesquisadores sugerem que o sucesso na aplicação de bolhas de ar estaria associado ao som que elas produzem e não propriamente às bolhas (OTA, 1995). Outros, que os efeitos de repulsa aumentavam em associações de bolhas de ar e luzes (Patrick *et al.*, 1985).

No Brasil, em termos de projeto de novos empreendimentos e de aplicações em aproveitamentos existentes, a tendência recente é a utilização de grades com telas metálicas a jusante do tubo de sucção de turbinas, imediatamente após a parada das máquinas. Isto porque sua utilização de forma permanente poderia ser uma solução eficaz, porém com a desvantagem de introduzir perda de geração de energia em usinas. Exemplo de grade desse tipo é apresentado na Figura 3.3 – Grade Anti-Cardume Tipo Gaveta para Tubo de Sucção (Vista) e na Figura 3.4 - Grade Anti-Cardume Tipo Gaveta para Tubo de Sucção (Localização).

A dúvida relativa à eficácia desse tipo de grade, e para a qual ainda não existem dados disponíveis, é se o tempo de descida da grade após a parada da máquina seria curto o suficiente para evitar a entrada de um número significativo de peixes no interior do tubo de sucção. Este aspecto deve ser ainda avaliado a partir de monitoramento específico, principalmente nos aspectos relativos ao comportamento dos peixes durante a redução da vazão das máquinas e quanto ao melhor momento para o início da descida e para o tempo de descida da tela.

Para contornar aquelas incertezas, o autor propõe, neste trabalho, uma grade com painéis giratórios múltiplos, que poderia ser instalada na saída do tubo de sucção durante parada temporária da máquina, anterior à parada programada, cuja abertura entre os painéis seria reduzida em proporção direta à redução de vazão da turbina. Esta grade é apresentada, de forma esquemática, na Figura 3.5 – Grade Anti-Cardume com Painéis Giratórios Múltiplos para Tubo de Sucção.

Figura 3.3 – Grade Anti-Cardume Tipo Gaveta para Tubo de Sucção (Vista) – Fonte: Leme Engenharia

Figura 3.4 - Grade Anti-Cardume Tipo Gaveta para Tubo de Sucção (Localização) – Fonte: Leme Engenharia

Figura 3.5 – Grade Anti-Cardume com Painéis Giratórios Múltiplos para Tubo de Sucção

Alguns estudos recentes no Brasil buscaram avaliar, em laboratório, os efeitos de repulsão provocados por barreiras do tipo elétrica (Lopes *et al.*, 2002) e de luzes (Silva *et al.*, 2007) sobre a entrada de peixes em tubos de sucção. Porém, há dúvidas quanto à representatividade dos resultados para aplicações em campo. Apesar de tais dúvidas, a aplicação de barreiras comportamentais pode representar uma solução promissora.

Considerando, por exemplo, a situação de usinas do estado de Minas Gerais, em que a grande maioria dos indivíduos presentes no interior de tubos de sucção de turbinas é de mandis amarelos (*Pimelodus maculatus*), e que possivelmente o mesmo ocorre em outras usinas da região sudeste, com peixes de mesmo gênero, considera-se que pesquisas de campo direcionadas para a avaliação das respostas de indivíduos daquela espécie a barreiras sonoras e elétricas, podem conduzir a soluções eficazes e, no caso de barreiras sonoras, de baixo custo, em prazos relativamente curtos, sem interferências com a operação de usinas.

Face ao exposto, as grades com telas metálicas e as barreiras comportamentais sonoras e elétricas aparentam ser as soluções mais promissoras para reduzir ou impedir a entrada de peixes em tubos de sucção de turbinas.

3.2 PEIXES A JUSANTE DE VERTEDOUROS

De forma similar à questão da mortalidade de peixes em turbinas durante migrações ascendentes, buscas na literatura sobre a mortalidade de peixes na região de restituição do escoamento de vertedouros fornecerá muito poucos resultados, grande parte associada à supersaturação de gases dissolvidos na água.

Em alguns aproveitamentos hidrelétricos no Brasil, com um arranjo particular das estruturas hidráulicas, em que o vertedouro fica posicionado no antigo leito do rio e o canal de fuga é escavado em uma das margens, a região a jusante do vertedouro pode ficar seca ao longo da maior parte do ano, ocorrendo escoamento apenas nos períodos de cheia.

Nesses casos particulares, com a abertura das comportas do vertedouro, peixes são atraídos do canal de fuga para a região a jusante do vertedouro pelas vazões vertidas e ali permanecem. Por ocasião do fechamento das comportas, o rápido rebaixamento dos níveis d'água na região de jusante, geralmente com geometria de fundo irregular, correspondente ao leito antigo do rio, tende a fazer com que peixes fiquem aprisionados em poços onde há maior quantidade de água.

Contudo, devido ao relativamente grande número de peixes e pequeno volume de água, aliados às altas temperaturas do ar e, por extensão, da água, a concentração de oxigênio dissolvido diminui de forma rápida, podendo causar a morte dos peixes concentrados nos poços. Fenômeno

relativamente análogo, que ocorre em lagos da Austrália, em condições naturais, é apresentado em Townsend e Edwards (2003).

Para evitar a morte de peixes aprisionados em tais poços, são adotadas manobras especiais para o fechamento das comportas do vertedouro, juntamente com a mobilização de equipes de resgate de peixes.

Poucos são os empreendimentos em que soluções estruturais para a questão são adotadas, apesar do impacto sobre a ictiofauna, das reações negativas da opinião pública e dos transtornos causados à operação do aproveitamento hidrelétrico pelos eventos em que ocorre mortalidade de peixes.

Por seu caráter pioneiro e por seus bons resultados na solução deste tipo de problema, a despeito do relativamente alto custo de implantação, os casos dos canais de restituição dos vertedouros das usinas hidrelétricas de Itutinga e Jaguará, apresentados em Junho e Vieira (2003), Junho *et al.* (2004a e 2004b), são descritos de forma sucinta a seguir.

3.2.1 Canais de Restituição dos Vertedouros das UHE's Itutinga e Jaguará

As usinas hidrelétricas de Itutinga e Jaguará, de propriedade da CEMIG, localizam-se no rio Grande, no estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil, e iniciaram sua operação comercial em 1954 e 1971, respectivamente.

Em ambos os aproveitamentos, a casa de força encontra-se na margem esquerda e o barramento e o vertedouro estão posicionados no antigo leito do rio, e a dissipação da energia do escoamento vertido era feita diretamente no antigo leito rochoso do rio. Durante a estação chuvosa, quando ocorre a maior parte das migrações de peixes, grandes quantidades de peixes são atraídas da região da casa de força pelo escoamento

proveniente do vertedouro. Ao final do período chuvoso, com o fechamento das comportas do vertedouro, e a redução do nível d'água naquela região, ocorria o aprisionamento de peixes em depressões e poços existentes no antigo leito do rio.

Após a realização de diversas intervenções visando disciplinar o escoamento na restituição do vertedouro e evitar o aprisionamento de peixes, dentre as quais, o fechamento especial das comportas, concentrando o escoamento na parte mais profunda do antigo leito do rio; a escavação de pequenos canais de drenagem dos poços ou de canais para cheias de menor porte; paralelamente à utilização de equipes de resgate de peixes; o proprietário decidiu por uma solução de longo termo, a saber, a implantação de canais de restituição do escoamento vertido, com capacidade de descarga suficiente para que ficasse confinado no seu interior, e que possuísse uma lâmina d'água contínua durante todo o tempo, que permitisse a livre movimentação dos peixes entre o vertedouro e o canal de fuga.

Em ambos os aproveitamentos, os canais de restituição consistem de uma calha menor escavada em rocha e uma calha maior conformada por aterros longitudinais de enrocamento (diques), com o material proveniente das escavações. As diretrizes gerais de projeto foram: cota de fundo do canal de restituição posicionada cerca de 1,0 m abaixo do nível d'água mínimo de operação do canal de fuga da usina; cota de crista dos diques com borda livre mínima de 1,0 m em relação à linha d'água para a vazão de projeto do vertedouro; inclinação do talude dos aterros de enrocamento de 1V:2H; enrocamento de proteção com diâmetros compatíveis com as velocidades e ondas do escoamento; e largura de crista entre 4,0 m e 10,0 m.

Os estudos hidráulicos foram realizados em duas etapas. A primeira foi constituída por cálculos teóricos, realizados com o auxílio do modelo HEC-RAS, para a definição das características geométricas iniciais do canal de restituição. A segunda, em modelo hidráulico reduzido, para a obtenção de condições de escoamento satisfatórias e para a otimização do traçado em planta e das seções de escavação e dos aterros longitudinais do canal, dadas as características tridimensionais do escoamento, em que a

configuração do leito do rio e a dissipação turbulenta da energia do jato são preponderantes. Os estudos em modelo permitiram, também, redução de custos em relação à solução teórica inicial, através da redução de volumes de escavação, e de enrocamento compactado nos diâmetros requeridos.

Após a conclusão das obras, a operação dos vertedouros das UHE's Itutinga e Jaguará foi realizada com condições de escoamento adequadas, sem o aprisionamento de peixes e sem restrições para as manobras de fechamento das comportas, confirmando a eficácia desta solução, o que recomenda sua utilização no caso de problemas similares.

A descrição dos aproveitamentos e das soluções implantadas é apresentada de forma resumida a seguir.

3.2.1.1 UHE Itutinga

A UHE Itutinga possui potência instalada total de 52 MW, com quatro turbinas, com vazão turbinada máxima total de 236 m³/s. A vazão média de longo termo é de 136 m³/s e a vazão de cheia máxima anual com tempo de recorrência de 2 anos é de 550 m³/s. Os níveis máximos normais de operação encontram-se na El. 885,80 m, no reservatório, e El. 857,70 m, no canal de fuga. O vertedouro, controlado por 5 comportas, possui capacidade de descarga de 1450 m³/s, no NA Máximo Normal. Para o nível d'água na El. 887,50 m, a vazão máxima vertida é da ordem de 2030 m³/s, incluindo a vazão pelos vertedouros livres. O topo rochoso a jusante do vertedouro encontra-se, em média, na El. 865,00 m.

O arranjo geral da usina encontra-se na Figura 3.6 - Vista Geral da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Itutinga e a região de restituição na Figura 3.7 – Vista da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Itutinga

Figura 3.6 - Vista Geral da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Itutinga –
Fonte: CEMIG

Figura 3.7 – Vista da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Itutinga – Fonte: CEMIG

Em função das condicionantes do trecho do rio, decidiu-se que o canal de restituição deveria ser otimizado para a vazão de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, maior vazão vertida no período histórico, com tempo de recorrência da ordem de 200 anos, e vazão de projeto de $1450 \text{ m}^3/\text{s}$. Para a capacidade máxima dos vertedouros, $2030 \text{ m}^3/\text{s}$, foi admitido o galgamento dos diques laterais, com lâmina d'água sobre a crista inferior a 1,0 m.

Ao final dos estudos teóricos, apresentados em HÍDRICON (2000), obteve-se configuração do canal de restituição que foi o ponto de partida para os estudos em modelo reduzido tridimensional geral, que foram realizados na FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, de agosto de 2001 a abril de 2002. O modelo foi construído em escala 1:50, atendendo aos critérios de semelhança mecânica. Um resumo dos relatórios parciais emitidos ao longo dos estudos e das observações e resultados mais importantes é apresentado em FCTH (2002).

O canal de restituição implantado na UHE Itutinga, apresentado na Figura 3.8 - Vista do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga e na Figura 3.9 - Vista Geral do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga, possui seção retangular escavada em rocha com cota de fundo na El. 855,00 m, comprimento total de 245 metros, largura constante de 20 metros, em uma extensão de 135 metros; e largura variável de 20 a 28,7 metros, a jusante, em extensão de 65 metros. O trecho montante é constituído por pré-fossa de erosão com cota de fundo na El. 850,00 m, comprimento de 35 metros e largura variável de 24,5 a 21,8 metros, de montante para jusante. A transição entre o fundo da pré-fossa e do canal é feita em talude 1V:2H, em extensão de 10,0 m.

A crista do aterro da margem esquerda encontra-se na El. 865,00 m, com largura variável e valor médio de 34 metros. A crista do aterro da margem direita possui largura de 8,0 m em cotas variáveis da El. 865,00 m a 866,00 m, de montante para jusante. O enrocamento de proteção possui D_{50} mínimo de 0,50 m e máximo de 1,00 m, para velocidades de escoamento, junto aos taludes, de até 6,6 m/s.

Figura 3.8 - Vista do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga – Fonte: CEMIG

Figura 3.9 - Vista Geral do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga – Fonte: CEMIG

3.2.1.2 UHE Jaguará

A UHE Jaguará possui potência instalada total de 424 MW e vazão turbinada máxima total de 1100 m³/s, em 4 unidades Kaplan. A vazão média de longo termo é de 1000 m³/s e a vazão de cheia máxima anual com tempo de recorrência de 2 anos é de 3.400 m³/s. Os níveis máximos normais de operação encontram-se nas elevações 557,50 m, no reservatório, e 512,00 m, no canal de fuga. O vertedouro, controlado por 6 comportas, possui capacidade de descarga de 14.000 m³/s, no NA Máximo Maximorum, El. 558,50 m. O topo rochoso a jusante do vertedouro encontra-se, em média, na El. 518,00 m.

A Figura 3.10 - Vista Geral da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Jaguará mostra o arranjo geral da usina, e um detalhe do leito do rio na região de restituição pode ser observado na Figura 3.11 – Vista da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Jaguará.

Figura 3.10 - Vista Geral da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Jaguará –
Fonte: CEMIG

Figura 3.11 – Vista da Região de Restituição Original do Vertedouro da UHE Jaguará – Fonte: CEMIG

Em função do regime hidrológico local, decidiu-se que a vazão de projeto da calha menor do canal de restituição seria de $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$, maior cheia vertida no período histórico, com tempo de recorrência da ordem de 25 anos, e para a calha maior, de $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$, vazão de projeto do vertedouro.

Ao final dos estudos teóricos, obteve-se configuração do canal de restituição que foi o ponto de partida para os estudos em modelo reduzido tridimensional geral, que foram realizados na FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, de junho a abril de 2001. O modelo foi construído em escala 1:80, atendendo aos critérios de semelhança mecânica. Um resumo dos relatórios parciais emitidos ao longo dos estudos, e das observações e resultados mais importantes é apresentado em FCTH (2001).

O canal de restituição implantado na UHE Jaguará, apresentado na Figura 3.12 - Vista do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará e na Figura 3.13 - Vista Geral do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará, possui seção de escavação com cota de fundo na El. 510,00 m e comprimento total de 420 metros. O trecho montante, com início na fossa de erosão existente, possui comprimento de 75 metros, largura de 120 metros e cota de piso variável entre elevações 505,00 m, a montante, e 510,00 m, a jusante.

Figura 3.12 - Vista do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará – Fonte: CEMIG

Figura 3.13 - Vista Geral do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará – Fonte: CEMIG

O trecho intermediário, curvo, com cota de fundo na El. 510,00 m, possui comprimento de 110 m, largura de 120 metros, a montante, de 130 metros, na região central, de 100 metros, a jusante. O trecho jusante, também com cota de fundo na El. 510,00 m, possui comprimento de 235 metros e largura de 120 metros.

O aterro que limita a calha menor pelo lado esquerdo possui crista na El. 521,00 m, com largura variável e valor médio de 70 metros. Pelo lado direito, possui crista na El. 522,00 m e largura variável de 25 a 40 metros. O aterro que limita a calha maior possui crista na El. 528,00 m e largura constante de 8,0 m, em ambas as margens. O enrocamento de proteção possui D_{50} mínimo de 0,55 m e máximo superior a 1,00 m, constituído pelos maiores blocos de rocha disponíveis no local, para velocidades de escoamento, junto aos taludes, de 2,4 m/s e 8,3 m/s, respectivamente.

4 SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES PARA MONTANTE

4.1 PRINCIPAIS TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO

4.1.1 Aspectos Gerais

Os sistemas de transposição de peixes em barramentos de rios constituem solução clássica para a mitigação de impactos sobre espécies de peixes migradoras anádromas, do ponto de vista da conservação da ictiofauna, porque possibilitam a restauração da conectividade longitudinal entre sítios de alimentação e reprodução, nas migrações ascendentes, complementados pela passagem por turbinas, vertedouros e sistemas de contorno (*bypasses*) a partir do reservatório, que permitem a restauração daquela conectividade nas migrações descendentes.

Sucessos na recuperação de estoques de espécies migradores em rios com barramentos têm sido obtidos com a implantação desses sistemas de transposição para montante, conforme Moffitt *et al.* (1982), Moring (1993) e Clay (1995).

Os sistemas de transposição de peixes podem ser agrupados, de acordo com Clay (1995), em três categorias gerais: escadas, eclusas e elevadores. Mais recentemente, esforços têm sido empregados também na utilização de canais semi-naturais, que buscam reproduzir condições de escoamento mais próximas daquelas encontradas em cursos d'água naturais.

Enquanto as escadas de peixes são mais antigas, havendo registros de estruturas com até 300 anos na Europa, a utilização de eclusas e elevadores é mais recente, da ordem de 70 anos, segundo Clay (1995). Canais semi-

naturais são ainda mais recentes, tendo-se iniciado sua utilização de forma mais intensa há cerca de 20 anos, de acordo com FAO/DVWK (2002).

Clay (1995) comenta que, enquanto as barragens possuíam alturas inferiores ou da ordem de 15 metros, as escadas de peixes eram consideradas a solução “natural”. À medida que as alturas das barragens aumentavam, chegando a valores da ordem de 100 metros, houve um maior incentivo para a busca de alternativas para a transposição de peixes surgindo, então, os elevadores e eclusas para peixes. Uma revisão abrangente sobre sistemas de transposição de peixes encontra-se em Martins (2005).

4.1.2 Canais Semi-Naturais

Em anos recentes, surgiu na Europa uma grande tendência à utilização de canais semi-naturais para a transposição de peixes em barragens. Sem sombra de dúvida, estes canais atendem a requisitos de ordem biológica de forma mais satisfatória do que estruturas tais como escadas, elevadores ou eclusas, no que concerne à conectividade dos rios, conforme FAO/DVWK (2002).

Por outro lado, constituem também uma medida para a restauração de rios em vários países onde os rios, em sua maior parte, foram canalizados ou retificados ou barrados, em decorrência do processo de desenvolvimento, segundo Parasiewicz (2000).

Exemplos de canais semi-naturais, que incluem rampas ou taludes de fundo, rampas de peixes e canais de derivação, podem ser observados na Figura 4.1 – Exemplo de Canal Semi-Natural e na Figura 4.2 – Exemplo de Canal Semi-Natural, e são apresentados em Pasche *et al.* (1995), Miyamoto *et al.* (1995), Steiner (1995), Odeh e Haro (2000), Larinier (2001), FAO/DVWK (2002) e Zitek e Schmutz (2004), dentre outros.

Figura 4.1 – Exemplo de Canal Semi-Natural – Fonte: Larinier (2001)

Figura 4.2 – Exemplo de Canal Semi-Natural – Fonte: Larinier (2001)

Suas características geralmente são definidas considerando critérios e recomendações construtivas típicas de trabalhos de restauração de rios, tais como os apresentados em Schiechl e Stern (1994), Brookes e Shieds Jr. (1996) e FAO/DVWK (2002).

De forma geral, estes canais tem sido implantados em barragens com desníveis médios da ordem de 3,0 m e máximos de 7,0 m, que são pequenos em comparação com aqueles usualmente encontrados no Brasil.

E, também, em reservatórios com níveis de operação constante ou com pequenas variações de níveis (aproveitamentos a fio d'água). Isto porque variações significativas dos níveis de água de reservatórios exigem equipamentos de controle especiais, que podem criar condições hidráulicas que representem dificuldades à passagem de peixes, de acordo com Larinier (2001), e que descaracterizariam, de certa forma, o caráter natural do canal.

4.1.3 Escadas de Peixes

De acordo com Kamula (2001), do ponto de vista biológico, as escadas de peixes são estruturas que permitem aos peixes vencerem os obstáculos em seus deslocamentos migratórios, enquanto que do ponto de vista hidráulico, são estruturas de dissipação de energia. Conforme Katopodis (1992), no que concerne ao tipo de dissipação de energia, as escadas são usualmente divididas em três categorias: *Denil*, tanques com vertedores (*pool and weir*) e ranhura vertical (*vertical slot*). Informações básicas relativas ao comportamento hidráulico dessas estruturas encontram-se em Rajaratnam, Katopodis & Paccagnan (1992).

As escadas de peixes tipo *Denil* consistem de um canal dotado de defletores simétricos posicionados nas laterais e no fundo, que geram correntes helicoidais que dissipam energia junto a eles, reduzindo a velocidade média do escoamento, permitindo aos peixes se deslocarem pelo centro do canal.

Como o escoamento possui velocidades, turbulência e aeração significativas, demandando grandes esforços natatórios dos peixes são necessários tanques de descanso a certos intervalos, para que eles possam se recuperar do esforço despendido antes de prosseguirem em seu movimento ascendente.

Pelos mesmos motivos, este tipo de estrutura é bastante seletivo, devendo sua utilização ser restrita a espécies cujos indivíduos sejam considerados fortes nadadores como o salmão, a “truta do mar”, e, talvez, peixes como o dourado, a curimba e outros similares.

Um tipo interessante de escada *Denil* é a chamada passagem inclinada do Alaska (*Alaska steep pass*), constituída por módulos metálicos pré-fabricados, desenvolvida originalmente para áreas remotas.

As características do escoamento em escadas tipo *Denil* e critérios usuais de projeto podem ser encontrados em Rajaratnam e Katopodis (1984), Rajaratnam e Katopodis (1991), Rajaratnam *et al.* (1997) e Quinn (2000).

As escadas do tipo tanque e vertedouro são constituídas de uma série de tanques em desníveis, que são separados por defletores, cujo objetivo é dissipar a energia do escoamento de modo a permitir o deslocamento dos peixes, de jusante para montante, nadando ou saltando de um tanque para outro. Os defletores podem ter apenas orifícios junto ao fundo (*pool and orifice*), ou, também, orifícios e vertedouros (*pool and orifice weir*). Em tese, em seu movimento ascendente através dos defletores, os peixes de couro utilizam os orifícios, enquanto que os peixes de escamas, os vertedouros.

Escoamentos ocorrem sobre os vertedouros ou diretamente através de orifícios, em direção a estruturas similares nos lados opostos do canal, criando um padrão de circulação, em planta, em torno do eixo longitudinal da escada que dissipa a energia do escoamento.

Geralmente, em escadas de peixes do tipo tanque com vertedouro podem ocorrer escoamentos do tipo cascata (*plunging*) ou corrente (*skimming*). No escoamento tipo *plunging*, o escoamento ocorre por sobre os vertedouros e se dissipa através de quedas no volume de água do tanque de jusante. No escoamento tipo *skimming*, o escoamento também ocorre por sobre os vertedouros, porém devido ao afogamento por jusante, a dissipação ocorre pela recirculação de parte do escoamento no interior dos tanques.

As características do escoamento em escadas tipo tanques com vertedouros e critérios usuais de projeto encontram-se em Rajaratnam *et al.* (1988) e Rajaratnam *et al.* (1989).

As escadas do tipo ranhura vertical também são constituídas de uma série de tanques em desníveis, que são separados por defletores, localizados junto a uma das paredes do canal ou mesmo às duas, que possuem uma abertura ou ranhura ao longo de toda a vertical. O escoamento ocorre através da ranhura e é direcionado para o interior do tanque, e sua energia é dissipada através da circulação em torno de um ou dois eixo(s) vertical(is), perpendicular(es) ao fundo do canal.

As escadas de peixes tipo ranhura vertical apresentam padrão de escoamento e, conseqüentemente, de distribuição de velocidades e dissipação de energia praticamente independente da lâmina d'água no interior dos tanques. Em tese, os peixes podem fazer a travessia dos defletores ao longo de toda a lâmina d'água, na profundidade de sua preferência.

Exemplo de escada de peixes tipo ranhura vertical e aspectos do escoamento no interior do tanque podem ser observados na Figura 4.3 – Vista Geral da Escada de Peixes da UHE Igarapava e na Figura 4.4 - Escoamento em Tanque de Escada de Peixes Tipo Ranhura Vertical (UHE Igarapava).

Figura 4.3 – Vista Geral da Escada de Peixes da UHE Igarapava – Fonte: Consórcio Igarapava

Figura 4.4 - Escoamento em Tanque de Escada de Peixes Tipo Ranhura Vertical (UHE Igarapava)

As características do escoamento em escadas tipo ranhura vertical e critérios usuais de projeto podem ser encontrados em Rajaratnam *et al.* (1986), Rajaratnam *et al.* (1992) e Wu *et al.* (1999).

4.1.4 Eclusas de Peixes

Eclusas são sistemas que possuem uma câmara, na qual os peixes entram ao nível de água de jusante, que se enche, periodicamente. Quando o nível de água no seu interior atinge o nível do reservatório, os peixes podem vencer o desnível da barragem e prosseguir para montante.

As eclusas do tipo *Borland* são de uso mais disseminado, principalmente na Europa, sendo empregadas, geralmente, em barragens com altura superior a 10 metros, segundo Clay (1995). Permitem, também, em tese, a migração de peixes de montante para jusante. Suas principais desvantagens estão associadas à baixa eficiência devido à sua limitada capacidade e à relutância de indivíduos de algumas espécies em saírem da câmara da eclusa no tempo previsto. A Figura 4.5 – Esquema de Eclusa tipo *Borland* apresenta esquema de eclusa desse tipo.

Figura 4.5 – Esquema de Eclusa tipo *Borland* – Fonte: Clay (1995)

Citando o exemplo das eclusas *Borland* da UHE Salto Grande, no rio Uruguai, que fazem a transposição de espécies tais como dourados, curimatás e piaus, Clay (1995) destaca suas limitações quando aplicadas para espécies não salmonídeas, em rios com grandes populações migratórias.

Para estes casos, as eclusas utilizadas na Rússia com vários acessórios em relação às eclusas tipo *Borland*, tais como grades confinadoras, cestas elevadoras, conforme apresentado em Pavlov (1989), seriam mais indicadas. Exemplos de eclusas similares são apresentados na Figura 4.6 – Esquema da Eclusa da Barragem de Ardnacrusha, Irlanda e na Figura 4.7– Esquema da Eclusa da Barragem de Volzhskaya, Rússia.

Estas eclusas tem tido sucesso na transposição de esturção, ciprinídeos (carpas) e outras espécies. De forma similar, Beitz (2000) relata o sucesso da utilização de uma eclusa na barragem de Walla, na Austrália, na transposição de peixes não salmonídeos, tanto para montante quanto para jusante.

Figura 4.6 – Esquema da Eclusa da Barragem de Ardnacrusha, Irlanda – Fonte: Clay (1995)

Figure 8.— The fish lock of the Volzhskaya hydroelectric dam on the Volga River: 1. outlet orifices, 2. operational gates, 3. crowding device, 4. hydroelectric unit

Figura 4.7— Esquema da Eclusa da Barragem de Volzhskaya, Rússia – Fonte: Pavlov (1989)

4.1.5 Elevadores de Peixes

Elevadores de peixes são definidos como quaisquer sistemas mecânicos que transportem os peixes de forma passiva, através da utilização de compartimentos estanques. Os elevadores mais comuns são aqueles em que os peixes são elevados em caçamba içada por cabo (captura e transporte aéreo) e liberados diretamente sobre um canal ao nível do reservatório e aqueles em que os peixes são transportados por caminhões (captura e transporte terrestre). Por captura entende-se a utilização de um escoamento de atração dos peixes ao interior de um canal onde serão capturados de forma eficiente e cuidadosa.

Exemplos de elevador de peixes tipo captura e transporte aéreo e de sistema tipo captura e transporte terrestre, por caminhão, são apresentados na Figura 4.8 - Vista Geral do Elevador de Peixes da UHE Funil e na Figura 4.9 – Vista do Sistema de Captura e Transporte da UHE Santa Clara.

Figura 4.8 - Vista Geral do Elevador de Peixes da UHE Funil – Fonte: Alexandre Godinho

Figura 4.9 – Vista do Sistema de Captura e Transporte da UHE Santa Clara – Fonte: Paulo Pompeu

De acordo com OTA (1995), a utilização de sistemas de captura e transporte terrestre por caminhão envolve uma certa controvérsia devida, principalmente, ao desconhecimento dos efeitos causados pelo manuseio e transporte sobre o comportamento e saúde dos peixes. Por outro lado, em barragens de alta queda, e/ou com longos reservatórios, e/ou em rios com múltiplos barramentos, o transporte por caminhões tem sido adotado como solução permanente para a transposição de peixes. Sua grande vantagem é a liberação dos indivíduos preparados para desova próximo aos locais de desova. No Brasil esta solução tem sido adotada em aproveitamentos com trechos de vazão reduzida de grande extensão e/ou com barragens de grande altura.

A captura e transporte de peixes por caminhões é uma prática usual em outros países, de acordo com Clay (1995), e tem sido utilizada com relativo sucesso. Como exemplo cita os aproveitamentos no rio Susquehana, no estado da Pennsylvania, EUA, onde instalações adequadas e práticas operacionais conservadoras são utilizadas para minimizar os efeitos de *stress* sobre os peixes. Os indivíduos de três espécies principais são capturados no canal de fuga da usina de Conowingo e transportados para montante ao longo de outras três usinas e liberados nas cabeceiras do reservatório superior, ou mais a montante.

As principais vantagens dos elevadores sobre as eclusas são a maior eficiência, devido à maior capacidade de transposição de peixes por ciclo, e à pronta liberação dos peixes no reservatório. A principal desvantagem é a impossibilidade de sua utilização direta na migração de peixes de montante para jusante, exigindo a implantação de estruturas de captura no reservatório. Adicionalmente, os sistemas tipo captura e transporte terrestre apresentam limitações na transposição de indivíduos de grande porte ou de grande biomassa de indivíduos, mesmo de menor porte.

De acordo com Larinier (1987), a utilização de elevadores é preferível à de eclusas, posto que elimina a incerteza associada à saída dos peixes para o reservatório, particularmente no caso de eclusas tipo *Borland*.

Observa-se nos Estados Unidos a utilização de elevadores para peixes, preferencialmente às eclusas, para a transposição de pequenas populações de salmões e grandes populações de clupeídeos em barragens de grandes alturas, segundo Clay (1995). Na Rússia, de acordo com o mesmo autor, observa-se a mesma tendência de utilização de elevadores no lugar de eclusas.

4.2 COMPONENTES DOS SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO MODERNOS

Os sistemas modernos de transposição de peixes são compostos, em geral, por quatro partes principais: o sistema propriamente dito, ou seja, escada, elevador ou eclusa; o canal de entrada, que faz a ligação entre o sistema e o canal de fuga das usinas hidrelétricas; o canal de saída, que faz a ligação entre o sistema e o reservatório; e o sistema de água de atração, cujo principal objetivo é produzir um escoamento no canal de entrada que seja eficaz na atração dos peixes do canal de fuga.

Observe-se, na descrição acima, que a nomenclatura utilizada para caracterizar os canais utiliza como referência o movimento dos peixes e não a direção do escoamento, como é usual.

O canal de entrada é, provavelmente, a parte mais importante dos sistemas de transposição. Caso a sua localização seja definida de forma inadequada e não seja encontrado facilmente pelos peixes, pode conduzir à operação ineficiente do sistema de transposição, por causar atraso na sua entrada na escada, ou mesmo impossibilitar sua migração para montante (Clay, 1995; Von Gunten *et al.*, 1956), ainda que o restante do sistema, como um todo, esteja tecnicamente correto e funcione adequadamente.

O canal de entrada é equipado, geralmente, com uma comporta, junto ao Canal de Fuga, que tem como objetivo criar um jato capaz de atrair os

peixes para o seu interior, onde deverão encontrar condições de escoamento com velocidades suficientes para fazê-los prosseguir em direção à escada.

O canal de saída constitui a parte de montante do dispositivo, onde os peixes saem do sistema de transposição propriamente dito e se dirigem ao reservatório. A saída no reservatório deve ser feita numa região com baixas velocidades de escoamento, sem efeitos apreciáveis do escoamento do Vertedouro ou da Tomada d'água (Von Gunten *et al.*, 1956).

O canal de saída é equipado, geralmente, com comportas que têm como função principal permitir a manutenção do sistema e, também, seu fechamento de emergência. No caso de escadas tipo tanque e vertedouro, é nele que são colocadas comportas para controle de vazão e regulação de profundidades do escoamento no interior da escada, quando o reservatório apresenta variações sensíveis de níveis d'água.

No canal de saída, também, são implantadas, usualmente, estruturas para contagem e captura dos peixes, para avaliar a abundância, a variedade de espécies e outros aspectos relativos aos indivíduos transpostos.

O sistema de água auxiliar ou de atração tem como função fornecer uma vazão complementar à vazão escoada pela escada, ou a própria vazão a ser escoada por eclusas ou elevadores, de modo a atender aos requisitos de atratividade dos peixes que se encontram fora do sistema de transposição, em termos, principalmente, de velocidades e turbulência, do escoamento do Canal de Entrada.

O fornecimento do escoamento de atração, fundamental para o funcionamento eficiente do sistema, é feito por três métodos principais (Von Gunten *et al.*, 1956; Banyas and Leonardson, 1969 e Clay, 1995): i) do reservatório, através de tubulação de gravidade, com sistemas de dissipação de energia adequados; ii) do reservatório, utilizando uma pequena turbina; e iii) do canal de fuga, através de bombas de pequena altura manométrica. Um outro método, aplicável em condições particulares, seria a utilização, parcial ou mesmo total, do próprio escoamento proveniente das turbinas.

Para os sistemas por gravidade, cabe destacar a tendência atual de sua motorização, com a utilização de turbinas “amigáveis aos peixes”, como feito em algumas usinas do rio Colúmbia, com o objetivo de reduzir a mortalidade de peixes na descida do reservatório e de gerar energia com o escoamento de atração. Exemplo deste tipo de aplicação encontra-se em Matus (1998).

4.3 SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO

A escolha e dimensionamento do tipo de sistema a ser utilizado num determinado local, segundo Larinier (1987), depende de vários aspectos de ordem biológica, hidrológica, hidráulica e topográfica, em particular, a) espécies migratórias presentes no curso de água, b) regime fluvial no local e gestão da água na bacia, c) configuração do obstáculo à migração (que, no caso de aproveitamentos hidrelétricos, corresponde ao arranjo geral das estruturas) e da topografia do leito do rio no local e d) do desnível a ser transposto e suas variações ao longo do período de migração.

Com relação ao arranjo de aproveitamentos hidrelétricos em geral, quando as estruturas de barragem, vertedouro e geração encontram-se integradas, que é uma configuração muito freqüente, a implantação de sistemas de transposição de peixes junto à casa de força é, em geral, a mais recomendada (Clay, 1995; Pavlov, 1989). No caso daquelas estruturas estarem separadas por um longo trecho de rio, configuração típica de aproveitamentos com derivação, é possível a implantação de sistemas de transposição de peixes junto à casa de força e também junto à barragem, de acordo com Belaud *et al.* (1987).

Em uma primeira avaliação, o local mais indicado para o sistema de transposição seria o barramento, onde, em tese, seria possível, a manutenção das rotas migratórias originais.

Entretanto, após o início de operação de uma usina, as condições de escoamento no trecho de rio de vazão residual e, também, junto ao barramento, irão sofrer mudanças significativas.

Em princípio, ao longo do ano, indivíduos de diversas espécies deverão se concentrar na região do canal de fuga, atraídos pelo escoamento proveniente das turbinas. Nos períodos de operação do vertedouro, que englobam o período de piracema, os indivíduos das espécies migradoras deverão se deslocar para a região do barramento, atraídos pelas maiores vazões. Encerrados os períodos de vertimento, os peixes que se deslocaram para o barramento e que não foram transpostos para montante tenderão a voltar para a região do canal de fuga.

Em termos práticos, o valor da vazão que daria início a este processo de deslocamento de indivíduos de diferentes espécies migradoras, do canal de fuga para o barramento, constitui uma incógnita. A título de exemplo, no caso da barragem de *Holyoke* e da casa de força da usina de *Hadley Falls*, apresentado em Barry and Kynard (1986), para vazões turbinadas da ordem de $118 \text{ m}^3/\text{s}$, os peixes em migração se deslocavam para a região da barragem/vertedouro quando as vazões vertidas eram superiores a $56 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, quando as vazões vertidas eram da ordem de 47% das vazões turbinadas.

Com relação à altura a ser transposta, que condiciona mais diretamente os custos e a viabilidade econômica da implantação dos sistemas de transposição de peixes, a utilização de escadas de peixes para desníveis inferiores a 10 m pode ser considerada prática usual. Como já citado, canais semi-naturais têm sido implantados em barragens com desníveis médios da ordem de 3,0 m e máximos de aproximadamente 7,0 m.

Na faixa de 10 a 20 m, escadas, eclusas e elevadores podem ser utilizados. Conforme Pavlov (1989), eclusas de peixes são utilizadas, em geral, para desníveis não superiores a 40 m. Elevadores mecânicos possibilitam a transposição em qualquer faixa de desníveis.

Com relação a custos, de modo geral, elevadores ou eclusas apresentam, na medida em que o valor do desnível a ser vencido aumenta, menores custos de implantação do que escadas, embora a presença de um maior número de equipamentos, tais como comportas e grades, implique em maiores custos de operação e manutenção (Larinier, 1987). Os custos de operação de elevadores são superiores aos de eclusas.

4.4 CRITÉRIOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO

Para subsidiar o adequado projeto de sistemas de transposição de peixes neotropicais, critérios de projeto usualmente adotados em sistemas para peixes de espécies salmonídeas são apresentados, como referência, a seguir.

4.4.1 Escadas de Peixes

Os principais parâmetros de projeto de escadas tipo tanque com vertedouro ou ranhura vertical são a carga hidráulica por defletor, a potência específica do escoamento (ou fator de dissipação de energia) nos tanques e a largura da ranhura vertical. A profundidade mínima do escoamento também é um importante parâmetro de projeto.

A carga hidráulica por defletor define a velocidade máxima do escoamento a ser vencida pelos peixes, no processo de subida da escada. Esta carga varia de acordo com as espécies consideradas.

Para escadas do tipo tanque com vertedouro, cargas de 0,45 a 0,60 m são usuais para salmão do Atlântico (Clay, 1995). Nas escadas da barragem de McNary, para salmão do Pacífico, os critérios de projeto previam cargas

hidráulicas de 0,30 m a 0,45 m (Von Gunten *et al.*, 1956), tendo-se observado, entretanto, que, para as dimensões dos tanques adotadas, 9,0 m por 6,0 m, cargas de 0,25 a 0,30 m produziam condições de dissipação de energia mais adequadas.

Ainda para salmão do Pacífico, as cargas de projeto usuais são de 0,30 m a 0,45 m (Larinier, 1987), sendo 0,30 m o valor mais utilizado, o qual foi adotado nas barragens mais antigas do Rio Colúmbia, segundo Banys and Leonardson (1969).

Para escadas do tipo ranhura vertical, a carga de projeto mais utilizada é de 0,30 m, tendo sido adotada nas barragens de *Turner Falls* e *Vernon*, no rio *Connecticut* (White and Pennino, 1980), de *Bergerac*, no rio *Dordogne* (Larinier e Trivellato, 1987) e nas barragens mais recentes do Rio Colúmbia (Rainey, 1991). Para salmão rosa, considerado um nadador menos “agressivo” que o salmão do Pacífico, os valores de carga usuais são da ordem de 0,23 m (Clay, 1995). Para as espécies migradoras mais comuns na Alemanha, a carga adotada é da ordem de 0,20 m (Pasche *et al.*, 1995). Para espécies com menor capacidade natatória valores usuais são de 0,15 a 0,30 m, conforme Larinier (1987).

Embora peixes como dourado ou curimba apresentem semelhanças com o salmão, em termos de comprimento e habilidade natatória, eles aparentam ser nadadores menos “agressivos”, apesar de freqüentemente saltarem sobre obstáculos (Clay, 1995).

Com relação à potência específica do escoamento, a premissa hidráulica básica no projeto de escadas de peixes com tanques é que a energia potencial de um tanque seja convertida em energia cinética no tanque seguinte, o qual deve possuir um volume suficiente à adequada dissipação desta energia. Caso contrário, potências específicas elevadas do escoamento nos tanques inferiores podem reduzir os volumes de descanso para os peixes, dificultando ou mesmo bloqueando sua subida (Rainey, 1991).

A potência específica do escoamento adotada para os tanques, que corresponde, essencialmente, à potência do escoamento por volume de água nos tanques, varia entre as espécies, de maneira similar à carga hidráulica. Para o salmão do pacífico, os valores usuais encontram-se entre 150 W/m^3 e 200 W/m^3 , conforme Larinier (1987), sendo o valor mais comum da ordem de 190 W/m^3 , de acordo com Rajaratnam *et al.* (1986) e Rainey (1991). Para espécies fluviais, menos agressivas, Rizzo (comunicação pessoal) recomenda valores entre 120 W/m^3 e 145 W/m^3 .

A largura da ranhura vertical deve ser definida de modo a permitir a passagem dos peixes sem impacto com as suas laterais. Esta distância depende do estilo de natação e do tamanho do peixe, conforme Kynard (comunicação pessoal).

As profundidades mínimas do escoamento adotadas em projetos recentes variam de 1,30 m (Pasche *et al.*, 1995) a 2,48 m (Larinier e Trivellato, 1987). Bell (1990) apresenta o valor de 0,60 m para a profundidade mínima do escoamento em escadas de pequeno porte.

4.4.2 Canal de Entrada

O Canal de Entrada dos sistemas de transposição de peixes deve ser posicionado no canal de fuga das usinas em local em que seja facilmente encontrado pelos indivíduos migradores de diferentes espécies.

Para a imposição de velocidades de escoamento na entrada do canal superiores à do escoamento do canal de fuga, em toda a faixa de variação de níveis d'água para as quais o sistema deve funcionar, geralmente são utilizadas comportas na extremidade jusante do canal de entrada.

Estas comportas podem ser do tipo orifício, do tipo mitra, como no elevador de peixes da UHE Porto Primavera, do tipo gaveta, como nas escadas de

peixe das UHE's Igarapava e Aimorés, ou do tipo basculante, como nas escadas de peixes das PCH's Canoa Quebrada e Paranatinga II. Nestes dois últimos tipos, o escoamento se dá sobre a comporta, com um escoamento tipo lâmina vertente. De acordo com Rizzo (comunicação pessoal) as comportas do tipo orifício devem ser evitadas, devido à relutância de indivíduos de algumas espécies em passarem por comportas com este tipo de escoamento.

Os valores de velocidade do escoamento junto às comportas do canal de entrada para atração de peixes do canal de fuga variam de acordo com as espécies e as condições de escoamento naquela região. Valores usuais variam entre 1,2 m/s (Clay, 1995; Von Gunten *et al.*, 1956) e 3,0 m/s (Rainey, 1991). É desejável que as velocidades do escoamento no canal de fuga sejam medidas em modelo reduzido.

A velocidade mínima do escoamento no interior do Canal de Entrada também varia em função da espécie. Valores de 0,3 m/s a 0,9 m/s são usuais, segundo Quinn (2000), sendo o valor médio de 0,6 m/s citado por Banys and Leonardson (1969).

A vazão proveniente do sistema de água auxiliar é introduzida no canal de entrada, geralmente, através de grades posicionadas nas paredes ou no piso (Banys and Leonardson, 1969), sendo que a adoção de grades no piso é mais comum. Para evitar que os peixes sejam atraídos por este escoamento são adotados baixos valores de velocidades junto às grades. Para grades nas paredes laterais, os valores brutos são da ordem de 0,08 m/s a 0,15 m/s, e para grades de piso, da ordem de 0,15 m/s a 0,30 m/s (Banys and Leonardson, 1969).

4.4.3 Canal de Saída

Os critérios gerais de velocidade do escoamento são os mesmos do canal de entrada, sendo que, junto à estação de contagem, são adotados valores da ordem de 0,30 m/s a 0,60 m/s (Quinn, 2000). Aspectos relativos à operação de sistemas de contagem de peixes são apresentados em Von Gunten *et al.* (1956).

De modo a simplificar as tomadas de água dos sistemas de água de atração ou auxiliar, geralmente se as localiza no piso do canal de saída, utilizando grades, de maneira similar às do canal de entrada. Esta solução apresenta boa relação custo benefício. Os critérios de velocidade junto às grades são os mesmo adotados no canal de entrada.

A título de ilustração, os parâmetros hidráulicos de projeto da escada de peixes da UHE Igarapava são apresentados em Junho (2000).

4.5 TRANSPOSIÇÃO PARA JUSANTE

A transposição de peixes para jusante é um desafio em todo o mundo, de acordo com Coutant e Whitney (2000).

Enquanto a entrada de sistemas de transposição de peixes para montante encontra-se, em geral, no canal de fuga das usinas, uma região de escoamento confinado, onde as velocidades do escoamento proveniente das turbinas, da ordem de 1,0 a 2,0 m/s, facilitam a localização daquela entrada pelos peixes, a saída desses sistemas de transposição usualmente é posicionada no reservatório, em regiões relativamente distantes das estruturas de vertedouro e tomada d'água, para evitar que sejam eventualmente induzidos a retornar para a região de jusante, na hipótese de desorientação na saída daqueles sistemas.

Como as velocidades de escoamento em reservatórios são muito baixas e as vazões escoam pelas tomadas d'água, ao longo de todo o ano, e também

pelos vertedouros, nos períodos de cheias, a saída dos sistemas de transposição de peixes para montante, com vazões comparativamente muito mais baixas, muito dificilmente é localizada por peixes em migrações descendentes. Essa dificuldade é ainda maior para ovos e larvas, que se deslocam de forma passiva.

Assim, embora os canais semi-naturais, as escadas e as eclusas de peixes possibilitem fisicamente a descida de peixes, tal movimento é altamente improvável e pode ocorrer de forma eventual, devido às características particulares do escoamento a jusante, no canal de fuga, e a montante, no reservatório, de um aproveitamento hidrelétrico.

Por este motivo, a conectividade longitudinal entre os sítios de reprodução e alimentação, nas migrações descendentes, é feita pela passagem dos indivíduos, através dos vertedouros e das turbinas, com taxas de sobrevivência variáveis, e de estruturas de contorno (*bypasses*).

Grandes esforços têm sido despendidos, em outros países, para se entender como os peixes negociam sua passagem para jusante em usinas hidrelétricas e lhes fornecer vias seguras que minimizem a mortalidade provocada durante a passagem pelas turbinas e pelos vertedouro.

No caso de vertedouros, a mortalidade está relacionada às altas velocidades do escoamento e ao impacto direto contra estruturas de concreto ou contra o leito e margens do rio. No entanto, o projeto apropriado da estrutura vertente e da bacia de dissipação pode aumentar satisfatoriamente a taxa de sobrevivência dos peixes (Therrien e Bourgeois, 2000).

Na passagem pelas turbinas, os danos causados aos peixes migrando para jusante são variáveis e tem sido estudados com mais freqüência. Para turbinas Kaplan, por exemplo, estudos indicam que as taxas de mortalidade variam de 0 a 20%, de acordo com Therrien e Bourgeois (2000).

Variações súbitas na pressão, choque e compressão contra as pás, desorientação devido à alta turbulência no tubo de sucção, e conseqüente

susceptibilidade a predadores, segundo Cada (2001), são as principais causas de morte de peixes migradores que atravessam a barragem através das turbinas.

De forma simplificada, os sistemas de contorno (*bypasses*) desenvolvidos para espécies salmonídeas são constituídos, em geral, por grades e/ou telas posicionados junto às tomadas, que, em conjunto com vazões de atração, dirigem os peixes para locais específicos, onde a transposição para jusante é feita diretamente pelo escoamento em condutos ou por meios mecânicos. Entretanto, o progresso nesta área é bastante lento, principalmente para peixes de fundo, conforme Kynard (2003).

Para os peixes neotropicais, com uma extraordinária diversidade de espécies e com grande parte das migrações descendentes sendo realizada por ovos e larvas, de forma passiva, pode-se antever grandes dificuldades no desenvolvimento de sistemas de contorno (*bypasses*) eficientes para a transposição para jusante. Essas dificuldades são agravadas pela sensível redução da concentração de ovos e larvas em direção a jusante, seja pelo aumento de predação devido à maior transparência das águas ou mesmo pela submersão devida às menores velocidades, em reservatórios de maior porte, de acordo com Agostinho, A. *et al.* (2007).

Assim, as maiores dificuldades para a transposição de peixes neotropicais para jusante estarão associadas ao adequado posicionamento da sua tomada d'água, tanto em planta quanto em profundidade, em função das distribuições horizontal e vertical de indivíduos de diferentes espécies. E, também, à atratividade de tais sistemas em relação à operação do vertedouro e tomada d'água do empreendimento, que sugerem a adoção de dispositivos para direcionamento que vão exigir ainda muitos estudos.

Embora o número de sistemas de transposição de peixes implantados no Brasil seja crescente, muito pouca atenção tem sido dada a problemas relacionados à manutenção dos deslocamentos dos peixes para jusante, e poucos estudos trataram diretamente esta questão.

Na barragem da UHE Santa Clara, em operação no rio Mucuri, MG, observações indicaram que, apesar de sua grande altura, 60 m, indivíduos de varias espécies podem descer pelo vertedouro, do tipo concha defletora (*flip bucket*), com dissipação por impacto em pré-fossa de erosão, sem danos externos aparentes, principalmente quando de eventos com grandes vazões (Pompeu *et al.*, 2004).

Sem maiores dúvidas, este tema deve merecer atenção especial e urgente por partes dos diversos agentes envolvidos na mitigação de impactos de barramentos sobre espécies migradoras e, dada sua complexidade, consiste em grande desafio para engenheiros e biólogos.

4.6 EXPERIÊNCIA NACIONAL EM SISTEMAS DE TRANSPOSIÇÃO DE PEIXES

De acordo com Quirós (1988), cerca de 45 sistemas de transposição de peixes foram construídos na América Latina, até 1986, sendo uma eclusa para peixes e, todos os demais, do tipo escada. Destas, 39 encontram-se no Brasil.

Até 1985, de acordo com Godoy (1985), já haviam sido construídos no Brasil 35 sistemas de transposição de peixes, todos constituídos por escada de peixes do tipo tanque com vertedouro e orifício, também chamados no Brasil de degrau-tanque. A maioria destes, 23 no total, encontrava-se em açudes do nordeste brasileiro.

Também em sua maioria, tais escadas, implantadas em torno da década de 50, consistiram em meras cópias de escadas desenvolvidas no hemisfério Norte, para salmões, sem nenhum tipo de ajuste às espécies neotropicais, tendo-se mostrado, em geral, inadequadas, como seria de se esperar.

Tal fato já havia sido registrado por Quirós (1988) e Clay (1995), para quem os diferentes graus de eficiência dos sistemas implantados na América Latina se devem ao pouco conhecimento das características natatórias das espécies, que diferem daquelas do hemisfério Norte, para as quais se dispõe de uma vasta gama de dados de pesquisa e de estudos específicos; e da aplicação inadequada ou apenas parcial dos critérios de projeto necessários ao bom funcionamento dos mecanismos de transposição de peixes.

Exemplo, infelizmente bastante divulgado, é a escada instalada na UHE Salto Morais, no rio Tijuco, cuja eficiência, ou melhor, seletividade, foi estudada por Godinho *et al.* (1991). A escada possui 25 tanques, 78,3 m de comprimento e desnível de 10,8 m, o que conduz a uma declividade longitudinal de cerca de 14%. Das 41 espécies da região, 34 ocorreram na escada, mas apenas 2% conseguiram atingir o terço médio da escada e os pimelodídeos foram os que mais sofreram restrições. As altas velocidades do escoamento e as altas potências específicas do escoamento nos tanques constituem, possivelmente, os maiores impeditivos à adequada utilização da escada por diferentes espécies.

A partir do terço final da década de 90, a implantação de sistemas de transposição de peixes tem sido retomada, com o objetivo de atender às exigências legais e às demandas da sociedade civil.

Na região sudeste, os estados de São Paulo, com a Lei nº 9.798, 1997; Minas Gerais, com a Lei nº 12.488, 1997; e Espírito Santo, com o decreto 1318-R, 2004, tornam compulsória a implantação de sistemas de transposições de peixes em barragens.

No estado de Minas Gerais, por exemplo, o artigo 1º da Lei 12.488 de 9/4/1997 torna obrigatória a construção de escadas de peixes de piracema em barragem a ser edificada em curso de água de domínio do estado. O parágrafo 1º deste artigo menciona que o disposto não se aplica quando, em virtude das características do projeto da barragem, a medida for considerada ineficaz. De acordo com o artigo 2º, as barragens existentes na data da publicação da Lei deveriam ser adaptadas no prazo de 5 anos. A Lei 12.488,

que tinha prazo de 180 dias para sua regulamentação pelo Poder Executivo, ainda não foi regulamentada.

O Decreto 43.713 de 14/1/2004 regulamenta a Lei de número 14.181 de 17/1/2002 que dispõe sobre a política de proteção à fauna aquática e de desenvolvimento da pesca e da aquicultura no estado de Minas Gerais. O parágrafo 1º do artigo 22 diz que, para o licenciamento ambiental de construção de novas barragens, reservatórios e represas para usinas hidrelétricas, poderá ser exigida a construção de estações de hidrobiologia e mecanismos de transposição que propiciem a realização do fenômeno da piracema.

No âmbito federal, lei que também tornava obrigatória a instalação de sistemas de transposição de peixes nas barragens localizadas em rios de domínio da União teve sua tramitação no Congresso Nacional suspensa.

Exemplos de sistemas de transposição de peixes, implantados a partir de meados da década de 90, são as escadas de peixes das UHE's Aimorés, Canoas I e II, Igarapava, Ilha dos Pombos, Lajeado, Ourinhos, Peixe Angical, Piraju e Porto Primavera; da UTE Igarapé; e das PCH's Canoa Quebrada e Paranatinga II; o canal da UHE Itaipu; os elevadores de peixes das UHE's Porto Primavera e Funil; e o sistema de captura e transporte de peixes da UHE Santa Clara, dentre outros.

Excetuando a escada de peixe da UTE Igarapé, que é similar ao tipo rombóide (FAO/DVWK, 2002), e as escadas das UHE's Aimorés e Igarapava e das PCH's Canoa Quebrada e Paranatinga II, que são do tipo ranhura vertical e serão abordadas em capítulo específico, todas as demais são do tipo degrau tanque.

Descrições sucintas dos sistemas de transposição de peixes implantados nas UHE's Igarapava, Funil e Santa Clara, no Estado de Minas Gerais, são apresentadas em Junho (2004). De modo similar, descrições sucintas das escadas de peixes implantadas nas UHE's Igarapava e Aimorés e na PCH Canoa Quebrada são apresentadas em Junho *et al.* (2007). Descrições do

canal para transposição de peixes implantado na UHE Itaipu podem ser encontradas em Müller *et al.* (2003) e Fontes Jr. *et al.* (2004).

Alguns desses mecanismos de transposição de peixes buscam contemplar, de forma mais adequada, as peculiaridades da ictiofauna neotropical, porém ainda em caráter tentativo, empírico e experimental.

Apesar da implantação de diversos sistemas de transposição no Brasil, até há pouco tempo, raros eram os estudos e monitoramentos sobre os resultados obtidos em relação à ictiofauna, podendo-se citar Fontenele (1961), Godoy (1985), Godinho *et al.* (1991) e Borghetti *et al.* (1994).

Estudos recentes sobre a eficiência (ou seletividade) das escadas de peixes das UHE's Canoas I e II, Porto Primavera e Lajeado foram realizados. Apresenta-se, a seguir, um extrato dos resultados obtidos.

As UHE's Canoas I e Canoas II localizam-se no rio Paranapanema, entre os aproveitamentos de Capivara, a jusante, e Salto Grande, a montante. De acordo com Britto e Sirol (2006), em estudos realizados nas escadas de peixes, de novembro de 2001 a março de 2004, no período de novembro a março, foram registradas 56 espécies de peixes, correspondentes a 83,6% das 67 espécies identificadas no reservatório da UHE Capivara (Hoffmann *et al.*, 2005). Dasquelas 56 espécies, nove são consideradas grandes migradoras, correspondendo a 16% do total. Todavia, nas escadas de Canoas I e II, as espécies migradoras responderam por, respectivamente, 67% e 78% da biomassa. As espécies mais abundantes foram o mandi-guaçu (*Pimelodus maculatus*), as piaparas (*Leporinus* spp.) e o curimbatá (*Prochilodus lineatus*).

A coleta de ovos, larvas e pós-larvas nos reservatórios das UHE's Canoas I e II foi baixa, sendo que nenhuma das espécies capturadas pertencia a espécies migradoras identificadas nas escadas. Nesses reservatórios foram identificadas formas juvenis de 29 e 35 espécies de peixes, das quais 11 e 13, respectivamente, foram comuns àquelas registradas nas escadas correspondentes, nenhuma das quais de espécies tipicamente migradoras.

Na escada de peixes da barragem de Porto Primavera, localizada no rio Paraná, a montante da UHE Itaipu, em coletas realizadas no período de dezembro de 2004 a março de 2005, foram registradas 37 espécies de peixes, correspondentes a 11% das 331 espécies encontradas no trecho de rio a jusante, de acordo com Makrakis *et al.* (2007). Das 37 espécies, 11 são consideradas grandes migradoras, correspondendo a 61% das 18 espécies migradoras registradas a jusante. As espécies mais abundantes foram *Rhinelepis aspera*, *Astyanax altiparanae*, *Serrasalmus marginatus* e *Leporinus friderici*, tendo sido apenas a primeira considerada como grande migradora.

Dentre as espécies migradoras no interior da escada, a presença de *Rhinelepis aspera* e *Raphiodon vulpinus* apresentou um declínio significativo na porção superior da escada, enquanto que os movimentos ascendentes de *Pimelodus maculatus*, *Leporinus obtusidens* e *Leporinus elongatus* aparentemente não sofreram alterações, sugerindo, de acordo com os autores, que a escada seja seletiva para espécies com baixa capacidade natatória.

Foram registradas 17 espécies subindo a escada, sendo as mais abundantes *Astyanax altiparanae* e *Leporinus friderici*, e 18 espécies descendo a escada, sendo *Metynnis maculatus* e *Astyanax altiparanae* as mais abundantes. Quatro espécies de grandes migradores apresentaram movimentos ascendentes e descendentes no interior da escada: *Leporinus elongatus*, *Leporinus obtusidens*, *Pimelodus maculatus* e *Raphiodon vulpinus*.

Na escada de peixes da barragem de Lajeado, localizada no rio Tocantins, como apresentado em Agostinho, C. *et al.* (2007a), em coletas realizadas no período de novembro de 2002 a dezembro de 2003, foram registradas 81 espécies de peixes, correspondentes a 62% das 130 espécies encontradas no trecho de rio a jusante.

Das 32 espécies de grandes migradores registradas a jusante, 24 foram registradas na escada, correspondendo a 75%. Dessas, as espécies mais abundantes foram *Raphiodon vulpinus*, *Psectrogaster amazonica* e *Oxydoras niger*. Na porção superior da escada, enquanto a abundância de indivíduos

da primeira espécie aumentou, a das outras duas apresentou um declínio significativo. O sucesso na ascensão da escada não variou de forma marcante entre espécies migradoras ou sedentárias, com a maior parte das espécies ocorrendo tanto nos tanques inferiores quanto nos superiores.

Com relação à velocidade do escoamento no interior da escada, a riqueza de espécies ao longo da escada tende a ser maior para velocidades menores, 2,3 m/s em comparação a 2,8 m/s, embora esta tendência tenha sofrido uma ligeira inversão quando ocorreram chuvas mais intensas e a transparência da água sofreu redução, sugerindo, de acordo com os autores, que diferenças de velocidade não sejam tão importantes quanto a motivação para migrar.

Comparações entre as proporções de classes de tamanhos entre indivíduos migradores indicou, de acordo com Agostinho, C. *et al.* (2007b), que para *Oxydoras niger*, o primeiro cardume a passar pela escada era composto predominantemente de indivíduos pequenos, em contraste com o segundo cardume; enquanto que para *Prochilodus nigricans* e *Pseudoplatystoma fasciatum*, os primeiros cardumes a ascenderem a escada eram compostos principalmente de indivíduos maiores. A grande maioria dos indivíduos adultos analisados não apresentou evidências de atividade reprodutiva, tanto a jusante quanto no interior da escada, sugerindo que o ingresso na escada, de acordo com os autores, tenha ocorrido mais em função de comportamento reofílico, de movimentos ascendentes dispersivos ou da busca de *habitats* mais apropriados para alimentação e crescimento, do que de migrações reprodutivas.

A título de ilustração e para referência futura, parâmetros hidráulicos de interesse para essas escadas de peixes, extraídos de Martins (2005), são apresentados na Tabela 4.1 – Características Hidráulicas de Escadas Tipo Orifício e Vertedouro. De forma similar, o percentual entre as vazões nas escadas de peixes e a vazão turbinada daquelas usinas é apresentado na Tabela 4.2 – Vazões em Escada Tipo Orifício e Vertedouro e Vazões Turbinadas.

Tabela 4.1 – Características Hidráulicas de Escadas Tipo Orifício e Vertedouro

Aproveitamento	Declividade (%)	Profundidade Média (m)	Carga Hidráulica (m)	Vazão (m ³ /s)	Potência Específica (W/m ³)
Canoas I e II	11,8	1,00	0,40	1,25	410
Porto Primavera	5	1,30	0,40	2,73	206
Lajeado	5	1,30	0,40	2,87	198

Fonte: Martins (2005)

Tabela 4.2 – Vazões em Escada Tipo Orifício e Vertedouro e Vazões Turbinadas

Aproveitamento	Vazão (m ³ /s)		Percentual
	Escada	Turbinada	
Canoas I e II	1,25	480	0,26
Porto Primavera	2,73	8400 (14 un.)	0,033
Lajeado	2,87	3250	0,09

Um resumo dos resultados daqueles estudos de monitoramentos de escadas relativos ao percentual de peixes a jusante e no interior das escadas de peixes, tanto para o número total de espécies quanto para espécies consideradas grandes migradoras, é apresentado na Tabela 4.3 – Presença de Espécies em Escadas Tipo Orifício e Vertedouro.

Tabela 4.3 – Presença de Espécies em Escadas Tipo Orifício e Vertedouro

Aproveitamento	Número de Espécies					
	Migradoras			Total		
	A jusante	Na Escada	%	A jusante	Na Escada	%
Canoas I e II	-	9	-	67	56	83,6
Porto Primavera	18	11	61	331	37	11
Lajeado	32	24	75	130	81	62

Registre-se que nesses aproveitamentos as entradas das escadas encontram-se relativamente distantes da saída do tubo de sucção das turbinas, e os canais de entrada não dispõem de comporta de regulação de velocidades para atração de peixes ao seu interior.

A partir de análises dos monitoramentos daquelas e de outras escadas de peixes, apresentados, dentre outros, em Agostinho *et al.* (2002), Agostinho, A. *et al.* (2007), Agostinho, C. *et al.* (2007a) e Agostinho, C. *et al.* (2007b), Pelicice e Agostinho (2008) apresentaram o conceito de escadas de peixes como armadilhas ecológicas, segundo o qual, em determinadas situações, as escadas de peixes poderiam atuar como uma fonte adicional de impacto ambiental sobre as espécies migradoras.

De acordo com este conceito, ao serem transpostos para montante os indivíduos das espécies migradoras podem ou não encontrar locais de desova e criadouros adequados.

Na hipótese do trecho a montante do reservatório ser extenso, de comportar locais de desova inalterados, e apresentar extensas áreas naturalmente alagáveis, o esperado é a manutenção dos estoques das espécies migradoras retidas a montante, com redução na diversidade genética ao longo do tempo, mas com prejuízos aos estoques a jusante.

Caso o trecho a montante do reservatório seja curto, contendo apenas os locais de desova, sem áreas alagáveis significativas, o estoque dos migradores a montante poderia ser severamente reduzido ou mesmo extinto.

Isto porque na ausência de criadouros adequados, os ovos e larvas seriam conduzidos diretamente ao reservatório, com águas de elevada transparência e de baixa velocidade, onde seriam fácil e intensamente predados por predadores visuais, incluindo peixes forrageiros que são abundantes em reservatórios. Nesta situação, os sistemas de transposição inviabilizariam o sucesso reprodutivo de indivíduos que poderiam desovar em segmentos favoráveis a jusante do reservatório, caso existam.

Outro aspecto apontado é que os sistemas de transposição têm funcionado predominantemente apenas com fluxo unidirecional de espécies para montante, o que seria comprovado pela presença insignificante de ovos, larvas e jovens descendo pelas escadas, causando uma redução massiva dos estoques a jusante.

Adicionalmente, a relativamente alta concentração de predadores no interior da escada, em tanques de descanso, e nas imediações das suas estruturas de entrada e saída, constituiria um problema adicional de seleção das espécies que conseguem ascender as escadas.

Por constatarem que as escadas de peixes implantadas no Brasil são satisfatórias para a passagem de espécies migradoras para montante, principalmente espécies de grande porte, apesar da seletividade e das incertezas, e para evitar sua instalação indiscriminada, o que poderia causar impactos ambientais adicionais, Agostinho, A. (2007) propôs um protocolo para orientar a tomada de decisão sobre a instalação de sistemas de transposição de peixes em rios brasileiros, que se baseia no critério de sustentabilidade dos estoques e sua relação com a posição do reservatório no rio.

Cabe registrar que o modelo conceitual proposto se baseou, principalmente, em estudos desenvolvidos para reservatórios de grande porte na bacia do rio Paraná, e que carece, por enquanto, de comprovação mais abrangente.

Seriam desejáveis, por exemplo, dados que permitissem separar as reduções de estoques a jusante de barragens devidas aos impactos dos próprios reservatórios, daquelas causadas pelas transferências para montante através das escadas. Ou ainda, avaliar que percentual da população de jusante foi transferida para montante, de forma a melhor caracterizar o que é chamado de transferência massiva de indivíduos para montante.

Com referência à pressão adicional de predação nas escadas, se por um lado a concentração de predadores no seu interior aumenta, o mesmo ocorre com a concentração dos indivíduos que passam. De maneira similar, seria proveitoso avaliar a relação entre esta proporção de predadores e indivíduos em migração em escadas de peixes e junto às corredeiras que constituem obstáculos naturais em rios, para verificar se ocorre, realmente, um agravamento da predação nas escadas.

Devido à dinâmica do escoamento em reservatórios já descrita, a ausência de ovos e larvas ou mesmo de alevinos, jovens ou adultos em movimentos descendentes em escadas de peixes não significa que não esteja ocorrendo transposição para jusante através das turbinas e vertedouros.

Assim, no que tange à descida de peixes pelas estruturas de vertedouros e tomadas d'água de usinas, a ausência de retorno de peixes para jusante é caracterizada de forma indireta, principalmente pela concentração de ovos e larvas em reservatórios de grande porte. Poucos são os dados similares para reservatórios de pequeno porte, com menores tempos de residência ou com menores reduções de transparência de suas águas.

Não se conhecem estudos sistemáticos, mas apenas dados esparsos, para a avaliação da passagem de alevinos ou de indivíduos jovens por turbinas ou vertedouros que possam caracterizar o que ocorre, de fato, nos reservatórios existentes no Brasil.

Com relação ao mesmo tema dos sistemas de transposição e os peixes brasileiros, Godinho e Kynard (2007) e Godinho e Kynard (no prelo) apresentam abordagem diferente, destacando cinco aspectos principais, descritos sucintamente a seguir.

Considerando o complexo padrão de migração das espécies neotropicais, as escadas de peixes propiciam a passagem de peixes em qualquer tipo de migração ascendente. Como certas espécies de peixes apresentam comportamento diádromo, migrando do oceano para os rios em busca de

alimento, a inexistência de escada de peixes pode levar à extinção dessas espécies a montante de barragens.

Como exemplo, citam migrações ascendentes de surubins em estágio de pós-desova no rio São Francisco, a jusante da UHE Três Marias. De forma similar, surubim e zulega realizam migrações ascendentes no rio São Francisco fora da época de desova. Citam também a escada da UHE Igarapava, onde 14% dos peixes que passaram para montante o fizeram durante a época de estiagem, quando a maior parte das espécies não desova.

Citam, ainda, um cardume migratório de jovens zulegas que chega todo ano ao canal de fuga da UHE Três Marias, e procura, por vários dias, uma passagem para montante. A falta de uma escada de peixes aumenta a densidade da população destes peixes na parte baixa do rio, o que atrai grandes piscívoros migradores como surubins e, possivelmente, dourados. Essas são as três espécies mais importantes para a atividade pesqueira na região de Três Marias, criando uma concentração de renda visível para estes pescadores, devido ao aprisionamento dos jovens zulegas que migram rio abaixo, crescem e não podem fazer o caminho de volta.

Godinho e Kynard (2007) discordam da sugestão de Agostinho *et al.* (2002) de que a presença de amplas planícies naturais (áreas de berçário) a montante da barragem seja essencial para a construção de escadas de peixes. Embora a importância das planícies de inundação seja indiscutível como áreas de berçário para os peixes migradores, a sua ausência em rios grandes pode significar baixa densidade de peixes migradores, mas não significa que eles não possam completar seu ciclo de vida. Um bom exemplo de que peixes migratórios utilizam outros *habitats* além das planícies é o estabelecimento de espécies migratórias introduzidas em rios que não têm planícies, como é o caso do dourado (*Salminus brasiliensis*) e da curimba (*Prochilodus costatus*) no rio Doce. Mesmo em rios com amplas planícies inundadas, já foi sugerido o uso de *habitats* dentro do rio para estágios iniciais do ciclo de vida de peixes migratórios, como com os grandes bagres na Amazônia.

A transposição de peixes para montante pode, ainda, evitar sua extinção local e propiciar recursos pesqueiros aos reservatórios que são *habitats* tipo sumidouro (não conectados a regiões de desova a montante ou com áreas de berçário de alta qualidade), se a população a jusante vive em um *habitat* tipo fonte (onde o recrutamento excede a mortalidade).

Como exemplo, citam as barragens de Igarapava e Miranda, construídas no final dos anos 90 na bacia do rio Paraná, ambas a fio d'água, com áreas de reservatório da mesma ordem, e a jusante de outras barragens previamente existentes, não havendo áreas de desova ou de berçário disponíveis para peixes migratórios em nenhuma das duas. Embora o mandi (*Pimelodus maculatus*) seja uma espécie migratória comum a ambas as barragens, no reservatório da UHE Igarapava, que possui escada de peixes, constitui o peixe mais comum em amostragens experimentais, enquanto que no reservatório da UHE Miranda, que não dispõe de sistema de transposição de peixes para montante, o mandi corria risco de extinção (Vono *et al.*, 2007). Esta situação também seria um indicador de que grandes trechos de corrente livre rio acima ou planícies inundadas não são pré-condições para a utilidade de sistemas de transposição de peixes para montante.

Ainda de acordo com Godinho e Kynard (2007), pode-se, de fato, questionar a utilidade de um sistema de transposição de peixes para a montante se não há um sistema de transposição para jusante. Todavia, para certas espécies e certos rios, um sistema de transposição de peixes para jusante pode não ser necessário.

Por exemplo, peixes de um cardume de curimbatás adultos migradores (*Prochilodus lineatus*) que vivem em um trecho de rio pequeno, da ordem de 3 km abaixo do canal de fuga da usina de Volta Grande, no rio Grande, que receberam radio transmissores e que foram liberados no reservatório, migraram rio acima e não retornaram nos dois anos em que foram rastreados. Se estes adultos foram desovados a montante da barragem e se estivessem tentando retornar para montante ao seu trecho natal do rio, seus deslocamentos sugerem que depois de alcançarem o

trecho acima do reservatório, eles não precisam de um sistema de transposição para jusante, hipótese que necessitaria ser testada.

Finalmente, a redução do estoque de peixes a jusante de uma barragem pode ser controlada, caso necessário, limitando-se o número de peixes que são transpostos para montante.

Essa discussão evidencia a necessidade de um melhor entendimento dos modelos de migração de peixes brasileiros, que possa subsidiar de forma mais confiável decisões relativas à implantação de sistemas de transposição de peixes para montante.

Enquanto se aguarda a consolidação do conhecimento científico nesta ampla área, faz-se necessário o desenvolvimento de soluções de sistemas de transposição de peixes adequadas à realidade brasileira, para os casos em que sua implantação for necessária, seja por motivos de conservação e manejo, ou por exigências legais.

Por estes motivos, estudos experimentais de escadas de peixe tipo ranhura vertical, sugeridas como promissoras para espécies neotropicais, são apresentados a seguir.

5 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E ENSAIOS REALIZADOS

5.1 ASPECTOS GERAIS

Dentre os vários tipos de escadas de peixes mais comuns decidiu-se estudar de forma experimental aquelas do tipo ranhura vertical pelas principais vantagens técnicas que apresentam em relação aos demais tipos (Clay, 1995), que são: a) permite a passagem do peixe na altura de lâmina d'água que mais lhe convenha; b) a trajetória de subida ou descida do peixe ao longo da escada não é tortuosa; c) as condições de descanso nos tanques, caso necessário, são satisfatórias.

Estas qualidades e seu grande sucesso na transposição de salmões do pacífico permitiam supor que fosse possível sua utilização satisfatória com peixes de outras espécies (Clay, 1995). De acordo com Rainey (1991), em 27 novas escadas de peixes construídas em tributários do Rio Columbia, no período de 1984 a 1990, 21 são do tipo ranhura vertical.

Além das vantagens já citadas, este tipo de escada pode ser utilizado em reservatórios com relativamente grandes variações de lâminas d'água (da ordem de 2 metros), sem a necessidade de equipamentos complexos de ajustes de vazão e/ou profundidades do escoamento. À medida que a lâmina d'água aumenta, o padrão de escoamento no interior dos tanques se mantém relativamente inalterado. Há um acréscimo na vazão da escada, mas a potência específica do escoamento nos tanques permanece aproximadamente a mesmo, porque a energia adicional é dissipada pelo volume adicional de água no tanque.

A escada tipo ranhura vertical é, atualmente, a mais utilizada na Alemanha e pesquisas realizadas demonstraram sua aplicabilidade às espécies presentes na Europa (Pasche *et al.*, 1995).

Estudos desenvolvidos na Austrália sugerem também que escadas tipo ranhura vertical com valores de velocidade e turbulência do escoamento menores que aqueles utilizados para espécies salmonídeas possuem grande potencial de aplicação para espécies migratórias de rios subtropicais e tropicais (Stuart e Mallen-Cooper, 1999).

Este tipo de escada foi implantado nas UHE's Igarapava (rio Grande) e Aimorés (rio Doce) e nas PCH's Paranatinga II (Rio Culuene) e Canoa Quebrada (rio Verde), tendo apresentado bons resultados no que concerne à presença de espécies migradoras de jusante no seu interior e à passagem para montante de indivíduos de diversas espécies e tamanhos.

Estudos hidráulicos em modelo reduzido são usuais para o projeto de escadas de peixe, de acordo com Rajaratnam *et al.* (1986). Exemplos de estudos similares encontram-se em White e Penino (1980), em Larinier e Trivellato (1987), em Rajaratnam *et al.* (1986), Rajaratnam *et al.* (1992), Wu *et al.* (1999) e Junho e Tamada (2004). As escalas usuais para modelos reduzidos de escadas de peixes são da ordem de 1:10 (Clay, 1995).

Com o objetivo de avaliar o comportamento hidráulico do escoamento no interior dos tanques, para algumas alternativas de tanques com ranhuras verticais, foram realizados estudos em modelo reduzido, descritos a seguir. Tais estudos foram realizados durante o desenvolvimento de projetos de escadas de peixes em aproveitamentos específicos e, assim, sofrem das limitações devidas a condicionantes de projeto. Por outro lado, possuem maior abrangência que estudos usuais para projetos deste tipo de estrutura, por terem sido realizados também com fins de pesquisa, pelo autor.

Foram realizados, inicialmente, estudos para escadas de peixes com tanques de seção transversal retangular, que correspondem à configuração clássica dessas estruturas hidráulicas. Os objetivos desses estudos foram, essencialmente, os de avaliar as condições de escoamento no interior dos tanques, de obter as curvas de descarga correspondentes, e de confirmar as geometrias de defletores para as quais não se dispunha de dados na literatura.

A Alternativa 1 corresponde à escada com declividade de 6% e largura de ranhura de 40 cm, implantada na UHE Igarapava, e a Alternativa 2, com declividade de 8% e largura de ranhura de 30 cm, àquela implantada na UHE Aimorés. A descrição detalhada dos estudos realizados e dos resultados obtidos encontra-se em FCTH (2005a).

Foram realizados, também, estudos para escadas de peixes com tanques de seção transversal trapezoidal, que possuem caráter inédito na literatura. Em princípio, a grande vantagem deste tipo de seção reside no menor custo em comparação com as escadas convencionais, devido à menor espessura de concreto nas paredes laterais e no fundo. Tal vantagem a qualificaria como solução atrativa, principalmente, para Pequenas Centrais Hidrelétricas.

Devido à inexistência de dados na literatura específica relativos a escadas com este tipo de seção transversal, os estudos realizados tiveram como objetivos a definição, por tentativas, das larguras das ranhuras verticais que atendessem aos critérios de projeto estabelecidos para os parâmetros hidráulicos vazão, lâmina d'água nos tanques e carga hidráulica junto aos defletores. Em conjunto com esta definição, foi feita a avaliação das condições de escoamento no interior dos tanques e, após a obtenção de condições satisfatórias, foram obtidas, sempre que possível, as curvas de descarga correspondentes, oscilações de níveis d'água no interior dos tanques e velocidades em pontos de interesse.

A Alternativa 3 corresponde à escada com declividade de 2,6% e vazão de projeto da ordem de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e a Alternativa 4 à declividade de 4,5%, para a mesma vazão, ambas as alternativas estudadas para a PCH Paranatinga II, tendo-se construído, no local, a Alternativa 4. Já a Alternativa 5, com declividade de 8% e vazão de projeto da ordem de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, foi estudada para a PCH Canoa Quebrada e lá implantada. A descrição detalhada dos estudos realizados e dos resultados obtidos encontra-se em FCTH (2005b, 2006a e 2006b). As instalações experimentais utilizadas nos estudos são apresentadas a seguir.

5.2 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

5.2.1 Alternativa 1

Na Alternativa 1, implantada na UHE Igarapava, a declividade da rampa é de 6%, os tanques são quadrados, com dimensão interna de 3,0 m, separados por defletores, cujas paredes possuem espessura de 20 cm. A ranhura vertical possui largura constante de 40 cm, ao longo de toda a altura. A geometria em planta é apresentada na Figura 5.1 - Alternativa 1 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos.

Figura 5.1 - Alternativa 1 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos – Fonte: HÍDRICON

A representação em modelo reduzido da geometria dos tanques e defletores da Alternativa 1 foi feita ao longo de toda a extensão de um canal em acrílico já existente na FCTH com 35 cm de largura. A alimentação do modelo foi

feita a partir de um reservatório de nível constante, alimentado por um sistema de recalque de água de um reservatório principal subterrâneo. A medição de vazão foi feita por meio de um vertedor retangular com capacidade máxima de 50 l/s, previamente aferido no banco de aferições da FCTH. As leituras de nível d'água para a determinação da vazão foram feitas por uma ponta limnimétrica.

A instalação experimental é apresentada na Figura 5.2 - Alternativa 1 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão e o detalhe do sistema de medição encontra-se na Figura 5.3 - Alternativa 1 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão.

Figura 5.2 - Alternativa 1 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão

Figura 5.3 - Alternativa 1 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão

Como a largura dos tanques dessa alternativa, em protótipo, é de 3,0 m, obteve-se modelo reduzido na escala geométrica 1:8,6. Com o comprimento de canal disponível, foi possível a reprodução de 26 tanques, além do canal de aproximação. As estruturas do tipo ranhura vertical (*vertical slot*) foram executadas em madeira, e pintadas com tinta epóxi. Estas peças foram fixadas no canal de acrílico por meio de parafusos.

Foram realizados ensaios com as vazões de 1,4 m³/s, 1,5 m³/s e 1,6 m³/s, sendo os valores referidos a protótipo. Adicionalmente, para auxiliar o traçado de curva de descarga das ranhuras verticais (*slots*), foram ensaiadas vazões de 1,3 m³/s e 1,7 m³/s.

5.2.2 Alternativa 2

Na Alternativa 2, implantada na UHE Aimorés, a declividade é de 8 %, os tanques são retangulares, com largura interna de 3,0 m e comprimento interno de 2,40 m, separados por defletores, cujas paredes possuem espessura de 20 cm. A ranhura vertical possui largura constante de 30 cm, ao longo de toda a altura. A geometria em planta é apresentada na Figura 5.4 - Alternativa 2 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos.

Figura 5.4 - Alternativa 2 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos – Fonte: SPEC

A alimentação do modelo foi feita pelo mesmo sistema de reservatórios, porém a medição de vazão foi feita por meio de um vertedor triangular com capacidade máxima de 30 l/s para a Alternativa 2, cujas vazões são menores que as da Alternativa 1.

A instalação experimental é apresentada na Figura 5.5 - Alternativa 2 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão. O sistema de medição de vazão pode ser melhor observado na Figura 5.6 - Alternativa 2 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão.

Figura 5.5 - Alternativa 2 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão

A representação da geometria dos tanques e defletores em modelo reduzido foi feita ao longo de toda a extensão do mesmo canal em acrílico da Alternativa 1, com 35 cm de largura. Como a largura dos tanques dessa alternativa, em protótipo, também é de 3,0 m, obteve-se modelo reduzido na mesma escala geométrica 1:8,6. Foram implantados 32 tanques e, de modo similar à Alternativa 1, as estruturas do tipo ranhura vertical foram executadas em madeira, e pintadas com tinta epóxi e fixadas no canal de acrílico por meio de parafusos.

Figura 5.6 - Alternativa 2 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão

Foram realizados ensaios com as vazões de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,73 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo os valores referidos ao protótipo. Adicionalmente, para auxiliar o traçado de curva de descarga das ranhuras verticais (*slots*), foram ensaiadas vazões de $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2.3 Alternativa 3

Na Alternativa 3, estudada inicialmente para a PCH Paranatinga 2, a declividade da rampa é de 2,6%, os tanques possuem seção típica trapezoidal, com comprimento interno de 8,1 m, largura da base de 2,0 m e taludes laterais com inclinação 1V:1,5H. As paredes dos defletores possuem espessura de 20 cm e a ranhura vertical possui largura constante de 75 cm, ao longo de toda a altura. A geometria em planta é apresentada na Figura 5.7 - Alternativa 3 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos.

Figura 5.7 - Alternativa 3 - Geometria do Tanque e Defletor Típicos – Fonte: MEK Engenharia

A representação em modelo reduzido da geometria dos tanques e defletores da Alternativa 3 foi feita ao longo de um canal em chapas de madeira, devidamente impermeabilizadas, especificamente construído pela FCTH, na escala geométrica 1:7,0. As estruturas do tipo ranhura vertical (*vertical slot*) foram executadas em madeira, pintadas com tinta epóxi e fixadas no canal por meio de parafusos.

Devido à baixa declividade da alternativa, ao relativamente grande comprimento de cada tanque e à disponibilidade de espaço do laboratório, foram reproduzidos 7 tanques no modelo, além do canal de aproximação. Para imposição de um regime “uniforme” no modelo, definido pelo escoamento com valores constantes de carga hidráulica junto aos defletores e de profundidade a meio comprimento do tanque, medidos nos tanques intermediários do modelo, foi instalada uma comporta metálica na extremidade de jusante do trecho representado. A comporta é bipartida verticalmente com as duas partes deslocando-se horizontalmente, de modo a impor o escoamento através de abertura central.

A alimentação do modelo foi feita a partir de um reservatório de nível constante, alimentado por um sistema de recalque de água de um reservatório principal subterrâneo. A medição de vazão foi feita por meio de

um vertedor triangular com capacidade máxima de 50 l/s, previamente aferido no banco de aferições da FCTH. As leituras de nível d'água para a determinação da vazão foram feitas por uma ponta limnimétrica.

A instalação experimental é apresentada na Figura 5.8 - Alternativa 3 – Perfil Longitudinal Esquemático do Canal de Ensaio e na Figura 5.9 - Alternativa 3 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão.

Figura 5.8 - Alternativa 3 – Perfil Longitudinal Esquemático do Canal de Ensaio –
Fonte: FCTH (2005b)

Figura 5.9 - Alternativa 3 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão – Fonte: FCTH (2005b)

Detalhes do sistema de alimentação e da comporta na extremidade jusante do canal são apresentados na Figura 5.10 - Alternativa 3 – Detalhe do

Sistema de Medição de Vazão e na Figura 5.11 - Alternativa 3 – Detalhe da Comporta de Jusante.

Figura 5.10 - Alternativa 3 – Detalhe do Sistema de Medição de Vazão

Figura 5.11 - Alternativa 3 – Detalhe da Comporta de Jusante

Foram realizados ensaios com a vazão de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, variando-se a abertura da ranhura vertical até a obtenção da profundidade pseudonormal de aproximadamente 2,15 m, valor estabelecido nos critérios de projeto da escada. Tal valor foi considerado como aquele medido nos tanques 3 a 5, correspondente ao trecho intermediário do modelo.

Cabe registrar que os defletores a montante foram considerados inicialmente com a mesma configuração e geometria dos defletores dos tanques intermediários. Contudo, características indesejáveis do escoamento, particularmente a ocorrência de oscilações amplas do nível d'água no tanque de montante, conduziram à adoção de defletores alinhados com geometria mais simples, com sensível melhoria nas condições de escoamento daquele tanque de montante.

Por este motivo, esta configuração do primeiro par de defletores, apresentada na Figura 5.12 - Alternativa 3 – Geometria dos Defletores de Montante, foi mantida, em termos conceituais, nos ensaios das demais alternativas. Estes aspectos serão apresentados com maiores detalhes no próximo capítulo.

Figura 5.12 - Alternativa 3 – Geometria dos Defletores de Montante – Fonte: FCTH (2005b)

Finalmente, com o objetivo de reduzir eventuais operações de resgate de peixes de escadas que ficam retidos junto à aresta interna de 90° dos defletores convencionais durante esvaziamentos programados; de reduzir

volumes de concreto, e de facilitar a construção, foi feita uma simplificação da geometria dos defletores, adotando-os simplesmente lineares, porém mantendo-os defasados. Esta nova configuração foi testada na Alternativa 4.

5.2.4 Alternativa 4

Na Alternativa 4, adotada para a PCH Paranatinga 2, a declividade da rampa foi aumentada para 4,5% e o comprimento interno foi reduzido para 4,40 m, mas a seção transversal do canal trapezoidal foi mantida, com largura da base de 2,0 m e taludes laterais com inclinação 1V:1,5H. A escala do modelo foi a mesma da anterior, ou seja, 1:7,0.

As paredes dos defletores possuem espessura de 20 cm e foram implantados defletores alinhados, a jusante do canal de aproximação, na seção da mudança de declividade de 0 para 4,5%, e defletores defasados ao longo dos demais tanques do canal.

Para as larguras das ranhuras verticais, constantes ao longo de toda a altura dos defletores, foram adotadas, inicialmente, valores de 80 cm, para o tanque de montante, e de 88 cm para os demais tanques.

A geometria é apresentada na Figura 5.13 - Alternativa 4 – Geometria dos Tanques de Montante e na Figura 5.14 - Alternativa 4 – Seção Transversal dos Tanques Típicos.

Com o aumento da declividade da escada, e a redução do comprimento dos tanques, para a manutenção da mesma carga hidráulica junto aos defletores, foi possível reproduzir 10 tanques no modelo, além do canal de aproximação. O esquema da instalação experimental é apresentado na Figura 5.15 – Alternativa 4 – Perfil Longitudinal e Planta Esquemáticos do Canal de Ensaios.

PLANTA

Figura 5.13 - Alternativa 4 – Geometria dos Tanques de Montante – Fonte: FCTH (2006a)

SEÇÃO TRANSVERSAL

Figura 5.14 - Alternativa 4 – Seção Transversal dos Tanques Típicos – Fonte: FCTH (2006a)

Figura 5.15 – Alternativa 4 – Perfil Longitudinal e Planta Esquemáticos do Canal de Ensaios –
Fonte: FCTH (2006a)

A instalação experimental pode ser observada na Figura 5.16 - Alternativa 4 - Canal de Ensaios e Sistema de Medição de Vazão, e o detalhe da comporta, na Figura 5.17 - Alternativa 4 – Detalhe da Comporta de Jusante.

Foram realizados ensaios com a vazão de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, variando-se a abertura das ranhuras até a obtenção da profundidade pseudonormal da ordem de 2,20 m, novo valor estabelecido nos critérios de projeto da escada. Tal valor foi considerado como aquele medido nos tanques 4 a 6, correspondente ao trecho intermediário do modelo.

Figura 5.16 - Alternativa 4 - Canal de Ensaio e Sistema de Medição de Vazão

Figura 5.17 - Alternativa 4 – Detalhe da Comporta de Jusante

Com o objetivo de reduzir volumes de concreto e de escavação, foi feita a redução da largura da base para 1,0 m, mantendo os taludes laterais na inclinação 1V:1,5H. Com o objetivo de facilitar ainda mais a construção, foram adotados os defletores lineares, porém alinhados. Esta nova configuração, com declividade de 8%, foi testada na Alternativa 5.

5.2.5 Alternativa 5

Na Alternativa 5, adotada para a PCH Canoa Quebrada, a declividade da rampa foi aumentada para 8%, o comprimento interno foi reduzido para 2,85 m, a largura da base do canal trapezoidal foi reduzida para 1,0 m e os taludes laterais foram mantidas com inclinação 1V:1,5H. A escala do modelo foi mantida em 1:7,0.

As paredes dos defletores possuem espessura de 25 cm e foram implantados defletores alinhados em todos os tanques do canal. Para as larguras das ranhuras verticais, constantes ao longo de toda a altura dos defletores, foram adotadas, inicialmente, valores de 40 cm, para o tanque de montante, e de 55 cm para os demais tanques.

Com o aumento da declividade da escada, e a redução do comprimento dos tanques para 3,10 m entre eixos dos defletores, foi possível reproduzir 16 tanques no modelo, além do canal de aproximação.

A geometria em planta é apresentada na Figura 5.18 - Alternativa 5 – Geometria dos Tanques de Montante.

Figura 5.18 - Alternativa 5 – Geometria dos Tanques de Montante – Fonte: FCTH (2006b)

O esquema da instalação experimental é apresentado na Figura 5.19 - Alternativa 5 – Perfil Longitudinal e Planta Esquemáticos do Canal de Ensaio.

Figura 5.19 - Alternativa 5 – Perfil Longitudinal e Planta Esquemáticos do Canal de Ensaio –
Fonte: FCTH (2006b)

A instalação experimental pode ser observada na Figura 5.20 - Alternativa 5
- Canal de Ensaio

Figura 5.20 - Alternativa 5 - Canal de Ensaio

Foram realizados ensaios com a vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, variando-se a largura das ranhuras verticais, conforme o esquema apresentado na Figura 5.21 - Alternativa 5 – Esquema de Redução Provisória da Largura das Ranhuras (dimensões referidas ao protótipo), até a obtenção da profundidade pseudo normal da ordem de 1,85 m, valor estabelecido nos critérios de projeto da escada. Tal valor foi considerado como aquele medido nos tanques 7 a 9, correspondente ao trecho intermediário do modelo.

Figura 5.21 - Alternativa 5 – Esquema de Redução Provisória da Largura das Ranhuras –
Fonte: FCTH (2006b)

A redução das larguras das ranhuras no modelo foi feita como apresentado na Figura 5.22 - Alternativa 5 – Redução Provisória da Largura das Ranhuras.

Figura 5.22 - Alternativa 5 – Redução Provisória da Largura das Ranhuras

5.3 MEDIÇÕES DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS

Nos ensaios realizados para as diversas alternativas, foram efetuadas, em geral, as medições descritas, de forma sucinta, a seguir. Para facilidade de referência, todos os resultados serão apresentados como valores de protótipo, exceto onde indicado.

5.3.1 Profundidade Média do Escoamento

A profundidade média foi definida como a profundidade medida na metade do tanque, ou seja, no meio do vão definido entre dois defletores.

As profundidades foram obtidas com o auxílio de uma escala milimetrada simples.

5.3.2 Carga Hidráulica Junto ao Defletor

A carga hidráulica junto ao defletor foi definida como o desnível existente entre dois vãos consecutivos, medidos a montante e a jusante de um defletor, nos dois lados do canal (esquerdo e direito). Também foram medidas com escala milimetrada simples.

5.3.3 Oscilação de Nível d'Água no Tanque

As oscilações de nível d'água no interior dos tanques foram medidas em pontos considerados representativos, definidos a partir de análise qualitativa do escoamento pelo canal.

Foram obtidas com a utilização de pontas capacitivas, como apresentado na Figura 5.23 - Instalação de Pontas Capacitivas no Modelo e na Figura 5.24 – Detalhe das Pontas Capacitivas no Modelo, cujo registro pode ser feito em papel ou em arquivos digitais, quando interligadas ao sistema de aquisição de dados. Este sistema permite o registro simultâneo das flutuações de níveis d'água em vários pontos e a análise estatística do sinal.

Figura 5.23 - Instalação de Pontas Capacitivas no Modelo – Fonte: FCTH (2006b)

Figura 5.24 – Detalhe das Pontas Capacitivas no Modelo – Fonte: FCTH (2006b)

5.3.4 Velocidades do Escoamento no Tanque

As velocidades do escoamento no interior dos tanques foram medidas em verticais consideradas representativas, definidas a partir de análise qualitativa do escoamento pelo canal, e, em cada vertical, em três alturas: próximo à superfície, a 50% da altura da lâmina d'água, e próximo ao fundo do canal. Para a medição de velocidades foram utilizados micromolinetes, previamente calibrados em bancos de aferição da FCTH. Os registros de velocidade média foram feitos por meio de integradores digitais.

As medições de velocidades foram efetuadas variando a posição do molinete de modo a identificar as direções predominantes do fluxo em cada ponto. Essas direções também foram identificadas.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados para as diversas alternativas são apresentados a seguir.

Ressalte-se que os resultados obtidos nos estudos em modelo reduzido permitem apenas realizar inferências acerca do comportamento de peixes no interior das estruturas. Informações mais realistas, entretanto, somente podem ser obtidas mediante o monitoramento do comportamento de peixes de diversas espécies dentro das escadas de peixes efetivamente construídas e em operação. Por este motivo, após os aspectos hidráulicos serão expostos aspectos de ictiofauna, compreendendo a descrição das escadas tipo ranhura vertical construídas com base nos estudos em modelo reduzido aqui relatados – UHE's Igarapava e Aimorés e PCH's Paranatinga II e Canoa Quebrada – bem como os dados disponíveis relativos às espécies de peixes observadas no seu interior.

6 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

6.1 ASPECTOS HIDRÁULICOS

Como já mencionado, os estudos em modelo reduzido foram realizados com objetivos específicos um pouco distintos. O objetivo geral de obtenção de condições de escoamento adequadas nos tanques, todavia, era comum a ambos.

Os estudos para escadas de peixes com tanques de seção transversal retangular, que correspondem à configuração clássica dessas estruturas hidráulicas, foram realizados a partir de geometria de defletores definida previamente, para avaliar as condições de escoamento no interior dos tanques, obter as curvas de descarga correspondentes, e confirmar a geometria de defletores para os quais não se dispunha de dados na literatura.

Os estudos para escadas de peixes com tanques de seção transversal trapezoidal foram realizados para a obtenção, por tentativas, das larguras das ranhuras verticais que atendessem aos critérios de projeto estabelecidos para os aproveitamentos específicos, relativos aos parâmetros hidráulicos vazão, lâmina d'água nos tanques e carga hidráulica junto aos defletores. Em conjunto com essa definição tentativa da largura das ranhuras, devido à inexistência de dados na literatura relativos a este tipo de seção transversal, foi feita a avaliação das condições de escoamento no interior dos tanques e, após a obtenção de condições satisfatórias, foram realizadas avaliações e medições similares àquelas dos tanques com seção retangular.

Como citado no capítulo anterior, nos ensaios realizados para as diversas alternativas, foram efetuadas medições da profundidade média do escoamento, da carga hidráulica ou desnível junto aos defletores, das

oscilações de níveis d'água e de velocidades no interior dos tanques, em pontos considerados representativos do escoamento. Também foram obtidas, sempre que possível, as curvas de descarga relativas à geometria das ranhuras.

Cabe ressaltar que nos estudos hidráulicos de escadas de peixes, as características do escoamento são definidas para escoamento pseudonormal. De acordo com Rajaratnam *et al.* (1986), o escoamento normal, denominado, neste trabalho, pseudonormal, ocorre quando a linha traçada pela posição do nível d'água médio no centro dos tanques, no sentido longitudinal, for paralela à linha do fundo. Nesta condição, a profundidade média no centro dos tanques é definida como a profundidade pseudonormal do escoamento. Neste trabalho, os resultados serão apresentados em relação à profundidade pseudonormal, exceto quando explicitamente indicado de forma diferente.

Devido às condições típicas de escoamento nos tanques e à precisão das medições realizadas em modelo, os valores de carga hidráulica medidos são menos confiáveis que os valores medidos de profundidade média, por estarem mais sujeitos às variações dos níveis d'água de montante e jusante. Assim, é comum que os resultados obtidos em modelo sejam expressos em relação à profundidade pseudonormal.

Por estes motivos, as medições dos parâmetros característicos do escoamento foram feitas em tanques situados na região central do canal de ensaios, onde já se estabeleceu escoamento pseudonormal e onde os efeitos de aproximação e restituição do escoamento no modelo podem ser considerados desprezíveis.

Os resultados obtidos para os diversos parâmetros hidráulicos nos ensaios realizados para as diversas alternativas são apresentados a seguir.

6.1.1 Alternativa 1

Os ensaios para a Alternativa 1, com declividade de 6%, tanque quadrado com dimensões internas de 3,0 m, largura da ranhura vertical de 0,40 m e espessura da parede do defletor de 0,20m, foram realizados para servir de referência aos estudos posteriores. Isto porque esta alternativa havia sido implantada na UHE Igarapava, a partir de geometria anterior (Rizzo, comunicação pessoal), e o monitoramento da escada sugeria o seu bom funcionamento, com a presença de um grande número de espécies migradoras no seu interior, de acordo com Vono *et al.* (2004).

Os ensaios para a avaliação e caracterização do escoamento foram feitos, inicialmente, com as vazões de 1,4 m³/s, 1,5 m³/s e 1,6 m³/s. Adicionalmente, para auxiliar o traçado de curva de descarga das ranhuras verticais (*slots*), foram ensaiadas vazões de 1,3 m³/s e 1,7 m³/s.

Aspectos do escoamento para a vazão de 1,5 m³/s são apresentados na Figura 6.1 - Alternativa 1 – Escoamento em Perfil - Vazão 1,5 m³/s e na Figura 6.2 - Alternativa 1 – Escoamento em Planta - Vazão 1,5 m³/s.

Figura 6.1 - Alternativa 1 – Escoamento em Perfil - Vazão 1,5 m³/s

Figura 6.2 - Alternativa 1 – Escoamento em Planta - Vazão 1,5 m³/s

A curva de descarga obtida em modelo encontra-se na Tabela 6.1 – Alternativa 1 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água.

Tabela 6.1 – Alternativa 1 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água

Vazão (m ³ /s)	Profundidade (m)
1,3	1,87
1,4	1,94
1,5	2,04
1,6	2,20
1,7	2,34

Fonte: FCTH (2005a)

A carga hidráulica medida junto à ranhura vertical, nos lados esquerdo e direito dos tanques, é apresentada na Tabela 6.2 – Alternativa 1 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical.

Tabela 6.2 – Alternativa 1 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical

Vazão (m ³ /s)	Carga Hidráulica (m)	
	Lado Esquerdo	Lado Direito
1,4	0,21	0,22
1,5	0,18	0,22
1,6	0,21	0,21

Fonte: FCTH (2005a)

As medições das oscilações do nível d'água foram realizadas em três pontos, P1 a P3, cuja localização foi definida a partir da análise qualitativa do escoamento. A posição dos pontos em planta é apresentada na Figura 6.3 - Alternativa 1 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água.

Figura 6.3 - Alternativa 1 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água –
Fonte: FCTH (2005a)

Os registros foram efetuados para as vazões de 1,4 m³/s, 1,5 m³/s e 1,6 m³/s, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.3 – Alternativa 1 - Oscilação de Nível d'Água.

Tabela 6.3 – Alternativa 1 - Oscilação de Nível d'Água

Vazão (m ³ /s)	Ponto	Altura das Ondas (m)	
		Máxima	Média
1,4	P1	0,17	0,06
		0,15	0,06
	P2	0,21	0,08
		0,22	0,07
	P3	0,12	0,05
		0,14	0,05
1,5	P1	0,12	0,05
		0,11	0,05
	P2	0,19	0,07
		0,21	0,08
	P3	0,18	0,06
		0,20	0,07
1,6	P1	0,14	0,06
		0,13	0,06
	P2	0,19	0,06
		0,20	0,07
	P3	0,16	0,06
		0,18	0,05

Fonte: FCTH (2005a)

Os registros gráficos relativos à vazão de 1,4 m³/s são apresentados nas Figura 6.4 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,4 m³/s – Ponto 1, Figura 6.5 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,4 m³/s – Ponto 2 e Figura 6.6 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,4 m³/s – Ponto 3, a título de ilustração.

Figura 6.4 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 1 –
 Fonte: FCTH (2005a)

Figura 6.5 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 2 –
 Fonte: FCTH (2005a)

Figura 6.6 - Alternativa 1 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 3 –
Fonte: FCTH (2005a)

As velocidades do escoamento foram medidas em 12 verticais, cuja localização encontra-se na Figura 6.3 - Alternativa 1 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água, já apresentada. Em cada vertical, as velocidades foram medidas em três alturas, a saber, junto à superfície, a 50% da profundidade da lâmina d'água, e junto ao fundo. As medições junto à superfície e ao fundo foram feitas a uma distância de aproximadamente 0,17 m, referida a protótipo, da superfície de referência correspondente.

Para a vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mais próxima da condição esperada em protótipo, foram efetuadas medições de velocidade em dois tanques adjacentes, para avaliação da homogeneidade do escoamento. Os tanques foram identificados por módulo 1 (M1), para o tanque de jusante, e módulo 2 (M2), para o de montante.

As velocidades medidas são apresentadas na Tabela 6.4 – Alternativa 1 - Velocidades Medidas na Superfície, na Tabela 6.5 - Alternativa 1 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade e na Tabela 6.6 - Alternativa 1 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo.

Tabela 6.4 – Alternativa 1 - Velocidades Medidas na Superfície

Vazão	1,4 m ³ /s		1,5 m ³ /s – M1		1,5 m ³ /s – M2		1,6 m ³ /s	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	1,80	1,83	1,80	1,84	1,70	1,74	1,82	1,82
2	0,25	0,27	0,28	0,28	0,33	0,34	0,27	0,29
3	0,30	0,36	0,31	0,32	0,32	0,35	0,27	0,28
4	0,60	0,63	0,58	0,61	0,63	0,68	0,56	0,62
5	1,64	1,66	1,52	1,62	1,39	1,63	1,47	1,53
6	0,88	0,93	0,98	1,09	0,98	0,98	1,02	1,12
7	0,78	0,85	0,74	0,80	0,78	0,97	0,36	0,38
8	0,48	0,48	0,50	0,53	0,44	0,50	0,38	0,40
9	0,68	0,76	0,59	0,61	0,65	0,69	0,52	0,54
10	0,59	0,63	0,54	0,55	0,43	0,51	0,43	0,44
11	1,14	1,19	0,96	1,10	0,92	0,98	1,09	1,15
12	0,33	0,33	0,32	0,39	0,68	0,72	0,77	0,82

Fonte: FCTH (2005a)

Tabela 6.5 - Alternativa 1 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade

Vazão	1,4 m ³ /s		1,5 m ³ /s – M1		1,5 m ³ /s – M2		1,6 m ³ /s	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	1,42	1,66	1,75	1,78	1,30	1,54	2,07	2,16
2	0,24	0,27	0,46	0,54	0,30	0,32	0,26	0,27
3	0,41	0,43	0,48	0,54	0,47	0,50	0,35	0,37
4	0,40	0,46	0,42	0,46	0,43	0,49	0,40	0,45
5	1,56	1,60	1,48	1,50	1,60	1,64	1,61	1,65
6	0,54	0,59	0,53	0,59	0,31	0,38	0,69	0,74
7	0,80	0,89	0,84	0,86	0,66	0,74	0,68	0,74
8	0,46	0,47	0,37	0,38	0,43	0,44	0,39	0,40
9	0,57	0,61	0,59	0,64	0,42	0,45	0,43	0,50
10	0,54	0,55	0,46	0,52	0,52	0,59	0,31	0,32
11	0,87	0,92	1,33	1,37	1,24	1,35	0,87	1,09
12	0,25	0,27	0,26	0,28	0,25	0,28	0,25	0,28

Fonte: FCTH (2005a)

Tabela 6.6 - Alternativa 1 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo

Vazão	1,4 m ³ /s		1,5 m ³ /s – M1		1,5 m ³ /s – M2		1,6 m ³ /s	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	1,89	1,93	1,51	1,67	1,52	1,90	1,96	1,99
2	0,23	0,24	0,34	0,39	0,30	0,31	0,47	0,51
3	0,43	0,48	0,24	0,29	0,56	0,62	0,33	0,38
4	0,45	0,48	0,47	0,48	0,47	0,54	0,42	0,46
5	1,46	1,49	1,32	1,37	0,93	1,03	1,15	1,19
6	0,61	0,65	0,42	0,44	0,40	0,40	0,38	0,41
7	0,72	0,74	0,65	0,70	0,47	0,52	0,80	0,81
8	0,45	0,46	0,39	0,46	0,63	0,71	0,49	0,51
9	0,52	0,55	0,33	0,43	0,27	0,27	0,29	0,31
10	0,61	0,62	0,39	0,40	0,45	0,47	0,34	0,37
11	1,52	1,54	1,21	1,32	1,73	1,78	1,35	1,49
12	0,33	0,35	0,38	0,50	0,65	0,69	0,59	0,66

Fonte: FCTH (2005a)

Para uma primeira avaliação das características esperados para o escoamento com a declividade de 8%, objeto da Alternativa 2, foram realizadas medições de velocidade para a geometria da Alternativa 1 implantada com a declividade de 8%, nas mesmas verticais e nas mesmas alturas.

Esta alternativa foi chamada de 1A e os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.7 – Alternativa 1A – Vazão 1,5 m³/s - Velocidades Medidas.

Tabela 6.7 – Alternativa 1A – Vazão 1,5 m³/s - Velocidades Medidas

Posição	Superfície		Meia Profundidade		Fundo	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	2,06	2,07	2,05	2,12	2,33	2,42
2	0,44	0,47	0,24	0,27	0,35	0,39
3	0,34	0,39	0,48	0,52	0,58	0,63
4	0,64	0,72	0,49	0,51	0,37	0,40
5	1,96	2,00	2,14	2,15	2,01	2,02
6	1,38	1,43	0,65	0,72	0,51	0,58
7	0,83	0,89	0,93	0,98	1,03	1,10
8	0,66	0,68	0,41	0,41	0,47	0,50
9	0,87	0,89	0,71	0,76	0,68	0,68
10	0,79	0,85	0,48	0,52	0,54	0,54
11	1,22	1,24	1,35	1,47	1,82	1,84
12	0,29	0,33	0,23	0,24	0,26	0,30

Fonte: FCTH (2005a)

6.1.2 Alternativa 2

Os ensaios para a Alternativa 2, com declividade de 8%, tanque retangular com dimensões internas de 2,4 m de comprimento e 3,0 m, largura da ranhura vertical de 0,30 m e espessura da parede do defletor de 0,20m, foram realizados para avaliar e caracterizar a escada a ser implantada, na ocasião, na UHE Aimorés.

Foram realizados ensaios com as vazões de 0,45 m³/s, 0,73 m³/s e 1,0 m³/s. Para auxiliar o traçado de curva de descarga das ranhuras verticais, foram ensaiadas, adicionalmente, vazões de 0,3 m³/s e 1,25 m³/s.

Aspectos do escoamento para a vazão de 1,0 m³/s são apresentados na Figura 6.7 – Alternativa 2 – Escoamento em Perfil - Vazão 1,0 m³/s e na Figura 6.8 – Alternativa 2 – Escoamento em Planta - Vazão 1,0 m³/s.

Figura 6.7 – Alternativa 2 – Escoamento em Perfil - Vazão $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 6.8 – Alternativa 2 – Escoamento em Planta - Vazão $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$

A curva de descarga obtida em modelo encontra-se na Tabela 6.8 – Alternativa 2 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água, e a carga hidráulica medida junto à ranhura vertical, nos lados esquerdo e direito dos tanques, é apresentada na Tabela 6.9 – Alternativa 2 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical.

Tabela 6.8 – Alternativa 2 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água

Vazão (m ³ /s)	Profundidade (m)
0,30	0,58
0,45	0,88
0,73	1,34
1,00	1,76
1,25	2,15

Fonte: FCTH (2005a)

Tabela 6.9 – Alternativa 2 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical

Vazão (m ³ /s)	Carga Hidráulica (m)	
	Lado Esquerdo	Lado Direito
0,30	0,14	0,15
0,45	0,16	0,19
0,73	0,19	0,20
1,00	0,16	0,21
1,25	0,18	0,18

Fonte: FCTH (2005a)

As medições das oscilações do nível d'água também foram realizadas em três pontos, P1 a P3, cuja localização foi definida a partir da análise qualitativa do escoamento. A posição dos pontos de medição é apresentada Figura 6.9 - Alternativa 2 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água.

Figura 6.9 - Alternativa 2 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água –
 Fonte: FCTH (2005a)

As oscilações de nível d'água foram registradas para as vazões de 0,45 m³/s, 0,73 m³/s e 1,0 m³/s, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.10 – Alternativa 2 - Oscilação de Nível d'Água.

A título de ilustração, os registros gráficos para a vazão de 1,0 m³/s são apresentados na Figura 6.10 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m³/s – Ponto 1, na Figura 6.11 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m³/s – Ponto 2 e na Figura 6.12 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m³/s – Ponto 3.

Tabela 6.10 – Alternativa 2 - Oscilação de Nível d'Água

Vazão (m ³ /s)	Ponto	Altura das Ondas (m)	
		Máxima	Média
0,45	P1	0,13	0,06
		0,14	0,06
	P2	0,13	0,05
		0,14	0,04
	P3	0,10	0,03
		0,12	0,04
0,73	P1	0,13	0,05
		0,13	0,06
	P2	0,20	0,05
		0,16	0,05
	P3	0,10	0,03
		0,10	0,04
1,00	P1	0,16	0,06
		0,16	0,06
	P2	0,19	0,05
		0,17	0,06
	P3	0,11	0,04
		0,11	0,04

Fonte: FCTH (2005a)

Figura 6.10 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,0 m³/s – Ponto 1 –
 Fonte: FCTH (2005a)

Figura 6.11 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 2 –
Fonte: FCTH (2005a)

Figura 6.12 - Alternativa 2 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 3 –
Fonte: FCTH (2005a)

De forma análoga à Alternativa 1, as velocidades do escoamento foram medidas em 12 verticais, cuja posição encontra-se na Figura 6.9 - Alternativa 2 - Pontos de Medição de Velocidades e de Oscilação de Nível d'Água, já apresentada.

Em cada vertical, as velocidades foram medidas junto à superfície, a 50% da profundidade da lâmina d'água, e junto ao fundo, sendo que as medições junto à superfície e ao fundo foram feitas a uma distância, referida a protótipo, da ordem de 0,17 m das superfícies correspondentes.

As velocidades medidas para a Alternativa 2 são apresentadas na Tabela 6.11 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas na Superfície, na Tabela 6.12 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade e na Tabela 6.13 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo.

Tabela 6.11 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas na Superfície

Vazão	0,45 m³/s		0,73 m³/s		1,0 m³/s	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	1,83	1,87	1,60	1,67	1,80	1,86
2	0,41	0,41	0,49	0,50	0,50	0,50
3	0,52	0,54	0,55	0,59	0,53	0,54
4	0,30	0,33	0,50	0,50	0,42	0,46
5	1,79	1,81	1,72	1,75	1,63	1,68
6	0,65	0,69	1,05	1,07	0,77	0,87
7	1,00	1,01	0,87	0,92	0,88	0,95
8	0,51	0,51	0,55	0,60	0,52	0,59
9	0,71	0,72	0,69	0,71	0,70	0,72
10	0,63	0,65	0,59	0,64	0,75	0,78
11	1,49	1,53	1,37	1,41	1,24	1,36
12	0,25	0,26	0,17	0,18	0,21	0,22

Fonte: FCTH (2005a)

Tabela 6.12 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade

Vazão	0,45 m ³ /s		0,73 m ³ /s		1,0 m ³ /s	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	1,87	1,92	1,69	1,82	2,02	2,07
2	0,35	0,37	0,45	0,46	0,50	0,52
3	0,63	0,67	0,64	0,65	0,69	0,73
4	0,34	0,36	0,34	0,36	0,36	0,38
5	1,83	1,85	1,78	1,80	1,65	1,76
6	0,59	0,61	0,77	0,80	0,63	0,67
7	1,00	1,02	1,03	1,06	0,84	0,85
8	0,36	0,38	0,34	0,38	0,43	0,45
9	0,78	0,79	0,69	0,70	0,60	0,63
10	0,69	0,71	0,63	0,64	0,65	0,67
11	1,20	1,24	1,45	1,54	1,58	1,69
12	0,24	0,25	0,21	0,23	0,22	0,22

Fonte: FCTH (2005a)

Tabela 6.13 – Alternativa 2 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo

Vazão	0,45 m ³ /s		0,73 m ³ /s		1,0 m ³ /s	
Ponto	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima
1	2,16	2,18	2,01	2,10	2,04	2,10
2	0,36	0,36	0,39	0,40	0,39	0,42
3	0,55	0,57	0,65	0,68	0,63	0,65
4	0,32	0,37	0,26	0,28	0,30	0,31
5	1,28	1,37	1,69	1,70	1,16	1,20
6	0,56	0,59	0,67	0,76	0,61	0,67
7	0,99	0,99	0,93	0,95	1,07	1,09
8	0,57	0,64	0,37	0,38	0,41	0,45
9	0,76	0,79	0,56	0,58	0,63	0,66
10	0,68	0,74	0,70	0,73	0,69	0,72
11	1,25	1,31	1,62	1,71	1,47	1,49
12	0,21	0,23	0,20	0,20	0,21	0,22

Fonte: FCTH (2005a)

6.1.3 Alternativa 3

Nos ensaios para a Alternativa 3, estudada inicialmente para a PCH Paranatinga II, a declividade da rampa é de 2,6%, os tanques possuem seção típica trapezoidal, com comprimento interno de 8,1 m, largura da base de 2,0 m e taludes laterais com inclinação 1V:1,5H. As paredes dos defletores possuem espessura de 20 cm.

Os valores estabelecidos pelo projeto, a serem alcançados nestes ensaios de otimização foram: a) vazão de 2,5 m³/s; b) carga hidráulica junto aos defletores típicos de 0,216 m; c) profundidade de 2,30 m a montante dos defletores de montante; d) profundidade média (ou pseudonormal) nos tanques de 2,18 m; e e) velocidade máxima do escoamento em torno de 2,0 m/s.

Os ensaios para a definição da largura da ranhura vertical que atendesse aos critérios de projeto da escada prevista para o empreendimento na ocasião foram iniciados com o modelo reproduzindo 6 tanques, cujos defletores possuíam ranhura vertical com largura constante de 75 cm, ao longo de toda a altura. Esta configuração foi denominada Condição 1.

Foram realizados ensaios com as vazões de 1,5 m³/s, 2,0 m³/s, 2,5 m³/s e 3,0 m³/s.

Aspectos do escoamento junto ao defletor de montante são apresentados na Figura 6.13 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento no Defletor de Montante - Vazão 2,5 m³/s e na Figura 6.14 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento no Defletor de Montante - Detalhe - Vazão 2,5 m³/s.

Aspectos do escoamento em um tanque típico encontram-se na Figura 6.15 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento em Tanque Típico - Vazão 2,5 m³/s e na Figura 6.16 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento em Tanque Típico - Detalhe - Vazão 2,5 m³/s.

Figura 6.13 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento no Defletor de Montante - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 6.14 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento no Defletor de Montante - Detalhe - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 6.15 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento em Tanque Típico - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 6.16 – Alternativa 3 – Condição 1 - Escoamento em Tanque Típico - Detalhe - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$

A curva de descarga obtida em modelo encontra-se na Tabela 6.14 – Alternativa 3 – Condição 1 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água.

Tabela 6.14 – Alternativa 3 – Condição 1 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água

Vazão (m ³ /s)	Profundidade (m)
1,5	0,88
2,0	1,23
2,5	1,72
3,0	2,07

Fonte: FCTH (2005b)

Como a profundidade de 1,72 m para a vazão de 2,5 m³/s era menor que aquela definida nos critérios de projeto, da ordem de 2,2 m, novos ensaios para a vazão de 2,5 m³/s foram realizados para largura da ranhura vertical de 0,65 m, denominada Condição 2, e para 0,55 m, Condição 3. As profundidades obtidas encontram-se na Tabela 6.15 - Alternativa 3 - Condições 1 a 3 - Largura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m³/s.

Tabela 6.15 - Alternativa 3 - Condições 1 a 3 - Largura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m³/s

Condição	Largura da Ranhura (m)	Profundidade (m)
C1	0,75	1,72
C2	0,65	1,82
C3	0,55	2,07

Fonte: FCTH (2005b)

A profundidade para a Condição 3 apresentou valor próximo ao previsto no projeto. Entretanto, observou-se que o escoamento no Tanque 1, ou seja, o tanque de montante, mostrava-se muito agitado e instável, com ocorrência de fluxo preferencial concentrado, com uma trajetória tipo “S”, em planta. Aspectos do escoamento podem ser observados na Figura 6.17 – Alternativa 3 – Condição 3 – Escoamento no Tanque de Montante e na Figura 6.18 – Alternativa 3 – Condição 3 – Escoamento no Tanque de Montante.

Figura 6.17 – Alternativa 3 – Condição 3 – Escoamento no Tanque de Montante

Figura 6.18 – Alternativa 3 – Condição 3 – Escoamento no Tanque de Montante

Em função dessas agitação e instabilidade indesejadas, foi decidida a implantação de um tanque adicional a montante, com defletores a montante alinhados e centralizados. De início, estes defletores de montante foram instalados 13,5 m a montante do tanque de montante anterior, cuja configuração foi denominada Condição 4.

Contudo, devido às ainda altas agitação e instabilidade dentro do tanque de montante, decidiu-se deslocar para jusante os defletores de montante, até uma distância de 8,3 m em relação aos defletores subseqüentes de jusante, mesma distância entre os demais defletores da escada. Esta configuração foi denominada Condição 5, com largura da ranhura vertical destes primeiros defletores de 55 cm, igual à dos demais defletores da escada.

Nessa Condição 5, ocorreu uma redução na carga hidráulica junto à primeira ranhura vertical, mas uma melhora pouco sensível nas condições de escoamento no tanque de montante. Assim, novos ensaios para a vazão de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ foram realizados para largura da ranhura vertical de 0,65 m, denominada Condição 6, e para 0,75 m, Condição 7.

Na Condição 7 ocorreu uma melhora significativa no escoamento do tanque de montante, quanto à agitação e à instabilidade, cujos aspectos podem ser observados na Figura 6.19 – Alternativa 3 – Condição 7 – Escoamento no Tanque de Montante e na Figura 6.20 - Alternativa 3 – Condição 7 – Escoamento no Tanque de Montante.

Finalmente, como a profundidade de escoamento obtida no canal de aproximação foi de 2,15 m e os critérios de projeto previam 2,30 m, ambos os valores referidos a protótipo, decidiu-se adotar para qual vazão o critério seria atendido. A vazão correspondente foi de $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$, pouco superior à vazão de ensaio de $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$, e esta configuração foi denominada Condição 7A, adotada para projeto. Um resumo das condições ensaiadas é apresentado na Tabela 6.16 – Abertura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 6.19 – Alternativa 3 – Condição 7 – Escoamento no Tanque de Montante

Figura 6.20 - Alternativa 3 – Condição 7 – Escoamento no Tanque de Montante

Tabela 6.16 – Abertura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m³/s

Condição	Defletor de Montante				Defletor Representativo	
	Posição Relativa	Abertura (m)	Lâmina (m)/Carga Hidráulica (m)	Oscilação de NA no Tanque de Montante(m)	Abertura (m)	Lâmina Pseudo Normal (m)
1	Defasado	0,75	-	-	0,75	1,72
2	Defasado	0,65	-	-	0,65	1,82
3	Defasado	0,55	-	grande	0,55	2,07
4	Alinhado ²	0,55	-0,47	grande	0,55	2,07
5	Alinhado ³	0,55	-0,44	0,56	0,55	2,07
6	Alinhado	0,65	-0,32	0,53	0,55	2,07
7	Alinhado	0,75	2,15/0,22	0,25	0,55	2,07
7A ¹	Alinhado	0,75	2,28/0,27	0,23	0,55	2,19

Observações:

1 - Para a condição 7A a vazão de ensaio foi de 2,65 m³/s

2 – Espaçamento de 13,5 m em relação aos defletores de jusante

3 – Espaçamento de 8,3 m em relação aos defletores de jusante

Aspectos do escoamento para a vazão de 2,65 m³/s podem ser observados na Figura 6.21 – Alternativa 3 – Condição 7A - Escoamento em Tanque Típico - Vazão 2,5 m³/s.

Figura 6.21 – Alternativa 3 – Condição 7A - Escoamento em Tanque Típico - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Para a definição da curva de descarga da Alternativa 3, foram realizados ensaios com as vazões de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.17 – Alternativa 3 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água.

Tabela 6.17 – Alternativa 3 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água

Vazão (m^3/s)	Profundidade (m)
1,50	1,26
2,00	1,54
2,65	2,19

Fonte: FCTH (2005b)

As medições das oscilações do nível d'água foram realizadas em quatro pontos, P1 a P4, cuja localização foi definida a partir da análise qualitativa do escoamento. A posição dos pontos de medição é apresentada na Figura 6.22 – Alternativa 3 – Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água.

Figura 6.22 – Alternativa 3 – Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água – Fonte: FCTH (2005b)

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.18 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,65 m³/s.

Tabela 6.18 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,65 m³/s

Ponto	Altura das Ondas (m)	
	Máxima	Média
P1	0,14	0,03
P2	0,20	0,06
P3	0,15	0,05
P4	0,17	0,07

Fonte: FCTH (2005b)

Para a configuração final da Alternativa 3, as velocidades do escoamento foram medidas no Tanque 4, considerado representativo do escoamento nos tanques da escada, em 20 verticais, cuja posição é apresentada na Figura 6.23 – Alternativa 3 – Pontos de Medição de Velocidades e Direcionamento do Escoamento.

Figura 6.23 – Alternativa 3 – Pontos de Medição de Velocidades e Direcionamento do Escoamento –
Fonte: FCTH (2005b)

Em cada vertical, as velocidades foram medidas junto à superfície, a 50% da profundidade da lâmina d'água, e junto ao fundo, sendo que as medições junto à superfície e ao fundo foram feitas a distâncias, referida a protótipo, de respectivamente, de 0,14 m e de 0,07 m, aproximadamente, das superfícies correspondentes.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.19 - Alternativa 3 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 2,65 m³/s, na Tabela 6.20 - Alternativa 3 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 2,65 m³/s e na Tabela 6.21 – Alternativa 3 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo - Vazão 2,65 m³/s.

Tabela 6.19 - Alternativa 3 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 2,65 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima
1	0,53	0,59
2	0,62	0,72
3	0,76	0,91
4	2,04	2,09
5	1,06	1,22
6	0,29	0,36
7	0,71	0,83
8	0,91	0,98
9 a 18	-	-
19	1,47	1,56
20	1,33	1,43

Fonte: FCTH (2005b)

Tabela 6.20 - Alternativa 3 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 2,65 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,24	0,26	11	0,68	0,81
2	0,25	0,28	12	0,45	0,50
3	0,39	0,53	13	0,26	0,29
4	1,69	1,78	14	0,64	0,69
5	1,02	1,06	15	0,98	1,06
6	0,25	0,28	16	0,64	0,69
7	0,33	0,36	17	0,30	0,38
8	0,66	0,71	18	0,34	0,38
9	0,72	0,83	19	1,52	1,55
10	0,81	0,88	20	1,39	1,49

Fonte: FCTH (2005b)

Tabela 6.21 – Alternativa 3 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo - Vazão 2,65 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima
1	0,63	0,75
2	0,59	0,67
3	0,74	0,92
4	1,26	1,47
5	1,15	1,26
6	0,25	0,28
7	0,87	0,94
8	0,79	0,87
9 a 18	-	-
19	1,44	1,47
20	1,15	1,48

Fonte: FCTH (2005b)

6.1.4 Alternativa 4

Nos ensaios para a Alternativa 4, que foi implantada, ao final, na PCH Paranatinga II, a declividade da rampa é de 4,5%, os tanques possuem seção típica trapezoidal, com comprimento interno de 4,6 m, largura da base de 2,0 m e taludes laterais com inclinação 1V:1,5H. As paredes dos defletores possuem espessura de 20 cm.

Os valores estabelecidos em projeto, a serem alcançados nos ensaios de otimização, foram os mesmos da Alternativa 3: a) vazão de 2,5 m³/s; b) carga hidráulica junto aos defletores típicos de 0,216 m; c) profundidade de 2,30 m a montante dos defletores de montante; d) profundidade média (ou pseudonormal) nos tanques da ordem de 2,18 m; e e) velocidade máxima do escoamento em torno de 2,0 m/s.

Os ensaios para a definição da largura da ranhura vertical que atendesse àqueles critérios de projeto foram realizados com o modelo reproduzindo 10 tanques, cujos defletores possuíam, inicialmente, ranhura vertical com largura constante, ao longo de toda a altura, de 70 cm, para o defletor de montante, e de 79 cm, para os defletores dos tanques típicos da escada. Esta configuração foi denominada Condição 1.

De forma geral, os ensaios para determinação das larguras das ranhuras verticais que atendessem aos critérios de projeto foram realizados de forma tentativa, com a modificação, ora da largura do defletor de montante ora dos demais, sem que tivessem ocorrido grandes modificações qualitativas do escoamento, correspondendo às condições 2 a 6, sempre com a vazão de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para a Condição 6, com abertura dos defletores de montante de 0,80 e dos demais de 0,70, obtiveram-se valores considerados satisfatórios.

Finalmente, como a profundidade de escoamento obtida no canal de aproximação foi de 2,22 m e os critérios de projeto previam 2,30 m, ambos os valores referidos a protótipo, decidiu-se verificar para qual vazão o critério seria atendido. A vazão correspondente foi de $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$, pouco superior à vazão de ensaio de $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$, e esta configuração foi denominada Condição 6A, adotada para projeto.

O resumo das configurações das alternativas estudadas e dos valores obtidos, para os parâmetros hidráulicos de interesse do escoamento, para cada condição de ensaio, é apresentado na Tabela 6.22 - Alternativa 4 – Largura dos Defletores e Lâmina d'Água - Vazão $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aspectos do escoamento para a Vazão de $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ junto ao defletor de montante e aos tanques 1 e 2 são apresentados na Figura 6.24 - Alternativa 4 – Escoamento nos Tanques de Montante – Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ e, em tanques típicos, tanques 5 a 7, na Figura 6.25 - Alternativa 4 – Escoamento em Tanques Típicos.

Tabela 6.22 - Alternativa 4 – Largura dos Defletores e Lâmina d'Água - Vazão 2,5 m³/s

Condição	Defletor de Montante			Defletor Típico		
	Abertura (m)	Lâmina (m)	Carga Hidráulica (m)	Abertura (m)	Lâmina Pseudo	
					normal no Tanque Representativo (m)	Carga Hidráulica (m)
1	0,70	-	0,50	0,79	-	>0,22
2	0,80	1,75	0,38	0,79	2,18	<0,22
3	0,80	2,20	0,27	0,73	2,10	>0,22
4	0,85	2,20	0,25	0,73	2,10	>0,22
5	0,85	2,20	0,20	0,70	2,10	0,20
6	0,80	2,22	0,21	0,70	2,10	0,20
6A ¹	0,80	2,30	0,22	0,70	2,20	0,21

Observação: 1 - Para a condição 6A a vazão de ensaio foi de 2,61 m³/s.

Figura 6.24 - Alternativa 4 – Escoamento nos Tanques de Montante – Vazão 2,61 m³/s

Figura 6.25 - Alternativa 4 – Escoamento em Tanques Típicos – Vazão 2,61 m³/s

Para a definição da curva de descarga da Alternativa 4, foram realizados ensaios com as vazões de 1,5 m³/s, 2,0 m³/s, 2,61 m³/s e 3,0 m³/s. A curva de descarga obtida encontra-se na Tabela 6.23 – Alternativa 4 - Vazão e Lâmina d'Água, e a carga hidráulica medida é apresentada na Tabela 6.24 – Alternativa 4 - Vazão e Carga Hidráulica Junto ao Defletor.

Tabela 6.23 – Alternativa 4 - Vazão e Lâmina d'Água

Vazão (m ³ /s)	Lâmina (m)
1,50	1,33
2,00	1,74
2,61	2,24
3,00	2,63

Fonte: FCTH (2006a)

Tabela 6.24 – Alternativa 4 - Vazão e Carga Hidráulica Junto ao Defletor

Vazão (m ³ /s)	Desnível (m)	
	Lado Esquerdo	Lado Direito
1,50	0,23	0,19
2,00	0,23	0,15
2,61	0,23	0,19
3,00	0,23	0,23

Fonte: FCTH (2006a)

As medições das oscilações do nível d'água foram realizadas em cinco pontos, P1 a P5, cuja localização foi definida a partir da análise qualitativa do escoamento. Sua posição é apresentada na Figura 6.26 - Alternativa 4 - Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água.

Figura 6.26 - Alternativa 4 - Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água – Fonte: FCTH (2006a)

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.25 – Alternativa 4 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s.

Tabela 6.25 – Alternativa 4 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s

Ponto	Altura das Ondas (m)	
	Média	Máxima
P1	0,07	0,26
P2	0,11	0,33
P3	0,04	0,23
P4	0,06	0,22
P5	0,05	0,22

Fonte: FCTH (2006a)

Os registros gráficos podem ser observados na Figura 6.27 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s – Ponto 1, na Figura 6.28 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s – Ponto 2, na Figura 6.29 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s – Ponto 3, na Figura 6.30 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s – Ponto 4 e na Figura 6.31 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s – Ponto 5.

Figura 6.27 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 2,61 m³/s – Ponto 1 –

Fonte: FCTH (2006a)

Figura 6.28 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 2 –
Fonte: FCTH (2006a)

Figura 6.29 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 3 –
Fonte: FCTH (2006a)

Figura 6.30 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 4 –
Fonte: FCTH (2006a)

Figura 6.31 - Alternativa 4 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 5 –
Fonte: FCTH (2006a)

Para a configuração final da Alternativa 4, as velocidades do escoamento foram medidas no Tanque 6, considerado representativo do escoamento nos tanques da escada, em 19 verticais, cuja posição é apresentada na Figura 6.32 – Alternativa 4 – Pontos de Medição de Velocidades e de Direcionamento do Escoamento. Em cada vertical, as velocidades foram medidas junto à superfície, a 50% da profundidade da lâmina d'água, e junto ao fundo. As medições junto à superfície e ao fundo foram feitas a uma distância, de protótipo, da ordem de 0,07 m das superfícies correspondentes.

Figura 6.32 – Alternativa 4 – Pontos de Medição de Velocidades e de Direcionamento do Escoamento – Fonte: FCTH (2006a)

Os resultados obtidos nessas posições constam da Tabela 6.26 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 2,61 m³/s e da Tabela 6.27 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 2,61 m³/s.

Tabela 6.26 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 2,61 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,52	0,58	11	1,75	1,90
2	0,98	1,06	12	0,47	0,51
3	0,53	0,64	13	0,35	0,44
4	0,70	0,75	14	0,46	0,49
5	0,74	0,91	15	0,82	0,83
6	0,31	0,35	16	0,83	0,91
7	0,54	0,73	17	0,97	1,02
8	0,72	0,78	18	1,12	1,17
9	1,70	2,02	19	0,70	0,74
10	2,14	2,24			

Fonte: FCTH (2006a)

Tabela 6.27 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 2,61 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,85	0,90	11	1,90	1,96
2	1,02	1,06	12	0,25	0,29
3	0,37	0,42	13	0,22	0,25
4	0,73	0,94	14	0,22	0,23
5	0,55	0,60	15	0,76	0,80
6	0,28	0,30	16	0,62	0,71
7	0,41	0,48	17	0,95	1,00
8	0,72	1,02	18	0,87	0,98
9	2,09	2,14	19	0,87	0,98
10	2,17	2,34			

Fonte: FCTH (2006a)

Os resultados restantes constam da Tabela 6.28 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo – Vazão 2,61 m³/s.

Tabela 6.28 – Alternativa 4 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo – Vazão 2,61 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,75	0,80	11	1,48	1,77
2	1,02	1,04	12	0,26	0,30
3	0,79	0,81	13	0,75	0,82
4	0,42	0,55	14	0,52	0,64
5	0,45	0,52	15	0,82	0,88
6	0,40	0,45	16	0,84	0,92
7	0,78	1,00	17	1,03	1,06
8	0,54	0,64	18	0,93	0,99
9	1,85	1,95	19	1,02	1,05
10	1,83	1,87			

Fonte: FCTH (2006a)

6.1.5 Alternativa 5

Nos ensaios da Alternativa 5, que foi implantada na PCH Canoa Quebrada, a declividade da rampa é de 8,0%, os tanques possuem seção típica trapezoidal, com comprimento interno de 2,85 m, largura da base de 1,0 m e taludes laterais com inclinação 1V:1,5H. As paredes dos defletores possuem espessura de 25 cm.

Os valores estabelecidos em projeto, alvos dos ensaios de otimização, foram: a) vazão de 1,5 m³/s; b) carga hidráulica junto aos defletores típicos de 0,25 m; c) profundidade de 2,00 m a montante dos defletores de montante; d) profundidade média (ou pseudonormal) nos tanques de 1,85 m; e e) velocidade máxima do escoamento de 2,5 m/s.

Os ensaios para a definição da largura da ranhura vertical, que atendesse àqueles critérios de projeto, foram realizados com 16 tanques em modelo, cujos defletores possuíam, inicialmente, ranhura vertical com largura de 40 cm, para o defletor de montante, e de 55 cm, para os defletores dos tanques típicos da escada. Esta configuração foi denominada Condição 1.

De forma geral, os valores dos parâmetros de interesse obtidos no ensaio, profundidade do escoamento e carga hidráulica junto ao defletor de montante, eram significativamente diferentes dos valores estabelecidos nos critérios de projeto, tanto para o canal de aproximação quanto para os demais tanques. Assim, foram realizados novos ensaios para a vazão de 1,5 m³/s, com largura da ranhura vertical nos tanques típicos de 0,40 m. Esta configuração foi denominada Condição 2.

Os parâmetros obtidos se aproximaram um pouco mais dos valores dos critérios de projeto, mas a profundidade nos tanques de 1,45 m era ainda significativamente menor que o valor desejado de 1,85 m, em decorrência de um coeficiente de descarga maior que o previsto inicialmente.

Como não era mais possível reduzir a largura da ranhura vertical, uma vez que o valor de 0,40 m era o mínimo compatível com o tamanho dos peixes esperado para a escada de peixes do empreendimento, decidiu-se reduzir a área do escoamento por outros meios.

A primeira modificação testada foi a introdução de uma soleira de fundo, com 0,25 m de altura, com taludes de 1V:1H e 1V:,5H, respectivamente, a montante e a jusante. Esta configuração foi denominada Condição 3.

A geometria da soleira é apresentada na Figura 6.33 - Alternativa 5 – Condição 3 – Geometria da Soleira de Fundo e a peça típica implantada no modelo pode ser vista na Figura 6.34 – Alternativa 5 – Condição 3 – Soleira de Fundo.

Figura 6.33 - Alternativa 5 – Condição 3 – Geometria da Soleira de Fundo – Fonte: FCTH (2006b)

Figura 6.34 – Alternativa 5 – Condição 3 – Soleira de Fundo

Aspectos do escoamento podem ser observados na Figura 6.35 – Alternativa 5 – Condição 3 – Escoamento em Tanque Típico.

Figura 6.35 – Alternativa 5 – Condição 3 – Escoamento em Tanque Típico – Vazão $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Os parâmetros obtidos se aproximaram ainda mais dos valores dos critérios de projeto, mas a profundidade nos tanques da ordem de 1,60 m ainda era menor que o valor desejado de 1,85 m. Entretanto, nos ensaios dessa configuração, foi observada uma grande instabilidade do escoamento no interior dos tanques, com a ocorrência de oscilação transversal do nível d'água com grande amplitude, cujos valores atingiram até 0,7 m, em avaliação visual.

Diante dessas características indesejadas do escoamento, descartou-se a implantação da soleira de fundo e, para a elevação das profundidades do escoamento ao longo dos tanques, foi feita a introdução, na ranhura vertical, de uma placa com altura de 0,50 m, posicionada a 0,60 m do fundo.

A configuração dessas placas é apresentada na Figura 6.36 - Alternativa 5 – Condição 4 – Geometria da Placa das Ranhuras.

Figura 6.36 - Alternativa 5 – Condição 4 – Geometria da Placa das Ranhuras – Fonte: FCTH (2006b)

Para a Condição 4, obtiveram-se valores dos parâmetros próximos aos de projeto, mas, como a profundidade de escoamento obtida no canal de aproximação foi de 2,10 m e os critérios de projeto previam 2,00 m, ambos os valores referidos a protótipo, decidiu-se verificar para qual vazão o critério seria atendido. A vazão correspondente foi de 1,40 m³/s, pouco inferior à vazão de ensaio de 1,50 m³/s, e esta configuração foi denominada Condição 4A. Esta configuração, com placas, foi adotada para projeto.

É importante registrar que, de forma qualitativa, o escoamento para as vazões de 1,40 e 1,50 m³/s apresentou características satisfatórias. Porém, para vazões superiores a 1,50 m³/s, foi observada a ocorrência de instabilidade do escoamento, com a ocorrência de oscilações transversais da linha d'água nos tanques, com amplitudes relativamente altas, atingindo valores da ordem de 0,70 m. Esta oscilação transversal do escoamento é apresentada de forma esquemática na Figura 6.37 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazões Superiores a 1,5 m³/s.

O resumo dos valores obtidos para os parâmetros de interesse do escoamento para as alternativas estudadas é apresentado na Tabela 6.29 – Alternativa 5 – Largura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão 1,5 m³/s.

Figura 6.37 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazões Superiores a $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ –

Fonte: FCTH (2006b)

Tabela 6.29 – Alternativa 5 – Largura da Ranhura e Lâmina d'Água - Vazão $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Condição	Obstáculo	Defletor de Montante			Defletor Representativo		
		Lâmina (m)	Carga Hidráulica (m)	Oscilação de NA no Tanque de Montante (m)	Abertura (m)	Lâmina Pseudo normal no Tanque (m)	Carga Hidráulica (m)
1	-	1,50	0,70	-	0,55	<1,00	>0,25
2	-	1,75	0,43	-	0,40	1,45	0,23
3	Soleira de Fundo	1,90	0,37	0,70	0,40	1,60	<0,25
4	Placa na Ranhura	2,10	0,27	(2)	0,40	1,90	0,24
4A ¹	Placa na Ranhura	2,00	0,25	(2)	0,40	1,90	0,23

Observações: 1 – Para a condição 4A a vazão de ensaio foi de $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$. 2 – Dado não Medido

Aspectos do escoamento para a vazão de $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ são apresentados na Figura 6.38 - Alternativa 5 – Escoamento em Tanques Típicos e na Figura 6.39 - Alternativa 5 – Escoamento em Tanques Típicos – Detalhe.

Figura 6.38 - Alternativa 5 – Escoamento em Tanques Típicos – Fonte: FCTH (2006b)

Figura 6.39 - Alternativa 5 – Escoamento em Tanques Típicos – Detalhe – Fonte: FCTH (2006b)

Para a definição da curva de descarga da Alternativa 5, foram realizados ensaios com as vazões de 1,0 m³/s, 1,4 m³/s, e 1,5 m³/s. A curva de descarga obtida em modelo encontra-se na Tabela 6.30 – Alternativa 5 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água, e a carga hidráulica medida junto à ranhura vertical, nos lados esquerdo e direito dos tanques, é apresentada na Tabela 6.31 – Alternativa 5 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical.

Tabela 6.30 – Alternativa 5 - Vazão e Profundidade de Lâmina d'Água

Vazão (m ³ /s)	Lâmina (m)
1,00	1,51
1,40	1,89
1,50	1,96

Fonte: FCTH (2006b)

Tabela 6.31 – Alternativa 5 - Vazão e Carga Hidráulica junto à Ranhura Vertical

Vazão (m ³ /s)	Desnível (m)	
	Lado Esquerdo	Lado Direito
1,00	0,25	0,25
1,40	0,24	0,24
1,50	0,24	0,24

Fonte: FCTH (2006b)

As medições das oscilações do nível d'água foram realizadas em cinco pontos, P1 a P5, cuja localização foi definida a partir da análise qualitativa do escoamento. A posição dos pontos de medição é apresentada na Figura 6.40 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água.

Os resultados são apresentados na Tabela 6.32 – Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água – Vazão 1,4 m³/s.

Figura 6.40 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Oscilação de Nível d'Água – Fonte: FCTH (2006b)

Tabela 6.32 – Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Ponto	Altura das Ondas (m)	
	Média	Máxima
P1	0,05	0,16
P2	0,07	0,26
P3	0,03	0,08
P4	0,03	0,08
P5	0,05	0,17

Fonte: FCTH (2006b)

Os registros gráficos encontram-se na Figura 6.41 - Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ - Ponto 1, na Figura 6.42 - Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ - Ponto 2, na Figura 6.43 - Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ - Ponto 3, na Figura 6.44 - Alternativa 5 - Oscilação de Nível d'Água - Vazão

1,40 m³/s – Ponto 4 e na Figura 6.45 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m³/s – Ponto 5.

Figura 6.41 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m³/s – Ponto 1 –
Fonte: FCTH (2006b)

Figura 6.42 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m³/s – Ponto 2 –
Fonte: FCTH (2006b)

Figura 6.43 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão 1,40 m³/s – Ponto 3 –
Fonte: FCTH (2006b)

Figura 6.44 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 4 –
Fonte: FCTH (2006b)

Figura 6.45 - Alternativa 5 – Oscilação de Nível d'Água - Vazão $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ – Ponto 5 –
Fonte: FCTH (2006b)

Para a configuração final da Alternativa 5, as velocidades do escoamento foram medidas no Tanque 8, considerado representativo do escoamento nos tanques da escada, em 19 verticais, cuja posição é apresentada na Figura 6.46 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Velocidades.

Em cada vertical, as velocidades foram medidas junto à superfície, a 50% da profundidade da lâmina d'água, e junto ao fundo, sendo que as medições junto à superfície e ao fundo foram feitas a uma distância, referida a protótipo, da ordem de 0,07 m das superfícies correspondentes.

Figura 6.46 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Velocidades – Fonte: FCTH (2006b)

Para as verticais 9 e 11, foram realizadas medições em 4 profundidades (A, B, C e D), devido à presença da placa nas aberturas dos defletores. A localização desses pontos é indicada na Figura 6.47 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Velocidades nas Verticais 9 e 11.

Figura 6.47 - Alternativa 5 – Pontos de Medição de Velocidades nas Verticais 9 e 11 – Fonte: FCTH (2006b)

Os valores obtidos são apresentadas na Tabela 6.33 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 1,4 m³/s, na Tabela 6.34 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 1,4 m³/s,

na Tabela 6.35 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo - Vazão 1,4 m³/s e na Tabela 6.36 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas nos Pontos A,B,C e D - Vazão 1,4 m³/s.

Tabela 6.33 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas na Superfície - Vazão 1,4 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,80	0,82	11	(Ver Tabela 6.36)	
2	0,79	0,86	12	1,53	1,69
3	0,40	0,44	13	1,44	1,62
4	0,92	0,95	14	1,38	1,52
5	0,78	0,88	15	0,58	0,67
6	0,40	0,45	16	0,43	0,46
7	0,47	0,55	17	0,66	0,70
8	0,71	0,83	18	0,65	0,71
9	(Ver Tabela 6.36)		19	0,37	0,45
10	2,12	2,21			

Fonte: FCTH (2006b)

Tabela 6.34 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas a Meia Profundidade - Vazão 1,4 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,87	0,92	11	(Ver Tabela 6.36)	
2	0,75	0,80	12	0,53	0,58
3	0,38	0,43	13	1,19	1,30
4	0,83	0,94	14	0,87	1,04
5	0,75	0,80	15	0,46	0,51
6	0,54	0,58	16	0,47	0,53
7	0,49	0,56	17	0,60	0,64
8	0,66	0,76	18	0,67	0,75
9	(Ver Tabela 6.36)		19	0,35	0,40
10	0,96	1,06			

Fonte: FCTH (2006b)

Tabela 6.35 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas Junto ao Fundo - Vazão 1,4 m³/s

Ponto	Velocidade (m/s)		Ponto	Velocidade (m/s)	
	Média	Máxima		Média	Máxima
1	0,77	0,84	11	(Ver Tabela 6.36)	
2	0,69	0,76	12	0,40	0,52
3	0,54	0,60	13	1,07	1,16
4	0,83	0,93	14	0,82	0,96
5	0,64	0,70	15	0,37	0,45
6	0,51	0,59	16	0,48	0,89
7	1,05	1,09	17	0,65	0,69
8	0,91	1,02	18	0,75	0,80
9	(Ver Tabela 6.36)		19	0,56	0,60
10	2,19	2,29			

Fonte: FCTH (2006b)

Tabela 6.36 – Alternativa 5 - Velocidades Medidas nos Pontos A,B,C e D - Vazão 1,4 m³/s

	Ponto	Velocidade (m/s)	
		Média	Máxima
9	A	2,38	2,46
	B	2,70	2,82
	C	1,99	2,18
	D	2,34	2,42
11	A	2,24	2,48
	B	1,98	2,07
	C	1,75	1,86
	D	1,82	1,97

Fonte: FCTH (2006b)

6.1.6 Discussão

6.1.6.1 CURVA DE DESCARGA

Os dados obtidos nos ensaios em modelo reduzido, relativos à curva de vazão pelas ranhuras verticais foram analisados conforme a formulação apresentada em Rajaratnam *et al.* (1986). A vazão pela escada Q (m^3/s) é expressa pela equação

$$Q = Q^* (g S_o b_o^5)^{1/2} \quad (1)$$

sendo g a aceleração da gravidade (m/s^2), S_o a declividade do fundo da escada, b_o a largura da ranhura vertical (m) e Q^* um parâmetro de descarga adimensional obtido pelo ajuste de equação do tipo:

$$Q^* = A_1 (y_o / b_o) - A_0 \quad (2)$$

onde y_o é a profundidade do escoamento pseudonormal equivalente (m), ou seja, considerando a lâmina d'água medida a meio comprimento do tanque, e A_1 e A_0 são constantes.

A potência específica do escoamento nos tanques foi calculada pela expressão (Rajaratnam *et al.*, 1986):

$$K = (Q \gamma \Delta h) / (B L y_o) \quad (3)$$

sendo K a potência específica do escoamento nos tanques (W/m^3), γ o peso específico da água (N/m^3), Δh a carga hidráulica no defletor (m), B a largura do tanque (m), L o comprimento do tanque (m) e y_o a profundidade média do escoamento no tanque (m).

Os dados foram analisados, também, considerando o escoamento pelos defletores como escoamento tipo orifício, de acordo com a formulação adaptada de Clay (1995)

$$Q = C_d b_o y' V \quad (4)$$

sendo C_d o coeficiente de descarga do defletor, y' a profundidade do escoamento a montante do defletor (m) e V a velocidade média do escoamento a jusante do defletor (m/s) dada, por sua vez, pela equação

$$V = (2g\Delta h)^{1/2} \quad (5)$$

A Tabela 6.37 - Parâmetros Hidráulicos Característicos do Escoamento nos Tanques sumariza os cálculos realizados.

Apesar das diferenças entre as geometrias dos defletores, dada a relativa similaridade entre as configurações das alternativas 1 e 2 com aquela denominada *Design 1* de Rajaratnam *et al.* (1986), com declividade de 10%, indicada neste trabalho como Alternativa R, os parâmetros hidráulicos dessas três geometria foram analisados também em conjunto, para avaliação dos resultados.

Aos valores de Q^* e y_o / b_o foram ajustadas retas, cujas constantes A_1 e A_0 são apresentadas na Tabela 6.38 – Constantes da Equação 2 para as Alternativas, juntamente com os coeficientes de determinação obtidos.

Os gráficos correspondentes são apresentados na Figura 6.48 – Relação Q^* x y_o/b_o para a Alternativa 1, na Figura 6.49 – Relação Q^* x y_o/b_o para a Alternativa 2, na Figura 6.50 – Relação Q^* x y_o/b_o para o Conjunto das Alternativas 1, 2 e R, na Figura 6.51 – Relação Q^* x y_o/b_o para a Alternativa 3, na Figura 6.52 – Relação Q^* x y_o/b_o para a Alternativa 4 e na Figura 6.53 – Relação Q^* x y_o/b_o para a Alternativa 5 e na Figura 6.54 – Relação Q^* x y_o/b_o para as Alternativas.

Tabela 6.37 - Parâmetros Hidráulicos Característicos do Escoamento nos Tanques

Alt.	So (%)	bo (m)	$\Delta h^{(1)}$ (m)	Q (m ³ /s)	yo (m)	Q*	yo/bo	K (W/m ³)	Cd
1	6,0	0,40	0,192	1,30	1,87	16,74	4,68	145,5	0,852
				1,40	1,94	18,03	4,85	151,0	0,886
				1,50	2,04	19,32	5,10	153,9	0,905
				1,60	2,20	20,61	5,50	152,2	0,898
				1,70	2,34	21,90	5,85	152,0	0,899
2	8,0	0,30	0,208	0,30	0,58	6,87	1,93	146,6	0,724
				0,45	0,88	10,30	2,93	144,9	0,755
				0,73	1,34	16,72	4,47	154,4	0,834
				1,00	1,76	22,90	5,87	161,0	0,885
				1,25	2,15	28,62	7,17	164,8	0,915
R ⁽²⁾	10,0	0,305	0,305	0,33	0,580	6,46	1,90	227,4	0,601
				0,66	1,210	12,91	3,97	218,0	0,646
				1,20	1,950	23,62	6,40	247,4	0,766
				1,67	2,750	32,87	9,02	244,2	0,772
3	2,6	0,55	0,216	1,50	1,26	13,24	2,29	80,0	0,969
				2,00	1,54	17,65	2,80	78,8	1,072
				2,65	2,19	23,39	3,98	59,8	1,019
4	4,5	0,70	0,216	1,50	1,33	5,51	1,90	130,0	0,724
				2,00	1,74	7,34	2,49	114,9	0,751
				2,61	2,24	9,58	3,20	100,1	0,771
				3,00	2,63	11,01	3,76	88,4	0,760
5	8,0	0,40	0,248	1,00	1,51	11,16	3,78	173,1	0,999
				1,40	1,89	5,14	2,70	164,9	1,048
				1,50	1,96	5,51	2,80	165,8	1,073

Observações:

1 – Carga hidráulica teórica no defletor, correspondente ao desnível geométrico entre os eixos de dois defletores limites de um tanque.

2 - Valores de Q e yo extraídos de Rajaratnam *et al.* (1986). Demais, calculados pela formulação apresentada.

Tabela 6.38 – Constantes da Equação 2 para as Alternativas

Alternativa	A ₁	A ₂	R ²
1 (6,0%)	4,198	2,4873	0,978
2 (8,0%)	4,194	1,6784	0,999
R* (10%)	3,77	1,11	-
Conjunto	3,894	0,950	0,988
3 (2,6%)	5,801	-0,551	0,977
4 (4,5%)	2,988	0,113	0,998
5 (8,0%)	5,675	10,279	0,999

R* - Valores extraídos de Rajaratnam *et al.* (1986).

Figura 6.48 – Relação Q* x yo/bo para a Alternativa 1

Figura 6.49 – Relação Q^* x yo/bo para a Alternativa 2

Figura 6.50 – Relação Q^* x yo/bo para o Conjunto das Alternativas 1, 2 e R

Figura 6.51 – Relação Q^* x yo/bo para a Alternativa 3 Figura 6.52 – Relação Q^* x yo/bo para a Alternativa 4

Figura 6.53 – Relação Q^* x yo/bo para a Alternativa 5

Figura 6.54 – Relação Q^* x yo/bo para as Alternativas

Os resultados obtidos para a formulação de escoamento tipo orifício estão apresentados na Tabela 6.37 - Parâmetros Hidráulicos Característicos do Escoamento nos Tanques e podem ser observados na Figura 6.55 – Coeficientes de Descarga para Escoamento Tipo Orifício.

Figura 6.55 – Coeficientes de Descarga para Escoamento Tipo Orifício

Os resultados obtidos evidenciam que a formulação adimensional linear apresentada na Equação 2 é representativa da curva de descarga dos defletores, para as diferentes alternativas, tanto para aquelas com seção transversal retangular quanto para trapezoidal.

Apesar das diferenças entre as geometrias dos defletores das alternativas com seção transversal retangular (alternativas 1, 2 e R), os parâmetros hidráulicos Q^* e y_o/b_o podem ser representados por uma única curva adimensional linear, demonstrando a consistência dos resultados obtidos e a possibilidade de adoção desta curva para a estimativa da descarga em escadas de peixes de seção transversal retangular com o mesmo tipo de defletor.

No caso de serem utilizados tanques e defletores com a mesma geometria das alternativas estudadas, sugere-se, obviamente, a utilização das constantes correspondentes apresentadas na Tabela 6.38 – Constantes da Equação 2 para as Alternativas.

Ressalve-se, contudo, que variações significativas nas dimensões dos tanques, nas larguras das ranhuras verticais, e nas declividades da escada devem ser analisadas de forma criteriosa, para evitar a ocorrência de escoamentos instáveis no interior dos tanques, como relatado em Rainey (1991). Em tais casos, é recomendável a realização de ensaios específicos em modelo reduzido, similares aos efetuados.

Para as alternativas com seção transversal trapezoidal, verifica-se que a equação adimensional linear para a curva de descarga dos defletores também é representativa dos resultados obtidos, e que os parâmetros desta equação apresentam valores relativamente diferentes para as alternativas estudadas, provavelmente devido à significativa diferença entre as geometrias dos defletores adotados, o que recomenda a adoção da curva definida para cada geometria na estimativa da descarga em escadas de peixes de seção transversal com defletores similares.

Todavia, a utilização dessas curvas deve ser feita apenas para a faixa de valores experimentais dos estudos realizados, considerando a instabilidade ocorrida para o escoamento no interior dos tanques, com oscilações transversais do nível d'água de grande amplitude, observadas na Alternativa 5. Tais oscilações transversais são causadas, possivelmente, por forças periódicas criadas por vorticidades originadas junto aos defletores, de maneira similar ao descrito em Zima e Ackermann (2002).

Desta maneira, é recomendável a realização de ensaios sistemáticos com tanques de seção transversal trapezoidal, para a mesma geometria de defletor e várias declividades, para a obtenção de mais dados que permitam a confirmação das equações apresentadas e os limites de utilização, de forma ampla.

Os resultados obtidos para o coeficiente de descarga, C_d , para escoamento nos defletores do tipo orifício, com relativamente grandes dispersões, como apresentado na Figura 6.55 – Coeficientes de Descarga para Escoamento Tipo Orifício, sugere a sua aplicação, devido à maior familiaridade com a equação, apenas para estimativas preliminares de vazões em escadas similares.

A despeito dos pormenores citados anteriormente, as escadas de peixes com seção transversal trapezoidal estudadas apresentam boas condições de escoamento e representam uma solução tecnicamente viável e com menores custos em relação às escadas com seção transversal retangular.

6.1.6.2 CARGA HIDRÁULICA JUNTO AOS DEFLETORES

Como já apresentado anteriormente, é usual a hipótese de que a carga hidráulica teórica junto aos defletores, para escoamento em regime pseudonormal, seja adotada com o mesmo valor do desnível geométrico entre os eixos de dois defletores limites de um tanque.

Para os ensaios realizados, os resultados médios para a carga hidráulica medidos em modelo e os valores teóricos correspondentes em cada alternativa são apresentados na Tabela 6.39 – Cargas Hidráulicas Medidas e Teóricas para as Alternativas.

Pode-se observar que a diferença percentual entre as cargas hidráulicas medida e teórica é, de forma geral, inferior a 10%, que é considerada como precisão das medidas realizadas em laboratório. A exceção ficou por conta da Alternativa 2, com diferença percentual da ordem de 15%. As alternativas 4 e 5 apresentaram diferença percentual da ordem de 3% e 2%, respectivamente.

Tabela 6.39 – Cargas Hidráulicas Medidas e Teóricas para as Alternativas

Alternativa	Carga Hidráulica (m)		Carga Hidráulica Medida/Teórica
	Medida	Teórica ⁽¹⁾	
1	0,210	0,192	1,094
2	0,176	0,208	0,846
3	-	0,216	-
4	0,210	0,216	0,972
5	0,243	0,248	0,980

Observação: 1 – desnível geométrico entre os eixos de dois defletores limites de um tanque

A partir destes resultados pode-se afirmar que a hipótese de que a carga hidráulica junto aos defletores é igual ao desnível geométrico entre os eixos de dois defletores adjacentes é correta, de forma geral.

6.1.6.3 OSCILAÇÃO DE NÍVEL D'ÁGUA NOS TANQUES

A oscilação de nível d'água nos tanques das escadas é um bom indicativo das variações instantâneas da profundidade do escoamento e um subsídio para a definição de folgas a serem adotadas nas alturas dos defletores em relação ao nível d'água médio no tanque, usualmente adotado como dado de referência. Os valores de oscilações, profundidades médias e percentuais correspondentes são apresentados na Tabela 6.40 – Oscilação de Nível d'Água nos Tanques para as Alternativas.

Tabela 6.40 – Oscilação de Nível d'Água nos Tanques para as Alternativas

Alt.	Vazão (m ³ /s)	Oscilação NA (m)		Profundidade (m)	Oscilação/Profundidade %	
		Média	Máxima		Média	Máxima
1	1,40	0,062	0,168	1,94	3,2	8,7
	1,50	0,063	0,168	2,04	3,1	8,3
	1,60	0,060	0,167	2,20	2,7	7,6
2	0,45	0,047	0,127	0,88	5,3	14,4
	0,73	0,047	0,137	1,34	3,5	10,2
	1,00	0,052	0,150	1,76	2,9	8,5
3	2,65	0,053	0,165	2,19	2,4	7,5
4	2,61	0,066	0,252	2,24	2,9	11,3
5	1,40	0,046	0,150	1,89	2,4	7,9

Observa-se que as oscilações média e máxima para as alternativas são da ordem de, respectivamente, 5 cm e 17 cm, e a oscilação máxima, de 25 cm para a Alternativa 4. Percentualmente, as oscilações média e máxima são de cerca de 3 % e 9 % da profundidade média do escoamento, respectivamente, e a oscilação máxima de 14%, para a Alternativa 2.

6.1.6.4 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES EM PLANTA

A distribuição de velocidades médias em planta e a linha de corrente onde ocorrem as máximas velocidades, para as medições realizadas a meia profundidade do escoamento, para vazões características de cada alternativa, são apresentadas na Figura 6.56 – Alternativa 1 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 1,5 m³/s, na Figura 6.57 – Alternativa 2 –

Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$, na Figura 6.58 – Alternativa 3 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$, na Figura 6.59 – Alternativa 4 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$ e na Figura 6.60 – Alternativa 5 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 6.56 – Alternativa 1 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 6.57 – Alternativa 2 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 6.58 – Alternativa 3 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 2,65 m³/s

Figura 6.59 – Alternativa 4 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão 2,61 m³/s

Figura 6.60 – Alternativa 5 – Distribuição de Velocidades em Planta – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$

As figuras evidenciam uma das principais características das escadas tipo ranhura vertical que é a presença de áreas de descanso no interior dos tanques, ou seja, regiões de baixa velocidade de escoamento, permitindo que os peixes realizem sua passagem de um tanque para outro da maneira que melhor lhes convenha. Nas alternativas com seção retangular, observam-se regiões com velocidades mais baixas em ambos os lados dos tanques, mas, devido à geometria dos defletores, as regiões de descanso mais amplas formam-se no lado esquerdo dos tanques.

Configuração semelhante ocorre na Alternativa 3, com geometria de defletores similar e com seção trapezoidal, embora se observe, também, uma região de descanso mais ampla na lateral direita, devido ao aumento da largura da seção em direção à superfície.

Para as alternativas 4 e 5, com seção trapezoidal e defletores de geometria retilínea com a ranhura vertical situada no centro do tanque, verifica-se a ocorrência de regiões de descanso igualmente amplas e relativamente simétricas em ambos os lados do escoamento principal.

Desta forma, as escadas com seção trapezoidal fornecem regiões de descanso no interior dos tanques, porém com largura variável em comparação com os tanques com seções retangulares, que apresentam largura constante.

Medições de circulação no escoamento de tanques de escadas tipo ranhura vertical realizadas em ensaios em laboratório indicaram, de acordo com Rajaratnam *et al.* (1986), que o escoamento nos tanques é tri-dimensional e que a trajetória da linha de corrente de maior velocidade pode variar com as vazões e com as profundidades do escoamento a jusante. Pelas observações efetuadas nos ensaios realizados no âmbito do presente trabalho, estas variações são pouco mais intensas no escoamento nos tanques trapezoidais em comparação com os retangulares.

6.1.6.5 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES EM PERFIL

É usual o cálculo da velocidade máxima do escoamento junto aos defletores dos tanques a partir da equação 5 que corresponde, em realidade, à velocidade teórica média. Os dados apresentados na Tabela 6.41 – Velocidades Teórica e Máxima Medida para as Alternativas permitem avaliar as diferenças.

Tabela 6.41 – Velocidades Teórica e Máxima Medida para as Alternativas

Alternativa							
	1	2	3	4	5	5	
Δh (m)							
	0,192	0,208	0,216	0,216	0,248	0,248	
Velocidade Teórica (m/s)							
	1,94	2,02	2,06	2,06	2,21	2,21	
Vertical							
	1	1	4	10	10	9	9
Posição	Velocidade Máxima Medida (m/s)						Ponto
Superfície	1,82	1,87	2,09	2,24	2,21	2,42	D
Meia Prof.	2,16	1,92	1,78	2,34	2,06	2,82	B
Fundo	1,99	2,18	1,47	1,87	2,29	2,46	A
Velocidade Máxima Medida/Velocidade Teórica							
	1,11	1,08	1,02	1,14	1,04	1,28	

Da análise desses resultados, observa-se que as velocidades máximas medidas são, em média, 8% superiores à velocidade teórica média calculada, tendo ocorrido o valor máximo de 14%, para esta relação, na Alternativa 4. Na Alternativa 5, a introdução da placa na ranhura introduziu uma perturbação na distribuição de velocidades que conduziu a um acréscimo da velocidade máxima em relação à teórica de 28%, com valor máximo da velocidade de 2,82 m/s em comparação à calculada de 2,21 m/s.

Distribuições das velocidades em verticais típicas do escoamento com maiores e menores velocidades, no interior dos tanques, para vazões características das alternativas, são apresentadas na Figura 6.61 – Alternativa 1 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 1,5 m³/s, na Figura 6.62 – Alternativa 2 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 1,4 m³/s, na Figura 6.63 – Alternativa 3 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 2,65 m³/s, na Figura 6.64 – Alternativa 4 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 2,61 m³/s e na Figura 6.65 – Alternativa 5 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão 1,4 m³/s.

Alternativa 1 - 6% - Retangular

Figura 6.61 – Alternativa 1 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Alternativa 2 - 8% - Retangular

Figura 6.62 – Alternativa 2 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Alternativa 3 - 2,6% - TRAPEZOIDAL

Figura 6.63 – Alternativa 3 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$

Alternativa 4 - 4,5% - TRAPEZOIDAL

Figura 6.64 – Alternativa 4 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão $2,61 \text{ m}^3/\text{s}$

Alternativa 5 - 8,0% - TRAPEZOIDAL

Figura 6.65 – Alternativa 5 – Distribuição de Velocidades em Perfil – Vazão $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Dos resultados expostos, a distribuição de velocidades em perfil mais comum apresenta velocidades mais elevadas a meia profundidade e velocidades menores junto à superfície e ao fundo.

Para a Alternativa 5, a ocorrência de velocidades mais acentuadas junto à geratriz inferior da placa introduzida na ranhura, sugere que deverá ocorrer maior passagem de peixes na porção da lâmina acima daquela placa e junto ao fundo, onde ocorrem menores velocidades e onde os gastos energéticos são menores.

De forma geral, é recomendável que sejam realizados monitoramentos das trajetórias de deslocamento de indivíduos de diferentes espécies no interior dos tanques, não só das alternativas apresentadas, mas, também, em outras escadas de peixes, para a obtenção de dados biológicos que possam subsidiar o projeto hidráulico de outras geometria eventualmente mais adequadas às espécies neotropicais.

6.2 ASPECTOS DE ICTIOFAUNA

6.2.1 UHE IGARAPAVA – ALTERNATIVA 1

A UHE Igarapava localiza-se no rio Grande, na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, a montante do aproveitamento de Volta Grande e a jusante do aproveitamento de Jaguará.

O arranjo geral do aproveitamento possui barramento com 1.128 m de extensão. É composto por barragens, com altura máxima de 28,0 m; vertedouro com 6 comportas segmento com vãos de 13,50 m de largura e carga de projeto de 18,5 m, dimensionado para a vazão de 14.300 m³/s, cuja dissipação de energia é feita por ressalto hidráulico em bacia plana; e casa de força com 5 máquinas tipo Bulbo, com queda nominal de 17,05 m e vazão turbinada unitária de 275 m³/s, totalizando 1.375 m³/s de vazão turbinada e 210 MW de potência instalada.

A escada de peixes localiza-se na margem esquerda do canal de fuga e o canal de entrada, dotado de comporta de regulação de velocidades tipo gaveta, para aumentar a atração do escoamento para os peixes, encontra-se a cerca de 120 m a jusante da saída dos tubos de sucção das turbinas.

Possui 282 m de extensão e declividade de 6%, para vencer um desnível médio de 16,70 m, em um total de 87 tanques quadrados com dimensão interna de 3,0 metros, cujos defletores possuem ranhuras verticais com 40 cm de largura e carga hidráulica de 19 cm, que fornece uma velocidade teórica máxima de 1,93 m/s. A vazão média pela escada é de 1,6 m³/s, a profundidade do escoamento no interior dos tanques varia 2,08 m a 2,27 m e a potência específica do escoamento é de 152 W/m³. O sistema de água de atração tem capacidade para uma vazão de 6,0 m³/s e, assim, a vazão total pelo sistema de transposição de peixes é de 7,6 m³/s, que corresponde 0,55% da vazão máxima turbinada. Possui sala de observação, com estação

de captura e contagem de peixes, no canal de saída, antes do reservatório. Aspectos da escada foram apresentados na Figura 4.3 – Vista Geral da Escada de Peixes da UHE Igarapava e Figura 4.4 - Escoamento em Tanque de Escada de Peixes Tipo Ranhura Vertical (UHE Igarapava).

O monitoramento da passagem de peixes na sala de observação, imediatamente antes da saída para o reservatório, realizado no período de julho de 2000 a fevereiro de 2004, revelou, de acordo com Vono *et al.* (2004) a presença de 25 espécies na escada, de um total de 35 registradas na região da barragem, correspondentes a 71% das espécies. Destas 35 espécies, 6 espécies eram migradoras de longa distância, da ordem dos Siluriformes e Characiformes, das quais 5 (83,3%) foram registradas no interior da escada. Sete espécies eram exóticas, a mais abundante *Cichla ocellaris*, e 4 foram registradas na escada, correspondentes a 57%. A Figura 6.66 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da UHE Igarapava ilustra a passagem pela sala de observação.

Figura 6.66 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da UHE Igarapava –
Fonte: Consórcio Igarapava

Peixes passaram na escada ao longo de todos os meses do ano, mas a maioria durante os meses de outubro a abril correspondente, em largo senso, ao período de piracema. O comprimento padrão de peixes utilizando a escada variou de 4 cm (*Bryconamericus stramineus*) a 130 cm (*Zungaro jahu*), este último de acordo com Vono (dados não publicados).

Os padrões de passagem de peixe ao longo do dia variaram para as espécies mais abundantes, em ordem decrescente: *Pimelodus maculatus*, quase que exclusivamente noturno, das 18:00 às 7:00 hs, com pico entre 1:00 e 5:00 hs; *Leporinus octofasciatus*, diurno, das 6:00 às 18:00 hs, com pico entre 16:00 e 18:00 hs; *Prochilodus lineatus*, noturno, das 18:00 às 20:00 hs; e *Schizodon nasutus*, com passagem bimodal, ao amanhecer e ao entardecer.

Segundo Bizzotto (2006), de acordo com o monitoramento no período de junho de 2003 a maio de 2004, 80% dos peixes que passaram pela escada eram de espécies migradoras. Cerca de 78% dos peixes passaram pela escada no período chuvoso e 63% dos peixes passaram durante o dia. Não foi percebida correlação entre a passagem de peixes e chuva ou vazão liberada pela usina. Porém, houve uma variação marcante no número de peixes passando pela escada em relação às fases da lua. O número era significativamente menor durante a lua nova, aumentava para o máximo de passagem durante a lua cheia e, então, se reduzia ao longo do último quarto. Independente da espécie, a passagem de peixes era mais intensa durante altas temperaturas, sendo que a grande maioria passou quando a temperatura da água era igual ou superior a 25°C.

As espécies de peixes observadas na escada no período de junho de 2000 a maio de 2004 são apresentadas na Tabela 6.42 – UHE Igarapava - Espécies Registradas na Escada de Peixes.

Tabela 6.42 – UHE Igarapava - Espécies Registradas na Escada de Peixes – Junho de 2000 a Maio de 2004

Ordem	Família	Espécie	Nome Popular
Characiformes	Characidae	<i>Astyanax altiparanae</i>	lambari-do-rabo-amarelo
		<i>Astyanax fasciatus</i>	lambari-do-rabo-vermelho
		<i>Brycon nattereri</i>	piabanha
		<i>Bryconamericus stramineus</i>	piaba
		<i>Galeocharax knerii</i>	peixe cachorro
		<i>Metynnis maculatus</i> ^E	pacu-cd
		<i>Salminus hilarii</i>	tabarana
		<i>Salminus brasiliensis</i> ^M	dourado
	Erythrinidae	<i>Hoplias lacerdae</i> ^E	trairão
		<i>Hoplias malabaricus</i>	traíra
	Anostomidae	<i>Leporinus elongatus</i> ^M	piapara
		<i>Leporinus friderici</i>	piau-três-pintas
		<i>Leporinus lacustris</i>	piau-de-lagoa
		<i>Leporinus octofasciatus</i>	ferreirinha
		<i>Schizodon nasutus</i>	taguara
	Prochilodontidae	<i>Prochilodus lineatus</i> ^M	curimba
Siluriformes	Pimelodidae	<i>Pimelodus maculatus</i> ^M	mandi-amarelo
		<i>Pseudoplatystoma sp.</i> ^M	pintado
	Loricariidae	<i>Hypostomus spp.</i>	casculo
		<i>Megalancistrus parananus</i>	casculo-abacaxí
Perciformes	Cichlidae	<i>Cichla ocellaris</i> ^E	tucunaré
		<i>Cichla temensis</i> ^E	tucunaré

^M Espécie Migradora; ^E Espécie exótica.

6.2.2 UHE AIMORÉS – ALTERNATIVA 2

A UHE Aimorés localiza-se no rio Doce, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, a montante da UHE Mascarenhas.

Possui potência instalada de 300 MW e o desnível médio entre o reservatório e o canal de fuga é de 28,0 m. Um trecho de rio de aproximadamente 11 km separa a barragem principal e o vertedouro da casa de força. O escoamento do reservatório é fornecido para as turbinas através de um canal de adução, na margem esquerda. A barragem, com altura máxima de 17 m, localiza-se na margem direita e parte do leito do rio. O vertedouro com 10 comportas segmento foi dimensionado para a vazão de 15.000 m³/s, cuja dissipação de energia é feita em bacia de ressalto hidráulico. A casa de força possui três turbinas tipo Kaplan, com vazão turbinada unitária de 475 m³/s e total de 1.425 m³/s.

A escada de peixes localiza-se entre o lado esquerdo do vertedouro e a margem esquerda do rio. O canal de entrada também é dotado de comporta de regulação de velocidade tipo gaveta e a vazão sanitária de 16 m³/s é utilizada como vazão de atração para a escada.

Possui 168 m de extensão e declividade de 8%, para vencer um desnível médio da ordem de 13,50 m, em um total de 58 tanques com comprimento e largura internos de, respectivamente, 2,40 m e 3,0 m. Os defletores possuem ranhuras verticais com 30 cm de largura e carga hidráulica de 21 cm, que fornece uma velocidade teórica máxima de 2,02 m/s. A vazão média pela escada é de 0,8 m³/s, a profundidade do escoamento no interior dos tanques varia 1,32 a 1,52 m e a potência específica do escoamento é de 161 W/m³. Considerando a vazão do sistema de água de atração de 16,0 m³/s, a vazão total pelo sistema de transposição de peixes é de 16,8 m³/s, que corresponde 0,95% da vazão de 1.775 m³/s, correspondente à cheia média anual descontada da vazão máxima turbinada. Possui sala de observação, com estação de captura e contagem de peixes, no canal de saída, imediatamente antes do reservatório. Aspectos da escada pode ser observado na Figura 6.67 – Vista da Escada de Peixes da UHE Aimorés.

Figura 6.67 – Vista da Escada de Peixes da UHE Aimorés – Fonte: Paulo Pompeu

De acordo com Vono (dados não publicados), foram coletados no interior dos tanques da escada, através das campanhas realizadas em março, abril e maio de 2007, 1238 exemplares pertencentes a 25 espécies, distribuídas em 3 ordens, 11 famílias e 21 gêneros. As espécies são apresentadas na Tabela 6.43 – UHE Aimorés - Espécies de Peixes Capturadas na Escada - Março a Maio de 2007.

O número de espécies representa cerca de 51% das 49 espécies registradas para a área de influência do AHE Aimorés (Holos, 2003). Dessas 49 espécies, pelo menos oito são consideradas migradoras. Das espécies coletadas no interior da escada, quatro - piau-branco (*Leporinus conirostris*), piau (*L. steindachneri*), curimba (*Prochilodus costatus*) e mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*) - são consideradas migradoras, representando 50% das espécies migradoras do trecho de rio, enquanto pelo menos três espécies de cascudos *Delturus carinotus*, *Hypostomus affinis* e *Hypostomus luetkeni* são consideradas reofílicas.

Tabela 6.43 – UHE Aimorés - Espécies de Peixes Capturadas na Escada - Março a Maio de 2007

Ordem	Família	Espécie	Nome popular
Characiformes	Characidae	<i>Astyanax bimaculatus</i>	lambari-do-rabo-amarelo
		<i>Astyanax taeniatus</i>	lambari
		<i>Bryconamericus stramineus</i>	piaba
		<i>Oligosarcus argenteus</i>	bocarra
		<i>Pygocentrus natterer</i> ^F	piranha
	Anostomidae	<i>Leporinus conirostris</i> ^M	piau-branco
		<i>Leporinus steindachneri</i> ^M	piau
	Prochilodontidae	<i>Prochilodus costatus</i> ^{M,E}	curimba
	Crenuchidae	<i>Characidium timbuiensis</i>	canivete
Gymnotiformes	Gymnotidae	<i>Gymnotus carapo</i>	sarapó
Siluriformes	Loricariidae	<i>Delturus carinotus</i>	cascudo-laje
		<i>Harttia loricariformes</i>	cascudo-barata
		<i>Hypostomus affinis</i>	cascudo
		<i>Hypostomus luetkeni</i>	cascudo-preto
		<i>Hypostominae gen. novo</i>	cascudo
	Auchenipteridae	<i>Glanidium melanopterum</i>	cumbaquinha
		<i>Parauchenipterus striatulus</i>	cumbaca
		<i>Pseudauchenipterus affinis</i>	cumbaquinha
	Pimelodidae	<i>Lophiosilurus alexandri</i> ^F	pacamã
		<i>Pimelodella sp.</i>	mandizinho
		<i>Pimelodus maculatus</i> ^{M,E}	mandi-açu
	Heptapteridae	<i>Rhamdia quelen</i>	bagre
	Trichomycteridae	<i>Trichomycterus immaculatus</i>	cambeva
		<i>Trichomycterus sp.</i>	cambeva
	Clariidae	<i>Clarias gariepinus</i> ^E	bagre-africano

^M Espécie Migradora; ^E Espécie exótica;

A espécie mais abundante foi o lambari-rabo-amarelo (*Astyanax bimaculatus*), de pequeno porte, enquanto que, em relação à biomassa, as mais importantes foram curimba (*Prochilodus costatus*), mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*) e cascudos (*Hypostomus* spp).

Cinco espécies, representando 20% do total capturado até o presente momento, são exóticas à bacia do rio Doce: piranha (*Pygocentrus nattereri*), curimba (*Prochilodus costatus*), pacamã (*Lophiosilurus alexandri*), mandi amarelo (*Pimelodus maculatus*) e bagre-africano (*Clarias gariepinus*). A piranha, o pacamã e o bagre-africano são espécies piscívoras, sendo potencialmente capazes de causar impactos negativos às espécies nativas da região.

6.2.3 PCH PARANATINGA II – ALTERNATIVA 4

A PCH Paranatinga II localiza-se no rio Culuene, Mato Grosso, afluente do rio Xingu.

O aproveitamento possui Potência Instalada de 30 MW, com um desnível médio entre o reservatório e o canal de fuga da usina de cerca de 17 m. As barragens, de terra, se localizam na margem esquerda e leito do rio, com comprimento de 440 m, e na margem direita, com comprimento de 430 m. O vertedouro, com duas comportas, possui capacidade de 1.500 m³/s, cuja energia é dissipada em bacia de ressalto hidráulico. A casa de força encontra-se na margem direita, com vazão total de 226,4 m³/s, em 3 unidades tipo Kaplan de eixo horizontal.

A escada de peixes localiza-se na margem direita do canal de fuga e o canal de entrada, dotado de comporta de regulação de velocidades tipo basculante, instalada sobre uma viga com um orifício quadrado com 80 cm

de lado, encontra-se a aproximadamente 40 m a jusante da saída dos tubos de sucção das turbinas.

Possui 460 m de extensão e declividade de 4,5%, para vencer um desnível médio da ordem de 17,0 m, em um total de 81 tanques. Os 36 tanques a jusante possuem seção retangular com comprimento e largura internos de, respectivamente, 4,60 m e 4,45 m. Os demais 45 tanques possuem seção trapezoidal com 2 metros de largura na base, taludes laterais com inclinação de 1V:1,5H e comprimento interno também de 4,60 m.

Os defletores possuem ranhuras verticais com 70 cm de largura e carga hidráulica de 21,6 cm, que fornece uma velocidade teórica máxima de 2,06 m/s. A vazão média pela escada é de 2,61 m³/s, a profundidade do escoamento no interior dos tanques varia 2,07 a 2,29 m e a potência específica do escoamento é de 120 e 100 W/m³ para as seções retangular e trapezoidal, respectivamente. A vazão pela escada de peixes corresponde 1,15% da vazão máxima turbinada. Possui sala de observação no canal de saída, imediatamente antes do reservatório.

Aspectos da escada podem ser observados na Figura 6.68 – Vista da Escada de Peixes da PCH Paranatinga II e a Figura 6.69 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da PCH Paranatinga II ilustra a passagem pela sala de observação.

Em campanha realizada em dezembro de 2007, segundo Vono (dados não publicados), foram capturados indivíduos de 24 espécies na área de influência do aproveitamento. Dessas 24 espécies, 8 foram registradas na escada, correspondendo a 33,3% do total. No interior da escada foram capturadas 7 espécies consideradas migradoras, correspondente a 87,5% das 8 espécies migradoras registradas a jusante. As espécies registradas na escada são apresentadas na Tabela 6.44 – PCH Paranatinga II – Espécies de Peixes Capturados na Escada – Dezembro de 2007.

Figura 6.68 – Vista da Escada de Peixes da PCH Paranatinga II

Figura 6.69 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da PCH Paranatinga II

Tabela 6.44 – PCH Paranatinga II – Espécies de Peixes Capturados na Escada – Dezembro de 2007

Ordem	Família	Espécie	Nome popular
Characiformes	Characidae	<i>Brycon falcatus</i> ^M	matrinchã
	Cynodontidae	<i>Hydrolycus armatus</i> ^M	cachorra
		<i>Rhaphiodon vulpinus</i>	cachorra-facão
	Anostomidae	<i>Leporinus friderici</i> ^M	piau-três-pintas
Siluriformes	Pimelodidae	<i>Hemisorubim platyrhynchos</i> ^M	jurupoca
		<i>Pimelodus sp.</i> ^M	mandi
		<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i> ^M	surubim
		<i>Sorubim trigonocephalus</i> ^M	bico-de-pato

^M Espécie Migradora

6.2.4 PCH CANOA QUEBRADA – ALTERNATIVA 5

A PCH Canoa Quebrada localiza-se no rio Verde, Mato Grosso, que integra a bacia do rio Teles Pires.

O aproveitamento possui Potência Instalada de 28 MW, com um desnível médio entre o reservatório e o canal de fuga da usina de cerca de 25 m. A barragem, de terra, se localiza na margem direita e parte do leito do rio, com comprimento de 630 m e altura máxima de 30 m. O vertedouro, com duas comportas, possui capacidade de 650 m³/s, cuja energia é dissipada por ressalto hidráulico em bacia plana. A casa de força encontra-se na margem esquerda, com vazão total de 133,2 m³/s, em 2 unidades tipo Kaplan de eixo horizontal.

A escada de peixes localiza-se na margem direita do canal de fuga e o canal de entrada, dotado de comporta de regulação de velocidades tipo

basculante, encontra-se a cerca de 75 m a jusante da saída dos tubos de sucção das turbinas.

Possui 400 m de extensão e declividade de 8%, para vencer um desnível médio da ordem de 25,0 m, em um total de 100 tanques. Os 15 tanques a jusante possuem seção retangular com comprimento e largura internos de, respectivamente, 2,85 m e 4,0 m. Os demais 85 tanques possuem seção trapezoidal com 1 metro de largura na base, taludes laterais com inclinação de 1V:1,5H e comprimento interno também de 2,85 m.

Os defletores possuem ranhuras verticais com 40 cm de largura, com uma viga com 50 cm de altura, cuja geratriz inferior encontra-se a 60 cm do fundo, e carga hidráulica de 25 cm, que fornece uma velocidade teórica máxima de 2,21 m/s. A vazão média pela escada é de 1,4 m³/s, a profundidade do escoamento no interior dos tanques varia 1,50 a 1,75 m e a potência específica do escoamento é de 159 e 167 W/m³ para as seções retangular e trapezoidal, respectivamente. A vazão pela escada de peixes de 1,4 m³/s corresponde a 1,05% da vazão máxima turbinada. Possui sala de observação no canal de saída, imediatamente antes do reservatório.

Aspectos da escada podem ser observados Figura 6.70 – Vista da Escada de Peixes da PCH Canoa Quebrada enquanto que a Figura 6.71 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da PCH Canoa Quebrada ilustra a passagem pela sala de observação.

Em campanha realizada em dezembro de 2007, conforme Vono (dados não publicados), foram capturados indivíduos de 30 espécies na área de influência do aproveitamento.

As espécies registradas na escada são apresentadas na Tabela 6.45 – PCH Canoa Quebrada - Espécies de Peixes Capturados na Escada - Dezembro de 2007.

Figura 6.70 – Vista da Escada de Peixes da PCH Canoa Quebrada

Figura 6.71 – Indivíduos de Algumas Espécies no Visor da Escada de Peixes da PCH Canoa Quebrada

Tabela 6.45 – PCH Canoa Quebrada - Espécies de Peixes Capturados na Escada - Dezembro de 2007

Ordem	Família	Espécie	Nome popular
Characiformes	Characidae	<i>Astyanax sp.1</i>	lambari
		<i>Astyanax sp.2</i>	lambari
		<i>Astyanax sp.3</i>	lambari
		<i>Astyanax sp.4</i>	lambari
		<i>Brycon falcatus</i> ^M	matrinchã
		<i>Bryconops sp.1</i>	piaba
		<i>Bryconops sp.2</i>	piaba
		<i>Jupiaba apenina</i>	lambari
		<i>Jupiaba polylepis</i>	lambari
		<i>Jupiaba poranga</i>	lambari
	Cynodontidae	<i>Hydrolycus armatus</i> ^M	cachorra
	Anostomidae	<i>Leporinus brunneus</i> ^M	piau-banana
		<i>Leporinus friderici</i> ^M	piau-três-pintas
		<i>Leporinus octomaculatus</i> ^M	piau
		<i>Synaptolaemus cingulatus</i>	cachimbinho
Perciformes	Crenuchidae	<i>Characidium hasemani</i>	canivete
	Hemiodontidae	<i>Hemiodus sterni</i> ^M	bananinha
	Cichlidae	<i>Cichla sp.</i>	tucunaré

^M Espécie Migradora ou Reofílica

Dessas 30 espécies, dezoito foram registradas na escada, correspondendo a 60% do total. No interior da escada foram capturadas seis espécies consideradas migradoras, correspondente a 54,5% das onze espécies migradoras registradas a jusante.

6.2.5 DISCUSSÃO

Um resumo dos resultados daqueles estudos de monitoramentos de escadas tipo ranhura vertical, relativos ao percentual de peixes a jusante e no interior da escada de peixes, tanto para o número total de espécies quanto para espécies consideradas grandes migradoras, é apresentado na Tabela 6.46 – Presença de Espécies em Escadas Tipo Ranhura Vertical.

Tabela 6.46 – Presença de Espécies em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Aproveitamento	Número de Espécies					
	Migradoras			Total		
	A Jusante	Na Escada	%	A Jusante	Na Escada	%
Igarapava	6	5	83,3	35	25	71
Aimorés	8	4	50,0	49	25	51
Paranatinga II	8	7	87,5	24	12	33,3
Canoa Quebrada	11	6	54,5	30	18	60

Parâmetros hidráulicos de interesse para essas escadas de peixes são apresentados na Tabela 6.47 - Características Hidráulicas de Escadas Tipo Ranhura Vertical. O percentual entre as vazões totais nessas escadas, incluindo vazão de atração, quando for o caso, e a vazão turbinada é apresentado na Tabela 6.48 – Vazões Totais em Escada Tipo Ranhura Vertical e Vazões Turbinadas. No caso da UHE Aimorés, pela localização da escada junto ao vertedouro, a vazão turbinada foi substituída pela vazão média de cheia descontada a vazão turbinada, que constitui referência similar para quantificar a possível atratividade da vazão total do STP.

Nesses aproveitamentos, as entradas das escadas encontram-se relativamente próximas da saída do tubo de sucção das turbinas, exceto para a UHE Aimorés, próxima do vertedouro; e os canais de entrada dispõem de comporta de regulação de velocidades para atração de peixes ao seu interior.

Tabela 6.47 - Características Hidráulicas de Escadas Tipo Ranhura Vertical

Aproveitamento	Declividade (%)	Profundidade Média (m)	Carga Hidráulica (m)	Vazão (m³/s)		Potência Específica (W/m³)
				Escada	Total	
Igarapava	6,0	2,18	0,19	1,6	7,6	152
Aimorés	8,0	1,42	0,21	0,8	16,8	161
Paranatinga II	4,5	2,18	0,22	2,61	2,61	120
C. Quebrada	8,0	1,625	0,25	1,4	1,4	167

Tabela 6.48 – Vazões Totais em Escada Tipo Ranhura Vertical e Vazões Turbinadas

Aproveitamento	Vazão (m³/s)		Percentual
	Total ⁽¹⁾	Turbinada	
Igarapava	7,6	1375	0,55
Aimorés	16,8	1425 ⁽²⁾	0,95
Paranatinga II	2,61	226,4	1,15
Canoa Quebrada	1,4	133,2	1,05

Obs.: 1 – Vazão pela escada acrescida da vazão do sistema de água de atração

2 - Vazão média de cheia descontada a vazão turbinada

De acordo com dados da literatura, o aumento da vazão do sistema de transposição de peixes e a utilização de comportas de regulação de velocidades conduzem à maior atração de peixes ao interior da escada (Clay, 1995). A seletividade das escadas, definida como o percentual de peixes que alcança o reservatório em relação àqueles que nela ingressaram, se reduz para menores cargas hidráulicas junto aos defletores (Clay, 1995 e Bell, 1991), para menores valores de potência específica do escoamento nos tanques e para maiores profundidades do escoamento (Stuart e Mallen-Cooper, 1999). Estes parâmetros poderiam ser utilizados, por extensão, como subsídio para um possível entendimento da presença de espécies de peixes migradores nas escadas em relação às registradas a jusante.

Os dados relativos ao percentual de espécies migratórias presentes nessas escadas, em relação às espécies observadas a jusante e às variáveis hidráulicas de interesse, são apresentados na Tabela 6.49 – Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas Tipo Ranhura Vertical; e podem ser observados na Figura 6.72 – Profundidade Média x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical, na Figura 6.73 – Carga Hidráulica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical, na Figura 6.74 – Vazão pela Escada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical, na Figura 6.75 – Percentual de Vazão Total x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical e na Figura 6.76 – Potência Específica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical.

Os valores das correlações correspondentes e dos coeficientes de determinação das retas ajustadas aos diversos conjuntos de variáveis encontram-se na Tabela 6.50 – Correlação entre Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas Tipo Ranhura Vertical.

Tabela 6.49 – Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Aproveitamento	Presença de Espécies Migradoras (%)	Profundidade Média (m)	Carga Hidráulica (m)	Vazão		Potência Específica (W/m³)
				Escada (m³/s)	Total (%)	
Igarapava	83,3	2,18	0,19	1,60	0,55	152
Aimorés	50,0	1,42	0,21	0,80	0,95	161
Paranatinga II	87,5	2,18	0,22	2,61	1,15	120
C. Quebrada	54,5	1,625	0,25	1,40	1,05	167

Figura 6.72 – Profundidade Média x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Figura 6.73 – Carga Hidráulica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Figura 6.74 – Vazão pela Escada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Figura 6.75 – Percentual de Vazão Total x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Figura 6.76 – Potência Específica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Tabela 6.50 – Correlação entre Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas Tipo Ranhura Vertical

Variável	R	R ²
Profundidade Média	0,968	0,937
Carga Hidráulica	-0,467	0,218
Vazão pela Escada	0,844	0,712
Vazão Total Percentual	-0,229	0,052
Potência Específica	-0,810	0,656

Para os dados disponíveis, as variáveis que apresentam maiores coeficientes de correlação com a presença de espécies migradoras nas escadas são, em ordem decrescente, profundidade média, vazão pela escada, potência específica, carga hidráulica e vazão total percentual. As direções das correlações encontram-se em acordo com as tendências apresentadas na literatura, exceto para a vazão total percentual, em que a

presença de espécies diminui com o aumento da variável, quando se esperaria o contrário.

De forma geral, os valores observados apresentam altas dispersões em relação aos fornecidos pelas retas ajustadas, o que indica que as regressões não são representativas. Embora a profundidade do escoamento seja uma exceção, ela não seria considerada uma variável explicativa da presença de espécies nas escadas, de acordo com a literatura.

Como não se dispõe de dados do percentual de peixes das diversas espécies que alcançam o reservatório em relação aos que foram observados no canal de entrada, não é possível a avaliação deste tipo de seletividade.

Acrescentando os resultados para as escadas de peixes tipo orifício com vertedouro aos das escadas tipo ranhura vertical, os dados relativos ao percentual de espécies migratórias presentes no conjunto das escadas, em relação às observadas a jusante e às variáveis hidráulicas de interesse, são apresentados na Tabela 6.51 - Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas de Peixes.

Esses dados podem ser observados na Figura 6.77 – Profundidade Média x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes, na Figura 6.78 – Carga Hidráulica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes, na Figura 6.79 – Vazão pela Escada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes, Figura 6.80 – Percentual da Vazão Turbinada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes e na Figura 6.81 – Potência Específica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes.

Os valores dos coeficientes de correlação e de determinação das retas ajustadas aos diversos conjuntos de variáveis encontram-se na Tabela 6.52 - Correlação entre Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas de Peixes.

Tabela 6.51 - Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas de Peixes

Aproveitamento	Presença de Espécies Migradoras (%)	Profundidade Média (m)	Carga Hidráulica (m)	Vazão		Potência Específica (W/m ³)
				Escada (m ³ /s)	Total (%)	
Canoas I e II	-	1,00	0,40	1,25	0,26	410
P. Primavera	61	1,30	0,40	2,73	0,033	206
Lajeado	75	1,30	0,40	2,87	0,09	198
Igarapava	83,3	2,18	0,19	1,6	0,55	152
Aimorés	50	1,42	0,21	0,8	0,95	161
Paranatinga II	87,5	2,18	0,22	2,61	1,15	120
C. Quebrada	54,5	1,625	0,25	1,4	1,05	167

Figura 6.77 – Profundidade Média x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes

Figura 6.78 – Carga Hidráulica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes

Figura 6.79 – Vazão pela Escada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes

Figura 6.80 – Percentual da Vazão Turbinada x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes

Figura 6.81 – Potência Específica x Presença de Espécies Migradoras em Escadas de Peixes Recentes

Tabela 6.52 - Correlação entre Presença de Espécies Migradoras e Parâmetros Hidráulicos em Escadas de Peixes

Variável	R	R ²
Profundidade Média	0,843	0,646
Carga Hidráulica	-0,117	0,014
Vazão pela Escada	0,549	0,301
Vazão Total Percentual	-0,056	0,003
Potência Específica	-0,446	0,199

Para o conjunto dos dados disponíveis de escadas tipo orifício e vertedouro e ranhura vertical, observa-se o mesmo comportamento obtido anteriormente para os valores das correlações, ou seja, as variáveis que apresentam maiores coeficientes de correlação com a presença de espécies migradoras são, em ordem decrescente, profundidade média, vazão pela escada, potência específica, carga hidráulica e vazão total percentual. A registrar que os coeficientes de correlação são sensivelmente menores que aqueles das escadas de peixe tipo ranhura vertical, exceto para a profundidade média. As direções das correlações também se encontram em acordo com aquelas tendências apresentadas na literatura, exceto para a vazão total percentual.

Os valores observados apresentam dispersões ainda mais altas em relação aos fornecidos pelas retas ajustadas, o que indica que as regressões não são representativas.

A baixa correlação entre a presença de espécies e o percentual entre as vazões pela escada e turbinada sugere, também, que a presença de comporta de regulação de velocidades não exerce uma influência sensível na atração de peixes ao interior das escadas.

Os resultados obtidos para as regressões lineares parecem indicar que variáveis hidráulicas não explicam a presença de peixes no interior das escadas. Contudo, tal conclusão pode ser prematura e equivocada.

O mais provável é que os dados disponíveis sejam insuficientes ou inadequados à realização de uma análise correta, devido à pequena amostragem e por terem sido levantados com objetivo distinto. Nesse sentido, fica evidente a precariedade dos dados específicos referentes ao comportamento de diferentes espécies de peixes em relação aos sistemas de transposição de peixes que possam constituir uma base sólida, tanto para o projeto de engenharia, quanto para a avaliação de aspectos de ictiofauna.

Com relação aos sistemas de transposição de peixes analisados, de forma geral, não se dispõe de dados de ictiofauna relativos aos seguintes aspectos: (i) percentual de indivíduos, por espécie, presentes a jusante e que ingressaram nas escadas; (ii) condições hidráulicas e fatores abióticos associados ao ingresso na escada, tais como vazão pela escada e pelo sistema de atração, quando houver; vazão liberada pela usina, velocidade do escoamento no canal de entrada, temperatura da água, turbidez ou transparência, etc; (iii) o comportamento de indivíduos no interior da escada, considerando tempo de deslocamento, tempo de permanência em tanques de descanso, horários preferenciais de movimentação, etc, e fatores abióticos correspondentes; e (iv) percentual de indivíduos que lograram transpor a escada; dentre outros aspectos, tanto para as diversas espécies de interesse quanto para indivíduos de diferentes tamanhos dentro da mesma espécie ou ainda para indivíduos da mesma espécie em diferentes épocas de migração.

Mesmo com relação aos aspectos de engenharia, não se dispõe de informações relativas à operação dos sistemas de transposição. Assim, embora as escadas do tipo orifício e vertedouro possuam comportas no canal de saída, para a regulação da vazão, os dados relativos à operação não estão disponíveis, se é que existem. O mesmo ocorre com as escadas tipo ranhura vertical, com relação à operação das vazões do sistema de água auxiliar ou de atração, e com as comportas de regulação de velocidade no canal de entrada. Desta forma, não se sabe se as escadas estão sendo operadas de acordo com as premissas e critérios de projeto, do ponto de vista hidráulico.

Pelas dificuldades descritas, conclui-se que o projeto das escadas tem sido feito sem o devido conhecimento das características biológicas das espécies que deveriam utilizá-lo.

Tal conhecimento, que pode ser denominado de base biológica dos sistemas de transposição, de acordo com Kynard (1993), é fundamental para a eficiência dos sistemas de transposição de peixes, e inclui diversos aspectos tais como (i) as habilidades natatórias, em termos de velocidades mínimas de atração e velocidades máximas capazes de serem superadas em curtos intervalos de tempo; (ii) características migratórias, compreendendo a distribuição temporal e espacial dos movimentos migratórios específicos das diferentes espécies, meses do ano e períodos dos dias em que são feitas as migrações, e (iii) comportamento no canal de fuga e nas proximidades da tomada d'água de usinas, particularmente frente aos dispositivos de transposição.

Ainda de acordo com Kynard (1993), entender o comportamento dos peixes em relação aos mecanismos de transposição é fundamental para projetar, posicionar e operar com sucesso tais estruturas.

Vários aspectos do comportamento como capacidade natatória, resposta a estímulos, agregação e respostas a fatores ambientais físicos (por exemplo, iluminação, som, profundidade e velocidade da água), biológicos (competição por espaço e resposta a predadores, por exemplo) e químicos, influenciam a capacidade dos peixes de encontrarem a entrada do sistema e passarem por ela.

Pelo exposto, fica evidente a necessidade de ampliar o conhecimento sobre o comportamento de peixes neotropicais em relação aos sistemas de transposição.

Nesse sentido, se destaca a urgência da realização de estudos de monitoramento de ictiofauna específicos, tais como: de distribuição de indivíduos no canal de fuga de usinas, com a utilização de telemetria (rádio

ou acústica); de sonares; de avaliação de resposta de indivíduos a vazões de atração, através de marcação com marcas convencionais, liberação no canal de fuga e captura no canal de entrada da escada; de avaliação do trânsito de indivíduos no interior da escada, com a utilização de marcas do tipo PIT (*passive integrated transponder*); etc.

Para possibilitar a aquisição desse conhecimento, a operação dos sistemas de transposição de peixes deve ser feita em caráter experimental, com a avaliação, por biólogos e engenheiros hidráulicos, das respostas comportamentais obtidas, e a introdução de ajustes e modificações, quando necessário.

7 CONCLUSÕES

Uma decisão bem fundamentada quanto à implantação ou não de sistemas de transposição de peixes requer o conhecimento e a compreensão das migrações ascendentes e descendentes de peixes em seus vários estágios de vida, e dos efeitos causados por barragens sobre o comportamento reprodutivo, sobre sítios de reprodução e alimentação, e sobre a sua dinâmica de movimentação, particularmente, de ovos, larvas e alevinos.

Diante da precariedade dos dados e informações disponíveis sobre sistemas de transposição de peixes, principalmente no que diz respeito a aspectos de ictiofauna, sobressai a necessidade de realização de estudos e monitoramentos específicos, sistemáticos e de maior abrangência, que permitam o estabelecimento de bases sólidas para a definição das práticas de conservação e manejo adequadas a cada empreendimento.

A ampliação do conhecimento dos aspectos de ictiofauna, particularmente dinâmicas migratórias, torna-se ainda mais relevante na medida em que começam a ser construídos aproveitamentos hidrelétricos na região amazônica, com sua mega diversidade de espécies de peixes, onde os impactos ainda não podem ser cientificamente avaliados.

É também evidente a urgência de estudos migratórios específicos para avaliar os casos em que a transposição de peixes para jusante seria necessária, e, nesta hipótese, de estudos que possibilitem o desenvolvimento de soluções apropriadas. Tais soluções devem permitir a passagem segura de peixes, em diferentes estágios de vida, seja por sistemas de contorno (*bypasses*) eficientes, ou por turbinas e vertedouros, com taxas de mortalidade consideradas aceitáveis.

Com relação à proteção de peixes em turbinas, as grades com telas metálicas e as barreiras comportamentais sonoras e elétricas aparentam ser,

de acordo com a literatura, as soluções mais promissoras para reduzir ou impedir a entrada de peixes em tubos de sucção de turbinas.

Uma grade com painéis giratórios múltiplos, cuja abertura entre os painéis seria reduzida em proporção direta à redução de vazão da turbina, conforme proposto pelo autor neste trabalho, que poderia ser instalada na saída do tubo de sucção durante parada temporária da máquina, anterior à parada programada, oferece, provavelmente, melhor resposta que as grades convencionais, reduzindo as incertezas associadas ao momento de início da descida e ao tempo transcorrido até ao total bloqueio do tubo de sucção, bem como ao comportamento dos peixes durante a redução da vazão das máquinas.

Acredita-se que as barreiras comportamentais possam oferecer soluções razoavelmente eficazes, sem interferências com a operação da usina e, no caso de barreiras sonoras, os resultados seriam obtidos com baixo custo, e em prazos relativamente curtos, o que precisa ser confirmado mediante avaliação das respostas de indivíduos da espécie mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*) ou de outras espécies do mesmo gênero, por meio de pesquisas de campo direcionadas para esta finalidade.

No que concerne à proteção de peixes na região de restituição do escoamento de vertedouros, após o fechamento das comportas, nos casos particulares em que a restituição ocorre em leitos antigos de rios e que ficam secos na maior parte do tempo, a implantação de canais de restituição constitui uma solução permanente e eficaz, tornando sua utilização altamente recomendável. Dada a complexidade das condições dos escoamentos provenientes de vertedouros, recomenda-se que o projeto desses canais seja confirmado por estudos hidráulicos em modelo reduzido.

Os canais de restituição, além de atenderem os objetivos propostos de eliminação do aprisionamento de peixes a jusante, e da eventual mortalidade, apresentam também benefícios para a operação do aproveitamento, possibilitando o fechamento das comportas do vertedouro

sem restrições e sem a necessidade de mobilização de equipes de resgate de peixes.

O desenvolvimento de projetos de sistemas de transposição de peixes, adequados às espécies neotropicais, envolve variáveis biológicas complexas, tais como características natatórias, comportamento face a estruturas hidráulicas, dentre outros, para diferentes espécies. A compreensão destas variáveis, ainda não disponível, só será construída através da realização de estudos sistemáticos nesta área.

Com relação às escadas de peixes tipo ranhura vertical, os estudos hidráulicos realizados em modelo reduzido permitiram a caracterização dos principais parâmetros hidráulicos do escoamento, no interior dos tanques e junto aos defletores, tanto para as alternativas com seção transversal retangular, usualmente utilizada, quanto para a seção trapezoidal, proposta neste trabalho.

O comportamento do escoamento no interior dos tanques mostrou-se satisfatório, para as alternativas estudadas, não se tendo observado, ao final dos estudos de definição da geometria dos tanques trapezoidais, agitação excessiva do escoamento no interior dos tanques.

As constantes obtidas pelo autor para a formulação adimensional linear da curva de descarga dos defletores de escadas com seção trapezoidal, são consistentes com os resultados observados, o que permite sua adoção em aplicações com geometrias similares, dentro da faixa dos valores experimentais. É recomendável, todavia, a realização de ensaios sistemáticos com tanques de seção transversal trapezoidal, para uma mesma geometria de defletor e várias declividades, para a confirmação das equações apresentadas e os limites de utilização, de forma ampla.

As escadas de peixes com seção transversal trapezoidal estudadas apresentam boas condições de escoamento e representam uma solução tecnicamente viável e com menores custos em relação às escadas com

seção transversal retangular. Assim, sua utilização pode ser atraente, particularmente no caso de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

Finalmente, cabe destacar a relevância de que os estudos, pesquisas e monitoramentos realizados nas áreas de hidráulica e ictiofauna sejam desenvolvidos em conjunto por engenheiros e biólogos, para que os dados e as informações já disponíveis sobre o comportamento de peixes neotropicais em relação às diferentes estruturas hidráulicas de aproveitamentos hidrelétricos, bem como o conhecimento mais abrangente ainda por se construir, deixe de ser utilizado de forma limitada e estanque, mas passe a assumir um caráter mais amplo e integrado. Somente assim será possível conciliar as justas demandas por aproveitamento de recursos hídricos e por conservação de ictiofauna, de forma responsável, para a construção de uma sociedade mais justa.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; FERNANDEZ, D. R.; SUZUKI, H. I. Efficiency of fish ladders for Neotropical Ichthyofauna. **River Research and Applications**, **18**: p. 299-306, 2002.

AGOSTINHO, A. A. **Fish passages as a fish conservation tool**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 02 ago. 2007. Palestra proferida no International Symposium on Fish Passages in South America, Lavras, 2007.

AGOSTINHO, A. A.; MARQUES, E. E.; AGOSTINHO, C. S.; ALMEIDA, D. A.; OLIVEIRA, R. J.; MELO, J. R. B. Fish ladder of Lajeado Dam: migrations on one-way routes? **Neotropical Ichthyology**, **5(2)**: p. 121-130, 2007.

AGOSTINHO, C. S.; AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F.; ALMEIDA, D. A.; MARQUES, E. E. Selectivity of fish ladders: a bottleneck in Neotropical fish movement. **Neotropical Ichthyology**, **5(2)**: p. 205-213, 2007a.

AGOSTINHO, C. S.; PEREIRA, C. R.; OLIVEIRA, R. J.; FREIRAS, I. S.; MARQUES, E. E. Movements through a fish ladder: temporal patterns and motivations to move upstream. **Neotropical Ichthyology**, **5(2)**: p. 161-167, 2007b.

BANYS, R.; LEONARDSON, K. R. Fishways at Dams. In: DAVIS, C. V.; SORENSEN, K. E. (eds.) **Handbook of Applied Hydraulics**. Ed. McGraw-Hill, Section 23, 1969. Paginação Irregular.

BARRY, T. ; KYNARD, B. Attraction of Adult American Shad to Fish Lifts at Holyoke Dam, Connecticut River. **North American Journal of Fisheries Management**, **6**: p. 233-241, 1986.

BATES, K. **Fishway Guidelines for Washington State, Draft Report**. Washington Department of Fish and Wildlife. 2000. 57p. Disponível em: <<http://wdfw.wa.gov/hab/ahg/fishguid.pdf>>.

BARTHEM, R.; GOULDING, M. The catfish connection: ecology, migration, and conservation of Amazon predators. New York: Columbia University Press, 1997. 144 p.

BEITZ, E. Fishways to Complement Water Storages. In: ODEH, M. (ed.) **Advances in Fish Passage Technology: Engineering Design and Biological Evaluation**. Bethesda, Maryland: A. F. S., p. 115-128, 2000.

BELAUD, A.; LABAT, R; TRIVELLATO, D.; TISON, G. Experimentations Hydrauliques et Ichtyologiques d'un Système de Piégeage Automatique des Poissons Migrateurs à Golfech. **La Houille Blanche**, nº 1/2: p. 73-80, 1987.

BELL, M. C. **Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria**. Oregon: U.S. Army Corps of Engineers, 1991. Paginação irregular.

BERNACSEK, G. M. Guidelines for dam design and operation to optimize fish production in impounded river basins (based on a review of the ecological effects of large dams in Africa). **CIFA Tech Pap, 11**: p. 1-98, 1984.

BIZZOTTO, P. M. **Trânsito de Peixes na Escada da UHE Igarapava, Rio Grande, Alto Paraná**. Tese de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. 52 p.

BOUBÉE, J.; HARO, A. Downstream Migration and Passage Technologies for Diadromous Fishes in the United States of America and New Zealand: Tales from Two Hemispheres. In: **Proceedings of the Canberra Workshop on Downstream Movement of Fish in the Murray-Darling Basin**, p. 24-31, 2003. Disponível em: <www.mdbc.gov.au/_data/page/509/Jacques_Boubee_&_Alex_Haro.pdf>.

BORGHETTI, J. R.; NOGUEIRA, V. S. G.; BORGHETTI, N. R. B.; CANZI, C. The fish ladder at the Itaipu Binational hydroelectric complex on the Paraná river, Brazil. **Regulated Rivers**, **9**: p. 127-130, 1994.

BRITTO, S. G. C.; SIROL, R. N. Transposição de Peixes como Forma de Manejo: As escadas do Complexo Canoas, Médio Rio Paranapanema, Bacia do Alto Paraná. In: NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R.; JORCIN, A. (orgs). **Ecologia de Reservatórios, Impactos Potenciais, Ações de Manejo e Sistemas em Cascata**. São Carlos: RiMa. p. 285-304, 2006.

BROOKES, A.; SHIEDS JR., F. D. River Channel Restoration – Guiding Principles for Sustainable Projects. Chichester: Ed. Wiley, 1996. 433 p.

CANADIAN ELECTRICITY ASSOCIATION. Considering Fish and Fish Habitat in Existing Hydroelectric Operations and Maintenance: Electricity Industry Practices. Ottawa, 2001. 70 p. Disponível em: <www.canelect.ca/en/Pdfs/RevCEA.pdf>.

CADA, G. F. The Development of Advanced Hydroelectric Turbines to Improve Fish Passage Survival. **Fisheries**, **26 (9)**: p. 14-23, 2001.

COUTANT, C. C.; WHITNEY, R. R. Fish behaviour in relation to passage through hydropower turbines: a review. **Transactions of the American Fisheries Society**, **129**: p. 351-380, 2001.

CLAY, C. H. **Design of fishways and other fish facilities**. 2nd edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995. 248 p.

DINGLE, H. **Migration: The biology of Life on the Move**. New York: Oxford University Press, 1996. 480 p.

ESPÍRITO SANTO. **Decreto Normativo 4.489-N, de 15 de julho de 1999**. Regulamenta a implantação de mecanismos de transposição de peixes nos cursos de rios do estado do Espírito Santo. 1999.

FAO/DVWK. Fish passes – design, dimensions and monitoring. Roma, 2002. 119p.

FCTH. UHE Jaguará, Estudos da Restituição do Vertedouro, Modelo Reduzido Tridimensional, Escala 1:80, Relatório Final. São Paulo, 2001.

FCTH. UHE Itutinga, Modelo Reduzido Tridimensional, Escala 1:50, Relatório Final. São Paulo, 2002.

FCTH. AHE Aimorés, Transposição de Peixes, Modelo Reduzido Tridimensional, Escala 1:8,6. Relatório Final. São Paulo, 2005a. 38 p.

FCTH. **PCH Paranatinga, Modelo Reduzido da Escada para Peixes, Escala 1:7**, Nota Técnica nº 1: Otimização do Projeto, Caracterização do Escoamento. São Paulo, 2005b. 7 p.

FCTH. **PCH Paranatinga, Modelo Reduzido da Escada para Peixes, Escala 1:7**, Relatório Parcial nº 1, Alternativa 1, Canal Declividade 4,5%: Otimização do Projeto, Caracterização do Escoamento. São Paulo, 2006a. 32 p.

FCTH. **PCH Paranatinga, Modelo Reduzido da Escada para Peixes, Escala 1:7**, Relatório Parcial nº 2, Alternativa 2, Canal Declividade 8,0%: Otimização do Projeto, Caracterização do Escoamento. São Paulo, 2006b. 28 p.

FONTENELE, O. Escadas de peixes nos açudes do nordeste brasileiro. **Bol. Soc. Cearense Agronom**, 2: p. 11-21, 1961.

FONTES JR., H. M.; FERNANDEZ, D. R.; FIORINI, A. S. New Channel Provides Fish Passage at Itaipu Dam. **Hydro Review Worldwide**, 2004 (7): p. 18-23, 2004.

GODINHO, A. L. E os peixes de Minas em 2010? **Ciência Hoje**, 16, 91: p. 44-49, 1993.

GODINHO, A. L.; KYNARD, B. Fishways for Brazilian fishes. In: **Proceedings of International Symposium on Fish Passages in South America**. Lavras: UFLA, p.74-81, 2007.

GODINHO, A. L.; KYNARD, B. Migratory fishes of Brazil: life history and fish passage needs. **River Research and Applications**, 2008. No prelo.

GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L.; FORMAGIO, P. S.; TORQUATO, V. C. Fish ladder efficiency in a south-east Brazilian river. **Ciência e Cultura**, **43(1)**: p. 63-66, 1991.

GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L. Ecology and conservation of fish in southeastern Brazilian river basins submitted to hydroelectric impoundments. **Acta Limnologica Brasiliensia**, **5**: p. 187-197, 1994.

GODOY, M. P. Locais de Desova de Peixes num Trecho do Rio Mogi Guaçu, Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Biologia**, **14(4)**: p. 375-396, 1954.

GODOY, M. P. Age, Growth, Sexual Maturity, Behaviour, Migration, Tagging and Transplantation of the Curimatá (*Prochilodus Scrofa*, Steindachner, 1881) of the Mogi Guassu River, São Paulo State, Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, **31(3)**: p. 447-476, 1959.

GODOY, M. P. **Peixes do Brasil**. Piracicaba: Franciscana, 1975. 4v.

GODOY, M. P. **Aqüicultura**. Florianópolis: ELETROSUL, 1985. 77p.

HARDEN JONES, F. R. **Fish Migration**. London: Edward Arnold, 1968. 325 p.

HARVEY, B.; CAROLSFELD, J. Introduction: Fishes of the Floods. In: CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C.; BAER, A. (eds.) **Migratory**

Fishes of South America: Biology, Fisheries and Conservation Status.

Washington, DC: IBRD; Victoria, BC: WFT; Ottawa: IDRC, p.5-18, 2003.

HAWKINS, A.D. Underwater Sound and Fish Behaviour. In: PICHER, T. J. (ed.) **The Behaviour of Teleost Fishes**. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, p. 14-151, 1986.

HÍDRICON. **UHE Itutinga, Vertedouro: Estudo do Canal de Restituição**, Relatório ITT-VT-RE-01. Belo Horizonte, 2000.

HÍDRICON. **AHE Aimorés, Sistema de Transposição de Peixes**. Projeto Executivo. Belo Horizonte, 2003.

HÍDRICON. PCH Paranatinga II, Sistema de Transposição de Peixes, Projeto Básico. Relatório PRN-TP-RE-001. Belo Horizonte, 2004.

HÍDRICON. PCH Paranatinga II, Sistema de Transposição de Peixes, Projeto Básico. Relatório PRN-TP-RE-002. Belo Horizonte, 2006.

HOFFMANN, A. C.; ORSI, M. L.; SHIBATTA, O. A.. Diversidade de peixes do reservatório da UHE Escola de Engenharia Mackenzie (Capivara), Rio Paranapanema, bacia do alto rio Paraná, Brasil, e a importância dos grandes tributários na sua manutenção. **Iheringia Sér. Zool., Porto Alegre, 95(3): 319-325, 2005.**

HOLOS. AHE Aimorés, Plano de Controle Ambiental, Programa de Conservação da Ictiofauna, Subprograma: Estudos para Subsidiar a Execução do Mecanismo de Transposição para Peixes. Relatório Final. Nova Lima, 2003. 32 p.

JUNGWIRTH, M.; SCHMUTZ, S.; WEISS, S. **Fish Migration and Fish Bypasses**. London: Fishing News Books, 1998. 448 p.

JUNHO, R. A. C. Parâmetros Hidráulicos Teóricos do Dispositivo para Transposição por Peixes da UHE Igarapava, Brasil. In: **Proceedings of the XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica**. Cordoba, Argentina, 2000.

JUNHO, R. A. C.; VIEIRA, E. C .F. Estudos Hidráulicos do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Itutinga In: **Anais do XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Salvador, 2003.

JUNHO, R. A. C. Recent fish passes at three hydroelectric dams in Southeastern Brazil. In: **Proceedings of the 5th International Symposium on Ecohydraulics**. Madrid, p. 1041-1045, 2004.

JUNHO, R. A. C.; TAMADA, K. Estudos Hidráulicos em Modelo Reduzido de Escadas de Peixes tipo Vertical Slot. In: **XXI Congresso LatinoAmericano de Hidráulica**, São Pedro, Província de São Paulo, Brasil, CD-ROM: G088, 2004.

JUNHO, R. A. C.; TAMADA, K.; OLIVEIRA, F. T. R. Estudos Hidráulicos do Canal de Restituição do Vertedouro da UHE Jaguará. In: **XXI Congresso LatinoAmericano de Hidráulica**, São Pedro, Província de São Paulo, Brasil, CD-ROM: G087, 2004a.

JUNHO, R. A. C.; TAMADA, K.; VIEIRA, E. C. F.; OLIVEIRA, F. T. R. Spillway Exit Channels in Two Existing Hydroelectric Dams in Brazil. In: **Proceedings of the 5th International Symposium on Ecohydraulics**. Madrid, p. 1036-1040, 2004b.

JUNHO, R. A. C.; CARNEIRO, M.; FERREIRA, F. A. M. Vertical Slot Fishways at Three Hydroelectric Dams in Brazil. In: **Proceedings of the International Symposium on Fish Passages in South America**. Lavras: UFLA, p. 13-19, 2007.

KAMULA, R. **Flow over weirs with application to fish passage facilities**. Finland: University of Oulu, 2001. 113 p. Disponível em: <<http://herkules.oulu.fi/isbn9514259777/>>

KATOPODIS, C. **Introduction to Fishway Design**. Unpublished working document, 1992. 70 p. Disponível em: <www.wra.gov.tw/public/Attachment/41110254871.pdf>.

KYNARD, B. E. Anadromous Fish Behaviour Important for Fish Passage. In: **Proceedings of the Workshop on Fish Passage at Hydroelectric Developments, 1991**, St. John's Newfoundland: Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences, No. 1905, p. 95-104, 1993.

KYNARD, B. Review of Migration, Research Methods, and Passage for Downstream Migrant Fishes in the Northeast USA. In: **Proceedings of the Canberra Workshop on Downstream Movement of Fish in the Murray-Darling Basin**. p.15-23, 2003. Disponível em: <www.mdbc.gov.au/_data/page/509/Boyd_Kynard.pdf>

KYNARD, B.; O'LEARY, J. Behavioral Guidance of Adult American Shad Using Underwater AC Electrical and Acoustic Fields In: **Proceedings of the International Symposium on Fishways '90 in Gifu, Japan**. p. 131-135, 1990.

LARINIER, M. Les passes à poissons: méthodes et techniques générales. **La Houille Blanche**, nº 1/2, p. 51-57, 1987.

LARINIER, M.; TRIVELLATO, D. Etude sur Modèle Réduit de la Passe à Poissons du Barrage de Bergerac sur la Dordogne. **La Houille Blanche**, nº 1/2, p. 135-142, 1987.

LARINIER, M. Environmental Issues, Dams and Fish Migration. In: MARMULLA, Gerd (ed.) **Dams, fish and fisheries: Opportunities, challenges and conflict resolution**. FAO Fisheries Technical Paper 419, p. 45-89, 2001.

LOPES, R. E.; MARTINEZ, C. B.; GODINHO, A. L. O uso de barreiras elétricas no tubo de sucção de UHE'S para impedimento da entrada de

peixes nas máquinas hidráulicas In: **Anais do II Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais**. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, v. 1, p. 187-194, 2002.

MAKRAKIS, S.; MAKRAKIS, M. C.; WAGNER, R. L.; DIAS, J. H. P.; GOMES, L. C. Utilization of the fish ladder at the Engenheiro Sergio Motta Dam, Brazil, by long distance migrating potamodromous species. **Neotropical Ichthyology**, **5(2)**: p. 197-204, 2007.

MARTINS, S. L. **Sistemas para Transposição de Peixes Neotropicais Potamódromos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. 468 p. 2v.

MATUS, Z. R. Fish Friendly Designs. **International Water Power and Dam Construction**. p. 30-31. September 1998.

MINAS GERAIS. 1997. **Lei nº 12.488, de 09 de abril de 1997**. Torna obrigatória a construção de escadas de peixes de piracema em barragem edificada no Estado.

MIYAMOTO, S. I.; TAKI, M.; WATANABE, M.; KOMURA, S. Design Method of Boulders Protruded Slope Fishways. In: **Proceedings of the International Symposium on Fishways '95 in Gifu, Japan**, p. 101-112, 1995.

MOFFITT, C. M.; KYNARD, B.; RIDEOUT, S. G. Fish passage facilities and anadromous fish restoration in the Connecticut river basin. **Fisheries**, **7(6)**: p. 2-11, 1982.

MORING, J. R. Anadromous stocks. In: KOHLER, C. C.; HUBERT, W. A. (eds.) **Inland fisheries management in North America**. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, p. 553-580, 1993.

MÜLLER, I. I.; GILBERTONI, R. F. C.; FRIEDRICH, M. F.; FIORINI, A. Estudo do Comportamento Hidráulico do Canal de Piracema da Usina

Hidrelétrica de Itaipu. In: **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Curitiba, 2003.

NORTHCOTE, T. G. Migratory Strategies and Production in Freshwater Fishes. In: GERKING, S. D. (ed.) **Ecology of freshwater fish production**. Oxford: Blackwell, p. 326-359, 1978.

ODEH, M.; HARO, A. Developments in Fish Passage Engineering and Biology. In: ODEH, M. (ed.) **Advances in Fish Passage Technology : Engineering Design and Biological Evaluation**. Bethesda, Maryland: AFS, p. 1-11, 2000.

OTA. **Fish Passage Technologies: Protection at Hydropower Facilities**, OTA-ENV-641. Washington,DC: U.S. Government Printing Office, 1995. Disponível em: <www.princeton.edu/~ota/disk1/1995/9519/9519.pdf>

PASCHE, E.; DAUWE, L.; BLANK, M. New Design Principles of Fishways. In: **Proceedings of the International Symposium on Fishways '95 in Gifu Japan**, p. 113-120, 1995.

PARASIEWICZ, P. Fish Pass Facilities as a River Restoration Measure In: **Fish Passageways and Bypass Facilities - East Course**, Hadley, MA: U.S.F.W.S., July 10-14, 2000. Paginação Irregular.

PATRICK, P. H.; CHRISTIE, A. E.; SAGER, D.; HOCUTT, C.; STAUFFER JR., J. Responses of Fish to a Strobe Light/Air-Bubble Barrier. **Fisheries Research**, 3: p.157-172, 1985.

PAVLOV, D. S. Structures Assisting the Migrations of Non-Salmonid Fish: U.S.S.R.. **FAO Fisheries Tech. Pap. No. 308**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1989. 97 p.

PELICICE, F. M.; AGOSTINHO, A. A. Fish Passage Facilities as Ecological Traps in Large Neotropical Rivers. **Conservation Biology**, 22(1): p. 180-188. 2008.

PETREIRE JR, M. Migraciones de peces de água dulce en America Latina: Algunos comentários. **Copescal Documento Ocadional**, 1. 1985.

POMPEU, P. S.; FERREIRA, V. P.; SILVA, H. F.; MARTINEZ, C. B. Evaluation of Downstream Fish Passage Through Santa Clara Power Plant Dam, Minas Gerais State, Brazil. In: **Proceedings of the 5th International Symposium on Ecohydraulics**. Madrid: v. 2, p. 999-1003, 2004.

QUINN, D. Fish Passage Design Notes In: **Fish Passageways and Bypass Facilities – East Course**. Hadley, MA: U.S.F.W.S., July 10-14, 2000.

QUIRÓS, R. Structures Assisting the Migrations of Non-Salmonid Fish: Latin America. **FAO-COPESCAL Tech. Doc. No. 5**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1988. 50 p.

RAINEY, W.S.. Recent Adult Fish Passage Projects on Tributaries of the Columbia River In: **Proceedings of the 10th American Fisheries Society Symposium**, p. 278-288, 1991.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C. Hydraulics of Denil Fishways. **Journal of Hydraulic Engineering**, **110 (9)**: p. 1219-1233, 1984.

RAJARATNAM, N.; VAN DER VINNE, G.; KATOPODIS, C. Hydraulics of Vertical Slot Fishways. **Journal of Hydraulic Engineering**, **112 (10)**: p. 909-927, 1986.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; MAINALI, A. Plunging and Streaming Flow in Pool and Weir Fishways. **Journal of Hydraulic Engineering**, **114 (8)**: p. 939-944, 1988.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; MAINALI, A. Pool-Orifice and Pool-Orifice-Weir Fishways. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **16**: p. 774-777, 1989.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C. Hydraulics of Steeppass Fishways. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **18**: p. 1024-1032, 1991.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; SOLANKI, S. New Designs for Vertical Slot Fishways. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **19**: p. 402-414, 1992.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; PACCAGNAN, R. Field Studies of Fishway in Alberta. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **19**: p. 627-638, 1992.

RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; WU, S.; SABUR, M. A. Hydraulics of Resting Pools for Denil Fishways. **Journal of Hydraulic Engineering**, **123** (7): p. 627-638, 1997.

SÃO PAULO. **Lei nº 9.798 de 7 de outubro de 1997**. Dispõe sobre a construção de escadas de peixes em barragens edificadas em cursos d'água de domínio do estado.

SATO, Y.; OSÓRIO, F. M. F. A pesca na região de Três Marias, MG em 1986. In: Associação Mineira de Aquicultura **Coletânea de resumos dos encontros da Associação Mineira de Aquicultura**: 1982-1987. Brasília: CODEVASF, p. 91-92, 1988.

SATO, Y.; BAZZOLI, N.; RIZZO, E.; BOSCHI, M. B.; MIRANDA, M. O. T. Impacto a Jusante do Reservatório de Três Marias sobre a Reprodução do Peixe Reofílico Curimatá-Pacu (*Prochilodus argenteus*) In: GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L. (orgs.) **Águas, Peixes e Pescadores do São Francisco das Minas Gerais**. Belo Horizonte: PUC Minas, p. 327-345, 2003. Disponível em: <www.sfrancisco.bio.br>.

SCHIECHTL, H. M.; STERN, R. Water Bioengineering Techniques for Watercourse, Bank and Shoreline Protection. Ed. Blackwell Science, 1994.

SILVA, L. G. M.; SOARES, L. G.; MARTINEZ, C. B. Uso de Luz Estrooscópica para repulsão de peixes em áreas de risco em usinas hidrelétricas In: **Anais do XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Editora do SNPTEE, v. 1, p. 1-8, 2007.

STEINER, H. A.. Natural-like Design for Fishways at the Drau River in Austria, Design Criteria and Results of Measurements. In: **Proceedings of the International Symposium on Fisways `95 in Gifu, Japan**, p. 294-301, 1995.

STUART, I. G.; MALLIN-COOPER, M. An assessment of the effectiveness of a vertical slot fishway for non-salmonid fish at a tidal barrier on a large tropical/subtropical river. **Regulated Rivers: Research and Management**, **15 (6)**, p. 575-590, 1999

THERRIEN, J.; BOURGEOIS, G.. **Fish Passage at Small Hydro Sites**. Report by Genivar Consulting Group for Canmet Energy Technology Centre, Ottawa, 2000.

TOWNSEND, S. A.; EDWARDS, C. A. A fish kill event, hypoxia and other limnological impacts associated with early wet season flow into a lake on the Mary River floodplain, tropical northern Australia. **Lakes and Reservoirs: Research and Management**, **8**: p. 169-179, 2003.

TURNPENNY, A. W. H. Mitigation measures for migratory fish at hydro plants. **Hydropower & Dams**, **5**: p. 83-88, 1999.

VON GUNTEN, G. H.; SMITH, H. A.; MACLEAN, B. M. Fish Passage Facilities at McNary Dam. **Journal of Power Division, ASCE**, **82 (2)**: p. 1-27, 1956.

VONO, V.; BIZZOTTO, P. M.; GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L.; KYNARD, B. Fish Passage at the Igarapava Fish Ladder, River Grande, Brazil. In:

Proceedings of the VI International Congress on the Biology of Fish. Manaus, p. 179-182, 2004.

VONO, V.; GODINHO, A. L.; GODINHO, H. P. Fishway effect on the fishes in a Brazilian reservoir. In: **Proceedings of International Symposium on Fish Passages in South America.** Lavras: UFLA, p. 82-86, 2007.

WELCOMME, R. L. **River fisheries.** FAO Technical Paper, 262. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 330 p.

WHITE, D. K.; PENNINO, B. J. Connecticut River Fishways: Model Studies. **Journal of the Hydraulics Division**, **106** (): p. 1219-1233, 1980.

WU, S.; RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C. Structure of Flow in Vertical Slot Fishway. **Journal of Hydraulic Engineering**, **125** (4): p. 351-360, 1999.

ZIMA, L.; ACKERMANN, N. L. Wave Generation in Open Channels by Vortex Shedding from Channel Obstructions. **Journal of Hydraulic Engineering**, **128** (6): p. 596-603, 2002.

ZITEK, A.; SCHMUTZ, S., Efficiency of Nature Like Fish Passes and their Role for the Integrity of Running Waters. In: **3rd Thematic Network Workshop on Small Hydropower: SHP and Fish Ladders.** Vienna, 2004. Disponível em: <http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/workshops/vienna/efficiency_of_fish_ladders.pdf>