



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EFEITO DE CAMPO ELÉTRICO NO**  
**COMPORTAMENTO DE PEIXES BRASILEIROS E**  
**ESTUDO DE BARREIRA ELÉTRICA COMO**  
**MECANISMO DE CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DE**  
**PEIXES**

**FLÁVIO NAKAMURA ALVES SILVA**

**Belo Horizonte, 18 de maio de 2010**

Flávio Nakamura Alves Silva

**EFEITO DE CAMPO ELÉTRICO NO  
COMPORTAMENTO DE PEIXES BRASILEIROS E  
ESTUDO DE BARREIRA ELÉTRICA COMO  
MECANISMO DE CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DE  
PEIXES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia

Orientador: Carlos Barreira Martinez

PPGEE – UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2010



**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3409-5465 - Fax.: +55 31 3409-5480

www.ppgee.ufmg.br - E-mail: wmaster@cpdee.ufmg.br

**EFEITO DE CAMPO ELÉTRICO NO  
COMPORTAMENTO DE PEIXES BRASILEIROS E  
ESTUDO DE BARREIRA ELÉTRICA COMO  
MECANISMO DE CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DE  
PEIXES**

**FLÁVIO NAKAMURA ALVES SILVA**

Dissertação defendida e aprovada em 31, de maio de 2010, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Elétrica**", na área de concentração de "**Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia**".

---

**Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez – Universidade Federal de Minas Gerais –  
Orientador**

---

**Prof. Dr. Jaime Arturo Ramirez – Universidade Federal de Minas Gerais –  
Examinador**

---

**Prof. Dr. José Osvaldo – Universidade Federal de Minas Gerais – Examinador**

---

**Prof. Dr. Paulo dos Santos Pompeu – Universidade Federal de Lavras –  
Examinador**

Aos meus pais, irmãos  
e à Roberta

## Agradecimentos

A Deus pela sabedoria, saúde e pela simples e extraordinária oportunidade de viver.

Aos meus pais pela corujisse! À minha mãe pelo apoio incondicional, por ter me educado com a sabedoria e a paciência oriental que só ela tem e pelo amor que recebi desde minhas primeiras horas de vida. A meu pai por ter sido a primeira pessoa a me fazer gostar das ciências exatas, pelo amor e por sempre ter sido um exemplo de homem, profissional e principalmente por me ensinar o que é ser pai. Agradeço novamente a Deus por ter me dado a honra de ter estas duas extraordinárias pessoas como pais, amigos e conselheiros.

À Roberta pela enorme paciência e compreensão. O amor, o carinho e o incentivo que recebi desde os primeiros semestres da graduação foram os grandes responsáveis por eu ter chegado até aqui. Sem você tudo teria sido muito mais complicado. Obrigado por me amar e por acreditar em mim!

Ao meu irmão por ter sido meu grande companheiro e amigo desde nossa infância. À Déa pelo amor que sempre demonstra nos poucos momentos que passamos juntos e pela eterna torcida.

Ao Martinez, grande homem, professor, mestre e amigo. Por ter me confiado esta incrível e misteriosa tarefa e por ter me ensinado a ser um sonhador e acreditar naquilo que ainda podemos ser e realizar.

Ao Brener pela valiosíssima e imprescindível ajuda nos trabalhos experimentais, pelo constante zelo com o bem-estar dos peixes e pela divertida parceria nas pescarias do meio de semana.

Ao Torinha pela extra-oficial co-orientação que foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Suas idéias, questionamentos e as várias horas que passamos juntos pensando sobre a idéia maluca de dar choque em peixes foram o alicerce de todo o trabalho.

Ao Luizão pelo conhecimento que suguei durante estes anos. Sei que não foi fácil explicar biologia, ecologia e comportamento animal para um engenheiro, por isso agradeço imensamente a sua disposição e paciência.

Ao Arnaldo Nakamura que ajudou a dar o difícil e cauteloso pontapé inicial nos experimentos e teve participação fundamental na elaboração da metodologia dos testes.

À toda equipe, colegas, mestres e funcionários do CPH que de uma forma ou de outra colaboraram para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos, uberabenses e belo-horizontinos, por terem ouvido durante todos estes anos esse papo esquisito de electrocutar peixes com tanta paciência e interesse. Agradeço ainda pela sincera e verdadeira amizade.

Ao pessoal da AC/DC Engenharia pela oportunidade de aprendizado, amizade e paciência durante este período conturbado da pós-graduação.

A meus tios, primos, minha querida avó, João e Ângela pelo apoio, paciência e torcida.

Aos peixes, pela involuntária e forçada participação nos testes. O sofrimento ao qual foram submetidos não será em vão.

À todos aqueles que por pura infelicidade e cansaço não citei, peço desculpas. O esforço e amizade de todos que participaram desta caminhada serão sempre lembrados.

Meus sinceros agradecimentos.

*“A força motriz de toda perfeição, tanto para o indivíduo, como para nações inteiras, não é a compreensão do que existe neste mundo, mas a compreensão do que pode ser realizado”.*

(Leon

Tolstoi)

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	16
NOMENCLATURA.....	17
RESUMO .....	18
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 O Setor Elétrico Nacional e as Usinas Hidrelétricas .....	19
1.2 Componentes de uma planta hidrelétrica.....	22
1.2.1 Barragem .....	23
1.2.2 Vertedouros ou Extravasores.....	24
1.2.3 Casa de Máquinas .....	24
1.2.4 Comportas.....	25
1.2.5 Conduitos e Dutos .....	25
1.3 Os problemas na ictiofauna relacionados à operação de UHEs.....	26
1.4 Mortandade de peixes em turbinas hidráulicas.....	27
1.5 Alternativas existentes para minimizar o problema de mortandade de peixes em Centrais Hidroelétricas .....	30
2 OBJETIVOS .....	34
2.1 Objetivos Gerais .....	34
2.2 Objetivos Específicos .....	34
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
3.1 Os Rios Brasileiros e as principais espécies nativas.....	35
3.2 Os principais sistemas de impedimento de entrada de peixes existentes.....	38
3.3 O efeito da corrente elétrica no comportamento dos peixes.....	43
3.3.1 Campos Elétricos Contínuos .....	44

3.3.2	Campos Elétricos variáveis .....	45
3.3.3	Diferenças entre as reações provocadas por corrente contínua, pulsada e alternada.....	47
3.4	Efeitos nocivos das correntes elétricas .....	47
3.5	Trabalhos relevantes de Eletrosensibilidade.....	51
3.6	Aparatos apresentados na literatura .....	53
3.7	Barreiras Elétricas.....	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1	Escolha da espécie alvo .....	60
4.2	Manutenção e manejo dos peixes em laboratório.....	61
4.3	Bancadas de teste .....	64
4.3.1	Ensaio de Eletrosensibilidade .....	64
4.3.2	Teste de barreira tipo Stoplog em modelo reduzido.....	67
4.3.3	Teste de barreira tipo Stoplog em tanque circular.....	71
4.4	Metodologia de teste adotada .....	72
4.4.1	Teste de eletrosensibilidade.....	72
4.4.2	Teste de barreira Tipo Stoplog em modelo reduzido .....	79
4.4.3	Teste de barreira Tipo Stoplog em tanque circular.....	84
5	RESULTADOS .....	88
5.1	Ensaio de Eletrosensibilidade.....	88
5.1.1	Curvas de Campo Elétrico em função do peso e Comprimento.....	88
5.1.2	Análise da Eletrosensibilidade em função da potência e densidade de potência transferida para o peixe.....	91
5.2	Teste de barreira Tipo Stoplog em modelo reduzido.....	94
5.3	Teste de barreira Tipo Stoplog em tanque circular.....	95
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	105
6.1	Ensaio de Eletrosensibilidade.....	105
6.2	Teste de Barreira Tipo Stoplog em modelo reduzido.....	110

6.3	Teste de Barreira Tipo Stoplog em tanque circular .....	111
7	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	113
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	116
9	ANEXOS.....	122

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Estrutura do setor elétrico brasileiro.....	19
Figura 1-2. Gráfico da matriz de oferta de energia Elétrica.....	20
Figura 1-3. Estrutura da Oferta Segundo a Natureza da Fonte Primária de Geração no mundo.....	21
Figura 1-4. Futuros empreendimentos hidrelétricos.....	22
Figura 1-5. Vista geral de uma Central Hidrelétrica.....	23
Figura 1-6. Vista em corte lateral de uma Central Hidrelétrica.....	25
Figura 1-7. Ilustração do funcionamento do conjunto gerador como compensador síncrono.....	29
Figura 1-8. Canais de desvio ou derivação.....	30
Figura 1-9. Esquema de barreira física que guia os peixes a um elemento bypass.....	32
Figura 3-1. Divisão Hidrográfica Nacional.....	36
Figura 3-2. Barreira mecânica instalada na saída da sucção de aparato experimental... 40	
Figura 3-3. Barreira elétrica gradual, construída com vários eletrodos e intuito de deter movimento ascendente de peixes.....	43
Figura 3-4. Lesões causadas por pesca elétrica, representando lesões na coluna (Foto B) e hemorragias provocadas por esta lesão (Foto A).....	48
Figura 3-5. Efeito da corrente elétrica sobre peixes: quebra e achatamento de vértebras.....	49
Figura 3-6. Deformação no corpo e crescimento anormal de trutas (Fotos A e B), provavelmente causados por corrente elétrica (pesca elétrica), em comparação com uma truta normal (Foto C).....	51
Figura 3-7. Barreiras elétricas instaladas no Central Arizona Project para impedir migração de peixes pelos canais artificiais. A barreira no Prima Lateral Canal foi instalada em 1990 e desenergizada em 1992, pois seu funcionamento era redundante com a barreira de Florence-Casa Grande Canal.....	55
Figura 3-8. Região do Lago Michigan e bacia do rio Mississippi antes e após a construção do Chicago Sanitary and Ship Canal e local de instalação do conjunto de barreiras elétricas.....	56
Figura 3-9. Instalação da barreira elétrica utilizando cabos como eletrodos.....	57
Figura 3-10. Sistema de barreiras elétricas do CSSC.....	58

Figura 3-11. Sistema de barreiras elétricas do CSSC.....	59
Figura 3-12. Possíveis aplicações das barreiras da Smith-Root.....	59
Figura 4-1. Foto de um <i>Pimelodus maculatus</i> mantido em laboratório. (Fonte própria)	61
Figura 4-2. Foto do tanque de manutenção dos exemplares de <i>Pimelodus maculatus</i> mantidos em laboratório.....	62
Figura 4-3. Dimensões e capacidade dos tanques de manutenção dos peixes. ....	63
Figura 4-4. Foto de um dos tanques de fibra de vidro utilizados para separar peixes já ensaiados dos que ainda não haviam sido testados. ....	63
Figura 4-5. Representação do primeiro tanque utilizado para testes de eletrosensibilidade.....	64
Figura 4-6. Representação dos equipamentos elétricos utilizados para os testes de eletrosensibilidade com onda senoidal a 60Hz.....	65
Figura 4-7. Amplificador montado para os testes de 50, 1000 e 10000Hz. ....	66
Figura 4-8. Circuito eletrônico montado para geração de tensão pulsante.....	66
Figura 4-9. Forma de onda da tensão entre eletrodos e tensão de comando. ....	67
Figura 4-10. Desenhos tridimensionais da caixa voluta e do tubo de sucção. ....	68
Figura 4-11. Processo de colagem das placas de isopor.....	68
Figura 4-12. Modelo da caixa voluta e tubo de sucção após aplicação do gesso.....	68
Figura 4-13. Laminação com fibra de vidro dos modelos da caixa voluta e tubo de sucção. ....	69
Figura 4-14. Modelos e fotografia do conjunto rotativo e distribuidor da máquina em escala reduzida.....	69
Figura 4-15. Fotografias do tanque de restituição e das bombas centrífugas.....	70
Figura 4-16. Barreira Eletromecânica projetada.....	70
Figura 4-17. Fotografia da montagem final do modelo de turbina hélice com barreira eletromecânica.....	71
Figura 4-18. Fotografia da barreira eletromecânica montada para teste em tanque circular.....	72
Figura 4-19. Gradiente de tensão, campo elétrico e superfícies equipotenciais no interior do tanque de teste em um instante de tempo t. ....	74
Figura 4-20. Posição de conforto para os peixes nos testes de eletrosensibilidade.....	75
Figura 4-21. Modelo elétrico do teste de eletrosensibilidade.Fonte: (Lopes R. E., 2009) .....	77
Figura 4-22. Circuito equivalente do modelo apresentado na FIG 4-21. ....	78

Figura 4-23. Campo elétrico (representado pelas setas) e gradiente de potencial na barreira eletromecânica – Vista frontal da barreira .....	80
Figura 4-24. Aproximação do peixe à barreira – Vista lateral da barreira. ....	81
Figura 4-25. Bancada de teste montada e em operação.....	83
Figura 4-26. Curva de velocidade do eixo da turbina hélice em função da velocidade das bombas.....	83
Figura 4-25. Aproximação dos peixes à barreira eletromecânica – Vista lateral da barreira.....	84
Figura 4-26. Tanque circular utilizado para teste de eficiência da barreira eletromecânica.....	86
Figura 5-1. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão pulsada 1000Hz, duty cycle 50%. (Fonte própria) .....	89
Figura 5-2. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão senoidal 1000Hz. (Fonte própria). ....	90
Figura 5-3. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão senoidal a 60Hz. (Fonte própria) .....	90
Figura 5-4. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão senoidal a 50Hz. (Fonte própria) .....	91
Figura 5-5. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os testes com a barreira energizada a 5V. (Fonte própria).....	100
Figura 5-6. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os testes com a barreira energizada a 10V. (Fonte própria).....	101
Figura 5-7. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os testes com a barreira energizada a 15V. (Fonte própria).....	101
Figura 5-8. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os movimentos de descida dos peixes. (Fonte própria).....	102
Figura 5-9. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os movimentos de subida dos peixes. (Fonte própria).....	103
Figura 5-10. Valor absoluto de peixes transitando pela barreira no decorrer dos testes de 5V. ....	103
Figura 5-11. Valor absoluto de peixes transitando pela barreira no decorrer dos testes de 10V. ....	104
Figura 5-12. Valor absoluto de peixes transitando pela barreira no decorrer dos testes de 15V. ....	104

Figura 6-1. Circuito equivalente do modelo apresentado na FIG4-22, considerando-se efeitos capacitivos.....	106
Figura 6-2. Curvas de eletrosensibilidade para campos pulsantes e alternados de 1000Hz sobrepostas. (Fonte própria) .....	107
Figura 6-3. Curvas sobrepostas de agitação para campos senoidais. (Fonte própria)..	108
Figura 6-4. Curvas sobrepostas de tetania para campos senoidais. (Fonte própria).....	109
Figura 7-1. Vista em corte de uma usina hidrelétrica com proposta de instalação da barreira elétrica. ....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1. Principais hidrelétricas brasileiras em operação .....	21
Tabela 5-1. Medição de densidade média de Indivíduos jovens de <i>Pimelodus maculatus</i> . .....	93
Tabela 5-2. Valores médios de potência e densidade de potência necessários para provocar reações de movimento sem direção (Agitação) e Tetania (paralisia).....	93
Tabela 5-3. Trânsito de peixes pela barreira energizada a 5V.....	96
Tabela 5-4. Trânsito de peixes pela barreira energizada a 10V.....	97
Tabela 5-5. Trânsito de peixes pela barreira energizada a 15V.....	98
Tabela 5-6. Transito total de peixes nos testes efetivos e controle para cada tipo de movimento.....	98

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

PPGEE	Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
CPDEE	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANA	Agência Nacional de Águas
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
BEN	Balanço Energético Nacional
NOS	Operador Nacional do Sistema
OIE	Oferta Interna de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$P$	Potência [W]
$U$	Tensão [V]
$I$	Corrente elétrica [A]
$R$	Resistência elétrica [ $\Omega$ ]
$c$	Condutividade elétrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
$W$	Trabalho [J]
$F$	Força [N]
$E$	Campo Elétrico [V/m]
$l$	Comprimento [m]
$Q$	Carga elétrica [C]
$A$	Área [ $\text{m}^2$ ]
$V$	Volume [ $\text{m}^3$ ]
$D$	Densidade de potência [ $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ ]
$d$	Densidade volumétrica [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

### Letras Gregas

$\rho$	Resistividade [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]
--------	---

## RESUMO

O uso de sistemas de repulsão e direcionamento de peixes é uma alternativa para a proteção de cardumes que ficam impedidos de continuar seu movimento de subida do rio. Dentre tais sistemas, as barreiras comportamentais, como são conhecidas as barreiras não-físicas, merecem destaque pois são construídas no intuito de influenciar o comportamento de certas espécies de peixes, fazendo com que elas evitem determinadas áreas, o que pode reduzir a entrada de peixes no tubo de sucção sem causar perdas de carga significativas no sistema hidráulico e sem requerer parada de máquina para sua manutenção e/ou limpeza. Basicamente, as barreiras comportamentais utilizam luz estroboscópica, infrassom e/ou ultrassom, cortina de bolhas e campo elétrico. Neste trabalho buscou-se estudar a influência de campos elétricos de intensidade, frequência e formas de onda diferentes, em indivíduos jovens e adultos de *Pimelodus maculatus*, uma das espécies brasileiras de peixe mais afetadas no que diz respeito a mortalidade de peixes devido a operação de turbinas hidráulicas. A partir deste conhecimento, foram levantadas as curvas de eletrosensibilidade, que definem os limiares do valor de campo aplicado e potência transferida ao peixe para os diferentes níveis de reação desta espécie. Foi proposto um modelo de barreira elétrica para instalação em usinas já em operação e foram realizados ainda experimentos em laboratório que comprovaram a eficiência deste tipo de barreira. Os resultados obtidos são fundamentais para o entendimento e futura aplicação da barreira em empreendimentos hidrelétricos e sinaliza uma possível solução para a redução da mortalidade de peixes em turbinas hidráulicas.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O Setor Elétrico Nacional e as Usinas Hidrelétricas

A energia elétrica desempenha papel fundamental na sociedade atual. Ela deixou de ser artigo de luxo e passou a compor a lista de necessidades básicas do ser humano a partir do momento em que intensificou o processo de urbanização e acelerou de modo extraordinário o progresso tecnológico. De acordo com dados do Balanço Energético Nacional 2008, ano base 2007 (BEN-2008), atualmente a eletricidade representa a maior fonte de energia nos Setores Comercial, Público, Residencial e Industrial com respectivamente 84,8%, 81,5%, 35,1% e 20,2% de participação no consumo de energia destes setores e, a estimativa de crescimento médio anual do mercado de energia elétrica é de 4,11% até o ano de 2011 e de 4,8% para os anos de 2012 a 2016. Segundo [2], levando-se em conta tal cenário, o consumo de energia elétrica em todos os setores em 2015 deverá atingir 76GW médios, o que é equivalente a 666TWh e os investimentos necessários à expansão da geração nos próximos 10 anos devem ser da ordem de US\$40 bilhões.

O setor elétrico brasileiro atende à cerca de 61,5 milhões de unidades consumidoras, sendo que de todos os segmentos de infra-estrutura, energia elétrica é o serviço mais universalizado. Adota uma estrutura institucional horizontal, com a participação de centenas de empresas públicas e privadas, estruturando-se da seguinte maneira:

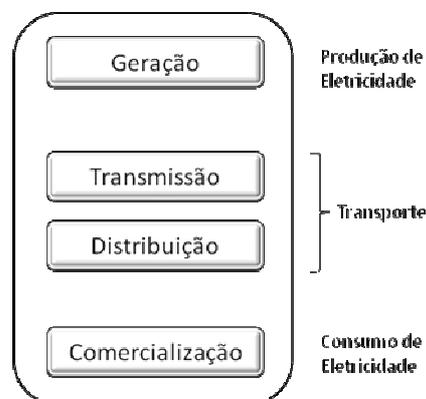


Figura 1-1. Estrutura do setor elétrico brasileiro.

O setor de Geração de Energia Elétrica contava em agosto de 2009, com oitenta e nove agentes de geração cadastrados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), sendo que quantidade significativa destes agentes utilizam a energia hidráulica para a geração de energia elétrica.

Embora tenha sido ultrapassada pelos produtos da cana-de-açúcar na composição da Oferta Interna de Energia (OIE) em 2007, a Energia Hidráulica e Eletricidade ainda possuem papel importante na composição da Matriz Energética Nacional, com participação de 14,9%, de acordo com o (BEN-2008). Se analisada apenas a produção de Energia Elétrica, a contribuição de Centrais Hidroelétricas (UHes e PCHs<sup>1</sup>) corresponde a 74,3% da Oferta Interna do Brasil. As Centrais Térmicas, segunda maior fonte de produção, correspondem a apenas 14,7% do total ofertado. Fica então evidente que o parque gerador de eletricidade do Brasil é fortemente dominado pelas centrais hidrelétricas, e esse domínio tende ainda a aumentar, por ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, pelo Brasil ter aproveitado apenas 30% de seu potencial hidrelétrico e por ter apresentado crescimento de 7% na comparação com 2006, enquanto que a geração a partir de combustíveis apresentou um decréscimo de 8,8%, com redução expressiva na geração a partir da energia nuclear (-12,3%) e do gás natural (-18,6%) para as centrais de serviço público. A FIG 1-2 apresenta a composição da matriz de oferta de energia Elétrica do Brasil.

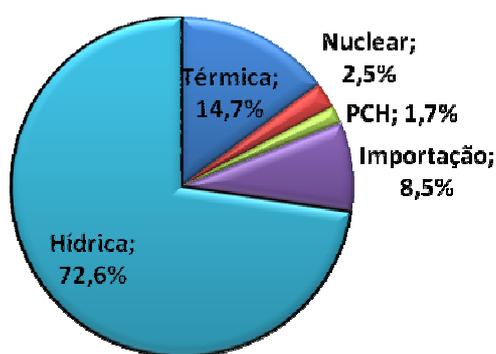


Figura 1-2. Gráfico da matriz de oferta de energia Elétrica.  
Fonte: Balanço Energético Nacional BEN 2008

<sup>1</sup> Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica os empreendimentos hidroelétricos são classificados como: Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH, com até 1MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH, entre 1,1 e 30MW de potência instalada) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30MW de potência instalada)

Se comparado com a estrutura da oferta segundo a natureza da fonte primária de geração no mundo em 2006 (FIG 1-3), pode-se observar que o “Brasil apresenta uma matriz de geração de origem predominantemente renovável, com aproximadamente 75% da oferta sendo atendida por geração interna hidráulica,” enquanto a oferta de energia elétrica mundial está baseada principalmente em centrais a carvão mineral, com 41% do total. De acordo com os dados do Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição, o Brasil é o segundo maior consumidor de energia hidrelétrica do mundo, ficando atrás apenas da China e é também o segundo país em participação da hidreletricidade na produção total de energia elétrica, índice no qual a China aparece apenas na oitava posição.

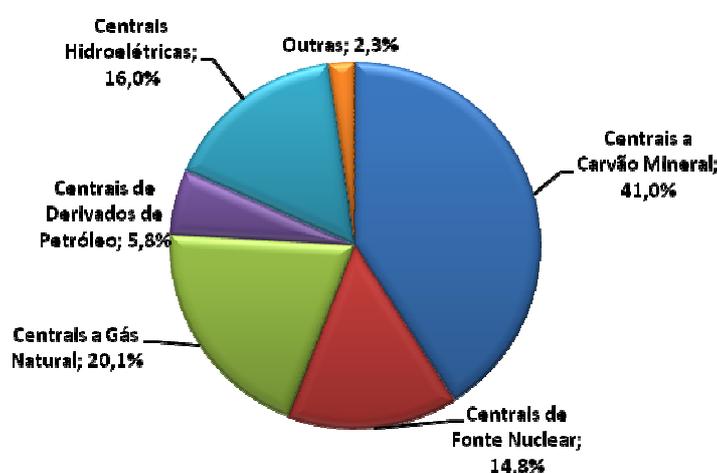


Figura 1-3. Estrutura da Oferta Segundo a Natureza da Fonte Primária de Geração no mundo.  
Fonte: Balanço Energético Nacional BEN 2008

De acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) da ANEEL, em novembro de 2008, existiam no Brasil setecentos e seis empreendimentos de fonte hidrelétrica em operação, gerando um total de 77.152MW, 89 empreendimentos hidrelétricos em construção somando o total de 5.408MW e 255 empreendimentos dessa mesma fonte outorgados, que acrescentariam um total de 11.536MW no sistema. Das usinas já em operação, destacam-se:

Tabela 1-1. Principais hidrelétricas brasileiras em operação

Usina Hidrelétrica	Localização	Potência (MW)
<b>Tucuruí</b>	Rio Tocantins	8.125
<b>Itaipu</b>	Rio Paraná	6.300 (parte brasileira)
<b>Ilha Solteira</b>	Rio Paraná	3.444
<b>Xingó</b>	Rio São Francisco	3.162
<b>Paulo Afonso IV</b>	Rio São Francisco	2.462

As usinas hidrelétricas devem ter participação predominante na geração de energia do SIN – Sistema Interligado Nacional, por um longo período de tempo. Ainda existem empreendimentos a serem construídos que são viáveis do ponto de vista técnico, ambiental e social e tal forma de geração de energia ainda é a fonte de geração mais econômica para o país, quando comparada com fontes tradicionais. Nos leilões A-5 de 2005 e 2006, o valor médio praticado para fontes hidráulicas foi de R\$/MWh 123,00 enquanto para usinas térmicas, o valor médio do MWh foi de R\$ 135,00.

Os empreendimentos em construção e outorgados estão distribuídos segundo o mapa da FIG 1-4.

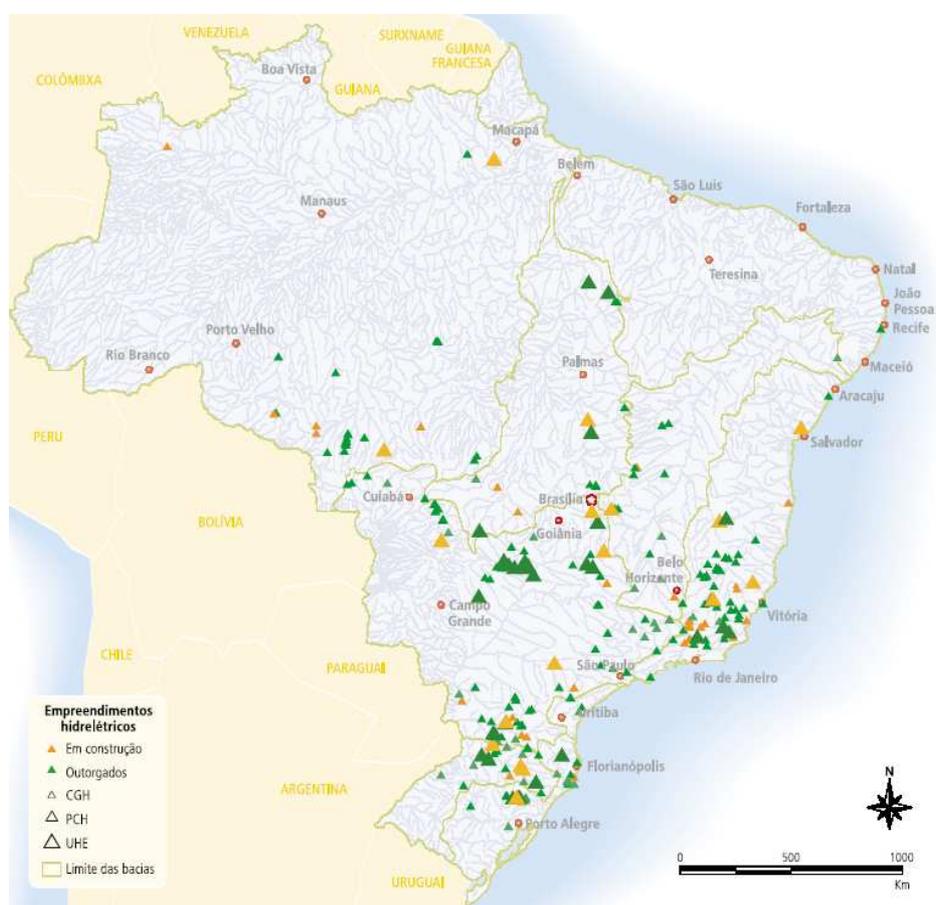
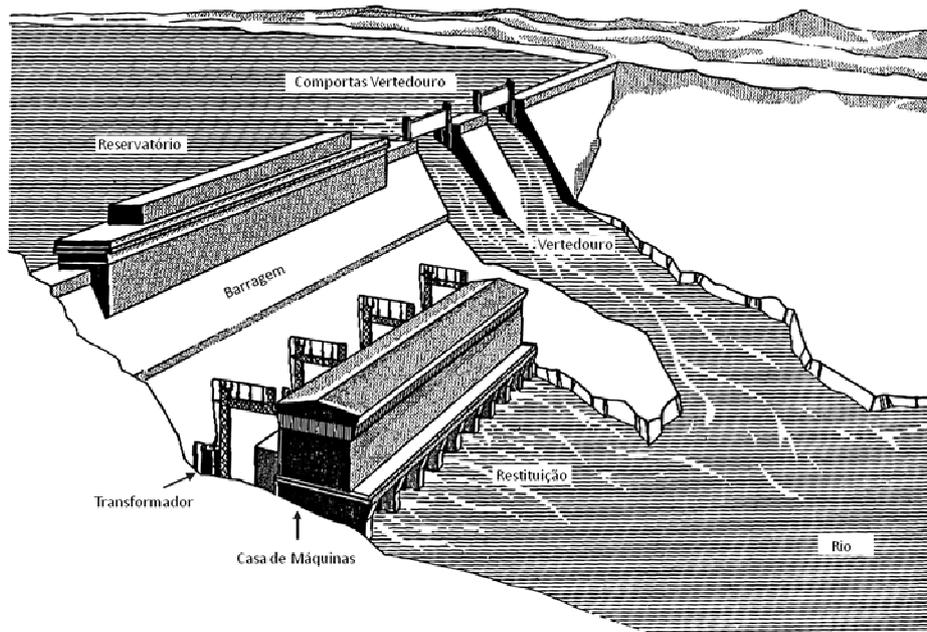


Figura 1-4. Futuros empreendimentos hidrelétricos.  
Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª Edição. ANEEL

## 1.2 Componentes de uma planta hidrelétrica

As usinas hidroelétricas representam um conjunto complexo e grandioso de estruturas e máquinas construídas com o intuito de aproveitar a energia potencial e/ou cinética do fluxo de água dos rios para a produção de energia elétrica. A energia associada ao fluxo de água é capturada e controlada pelas barragens e conduzida até as

turbinas através de dutos ou tubulações (conduto forçado). A passagem de água pelas pás da turbina faz com que ela gire, que por sua vez gira o eixo principal de um gerador elétrico. O gerador, então, converte a energia mecânica em energia elétrica, que é disponibilizada para transformação e transporte através das linhas de transmissão de alta tensão. A FIG 1-5 representa a vista simplificada de uma Central Hidrelétrica.



*Figura 1-5. Vista geral de uma Central Hidrelétrica.  
Fonte: Canadian Electricity Association*

Os principais componentes de uma Central Hidrelétrica são descritos a seguir.

### 1.2.1 Barragem

As principais finalidades das barragens são: represar a água para captação e desvio; elevar o nível d'água para aproveitamento elétrico e navegação; represar a água para regularização de vazões e amortecimento de ondas de enchentes. Pode ser construída a partir de elementos como pedra, terra compactada e/ou concreto. A escolha do melhor tipo de barragem é um problema tanto de viabilidade técnica quanto econômica. A solução técnica depende de fatores como relevo, geologia e clima. Economicamente, a escolha depende principalmente da disponibilidade de materiais próximo ao local da obra e da acessibilidade de transportes.

O reservatório formado a partir da construção da barragem permite o uso mais constante de uma vazão média de água superior àquela garantida apenas pelo

comportamento natural do rio e, permite ainda o armazenamento de água para utilização durante as estações mais secas do ano.

### 1.2.2 Vertedouros ou Extravasores

Os extravasores são dispositivos que permitem a passagem direta de água para jusante. São necessários para descarregar as cheias e evitar que a barragem seja danificada, tornando-se assim elementos de segurança da barragem. Um extravasor deve ser capaz de descarregar as maiores cheias sem prejudicar a barragem ou qualquer estrutura auxiliar e, ao mesmo tempo, permitir que se mantenha o nível das águas no reservatório abaixo de um nível máximo pré-estabelecido. A quantidade de água vertida (extravasada) dependerá da capacidade do reservatório e da vazão do rio.

Os efeitos dos vertedouros sobre a ictiofauna local dependem fortemente da configuração do vertedouro (forma de construção, frequência de operação, volume de água vertida) e das características da ictiofauna local. A mortalidade de peixes durante sua passagem pelos vertedouros está associada com a altura da queda e desaceleração sofrida no impacto com a água, choque físico contra os elementos do vertedouro, alteração da qualidade da água através do aumento da concentração de gás dissolvido e causas indiretas como o aumento da predação e doenças devido à desorientação causada durante a passagem.

Apesar dos efeitos descritos acima, não são considerados como um grave problema na mortalidade de peixes e segundo (Canadian Electricity Association, 2001) a manipulação dos vertedouros para atrair e até realizar passagem de peixe é rotina em usinas hidrelétricas do Canadá.

### 1.2.3 Casa de Máquinas

A casa de máquinas abriga as turbinas, geradores e outros equipamentos relacionados à conversão da energia armazenada na água em eletricidade. A casa de máquinas pode estar afastada da barragem, sendo ligada através de dutos (condutos forçados) ou pode ainda ser parte integrante da barragem, conforme FIG 1-6.

As configurações das casas de força variam largamente segundo as características dos aproveitamentos hidrelétricos, tais como porte da central, tipo de aproveitamento, tipo de turbinas e geradores utilizados, etc. O tipo de turbina utilizada dependerá da altura de queda (diferença entre o nível de água de montante e jusante) e vazão do aproveitamento hidrelétrico. Atualmente, as turbinas Francis e Kaplan são os dois tipos predominantemente encontrados nas plantas hidrelétricas do Brasil.

A operação das turbinas hidráulicas é fortemente relacionada com a mortandade de peixes em Centrais Hidrelétricas, como é o caso da passagem de peixes de montante à jusante através das turbinas hidráulicas, que é objeto de vários estudos em todo o mundo, sendo várias as tentativas de se construir turbinas “amigáveis”<sup>2</sup> (Cada G. F., 2001).

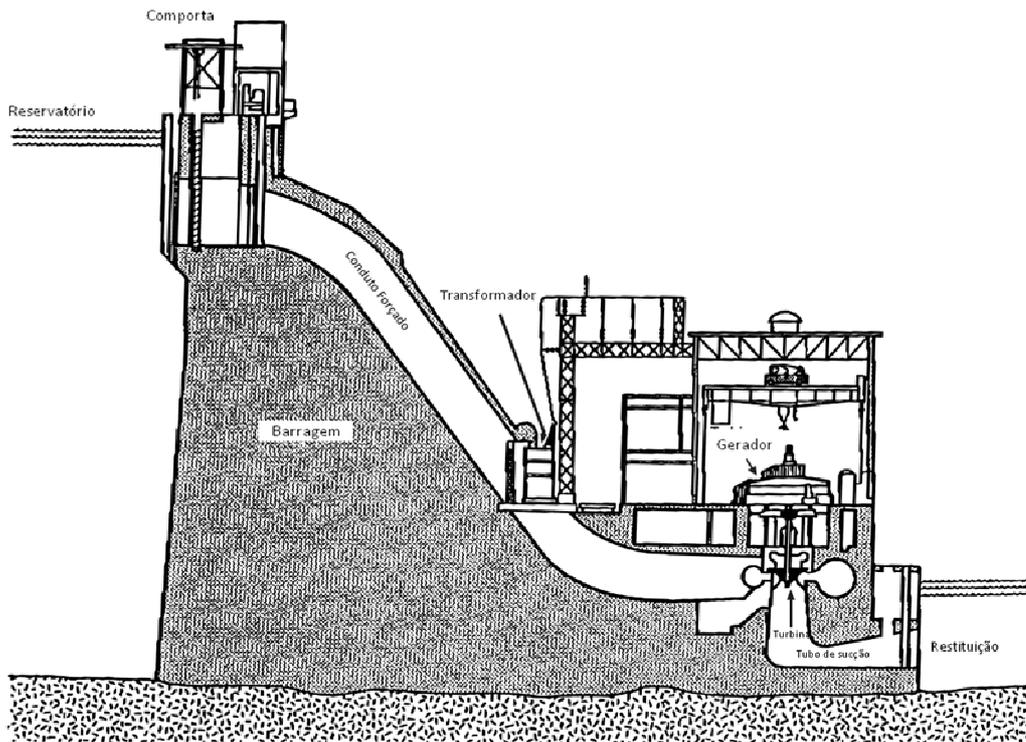


Figura 1-6. Vista em corte lateral de uma Central Hidrelétrica.

Fonte: Canadian Electricity Association

#### 1.2.4 Comportas

São os componentes que permitem isolar a água do sistema final de produção da energia elétrica, tornando possíveis, por exemplo, trabalhos de manutenção. A tomada d'água tem por principal função permitir a retirada de água do reservatório e proteger a entrada do conduto de danos e obstruções provenientes de congelamento, sujeiras (resíduos sólidos), ondas e correntes.

#### 1.2.5 Conduto e Dutos

São tubulações ou dutos por onde escoa a água. Os condutos forçados e os condutos livres são aqueles que conduzem a água do reservatório até as turbinas, sendo

---

<sup>2</sup> Turbinas que reduzem a mortandade de peixes durante sua passagem pela turbina

que nos forçados o escoamento se faz com a água a plena seção e os livres podem ser em canais (a céu aberto) ou aquedutos.

Após passar pelo rotor da turbina, um duto chamado tubo de sucção conduz a água até a parte de jusante da casa de máquinas (ver FIG 1-6). Tal tubo, por representar uma região de abrigo semelhante a uma caverna na estrutura da barragem e por manter um fluxo contínuo de água (vazão proveniente das turbinas) é o ambiente preferencial de diversas espécies de peixes que se acumulam no sopé da barragem.

### **1.3 Os problemas na ictiofauna relacionados à operação de UHEs**

Para ser mais bem aproveitada, a energia hidráulica demanda a construção de barragens que permitam o armazenamento da água e proporcionem uma vazão média superior àquela garantida apenas pelo comportamento natural do rio. Do ponto de vista da operação, a regularização da vazão dos rios através dos reservatórios é bastante benéfica, porém sobre o ponto de vista ambiental os impactos negativos das barragens superam os benefícios de sua construção. Assim, apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, a geração de energia hidrelétrica provoca profundas mudanças na ictiofauna local, alterando, segundo (Agostinho, Gomes, & Pelicice, 2007), a composição e abundância das espécies, com elevada proliferação de algumas e redução ou mesmo eliminação de outras. A intensidade dos impactos dependerá das particularidades da fauna e flora locais, tais como estratégias reprodutivas, padrões de migrações e grau de adaptação a ambientes lacustres; dependerá ainda das características do reservatório, desenho da barragem, vazão, tipo de turbina, procedimentos operacionais, etc.

A formação de um reservatório com a conseqüente interrupção do fluxo natural do rio provoca uma mudança nas espécies predominantes à montante da barragem (de espécies de ambientes lóticos para espécies de ambientes lênticos), pois muda-se a temperatura e oxigênio dissolvido na água, reduz-se o fluxo de água, velocidade de escoamento e diversidade de habitats, além de provocar diminuição na população de peixes pequenos, por falta de refúgio e facilidade de captura pelos predadores. A estratificação térmica das águas do reservatório, que fica acentuada no verão, além de ser bastante prejudicial para os indivíduos à montante da barragem, pode ainda provocar stress, redução de produtividade e até mesmo mortandade de peixes a jusante da barragem.

Muitas espécies de peixes realizam migrações com o intuito de se alimentarem, reproduzirem ou para refúgio. Segundo (Filho & Weingartner, 2007) as espécies de peixes conhecidas como “desovadoras totais” apresentam estações de desova bem definidas e realizam longas migrações com o objetivo de se reproduzirem. A migração trófica ou alimentar também é realizada por várias espécies de peixes e, como a migração reprodutiva, pode ser ascendente (de jusante para montante) ou descendente (de montante para jusante). No Brasil a migração reprodutiva ascendente dos peixes de nossa ictiofauna é conhecida como piracema. A construção de barragens impede o deslocamento dos peixes entre seus sítios de reprodução, alimentação ou refúgio. Assim, muitos deles permanecem longos períodos no sopé da barragem e, tornam-se presas fáceis para predadores ou são mortos devido à ação da turbina hidráulica, tanto em sua migração ascendente quanto na descendente (passagem de peixes pela turbina). A interrupção da migração reprodutiva das espécies pode ainda levar a um declínio acentuado na população de peixes e até mesmo à extinção de algumas espécies, como apresentado por (Larinier M. , 2001).

Apesar de todos os problemas relacionados com a construção do reservatório, se orientada, sua operação pode minimizar os efeitos causados pela mudança da estrutura natural do rio, como é o caso das Hidrelétricas da *Énergie NB Power*, que controlam o deplecionamento do reservatório para proteger as áreas de reprodução das trutas. A correta operação dos reservatórios pode ainda garantir o acesso a importantes tributários ou áreas alagadas, que servem como áreas de desova, e prover o nível de água ideal para desova e incubação de importantes espécies de peixes.

#### **1.4 Mortandade de peixes em turbinas hidráulicas**

Como descrito no item anterior, um dos grandes problemas ambientais da operação de Centrais Hidrelétricas é a mortandade de peixes durante sua passagem pela turbina, no movimento descendente. Isto pode provocar sérias conseqüências na população de peixes, principalmente nas espécies que realizam migração com o objetivo de reprodução.

Nas turbinas Pelton, a taxa de mortalidade é de 100%. Contudo, este tipo de turbina somente é usada para alturas de queda muito elevadas e não são encontradas com facilidade em Centrais Hidrelétricas brasileiras.

Segundo (Cada G. F., 2001), nas turbinas Francis e Kaplan, as injúrias e a mortandade dos peixes que passam por elas podem ser resultado de uma série de eventos, como:

- mudanças bruscas de pressão (a pressão da água durante sua passagem pela turbina aumenta várias atmosferas e então cai abruptamente para pressões abaixo da atmosférica (pressões negativas);
- cavitação (formação de bolhas de vapor devido a sub-pressão e conseqüente colapso das mesmas no contato com os peixes);
- stress causado devido a atuação de forças laterais advindas da atuação de fluxos de água de diferentes velocidades (força de cisalhamento);
- turbulência (movimento irregular da água, que pode causar lesões pontuais e desorientação);
- choque físico (colisão em estruturas como as pás das turbinas, palhetas do distribuidor, parede do tubo de sucção, etc);
- esmagamento (passagem por espaços estreitos entre estruturas fixas e girantes)

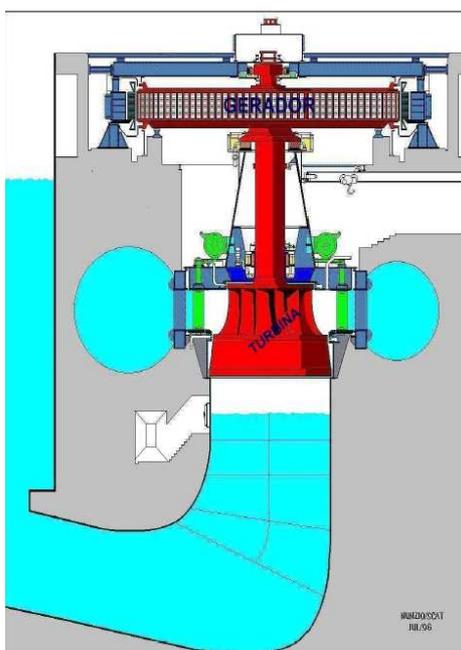
Segundo (Larinier & Travade, 2002) a taxa de mortalidade depende das propriedades do rotor da turbina (diâmetro, velocidade de rotação, etc.), seu modo de operação, da altura de queda da instalação e da espécie e tamanho do peixe. Em turbinas Francis, a taxa varia de 5% a 90%, sendo na média, menor para as turbinas Kaplan com uma taxa de 5% a 20%. Porém, esta diferença se dá devido ao fato de as turbinas Francis serem normalmente instaladas com uma maior altura de queda. Quando os dois tipos de turbina são instalados com a mesma altura de queda e vazão, as taxas de mortalidade são praticamente iguais.

Embora seja grande a preocupação de ambientalistas, biólogos e engenheiros com a mortandade de peixes que passam de montante para jusante através das turbinas (principalmente no Canadá e Estados Unidos), no Brasil algumas companhias geradoras de energia hidrelétrica há alguns anos se atentaram para o fato de que quantidade significativa de peixes morrem ou ficam bastante lesionados durante os eventos de partida e em algumas operações especiais das turbinas hidráulicas, como é o caso da operação das máquinas como compensador síncrono.

A operação da máquina como compensador síncrono é utilizada para regulação de tensão do sistema. Em várias centrais o síncrono é realizado fechando-se gradativamente as palhetas do distribuidor e injetando-se ar sobre pressão na cavidade

da máquina, de modo que ela possa rodar a vazio, forçando o conjunto a funcionar como um motor síncrono (ou gerador super-excitado), conforme apresentado na FIG 1-7. Isto faz com que o conjunto gere potência reativa para a rede, compensando o consumo desta potência pelas cargas e estabilizando o sistema. A operação do síncrono possibilita ainda que estas turbinas fiquem como “reserva girante” do sistema, podendo ser acionadas rapidamente quando necessário.

Várias espécies de peixes se sentem atraídas pelo fluxo de água proveniente das turbinas e/ou pelo ambiente fechado e escuro do tubo de sucção e acabam por adentrá-lo. Assim, durante as operações do síncrono, os efeitos da descompressão causada pela liberação do ar confinado na cavidade da máquina e pela liberação da água supersaturada de gases nitrogênio e oxigênio são devastadores para a população de peixes presente no tubo de sucção ou nas proximidades deste.



*Figura 1-7. Ilustração do funcionamento do conjunto gerador como compensador síncrono.*

A entrada de peixes no tubo de sucção também se torna um problema em eventos de manutenção dos componentes da turbina ou do próprio tubo. A partir do momento em que o fluxo de água pelas turbinas é reduzido para a posterior parada da máquina, quantidade significativa de peixes entra e fica aprisionada no tubo após o fechamento da comporta Stop log. Dependendo do tempo de parada para manutenção e da quantidade de peixes aprisionados, o nível de oxigênio dissolvido na água

aprisionada no tubo pode não ser suficiente para o total de peixes e uma mortandade generalizada pode ocorrer.

### 1.5 Alternativas existentes para minimizar o problema de mortandade de peixes em Centrais Hidroelétricas

Para tentar reduzir os impactos da construção e operação das Centrais Hidroelétricas sobre a ictiofauna, aproximadamente trinta dispositivos já foram testados nos últimos 50 anos e podem ser agrupados em quatro diferentes categorias (Therrien & Bourgeois, 2000): bypass (derivações ou desvio), barreiras físicas, barreiras comportamentais e sistemas de captura e transposição. Podem ainda ter o objetivo de atração, repulsão e/ou transposição dos peixes em seus movimentos ascendentes e/ou descendentes, sendo a eficiência de cada alternativa dependente das espécies alvo, da proporção de indivíduos usando o sistema e das características do local onde o dispositivo foi instalado.

Os dispositivos bypass, ou sistemas de transposição de peixes, são utilizados para evitar que os peixes entrem pela tomada d'água e/ou para desviá-los da turbina, criando um caminho alternativo livre de obstáculos e perigos, de modo a retorná-los ao ambiente natural de maneira segura. São considerados dispositivos bypass p/ migração descendente os vertedouros e os canais de desvio ou derivação, apresentados na FIG 1-8.

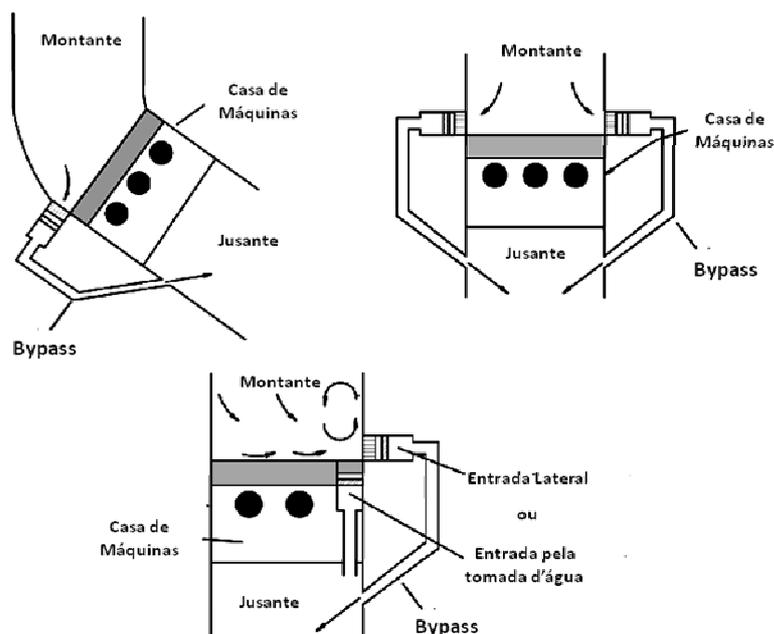


Figura 1-8. Canais de desvio ou derivação.  
Fonte: Adaptação de (Larinier & Travade, 2002)

As soluções que visam o movimento ascendente têm como objetivo atrair os peixes migradores para um ponto específico do rio a jusante da barragem e induzi-los a completar sua migração, através de canais, geralmente abertos, especialmente projetados para a subida dos peixes. São comumente constituídas de uma série de tanques em desníveis, que conduzem a água de montante para jusante, separados entre si por defletores de modo a permitir ao peixe nadar ou saltar de um tanque para outro. Este tipo de dispositivo é popularmente conhecido como escada para transposição de peixes e sua eficiência está relacionada com a velocidade da água e seu padrão de escoamento. Os canais artificiais que imitam rios tributários e ligam o reservatório ao curso do rio à jusante da barragem, como é o caso do Canal da Piracema na Usina Binacional de Itaipu, utilizam os mesmos princípios e objetivos das escadas, porém são menos seletivos quanto às espécies e tamanho dos peixes que os utilizam.

Os sistemas de captura e transposição também utilizam mecanismos para atração de peixes, que são normalmente canais que mantêm um fluxo contínuo de água (chamado de água de atração) e conduzem os animais até os dispositivos de coleta. Uma vez confinados em tais dispositivos, três diferentes métodos de transposição para montante são utilizados:

- Elevador, no qual a caçamba coletora é elevada até o nível do reservatório, e então libera os indivíduos capturados em um canal que conduz os peixes para montante da barragem.
- Eclusas, que semelhantemente às eclusas de navegação, se enchem de água até o nível do rio a montante e então comportas são abertas para a liberação dos peixes.
- Caminhões tanque, que coletam os peixes capturados e os liberam em algum ponto à montante da barragem.

As barreiras físicas usam dispositivos intransponíveis aos peixes para impedi-los de entrarem pela tomada d'água e/ou tubo de sucção e alcançarem a turbina. Telas do tipo rede, barreiras cilíndricas e grades instalados na abertura da tomada d'água e do tubo de sucção, são soluções normalmente empregadas em locais com baixa velocidade do fluxo de água como, por exemplo, usinas térmicas. São ineficientes a altas velocidades de escoamento e em locais onde a quantidade de sedimentos e partículas sólidas é alta. Paredes-guia, que conduzem os peixes a um elemento by-pass, construídas próximas à tomada d'água e na metade superior do nível de água, também

são consideradas como barreiras físicas e causam significativa redução de potência no conjunto gerador. As paredes-guia podem, porém, ser substituídas por colunas ou grades inclinadas de modo que estas conduzam os peixes e sedimentos sólidos até um elemento by-pass. Este tipo de solução não causa tanta perda de carga como a parede-guia, porém assim como essa, apresenta eficiência inferior a 90%, e é fortemente dependente do dispositivo by-pass escolhido para a transposição. A FIG 1-9 apresenta este tipo de solução, conduzindo os peixes a um bypass artificial.

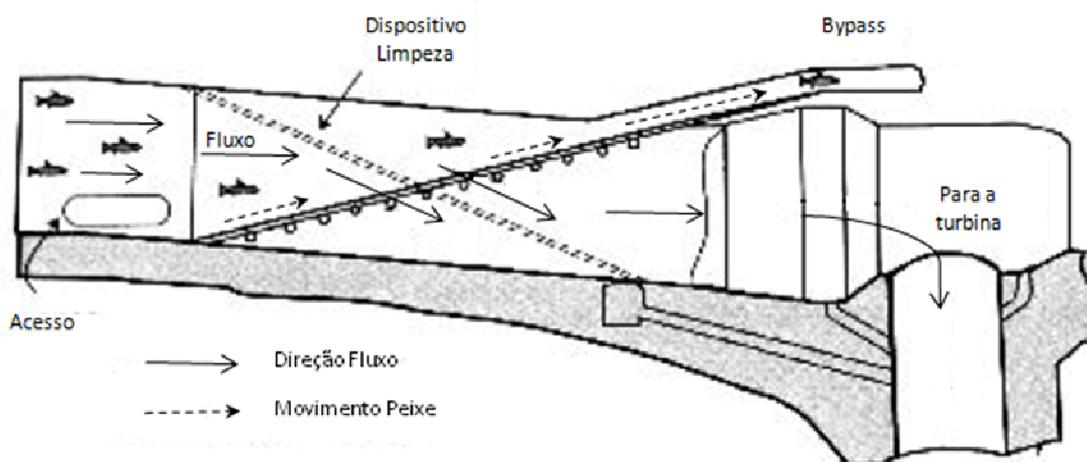


Figura 1-9. Esquema de barreira física que guia os peixes a um elemento bypass.  
 Fonte: Adaptação de (Therrien & Bourgeois, 2000)

Barreiras comportamentais, como são conhecidas as barreiras não-intrusivas (não-físicas), são divididas em duas categorias quando vistas em termo dos efeitos produzidos: barreiras de atração e de repulsão. Ambas têm o intuito de influenciar o comportamento animal atraindo ou repelindo-os para áreas seguras. Utilizam a aguçada e ampla sensibilidade dos peixes e as diferentes respostas a diversos estímulos para alcançarem seus objetivos, sendo geralmente menos dispendiosas (instalação, operação e manutenção) se comparadas às barreiras físicas (Nestler & Polskey, 1996). O sistema de atração mais utilizado é a manutenção de um fluxo de água constante para, por exemplo, atrair peixes para a região de uma escada de peixes. Dentre os sistemas de repulsão, destaca-se a utilização da luz estroboscópica, som, cortina de bolhas e campo elétrico.

Ainda não há no meio científico, uma clara definição sobre qual das barreiras comportamentais de repulsão é mais eficiente. A escolha da tecnologia a ser utilizada dependerá das condições do local, das espécies alvo e condições de instalação. Para que

uma maior taxa de repulsão seja alcançada, alguns grupos de pesquisa já consideram a utilização de barreiras mistas(Coutant, 2001), (Therrien & Bourgeois, 2000), que combinam os efeitos de dois ou mais dispositivos e garantem que uma quantidade maior de espécies seja alcançada, já que mais de um estímulo está sendo aplicado.

Neste trabalho, busca-se identificar os efeitos do campo elétrico sobre o organismo do *Pimelodus maculatus*, uma importante espécie de peixe brasileira. Serão levantadas curvas de eletrosensibilidade para diferentes formas de onda e frequência para peixes de diferentes tamanhos. Será ainda desenvolvida e testada uma barreira elétrica com o objetivo de reduzir a entrada de peixes no tubo de sucção de usinas hidrelétricas, reduzindo assim a mortandade durante a operação das mesmas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Este trabalho tem como objetivos gerais estudar o comportamento de peixes quando submetidos a campos elétricos de diferentes formas de onda, frequência e intensidade. Foi baseado em uma das espécies brasileiras com maior índice de mortandade em turbinas hidráulicas e fundamenta a concepção de uma barreira elétrica para impedimento de entrada de peixes em turbinas hidráulicas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos desta dissertação, podem-se citar:

- Identificar a espécie alvo;
- Projetar e construir bancadas, aparatos e metodologias de testes que possibilitem, de forma eficiente e objetiva, o estudo dos efeitos do campo elétrico sobre peixes;
- Realizar testes de eletrosensibilidade com o intuito de estabelecer curvas de comportamento em função do campo aplicado.
- Projetar e testar a eficiência de uma barreira elétrica de baixo custo de construção e fácil instalação com o intuito de impedir a entrada de peixes em turbinas hidráulicas.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Os Rios Brasileiros e as principais espécies nativas**

O Brasil detém uma das mais amplas, extensas e diversificadas redes fluviais de todo o mundo, contando com uma vazão média anual dos rios em território brasileiro de cerca de 180 mil m<sup>3</sup>/s (12% da disponibilidade mundial de recursos hídricos). Se forem levadas em conta as vazões oriundas em território estrangeiro e que ingressam no país, a vazão média total atinge valores da ordem de 267 mil m<sup>3</sup>/s (18% da disponibilidade mundial) (Agência Nacional de Águas - ANA, 2007).

Grande parte dos rios brasileiros é de planalto, apresentando quedas que conferem ao Brasil um dos maiores potenciais hidrelétricos do mundo, com destaques importantes para as quedas de Urubupungá, Sobradinho e Paulo Afonso. Apresentam regime de alimentação pluvial e suas cheias ocorrem predominantemente no verão, com exceção de alguns rios do Nordeste. Grande maioria dos rios é perene e possui drenagem exorréica.

Em 15 de outubro de 2003, definiu-se a Divisão Hidrográfica Nacional adotada no Plano Nacional de Recursos Hídricos - PNRH e instituída pela Resolução do CNRH Nº 32, e que considera 12 regiões hidrográficas com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, sendo elas:



Figura 3-1. Divisão Hidrográfica Nacional

Fonte: Plano Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em <http://pnrh.cnrh-srh.gov.br/>

Dentre as regiões doze regiões hidrográficas nacionais, merecem destaque pelo potencial hidrelétrico instalado e disponível a do Paraná, São Francisco, Uruguai, Tocantins Araguaia e Amazônica.

A Região Hidrográfica do Paraná é de fundamental importância para o país, pois engloba a área de maior desenvolvimento econômico do Brasil e suporta 32% de sua população. Possui a maior capacidade instalada de energia (59,3% do total) e, segundo dados do Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, um total de 176 centrais hidrelétricas, com destaque para Itaipu, Furnas, Porto Primavera e Marimbondo.

O Paraná, principal rio desta região, é formado pelo encontro das águas dos rios Grande e Paranaíba. Possui extensão total de 3.740 km, sendo o terceiro mais extenso das Américas. Por suportar grande parte da população brasileira, a pesca na região hidrográfica do Paraná representa uma atividade econômica importante e necessária. As principais espécies para a pesca profissional do Rio Paraná e seus afluentes são:

*Prochilodus spp* (curimatá), *Pimelodus maculatus* (mandi-amarelo) *Piaractus mesopotamicus* (pacu), *Pseudoplatystoma corruscans* (surubim), *Salminus brasiliensis* (dourado), *Paulicea luetkeni* (jaú), *Brycon nattereri* (pirapitinga) e *Chichla spp* (tucunaré), espécie originária da bacia amazônica e introduzida na região hidrográfica do Paraná.

A Região Hidrográfica do Uruguai é importante para o país em função das atividades agro-industriais desenvolvidas e pelo seu potencial hidrelétrico (40,5 kW/km<sup>2</sup>), uma das maiores relações potência/km<sup>2</sup> do mundo. Destacam-se as Usinas de Itá e Machadinho, com potências instaladas de 1.450 MW e 1.140 MW respectivamente. O rio Uruguai possui 2.200 km de extensão e se origina da confluência dos rios Pelotas e do Peixe. É considerado um dos rios mais importantes na hidrografia do sul do país, sendo a ictiofauna desta região, bastante similar à do Paraná.

A Região Hidrográfica do São Francisco assume grande expressão, uma vez que seu principal rio, o rio São Francisco, atravessa uma região semi-árida e contribui de maneira substancial para o desenvolvimento desta região. O aproveitamento hidrelétrico nessa região hidrográfica representa a base de suprimento de energia da região nordeste, sendo ao todo nove usinas hidrelétricas instaladas no rio São Francisco, com destaque para Xingó, Paulo Afonso e Itaparica.

A pesca no rio São Francisco e seus afluentes é de extrema importância, principalmente para a população ribeirinha que, em sua maioria, tira do rio sua principal fonte de alimentação e renda. Dentre as diversas espécies nativas desta região, merecem destaque:

*Prochilodus marggravii* (curimatã-pacu), *Salminus brasiliensis* (dourado), *Pseudoplatystoma corruscans* (surubim), *Brycon lundii* (matrinxã), *Pimelodus maculatus* (mandi-amarelo), *Leporinus elongatus* (piauí-verdadeiro) e *Pachyurus francisci* (corvinas). A *Chichla spp* (tucunaré) também foi introduzida na região do São Francisco e atualmente pode ser encontrada em quase toda sua extensão.

A Região do Tocantins-Araguaia possui vazão média correspondente a 9,6% do total do país e ocupa uma área de aproximadamente 11% do território nacional, sendo grande parte situada na região Centro-Oeste. Seus principais rios são o Araguaia e Tocantins, com 2.600 km e 1.960 km de extensão respectivamente. Está prevista a implantação de uma hidrovía que utilizaria o rio das Mortes, Araguaia e Tocantins e facilitaria a escoação da produção de grãos e pecuária.

O grande potencial hidrelétrico desta região e sua localização próxima aos consumidores da região Nordeste, tornam-na prioritária para a implantação de centrais hidrelétricas. Dentre as 28 usinas instaladas, destaca-se a UHE Tucuruí, com 8370MW de potência instalada, sendo a maior usina hidrelétrica nacional.

A ictiofauna local é bastante diversificada e sustenta uma importante atividade econômica regional: a pesca. O reservatório de Tucuruí, no baixo Tocantins, promove

anualmente o Torneio de Pesca da Amazônia (TOPAM) e o reservatório de Serra da Mesa, no alto Tocantins, também está atraindo grande número de pescadores amadores. As principais espécies capturadas na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia são:

*Piaractus mesopotamicus* (pacu), *Brycon lundii* (matrinxã), *Arapaima gigas* (pirarucu), *Leporinus fasciatus* (piau-flamengo), *Pachyurus francisci* (corvinas), *Hoplias malabaricus* (traíra), *Pseudoplatystoma fasciatum* (cachara), *Phractocephalus hemeliopterus* (pirarara) e *Pimelodus spp* (mandi).

Outra importante região hidrográfica brasileira é a Amazônica, a mais extensa rede hidrográfica do mundo, ocupando cerca de 45% do território brasileiro e responsável por 68% da vazão média total do país. Na porção brasileira da região, os principais formadores do rio Amazonas são os rios Javari, Purus, Madeira, Tapajós e Xingú pela margem direita e, Iça, Japurá, Negro, Trombetas, Paru e Jarí pela margem esquerda.

Segundo dados da (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2008), o potencial hidrelétrico da bacia do Amazonas é de aproximadamente 42,2% do total nacional, sendo destes, apenas 1% aproveitados. Porém, é nessa região que estão localizadas as principais usinas planejadas para os próximos anos incluídas no Programa de Aceleração do Crescimento do Governo Federal (PAC). Santo Antônio, licitada em 2007 e capacidade prevista de 3150MW e Jirau, licitada em 2008 com 3300MW de potência, proporcionarão expansão da oferta de energia elétrica e estimulará o desenvolvimento econômico, tecnológico e social da região do Madeira, rio no qual estas usinas serão instaladas.

A Amazônia abriga a maior biodiversidade do planeta, incluindo mais de 3 mil espécies de peixes, sendo as principais espécies para a pesca local:

*Pellona Castelnanaeana* (apapá), *Osteoglossum bicirrhosum* (aruanã), *Piaractus mesopotamicus* (pacu), *Sphyraena guachancho* (bicuda), *Hydrolycus scomberoides* (cachorra), *Chichla spp* (tucunaré), *Arapaima gigas* (pirarucu), *Serrasalmus spp* (piranha), *Paulicea lutkeni* (jaú), *Phractocephalus hemeliopterus* (pirarara) e muitos outros.

### **3.2 Os principais sistemas de impedimento de entrada de peixes existentes**

Dentre as alternativas existentes para reduzir a mortandade de peixes em centrais hidroelétricas, há dispositivos dedicados ao impedimento da entrada destes animais em turbinas hidráulicas, tanto no seu movimento ascendente quando descendente. Embora

grande parte das referências estrangeiras sobre o assunto trate do uso dos sistemas para impedimento da entrada de peixes pela tomada d'água, no Brasil os grupos de pesquisa consideram o uso de tais sistemas no tubo de sucção das turbinas (migração ascendente), pelos motivos apresentados no item 1.4.

As alternativas utilizadas com este propósito são: barreiras físicas, que utilizam telas e grades, e barreiras comportamentais que podem utilizar luz estroboscópica, barreira sonora, elétrica, cortina de bolhas, cortina de correntes de aço ou uma combinação destas.

As barreiras físicas comumente apresentadas na literatura utilizam telas ou grades que são instaladas envolvendo a tomada d'água e impedem que os peixes entrem nos condutos e passem pela turbina no seu movimento descendente. Para que sejam eficientes, devem possuir uma malha pequena o bastante para impedir a passagem de peixes pequenos e guiar estes animais para um dispositivo bypass, além de serem projetadas de maneira a possuir baixa velocidade do fluxo de água em suas imediações para evitar acúmulo de sedimentos e peixes nas grades.

O uso de barreira física para evitar a entrada de peixes no tubo de sucção foi apresentada por (Companhia Energética de Minas Gerais, 2005). O sistema proposto, ao contrário de outros descritos na literatura, utiliza uma chapa de aço inoxidável de meia polegada que é inserida através de uma ranhura no tubo de sucção de um aparato experimental (modelo em escala reduzida de uma turbina Francis vertical), conforme FIG 3-2. A concepção desta barreira foi baseada no fato de que com a redução do fluxo de água na turbina, grandes quantidades de peixes entram no tubo de sucção. Pretendia-se criar um mecanismo que impedisse fisicamente a entrada de peixes neste momento. Assim, à medida que as pás do distribuidor da turbina fossem sendo fechadas, a barreira mecânica seria vagarosamente baixada até o completo bloqueio do tubo de sucção. Este estudo mostrou, porém, que a inserção da barreira mecânica na saída do tubo de sucção pode afetar consideravelmente o comportamento do conjunto hidrogerador. O aumento do empuxo hidráulico sobre o rotor do conjunto para a faixa de velocidades de operação de máximo rendimento pode atingir a faixa de 30 % com a inserção de restrição de fluxo no tubo de sucção, o que indica que a operação de barreiras mecânicas na saída da sucção de máquinas instaladas em usinas hidrelétricas deve ser efetuada com critério para evitar danos à integridade do conjunto rotativo e riscos de acidente.



*Figura 3-2. Barreira mecânica instalada na saída da sucção de aparato experimental.*  
*Fonte: (Companhia Energética de Minas Gerais, 2005)*

Dentre as barreiras comportamentais, o uso de luz estroboscópica é bastante difundido nos Estados Unidos e Canadá, sendo seu custo de instalação e manutenção relativamente baixos. Segundo (Larinier & Travade, 2002) e (Taft, Dixon, & Sullivan, 2001) a eficiência da luz estroboscópica depende muito das características do local, das espécies alvo, da turbidez da água, da concentração de sedimentos em suspensão, velocidade de escoamento e do período do dia, sendo o período noturno mais favorável à utilização deste tipo de barreira.

Testes em laboratório e em campo com aparelhos de luz estroboscópica e também com lâmpadas de vapor de mercúrio foram realizados por (Taft, Dixon, & Sullivan, 2001) e (Patrick, Poulton, & Brown, 2001). Os testes de laboratório com luz estroboscópica apresentaram resultados eficientes quanto à repulsão dos peixes da área iluminada, chegando a valores próximos a 94%, com exceção a algumas espécies que se mostraram indiferentes em períodos diurnos. O uso da lâmpada de vapor de mercúrio em laboratório não foi conclusivo. Algumas espécies foram atraídas, outras repelidas e algumas não demonstraram nem comportamento de repulsão nem de atração, mantendo-se indiferentes à luz.

A eficiência dos testes de campo com luz estroboscópica variou consideravelmente entre os locais pesquisados, tendo apresentado, em alguns testes, valores superiores a 90% de repulsão, resultados inconclusivos ou ineficientes. Para vários sítios pesquisados, a utilização da luz estroboscópica em períodos diurnos não afetou a movimentação de peixes. Os testes com lâmpadas de vapor de mercúrio

atraíram os peixes em direção á fonte luminosa em alguns casos (91% de aumento na quantidade de peixes na região) e em outros se mostraram ineficientes ou inconclusivos.

As barreiras sonoras têm sido estudadas desde a década de 80 e utilizam ondas sonoras que podem ser divididas em três grupos: infrassom (<35Hz), som audível (35 a 20000Hz) e ultrassom (>20000Hz). Testes realizados nos últimos 50 anos com frequências audíveis (20 a 1000Hz) demonstraram resultados muito inconstantes e muitas vezes com eficiência relativamente baixa. Porém segundo (Therrien & Bourgeois, 2000), experimentos recentes demonstraram que a barreira sonora pode ser bastante eficiente (75-100%) se empregada para afastar espécies específicas de peixes utilizando ondas sonoras específicas para cada espécie. O custo de instalação e manutenção deste tipo de barreira é considerado baixo para médio.

De acordo com (Larinier & Travade, 2002), sistemas sonoros de baixa frequência desenvolvidos no Reino Unido apresentaram resultados relativamente bons durante testes noturnos em campo, com 70% de eficiência. Já para os testes diurnos, a eficiência da barreira foi de apenas 30%, sendo que estes mesmos equipamentos foram utilizados na França com o intuito de guiar indivíduos jovens de salmão e apresentaram eficiência praticamente nula. Avaliações de (Hanson, Hayes, & Urquhart, 1997) também demonstraram variação significativa na eficiência da barreira, com valores que reduziram de 57% para 15% em dois anos de pesquisas. Estudos que utilizaram barreira sonora com frequências de 300 a 400Hz realizados por (Goetz, Dawson, Shaw, & Dillon, 2001) com o intuito de evitar a entrada de salmonídeos em eclusas, também não apresentaram resultados satisfatórios quanto a sua eficiência.

Estes resultados podem ser explicados devido à adaptação dos peixes ao estímulo sonoro e à alta sensibilidade de cada espécie a uma faixa específica de frequências, como é o caso dos salmonídeos que, segundo (Knudsen, Enger, & Sand, 1994) não se sensibilizam com ondas sonoras de frequências superiores a 50Hz. Os resultados mostram também que a barreira sonora não é um sistema confiável a ponto de ser utilizada em qualquer instalação e/ou condição ambiental, apesar de não ser influenciada pela turbidez da água, sólidos em suspensão e coloração da água.

A cortina de correntes de aço é um sistema com custos de instalação e manutenção muito baixos. Seu efeito de repulsão sobre os peixes é primariamente visual apesar de possuir também uma componente acústica devido ao choque entre as correntes da cortina. Sua maior eficiência é alcançada quando as correntes estão espaçadas de 10cm e permanecem a um ângulo de aproximadamente 60° do fluxo de

água (Therrien & Bourgeois, 2000). Em testes realizados com salmonídeos, já foram relatadas eficiências superiores a 80%, porém, este valor tende a cair consideravelmente com a diminuição da luminosidade do local, e aumento da turbidez e velocidade do fluxo. Outra desvantagem desta barreira comportamental é a ineficiência a certas espécies de peixes além de sedimentos e objetos poderem embarçar na cortina o que aumenta a necessidade e frequência de manutenções.

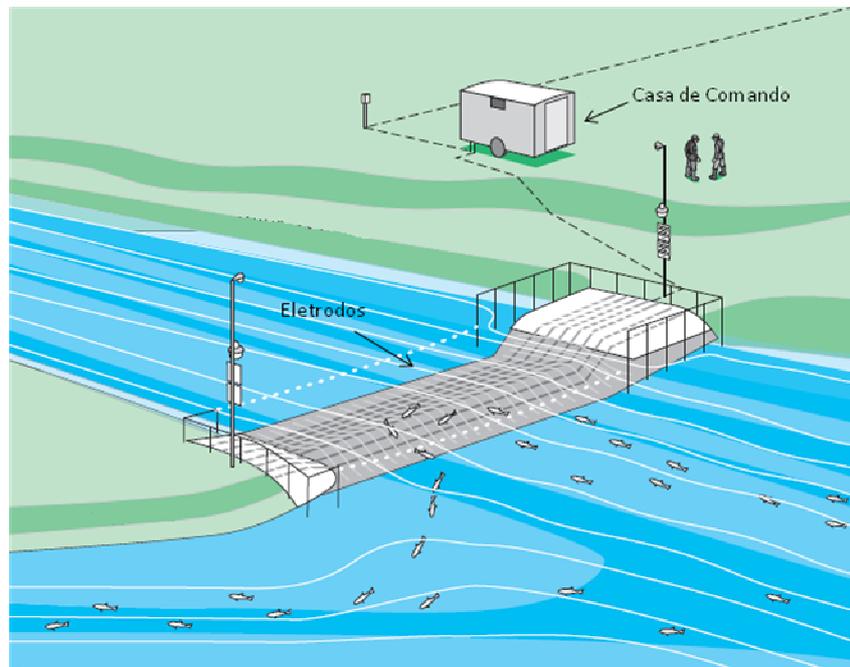
A cortina de bolhas utiliza um sistema de difusão que cria uma barreira permanente de bolhas de ar na qual peixes tendem a não se aventurar. Possui custos de instalação e manutenção relativamente baixos e sua eficiência é bastante dependente da temperatura da água, turbidez, velocidade do fluxo e principalmente luminosidade. Em alguns experimentos de laboratório, apresentou eficiência variando de 56 a 98% para algumas espécies e eficiência praticamente nula para outras. Como desvantagens pode-se destacar o possível entupimento do sistema de difusão em áreas com alto índice de deposição de sedimentos e sua total ineficiência em locais escuros.

As barreiras elétricas utilizam o campo elétrico para expulsar ou guiar peixes para áreas específicas. A forma de onda, frequência e intensidade da corrente elétrica são parâmetros da barreira que afetam diretamente a sensibilidade dos peixes. A qualidade e temperatura da água são os fatores externos que influenciam sua eficiência. Segundo (Roth, Insland, & Moeller, 2003) enquanto a corrente contínua pode ser usada para atrair e guiar peixes dependendo da amplitude do campo elétrico aplicado, tensões pulsantes e senoidais podem provocar eletronarcose, ou até mesmo fraturas e deslocamento de vértebras, hemorragias e rupturas das artérias dorsais.

Apesar de apresentar bons resultados (40 a 84% de eficiência) para uma variedade grande de espécies (Therrien & Bourgeois, 2000) em seus movimentos de descida, este método apresenta melhores resultados na expulsão de peixes de locais proibidos para os movimentos de subida dos peixes, pois caso o peixe se aproxime da barreira o suficiente para ficar paralisado, o fluxo de água se encarrega de levá-lo para longe da barreira e conseqüentemente da região proibida, o que não acontece caso a barreira esteja sendo utilizada na tomada d'água e o peixe consiga transpô-la. A FIG 3-3 apresenta o esquema de uma barreira elétrica utilizada para deter a migração ascendente de peixes e construída com vários eletrodos fixados em uma base de concreto.

Os custos de instalação e manutenção deste tipo de barreira comportamental são considerados médios e dependem muito das características do local. A velocidade de escoamento da água tanto para a utilização nas migrações descendentes quanto

ascendentes influencia bastante a sua eficiência. Peixes de grande porte podem sofrer sérias lesões ou até morrer dependendo do nível de campo utilizado e manutenções regulares devem ser realizadas para remover lixos e objetos acumulados nos eletrodos, que devem ser, também, substituídos periodicamente.



*Figura 3-3. Barreira elétrica gradual, construída com vários eletrodos e intuito de deter movimento ascendente de peixes.*

*Fonte: Smith-Root Inc. Disponível em [www.smith-root.com](http://www.smith-root.com)*

### **3.3 O efeito da corrente elétrica no comportamento dos peixes**

É possível sensibilizar peixes utilizando qualquer tipo de corrente elétrica: contínua, alternada ou pulsada. Para se obter, porém, uma maior eficiência dependendo do objetivo desejado, deve-se optar pela utilização de uma ou outra solução. De acordo com (Lamarque, *Electrophysiology of Fish in Electric Fields*, 1990) a corrente alternada (AC) causa tetania e grave lesões em maior número de peixes, dependendo da intensidade do campo aplicado e da condutividade da água, enquanto a corrente contínua (DC) possui a característica de atrair os peixes em direção ao anodo (taxia) tornando a captura mais fácil e menos letal. Os efeitos da corrente pulsada (PDC) podem ser considerados como intermediária entre AC e DC.

Não há como se estabelecer uma caracterização generalizada para as reações de peixes quando submetidos a campos elétricos, pois as respostas aos estímulos variam de acordo com as espécies e tipo de corrente. Apenas a reação de taxia em correntes

contínuas é unanimidade entre os pesquisadores, que identificaram ser produto de um reflexo medular e não cerebral.

### 3.3.1 Campos Elétricos Contínuos

Para campos elétricos DC e utilizando um tanque de *1,2 metros* de comprimento e água com condutividade dentre *300-400  $\mu S/cm$*  (Lamarque, *Electrophysiology of Fish in Electric Fields*, 1990) descreveu as reações de peixes quando submetidos a correntes DC da seguinte maneira:

- A primeira reação observada, independente da orientação do peixe no campo elétrico, é um sutil movimento do corpo ou da nadadeira dorsal. Esta primeira reação não é observada se o campo elétrico é puramente contínuo (sem componentes de frequências superiores) ou aplicado vagarosamente. Se o campo for aplicado abruptamente, o limiar para esta reação varia de 2 a  $8V/m$  dependendo da espécie.

As outras reações observadas dependem da posição do peixe em relação ao anodo, sendo descritas conforme apresentado a seguir:

#### 3.3.1.1 Orientado para o anodo

- Natação prejudicada. O peixe ainda consegue se movimentar voluntariamente, porém o movimento natural da cauda durante uma natação normal já não é mais observada. Ocorre por volta de  $12V/m$
- Com o aumento do campo para  $15V/m$ , o peixe se movimenta abruptamente em direção ao anodo, com uma natação forte e grandes ondulações do corpo. Este é o chamado primeiro movimento em direção ao anodo.
- A narcose elétrica aparece aos  $34V/m$ , quando o peixe perde o equilíbrio, ficando paralisado com os músculos relaxados e a respiração reduzida e descontinuada (apnéia).
- Aos  $80V/m$ , o peixe anteriormente em narcose elétrica, volta a nadar em direção ao anodo, porém de uma forma aleatória e desbalanceada. Este é o segundo movimento em direção ao anodo.
- A tetania de origem muscular se dá com campos superiores a  $100V/m$ , quando o peixe entra em estado permanente de contração muscular, sendo que estes não

conseguem relaxar para seu estado natural e o peixe não consegue se movimentar. Apenas quando o peixe está bem próximo ao anodo é que esta reação é observada.

#### 3.3.1.2 Orientado para o Catodo

- Por volta de  $11V/m$ , o peixe tende a nadar se afastando do anodo com ondulações de corpo curtas e rápidas.
- Com o aumento do campo para  $15V/m$ , o peixe se volta para o anodo e posteriormente apresenta as reações descritas anteriormente.
- Caso o peixe não se direcione para o anodo, campos de aproximadamente  $35V/m$  resultam em tania de origem nervosa (sistema nervoso). Campos acima de  $100V/m$  resultam em tania de origem muscular quando o peixe está próximo ao catodo.

#### 3.3.1.3 Paralelo às linhas de campo elétrico

- Quando o peixe se encontra nesta posição, observa-se uma única reação que é o direcionamento para o anodo, ocorrendo por volta de  $35V/m$ .

#### 3.3.2 Campos Elétricos variáveis

Campos elétricos com correntes alternadas e pulsadas possuem outros, parâmetros além da intensidade, que podem ser variados e que também afetam diretamente a sensibilidade dos peixes: frequência, duty cycle (duração do pulso) e forma de onda (senoidal, quadrada, triangular etc). Vários trabalhos já foram realizados buscando identificar para cada parâmetro qual a opção mais eficiente. Porém, grande parte deles realizou a busca por um determinado parâmetro mantendo os outros constantes, o que gerou conclusões contraditórias: por exemplo, em alguns casos diz-se que baixas frequências são melhores enquanto outros demonstram que altas frequências são mais benéficas, ou que campos pulsantes não produzem injúrias em certas circunstâncias, mas podem produzir em outras.

### 3.3.2.1 Campos Elétricos Pulsantes

As reações produzidas por tensões pulsadas foram descritas por (Lamarque, *Electrophysiology of Fish in Electric Fields*, 1990) utilizando pulsos quadrados, positivos, com frequência de 100Hz e duty cycle de 10%, da seguinte maneira:

Não mais são observadas as reações de Natação prejudicada, narcose elétrica e segundo movimento em direção ao anodo.

- Peixe orientado para o Anodo:
  - Com o peixe orientado ortogonalmente às linhas de campo, ele começa a nadar com ondulações curtas e rápidas em direção ao anodo por volta de  $8,0V/m$ , o que pode variar dependendo da espécie. Se comparado com o campo DC, esta reação ocorre em um limiar consideravelmente inferior. Por exemplo, para lampréias, é necessário um campo DC de  $31V/m$  enquanto que apenas  $8,1V/m$  bastariam para um campo PDC.
  - A tetania ocorre em limiares próximos a  $16,5V/m$ , também significativamente inferiores aos limiares do campo DC ( $100V/m$ ). Reações intermediárias entre tetania e ondulações curtas e rápidas não são apresentadas.
- Peixe orientado para o catodo
  - As reações são as mesmas apresentadas quando orientado para o anodo, com a diferença que em seu primeiro movimento de natação o peixe se volta para o anodo.
- Peixe paralelo às linhas de Campo Elétrico
  - Com campos próximos à  $13V/m$  o peixe se vira para o anodo e apresenta então as reações descritas para esta situação.

### 3.3.2.2 Campos Elétricos alternados

A corrente alternada muda de sentido a cada semi-ciclo. Assim, o efeito da polaridade não mais será observada para esta forma de onda. Se o peixe estiver de frente a um eletrodo e um campo alternado for aplicado, ele se moverá em direção a este eletrodo devido ao estímulo elétrico provocado em todo o corpo do peixe, similarmente ao que ocorre com correntes pulsadas. Esta reação foi descrita pela primeira vez por

(Scheminzky, 1924) e denominada *oscillotaxis*. Segundo (Lamarque, 1967) a frequência ótima para induzir a *oscillotaxis* em Anguilliformes e trutas é de aproximadamente 200 e 100 Hz respectivamente.

Após aplicado o campo, o peixe se movimenta muito pelo aquário em várias direções até encontrar uma posição confortável (paralelo às linhas de campo), onde permanece. Nesta posição o estímulo elétrico é simétrico aos dois lados do peixe, o que explica a não curvatura para o anodo, já que não há efeito da polaridade neste caso. Se o peixe tenta modificar sua posição no aquário, ele é forçado a retornar à posição paralela ao campo e, dependendo da amplitude do campo, qualquer movimento pode levá-lo à tetania.

### 3.3.3 Diferenças entre as reações provocadas por corrente contínua, pulsada e alternada

Conforme descrito anteriormente, correntes contínuas provocam taxia anódica (atração para o anodo) e induzem tetania apenas em regiões bem próximas aos eletrodos. PDC também provocam eletrotaxia em direção ao anodo, porém de uma forma mais branda e induzem à tetania em regiões mais afastadas dos eletrodos. Correntes alternadas não provocam eletrotaxia e os peixes entram em tetania em regiões mais afastadas dos eletrodos se comparado com PDC e DC.

Tais diferenças de comportamentos frente a diferentes formas de onda de corrente devem ser levadas em conta no projeto e especificação de cada equipamento, levando-se em conta as espécies alvo e as características do local. Por exemplo, a utilização de DC na pesca elétrica fará com que os peixes capturados se aglomerem no entorno do eletrodo, o que facilita a remoção destes indivíduos da água, porém a região sob influência é menor se comparado ao PDC ou AC.

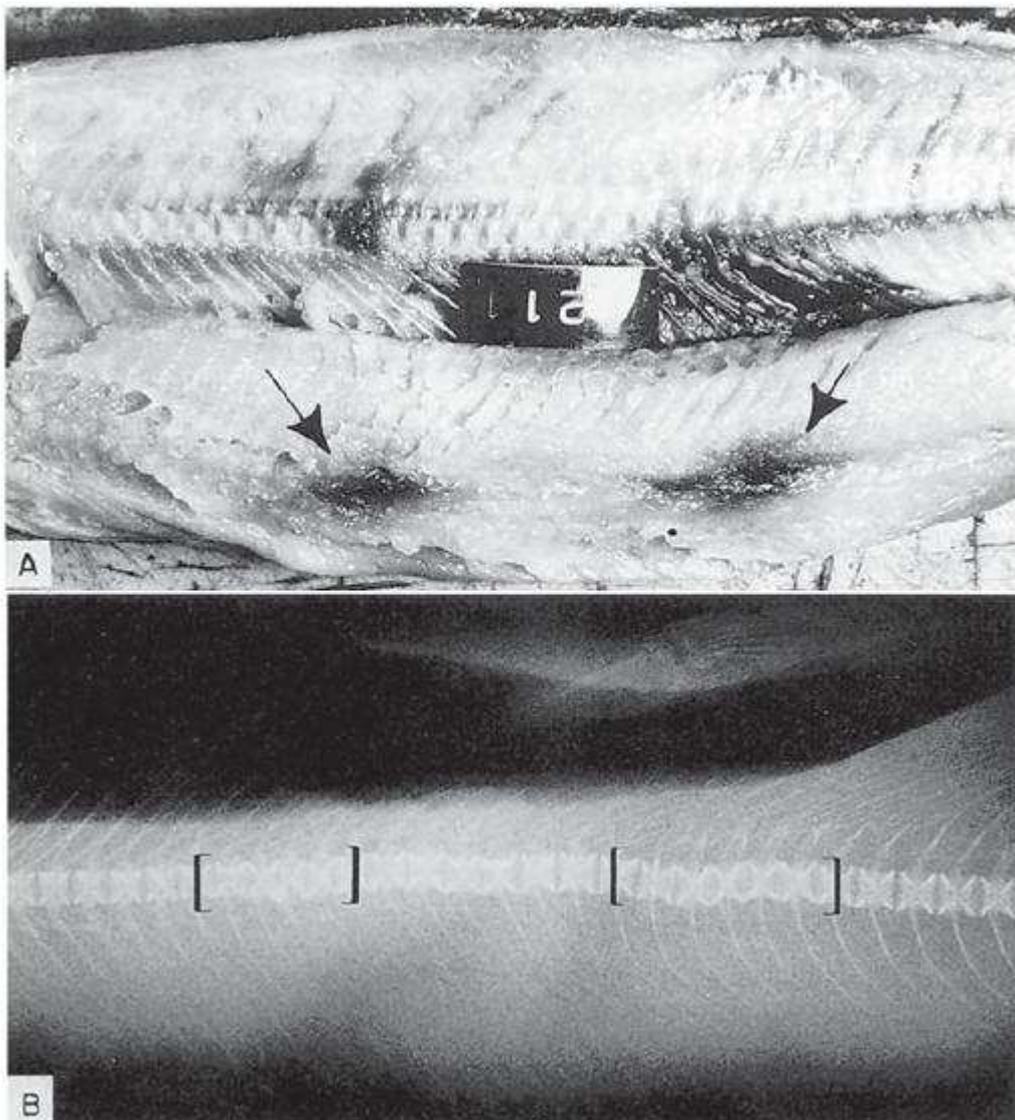
## 3.4 Efeitos nocivos das correntes elétricas

Em situações extremas, a passagem de corrente elétrica pelo organismo do peixe pode causar lesões graves ou até mesmo levá-lo a morte. O grau das lesões está relacionado com o nível de tensão aplicado, tempo de exposição, espécie, tamanho e condições do peixe, posição em relação às linhas de campo e, para correntes alternadas, as características da forma de onda como frequência e largura de pulso.

Dentre os principais efeitos da corrente elétrica destaca-se a fadiga e quebra de ossos e vértebra. Segundo (Lamarque, 1990) fadiga ocorre quando o peixe é exposto a um longo período de tempo em uma corrente capaz de deixá-lo em estado de tetania. Na

maioria das vezes, após cessado o campo, o peixe não se recupera imediatamente e morre por falta de ar, pois sua respiração não é restabelecida.

A fratura de ossos, principalmente da vértebra, e conseqüentes hemorragias internas são causados por fortes e rápidas contrações provocadas por correntes. Há casos em que um único pulso de corrente ou até mesmo reduzidas tensões são suficientes para provocar tais efeitos.



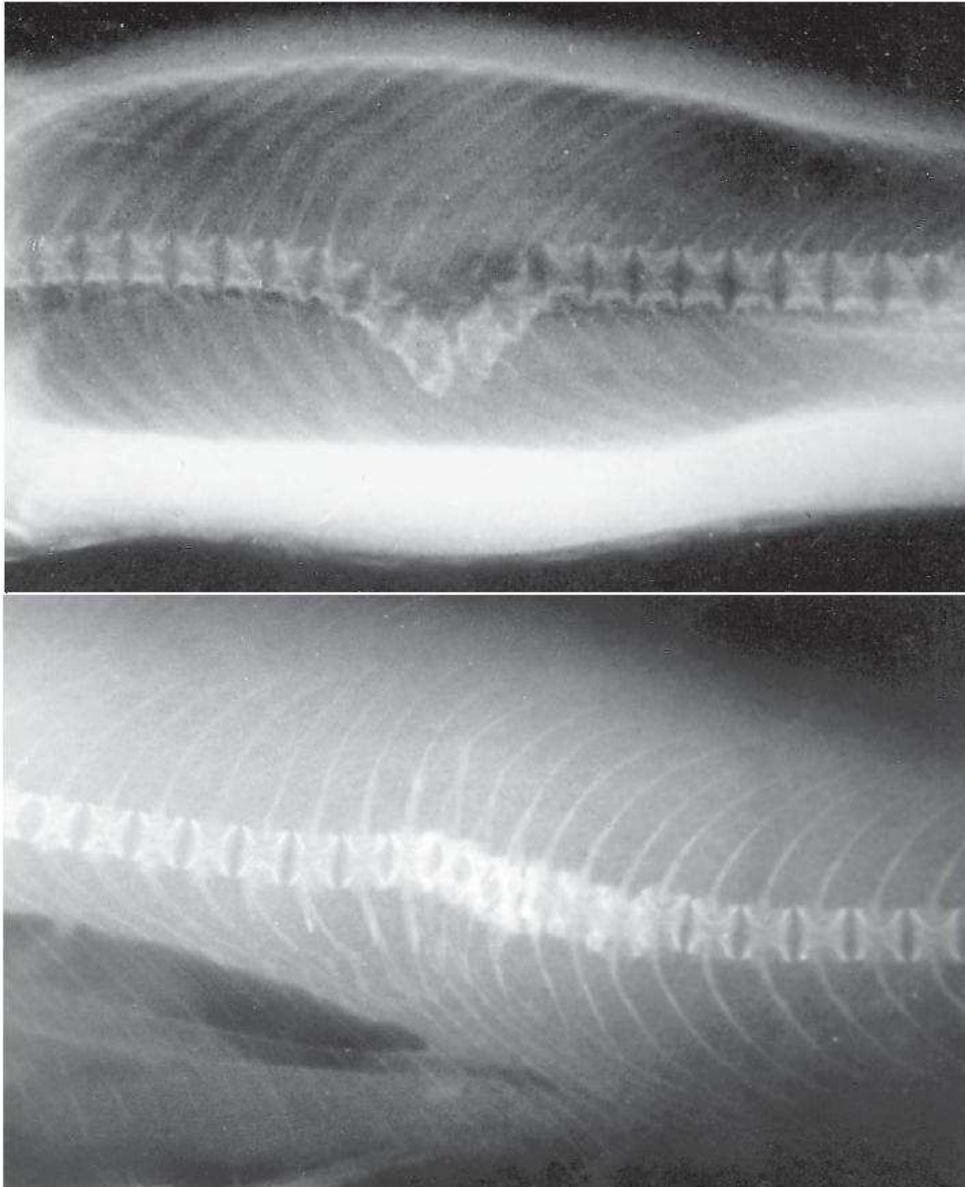
*Figura 3-4. Lesões causadas por pesca elétrica, representando lesões na coluna (Foto B) e hemorragias provocadas por esta lesão (Foto A).*

*Fonte: (Snyder, Electrofishing and its harmful effects on fish, Information and Technology Report USGS/BRD/ITR--2003-0002, 2003)*

Ainda segundo (Lamarque, 1990), a fratura da coluna vertebral pode ocorrer de duas diferentes formas: achatamento das vértebras, lesão tipicamente provocada por

correntes contínuas e desalinhamento ou deslocamento das vértebras, efeito das correntes alternadas.

O achatamento das vértebras ocorre apenas em níveis de corrente DC bastante elevados e em número reduzido de peixes, pois em correntes contínuas os peixes tendem a se alinhar em direção ao anodo e podem permanecer imóveis nesta posição por várias horas.



*Figura 3-5. Efeito da corrente elétrica sobre peixes: quebra e achatamento de vértebras.*  
*Fonte: (Snyder, Electrofishing and its harmful effects on fish, Information and Technology Report USGS/BRD/ITR--2003-0002, 2003)*

O movimento de natação natural de um peixe se dá com movimentos ondulatórios do corpo, com os músculos de um lado do corpo se contraindo enquanto os

músculos do outro lado estão relaxados. Quando submetido a campos variáveis (PDC e AC), os músculos de ambos os lados do corpo se contraem abrupta e simultaneamente, aplicando forças contrárias à coluna vertebral, que pode ter suas vértebras quebradas ou deslocadas. Não são necessárias grandes amplitudes de corrente, pois é a aplicação abrupta de corrente (degraus de corrente) a maior responsável por causar tais lesões.

Peixes em piores condições físicas podem ter menor chance de lesões na espinha, pois suas reações de contração muscular perante a aplicação de corrente elétrica são menos violentas. Por outro lado, seu estado debilitado pode reduzir sua suportabilidade ao stress causado pela tetania e apnéia e sua estrutura óssea fragilizada também pode torná-lo mais suscetível. Ainda não se tem dados oficiais sobre este fator na mortalidade de peixes. Todos os dados e citações realizadas baseiam-se apenas em observações e suposições.

O deslocamento ou quebra de ossos, em grande parte dos casos, não leva o peixe a morte, porém, seu corpo permanecerá contorcido e seu crescimento será prejudicado, com possíveis deformações, conforme fotografias apresentadas na FIG 3-6.



*Figura 3-6. Deformação no corpo e crescimento anormal de trutas (Fotos A e B), provavelmente causados por corrente elétrica (pesca elétrica), em comparação com uma truta normal (Foto C).  
Fonte: (Snyder, Electrofishing and its harmful effects on fish, Information and Technology Report USGS/BRD/ITR--2003-0002, 2003)*

### **3.5 Trabalhos relevantes de Eletrosensibilidade**

Para que se possa operar barreiras elétricas e equipamentos de pesca elétrica de forma segura e não prejudicial para os peixes, é preciso que se estabeleçam os níveis ou limites das grandezas elétricas (sejam elas intensidade de campo elétrico, potência transferida ou corrente elétrica) suficientes para causar os diferentes padrões de reação já descritas no item 3.3.

Atualmente apenas os trabalhos publicados por (Lopes, Silva, & Martinez, 2008) e (Silva, Lopes, & Martinez, 2009) apresentam dados sobre a suportabilidade de peixes brasileiros à aplicação de corrente elétrica. A grande maioria dos trabalhos estrangeiros desenvolvidos sobre a interação de peixes e eletricidade está voltada para a pesca elétrica, sendo que estes buscam estabelecer quais as melhores formas de onda, frequência e amplitude de campo para as diferentes espécies.

Embora pareça ser evidente que o tamanho do peixe influencie nos efeitos causados, pois quanto maior o comprimento do indivíduo, maior será a diferença de potencial à qual ele estará sujeito, tal afirmação não é unanimidade entre os pesquisadores, como apresentado por (Snyder, 2003). Alguns testes de laboratório e de campo mostraram que a mortalidade entre exemplares maiores de peixes apenas aumentava quando o tempo de exposição à corrente era aumentado e alguns pesquisadores chegaram a reportar até uma maior mortalidade entre os peixes menores.

Lamarque, 1990 (Lamarque, *Electrophysiology of Fish in Electric Fields*, 1990), estudou fisiologicamente os motivos pelos quais os peixes se comportam de maneiras distintas em diferentes campos elétricos. Este autor propôs ainda padrões de comportamento e efeitos nocivos da corrente elétrica sobre o organismo dos peixes e se constitui em uma importante referência para os estudos dos efeitos da corrente elétrica sobre o organismo de peixes. O trabalho citado detalha o funcionamento do sistema nervoso dos peixes e relaciona o estímulo do campo elétrico sobre as células nervosas com a orientação do peixe neste campo.

Em (Kolz A. L., 1989), o autor sugere que os níveis de reação dos peixes estão relacionados à potência transferida para cada peixe, sendo a pesca elétrica um fenômeno de transferência de potência elétrica. Baseando-se em conceitos teóricos de eletricidade postulou que a potência transferida para o peixe é proporcional à tensão aplicada e à condutividade da água e do peixe, através da seguinte relação:

$$P_f = \frac{P_w}{M_{cp}} \quad [3.1]$$

sendo  $P_w$  e  $P_f$  a densidade de potência aplicada na água e no peixe ( $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ ) respectivamente, e  $M_{cp}$  uma constante (multiplier for constant power) dada por:

$$M_{cp} = \frac{\left(1 + \frac{C_f}{C_w}\right)^2}{4 \cdot \frac{C_f}{C_w}} \quad [3.2]$$

onde  $C_w$  e  $C_f$  representam a condutividade da água e condutividade efetiva do peixe ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), respectivamente. (Kolz & Reynolds, 1989) utilizaram esta relação para determinar limiares de tetania do *goldfish* em função da potência transferida e (Miranda & Dolan, 2003) validaram o modelo através de experimentos com água de diferentes condutividades e estudaram a influência da condutividade do peixe sobre a potência transferida.

Já (Holliman, Reynolds, & Kwak, 2003), (Bird & Cowx, 1993) e (Roth, Imsland, & Moeller, 2003) estudaram os efeitos da eletricidade sobre o organismo dos peixes relacionando-os com a intensidade do campo elétrico e/ou tensão entre eletrodos. Esta falta de padronização para os procedimentos de teste e as diversas maneiras de expor os resultados de eletrosensibilidade dificulta o estabelecimento de padrões de comportamento e quase inviabilizam a comparação entre resultados.

### **3.6 Aparatos apresentados na literatura**

As bancadas de teste normalmente utilizadas para estudos de eletrosensibilidade são constituídas de tanques de vidro de seção retangular, como em (Bird & Cowx, 1993) e (Roth, Imsland, & Moeller, 2003) ou tanques de fibra de vidro, também com seção retangular, como em (Kolz & Reynolds, 1989), (Holliman, Reynolds, & Kwak, 2003) e (Dolan & Miranda, 2003). O aparato elétrico mais utilizado consiste normalmente de placas de aço ou cobre instaladas nos tanques de maneira a preencher toda a seção reta do aquário e utilizadas como eletrodos, transformadores isoladores, auto-transformadores variáveis (“*varivolts*”), circuitos retificadores e pulsadores para criação de campos elétricos pulsantes. Alguns outros trabalhos utilizam ainda equipamentos comerciais de pesca elétrica inseridos em tanques de grandes proporções de vidro ou fibra.

### **3.7 Barreiras Elétricas**

O uso de barreiras elétricas para impedir o movimento de migração ascendente de peixes foi pela primeira vez aplicado em larga escala nos Estados Unidos, na década de 50, com o intuito de impedir que a lampreia do mar (*Petromyzon marinus*) alcançasse a região dos Grandes Lagos (Clarkson, 2003). O objetivo específico do programa era impedir que a lampreia invadisse a região e atacasse a população de trutas (*Salvelinus namaycush*) bloqueando as migrações de desova da lampreia em riachos da região dos Grandes Lagos. As barreiras elétricas foram instaladas em tributários considerados inapropriados para barreiras físicas que impedem a subida das lampreias (barreiras que criam uma queda d’água de 60cm a 1,2m ou que elevam a velocidade do fluxo de água a um nível que as lampreias não conseguem nadar, devido a sua baixa capacidade natatória). As barreiras elétricas instaladas foram eficientes até a década de 60, quando o uso de produtos químicos ganhou força e as barreiras foram desativadas.

A partir da década de 80, com o advento da pesca elétrica e uso de fontes pulsantes, as barreiras elétricas voltaram a ser utilizadas não só para controle da

migração da lampreia, mas também como solução para outros tipos de manejo e controle da movimentação de peixes, como estimativa de fuga e bloqueio de entrada de peixes.

Atualmente no Estados Unidos, dois sítios de utilização da barreira elétrica merecem destaque, sendo eles:

**1. Central Arizona Project (CAP)**, um aqueduto de 540km de extensão que desvia água do rio Colorado para o *Gila River*. As barreiras elétricas foram instaladas com o intuito de impedir que peixes e outros organismos não-nativos de um rio consigam alcançar o outro. Quatro barreiras foram instaladas entre os anos de 1988 e 1990, sendo que três ainda continuam em operação. A FIG 3-7 ilustra a localização das barreiras nos canais artificiais.

(Clarkson, 2003) relata que pelo menos uma espécie conseguiu ultrapassar a barreira elétrica durante períodos de funcionamento ininterrupto da mesma (período em que não houve qualquer tipo de falha com consequente desligamento), já que houve registros desta espécie a montante da barreira, onde outrora esta espécie nunca havia sido registrada. Este fato sugere que, embora o trânsito de peixes pelas barreiras seja consideravelmente baixo, ela não bloqueia totalmente a migração ascendente dos peixes pelos canais. O fabricante da barreira explica que durante épocas de baixa vazão (5 a 8 cm de profundidade), grandes peixes podem não absorver energia elétrica suficiente para entrarem em tetania, devido a reduzida superfície do corpo que fica exposta ao campo elétrico. Porém, a associação da barreira com obstáculos verticais pode eliminar a transgressão destes animais através da barreira.

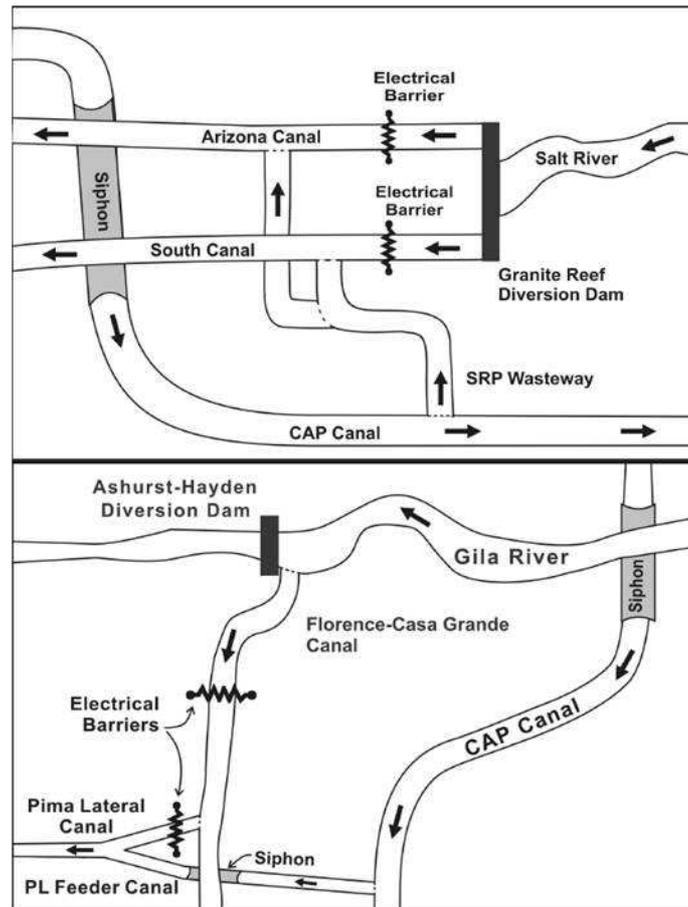


Figura 3-7. Barreiras elétricas instaladas no Central Arizona Project para impedir migração de peixes pelos canais artificiais. A barreira no Pima Lateral Canal foi instalada em 1990 e desenergizada em 1992, pois seu funcionamento era redundante com a barreira de Florence-Casa Grande Canal.

Fonte: (Clarkson, 2003)

**2. Chicago Sanitary and Ship Canal (CSSC)**, é um conjunto de canais artificiais que conectam o lago Michigan à bacia do rio Mississippi. As barreiras elétricas foram instaladas para evitar que espécies não-nativas de uma bacia pudessem alcançar a outra, evitando assim predação, competição por alimento, espaço e áreas de desova entre tais espécies. Especificamente, busca-se impedir que carpas asiáticas (peixes não-nativos da América do Norte e que causam grande desequilíbrio na bacia do rio Mississippi) alcancem os Grandes Lagos.

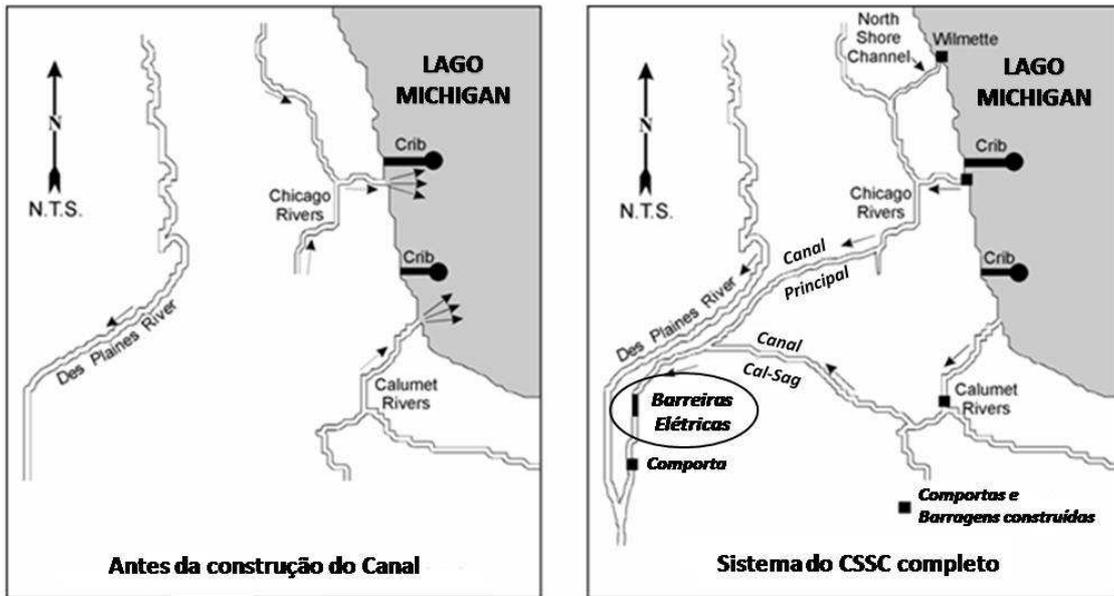


Figura 3-8. Região do Lago Michigan e bacia do rio Mississippi antes e após a construção do Chicago Sanitary and Ship Canal e local de instalação do conjunto de barreiras elétricas.

Fonte: US Army Corps of Engineers, disponível em: [www.lrc.usace.army.mil/projects/fish\\_barrier](http://www.lrc.usace.army.mil/projects/fish_barrier)

As barreiras do CSSC são operadas pelo corpo de engenheiros do exército americano e, segundo (Shea, 2005) a escolha por esta tecnologia foi feita dentre várias opções como: barreira de bolhas, acústica, térmica, luz UV, redução de oxigênio dissolvido, fluxo reverso, reprojeto do canal, predadores, parasitas, ozônio, nitrogênio e cloro. O exército optou pelo uso da barreira elétrica pelos seguintes motivos:

- Barreiras elétricas já haviam sido utilizadas com sucesso em canais artificiais;
- Não impedem o fluxo de água e movimento de embarcações pelo canal;
- Afugentam peixes sem matá-los;
- Não degradam a qualidade da água no canal, como seria o caso do uso de produtos químicos e biológicos.

Iniciou-se a operação do sistema em abril de 2002, com uma barreira que utiliza corrente pulsante, a título de experimentação. É operada em baixa tensão, com corrente pulsante sendo transportada através de cabos que criam campo elétrico na água. Um esboço do sistema é apresentado na Fig. 18.

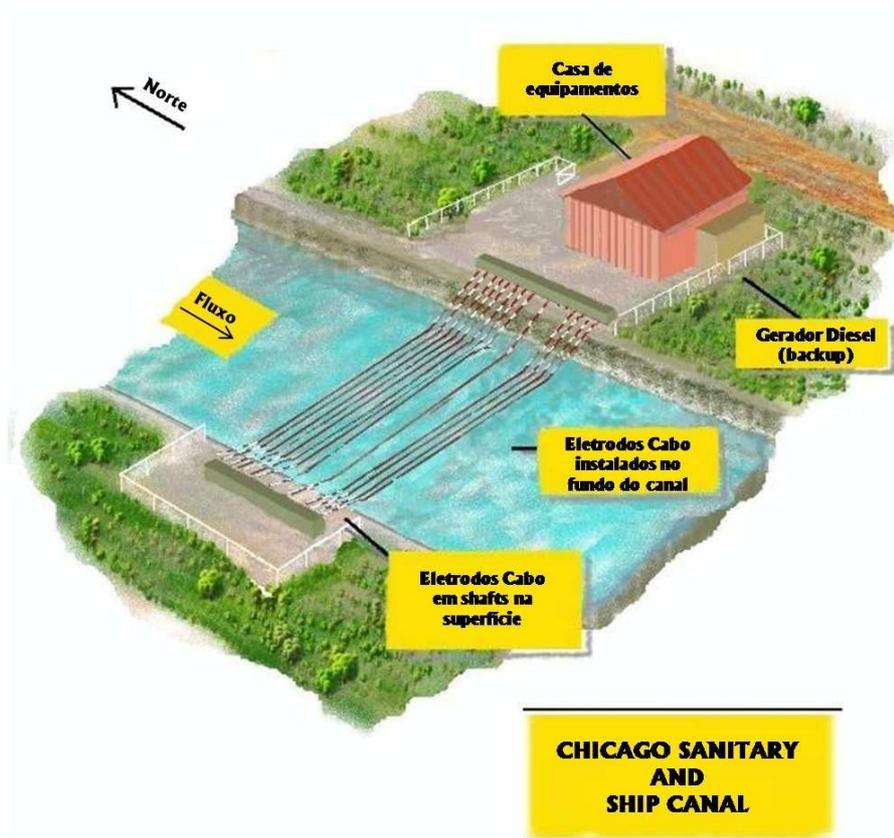


Figura 3-9. Instalação da barreira elétrica utilizando cabos como eletrodos.  
Fonte: US Army Corps of Engineers, disponível em: [www.lrc.usace.army.mil/projects/fish\\_barrier](http://www.lrc.usace.army.mil/projects/fish_barrier)

Baseado na efetividade da barreira experimental (chamada de Barreira I) e visto que esta estava dimensionada para operar por apenas alguns anos, em 2004 iniciou-se a construção de uma segunda barreira (Barreira II), construída 800m à jusante da Barreira I, com algumas melhorias e capaz de gerar campos ainda mais intensos (0,7V/cm). A Barreira II possui área de atuação mais ampla e consistem em dois sistemas de eletrodos e casa de equipamentos, chamados de Barreira IIA e IIB. Em 2006 a Barreira IIA entrou em operação, liberando a Barreira I para reparos de melhoria. A construção da Barreira IIB tem previsão de conclusão para 2010. Quando concluído, o sistema de barreiras elétricas terá a seguinte estrutura:

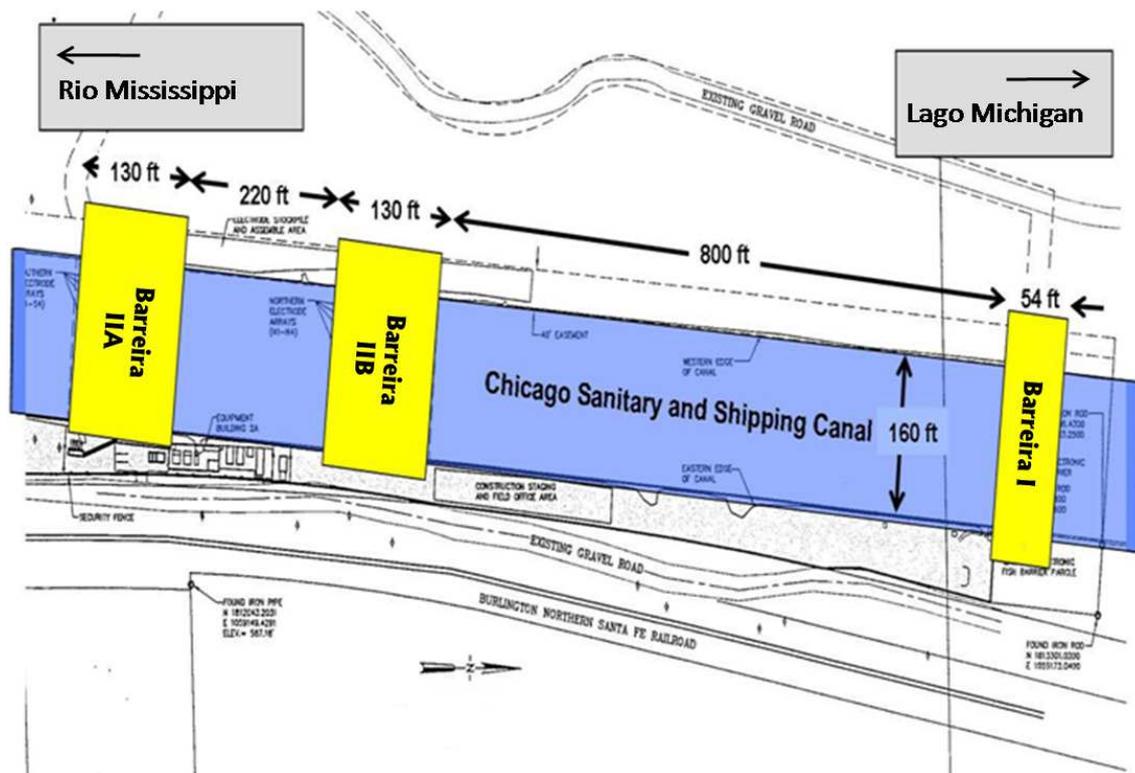


Figura 3-10. Sistema de barreiras elétricas do CSSC.

Fonte: U.S. Army Corps of Engineers, disponível em: [www.lrc.usace.army.mil/projects/fish\\_barrier](http://www.lrc.usace.army.mil/projects/fish_barrier)

De acordo com (Shea, 2005), o custo de planejamento de projeto e design da Barreira I foi de US\$900.000,00, e os custos de construção foram de US\$1.800.000,00. A monitoração biológica do sistema adicionou ao projeto um custo de US\$600.000,00. Os custos mensais com operação e manutenção são de aproximadamente US\$2.000,00. Segundo dados do *US Army Corps of Engineers* a Barreira II tem previsão de custo total de US\$16 milhões.

Tanto a barreira do CAP quanto o sistema de barreiras do CSSC, apesar de serem operadas por órgãos governamentais, foram construídas pela Smith-Root, Inc., empresa de origem norte-americana e atualmente sediada no Canadá. Possui atualmente 10 sites de operação de barreiras elétricas nos Estados Unidos, onde presta serviços de monitoração, manutenção e operação.

As barreiras da Smith-Root, Inc. utilizam campos pulsantes graduais produzidos a partir de geradores de pulso controlados por um computador e conectados a cabos que são instalados em uma base de concreto, conforme FIG 3-11.

A empresa prevê aplicações desta configuração de barreira tanto para migração ascendente quanto para descendente, em diversos sites, como canais artificiais, tubos de restituição de máquinas e tomadas d'água.

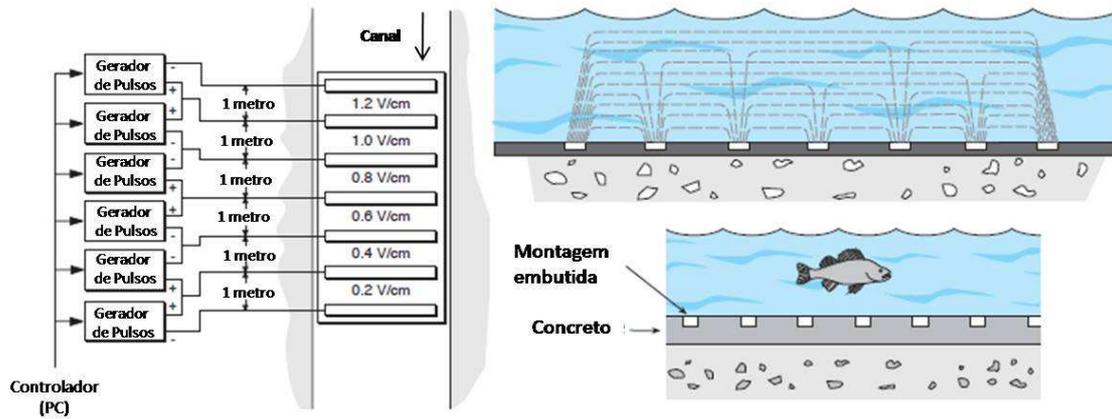


Figura 3-11. Sistema de barreiras elétricas do CSSC.  
 Fonte: Catálogo digital Smith-Root, Inc., disponível em: [www.smith-root.com](http://www.smith-root.com)

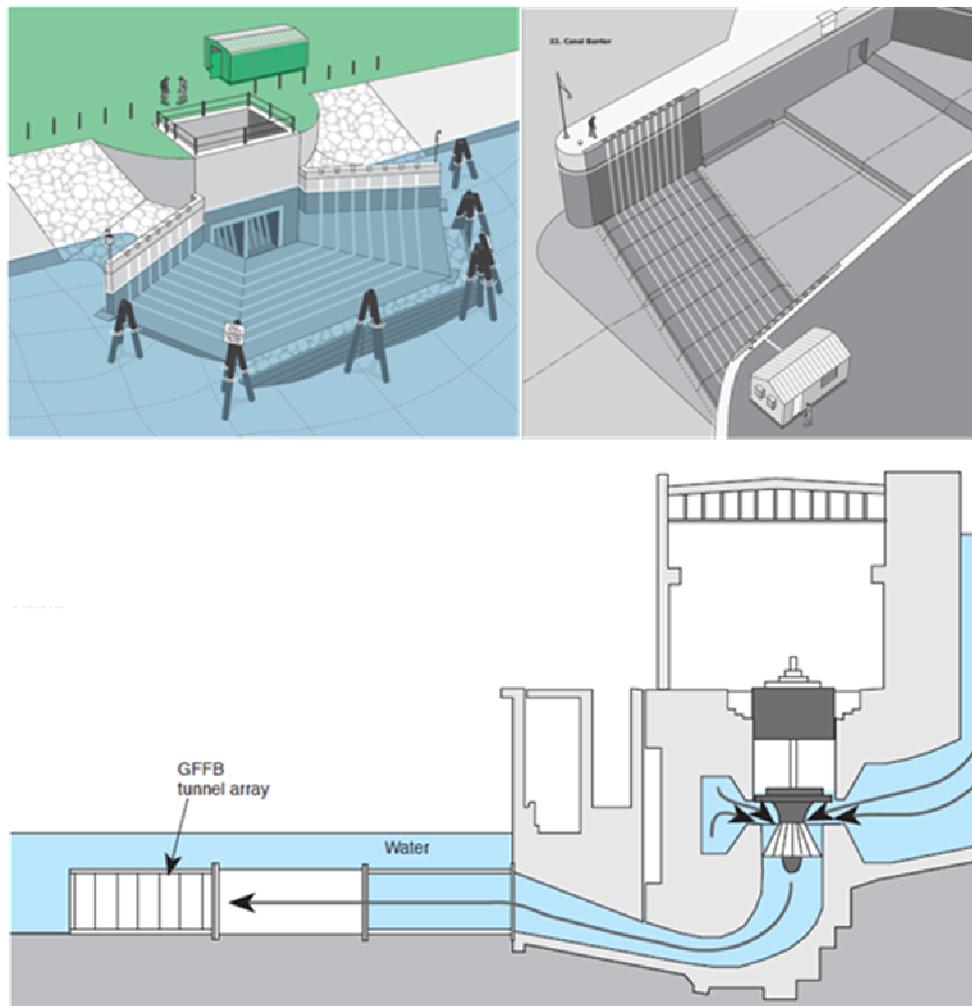


Figura 3-12. Possíveis aplicações das barreiras da Smith-Root.  
 Fonte: Catálogo digital Smith-Root, Inc., disponível em: [www.smith-root.com](http://www.smith-root.com)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Escolha da espécie alvo

Agentes geradores de energia relatam freqüentes acúmulos de peixes no tubo de sucção das usinas em eventos que reduzem o fluxo de água proveniente das turbinas. Relatos de importantes empreendimentos nas regiões hidrográficas do Paraná e São Francisco mostram que o *Pimelodus maculatus*, popularmente conhecido como mandi, é a espécie que apresenta o maior índice de mortandade devido a operação de turbinas hidráulicas, como é o caso da UHE de Funil, no município de Lavras, MG.

A espécie possui hábitos migratórios que ocorrem durante todas as épocas do ano, principalmente no período da piracema, quando realizam a migração reprodutiva. É um peixe de couro de água doce, com ampla distribuição geográfica, podendo ser encontrado na Amazônia, Guianas, Venezuela, Peru, Bolívia, Paraguai, Argentina, Uruguai, sendo ainda abundante em toda a bacia do Paraná e São Francisco, onde possui expressiva importância na pesca comercial e desportiva. Possui grandes variações cromáticas e até estruturais (Santos, 1954). Como a maioria dos peixes de couro, habita o fundo dos ambientes aquáticos, habitando tanto ambientes lênticos como em lóticos. É comum nos reservatórios hidrelétricos do sudeste do Brasil (Companhia Energética de Minas Gerais, 2006). O comprimento médio na primeira maturação sexual varia de 12,5 a 18cm para machos e 12 a 19cm para fêmeas. É um peixe onívoro, alimentando-se de larvas bentônicas de insetos, algas, moluscos, peixes e fragmentos vegetais. Possui preferência por ambientes escuros, sendo considerado de porte médio, alcançando até 40 centímetros de comprimento e peso de 3 quilogramas (Companhia Energética de Minas Gerais; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 2000). Deve-se tomar cuidado na manipulação destes peixes, devido aos esporões das nadadeiras peitorais e dorsal, que são farpados e possuem muco tóxico. Seu corpo é alto, cabeça curta e baixa, com a boca terminal e a fenda bucal ampla (Santos, 1954). Possui barbilhões maxilares longos que acredita-se ser um poderoso órgão sensorial. É bastante capturado e comercializado em suas regiões de ocorrência, e entre os pescadores é reconhecido como mandi, mandi-bandeira, mandi-chorão, mandi-guaçu, mandi-amarelo ou mandi-pintado. A Fig. 4-1 apresenta um exemplar de *Pimelodus maculatus* mantido em laboratório.

Devido à alta incidência desta espécie nos tubos de sucção das usinas, à facilidade de captura e o conhecimento existente para a manutenção de exemplares em laboratório, optou-se por investigar os efeitos de correntes elétricas e a eficiência da barreira elétrica com o *Pimelodus maculatus*.



Figura 4-1. Foto de um *Pimelodus maculatus* mantido em laboratório. (Fonte própria)

#### **4.2 Manutenção e manejo dos peixes em laboratório**

Como este trabalho envolveu experimentos com peixes vivos, foi necessária autorização do Comitê de Ética em Experimentação Animal (CETEA) da Universidade Federal de Minas Gerais para executá-lo. Toda a metodologia de teste e manejo foi avaliada pelo Comitê, que autorizou a experimentação animal tendo registrado o trabalho com o Protocolo número 188/2008. Cópia da autorização concedida pelo CETEA é apresentada nos “Anexos” deste trabalho.

Todos os peixes utilizados nesta pesquisa foram capturados no período noturno, por meio de “armadilhas” instaladas no rio Grande, em um dos vários lagos formados pela represa de Furnas, no município de Areado-MG. Foram efetuadas várias coletas durante a realização dos experimentos.

Após coletados, os peixes foram transportados em uma caixa de fibra de vidro com capacidade de 500 litros, específica para transporte de peixes vivos, fabricante Bernauer Aquacultura modelo TransFisch E-1502, com oxigenação contínua e adição de produtos químicos necessários para manter saudável a mucosa do peixe e combater possíveis doenças.

Em laboratório, os peixes foram contados e mantidos em dois aquários circulares, com sistema de filtragem e oxigenação permanente, além de um sistema de circulação de água que é acionado por algumas horas do dia, como mostrado na FIG 4-2.

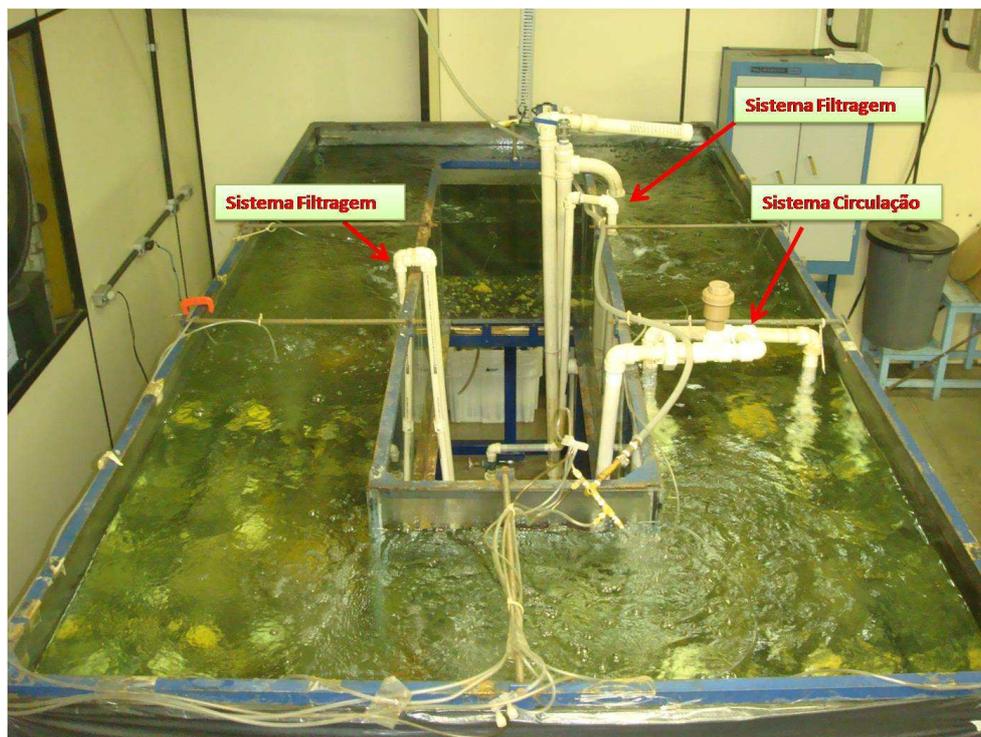


Figura 4-2. Foto do tanque de manutenção dos exemplares de *Pimelodus maculatus* mantidos em laboratório.

As dimensões e capacidade dos dois tanques de manutenção estão mostradas na FIG 4-3.

Os 30 primeiros dias foram considerados de aclimatação dos animais ao ambiente de laboratório. Durante este período, nenhum experimento foi realizado. Procedia-se apenas o tratamento com remédios bactericidas, para tratamento de ictio (doença dos pontos brancos), fungos e drogas (wound-ease™, dechlor-ease™, ick-ease™ e protect-ease™ nas proporções recomendadas pelo fabricante Mydor™) que ajudam a regeneração da membrana mucosa, além de proteger os peixes ao ataque de parasitas e bactérias oportunistas que surgem com o stress provocado pelo transporte e ambientação.

Para a realização de qualquer experimento, os peixes eram selecionados arbitrariamente e depois de ensaiados, eram mantidos em tanques de fibra de vidro (FIG 4-4) de maneira a não se misturarem aos exemplares ainda não testados. Não se utilizou qualquer peixe em mais de um experimento que envolvesse corrente elétrica.

Os peixes eram alimentados diariamente com ração extrusada (com 40% de proteína e 350mg de vitamina C/kg, diâmetro de 6 a 8mm), sempre nos períodos de fim de tarde. A alimentação era suprimida por um ou mais dias dependendo dos experimentos realizados.

Semanalmente era realizada limpeza por sucção nas pedras de fundo dos aquários e quinzenalmente a limpeza dos vidros. Foi utilizado ainda filtro com lâmpada ultra-violeta para melhorar a qualidade da água e eliminar organismos nocivos à saúde dos peixes.

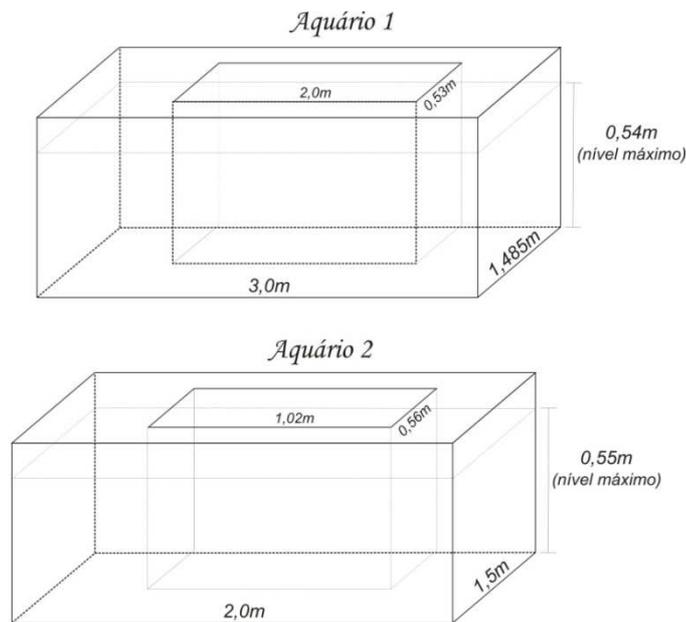


Figura 4-3. Dimensões e capacidade dos tanques de manutenção dos peixes.



Figura 4-4. Foto de um dos tanques de fibra de vidro utilizados para separar peixes já ensaiados dos que ainda não haviam sido testados.

### 4.3 Bancadas de teste

Todos os experimentos foram realizados em laboratório, sendo idealizados e montados no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.

#### 4.3.1 Ensaio de Eletrosensibilidade

Os ensaios de eletrosensibilidade foram inicialmente realizados em um canal de vidro de 980mm de comprimento, 260mm de largura e 600mm de altura, com uma placa de aço galvanizado instalada em cada face menor do tanque, conforme FIG. 4-5.

Iniciados os testes, detectou-se a necessidade de utilizar um tanque de menores dimensões, já que os peixes eram testados individualmente e o tanque em uso dificultava a análise dos resultados, pois com o aumento do campo elétrico aplicado os peixes tendiam a se alinhar às linhas de campo elétrico (equipotenciais), onde ficavam sujeitos a uma menor diferença de potencial, e permaneciam nesta posição indefinidamente. Assim, optou-se utilizar um tanque com largura inferior ao comprimento médio dos peixes, o que dificultava a permanência dos mesmos na posição de conforto. O novo tanque de vidro utilizado possuía 490mm de comprimento, 200mm de altura e 100mm de largura, com eletrodos de aço galvanizado dispostos na mesma posição do tanque representado na FIG 4-5.

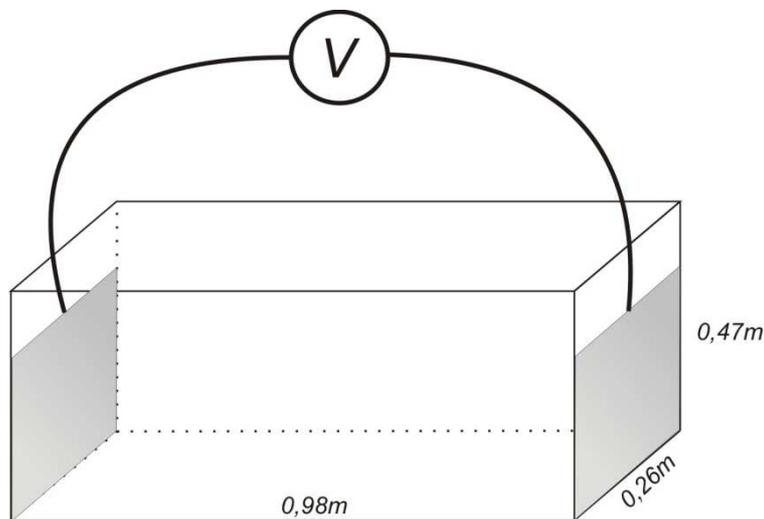


Figura 4-5. Representação do primeiro tanque utilizado para testes de eletrosensibilidade.

Para os testes com forma de onda senoidal a 60Hz, os eletrodos foram ligados a um auto-transformador variável utilizado para regular a tensão aplicada entre as placas, conforme figura a seguir:

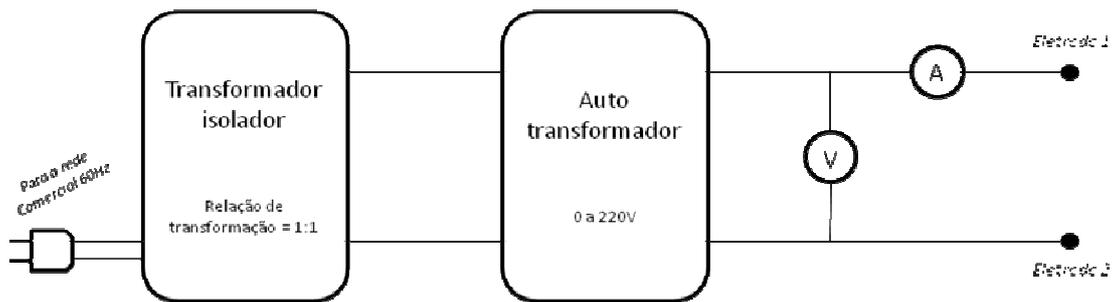


Figura 4-6. Representação dos equipamentos elétricos utilizados para os testes de eletrosensibilidade com onda senoidal a 60Hz.

Frequências diferentes de 60Hz para forma de onda senoidal, exigem a utilização de um conversor de frequência ou alguma fonte de tensão capaz de gerar ondas senoidais de frequências variáveis. Assim, para os testes de 50, 1000 e 10000Hz com forma de onda senoidal foi utilizado um gerador de sinais, também conhecido como gerador de funções, modelo Minipa MGF4200, que sintetiza sinais de tensão senoidais em uma ampla faixa de frequências. Como a amplitude dos sinais produzidos pelo gerador de funções é baixa, foi necessário utilizar um amplificador operacional linear de potência modelo APEX PA93. Os amplificadores operacionais recebem um sinal de tensão analógico de baixa amplitude e amplificam sua magnitude de forma controlada.

Projeteu-se uma placa de circuito impresso para suportar o amplificador e demais componentes utilizados para a amplificação de sinais, como o retificador e os capacitores para alimentação do amplificador em  $\pm 100\text{Vdc}$ , filtros e resistores para controle do ganho (relação  $V_{\text{saída}}/V_{\text{entrada}}$ ). O circuito projetado e montado em placa de circuito impresso é apresentado na FIG 4-7.

Os testes de 1000Hz com tensão pulsada e duty cycle de 50% foram realizados utilizando-se o transistor de potência TIP31C que chaveava (entrando em corte e saturação) com um sinal pulsante produzido através do gerador de funções Minipa MGF4200. O controle de amplitude da tensão entre eletrodos foi realizado por uma fonte de tensão contínua. A FIG 4-8 apresenta um esquemático do circuito utilizado para gerar tensão pulsante entre os eletrodos, que foram ligados entre coletor do transistor e terra do sistema, e a FIG 4-9 representa a forma de onda aplicada entre eletrodos nos testes de tensão pulsada.

Para os testes com corrente contínua foi utilizada uma fonte variável de tensão contínua com seus terminais positivo e negativo ligados diretamente a um eletrodo cada.

Para medição de tensão e corrente foram utilizados um osciloscópio modelo Tektronix TDS 2024B e multímetros digitais Minipa ET-2042C.



Figura 4-7. Amplificador montado para os testes de 50, 1000 e 10000Hz.

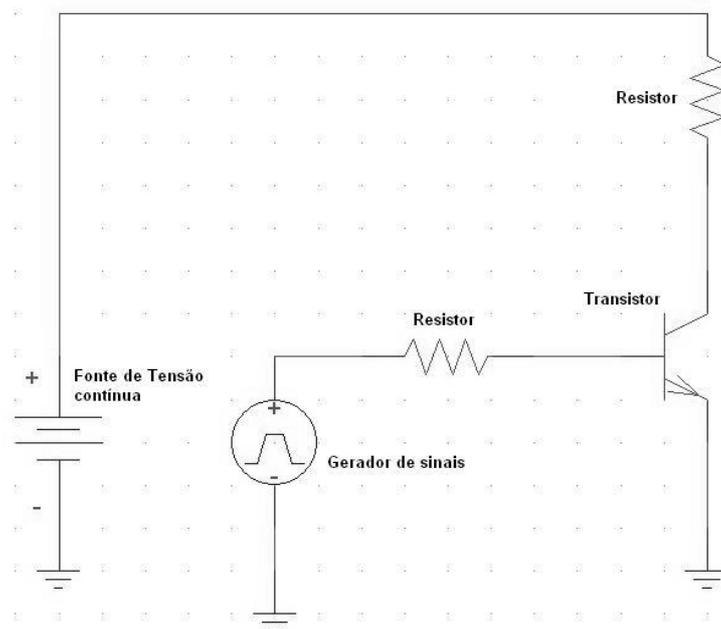


Figura 4-8. Circuito eletrônico montado para geração de tensão pulsante.

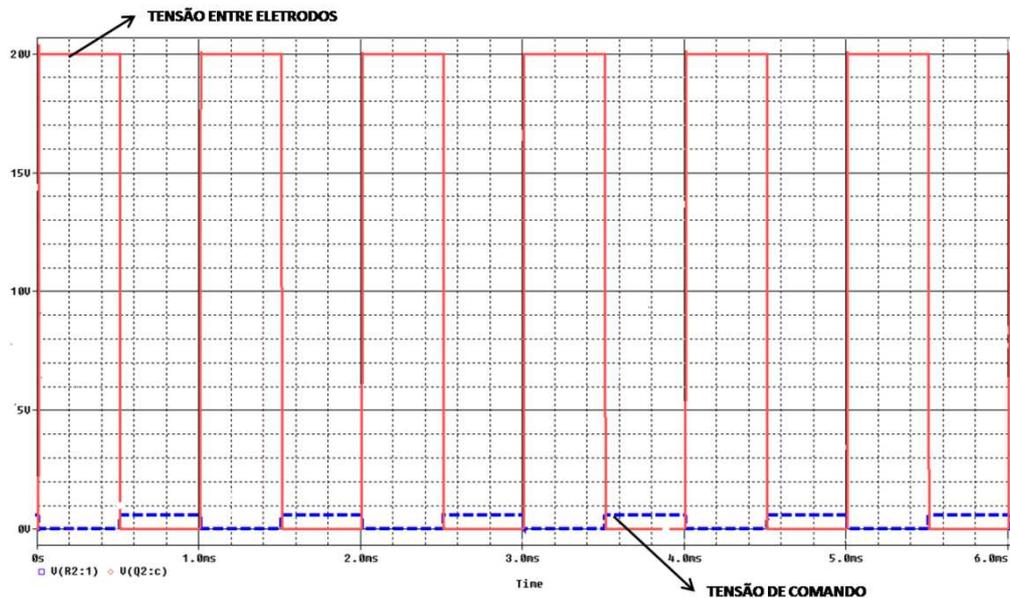


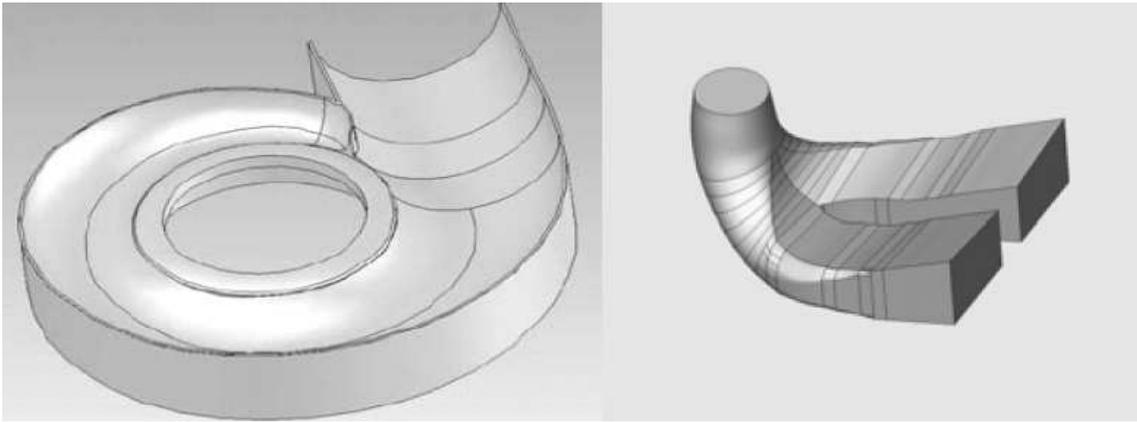
Figura 4-9. Forma de onda da tensão entre eletrodos e tensão de comando.

#### 4.3.2 Teste de barreira tipo Stoplog em modelo reduzido

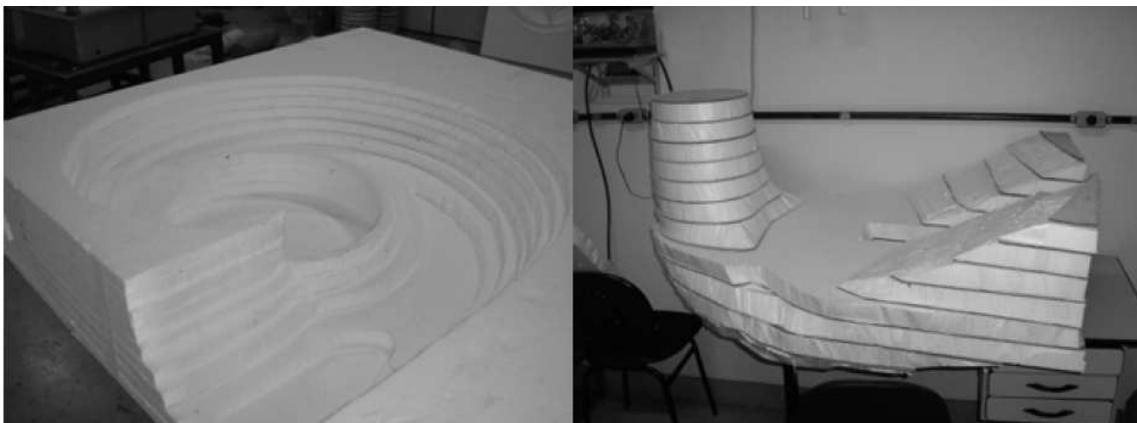
Para os testes com barreira eletromecânica, que combina o conceito da barreira mecânica instalada nas ranhuras existentes da comporta (stoplog) do tubo de sucção, com sistema elétrico de repulsão de peixes (Faria, M.T.C. et al., 2009), foi projetado e montado em laboratório um modelo reduzido em escala 1:10,5 da turbina hélice da usina de Itutinga, localizada no rio Grande estado de Minas Gerais.

O projeto completo do modelo reduzido da máquina de Itutinga compreende 9 itens: 1. Caixa voluta; 2. Tubo de sucção; 3. Conjunto rotativo; 4. Sistema distribuidor da turbina; 5. Sistema de alimentação; 6. Tanque de restituição; 7. Estrutura de suporte do modelo; 8. Conexões e instalações hidráulicas; 9. Barreira eletromecânica. Todo o projeto mecânico da máquina foi realizado no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG, pelo grupo de Dinâmica de Rotores.

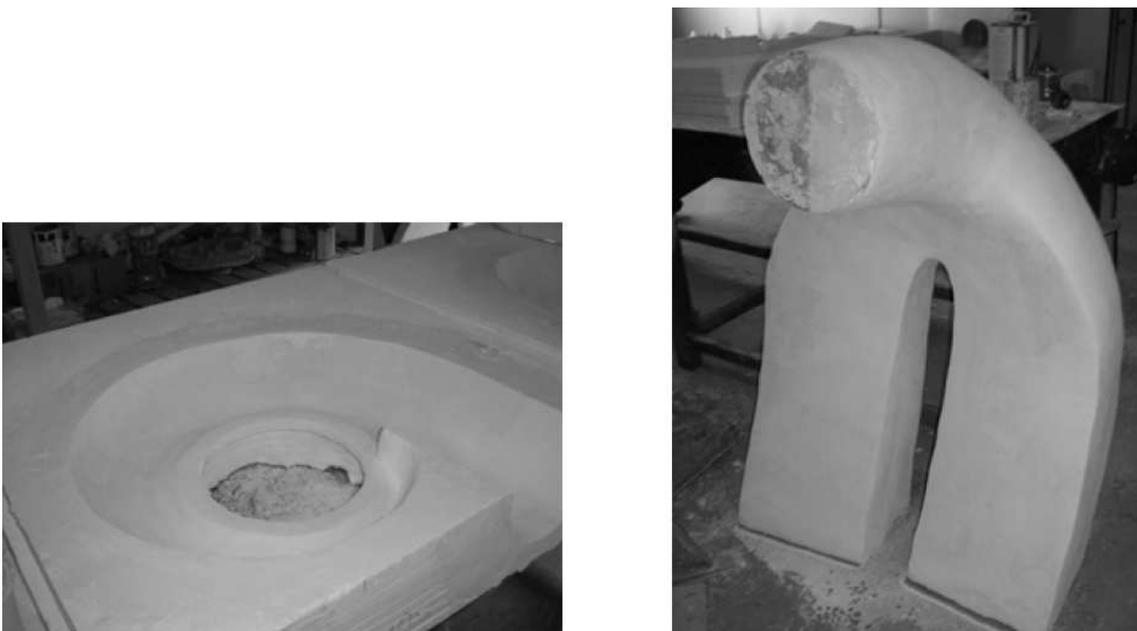
Para o projeto do tubo de sucção e caixa voluta, foi feita uma modelagem geométrica tridimensional com conseqüente obtenção dos planos de corte que são reproduzidos em placas de isopor. As placas são sobrepostas e coladas para posterior ajuste de geometria do modelo de isopor por meio de gesso. A fase final de fabricação consiste na laminação dos modelos com fibra de vidro. Todas as etapas do projeto são apresentadas nas figuras a seguir:



*Figura 4-10. Desenhos tridimensionais da caixa voluta e do tubo de sucção.  
Fonte: Centro de Pesquisas hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH/UFMG*



*Figura 4-11. Processo de colagem das placas de isopor  
Fonte: Centro de Pesquisas hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH/UFMG*

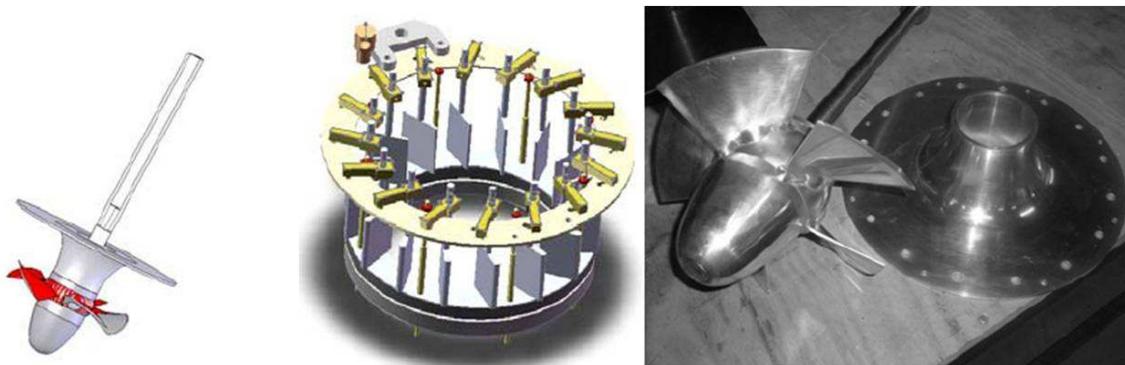


*Figura 4-12. Modelo da caixa voluta e tubo de sucção após aplicação do gesso  
Fonte: Centro de Pesquisas hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH/UFMG*



*Figura 4-13. Laminação com fibra de vidro dos modelos da caixa voluta e tubo de sucção.  
Fonte: Centro de Pesquisas hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH/UFMG*

O conjunto rotativo e o distribuidor da turbina hélice seguiram projeto do modelo de Itutinga. Foram feitos desenhos tridimensionais que serviram de base para usinagem assistida por computador. Após usinagem, procedeu-se à etapa de montagem das partes por meio de parafusos ou soldas. A FIG 4-14 apresenta o modelo em computador e a alguns componentes da peça já usinada.



*Figura 4-14. Modelos e fotografia do conjunto rotativo e distribuidor da máquina em escala reduzida.  
Fonte: Centro de Pesquisas hidráulicas e Recursos Hídricos – CPH/UFMG*

O tanque de restituição, com capacidade de 33mil litros foi especialmente projetado para permitir a realização de ensaios com peixes em laboratório. Foi fabricado por meio de laminação com fibra de vidro em estrutura metálica de perfis estruturais. A FIG 4-15a apresenta fotografia do tanque de restituição.

O sistema de alimentação de água da turbina hélice, apresentado na FIG4-15b, consiste em um conjunto de duas bombas centrífugas de 20cv e 1750rpm associadas em paralelo, comandadas por inversores de frequência modelo WEG CFW09-20cv.

O projeto do mecanismo de impedimento de entrada de peixes (barreira eletromecânica) consiste em comporta de acrílico com dois vãos inferiores, cuja área equivale à seção do tubo de sucção na região da comporta onde será instalada a barreira (FIG 4-16a). Nos vãos são instaladas placas metálicas paralelas na direção horizontal, que chamaremos de eletrodos, as quais são ligadas a um autotransformador variável (varivolt) monofásico modelo Vortex M-2412, 0-240V.

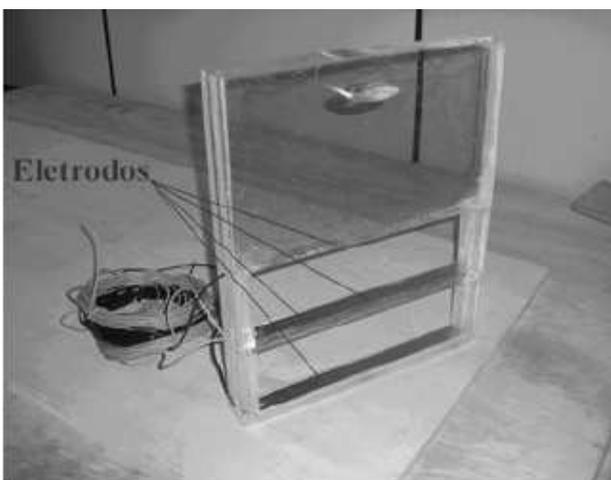
Os dois eletrodos intermediários (fixados na aresta que divide os dois vãos) são ligados ao neutro do varivolt, enquanto os eletrodos inferiores e superiores são ligados à fase (FIG 4-16b). Multímetros modelo Minipa ET-2042C foram utilizados para medir tensão e corrente circulante entre os eletrodos.



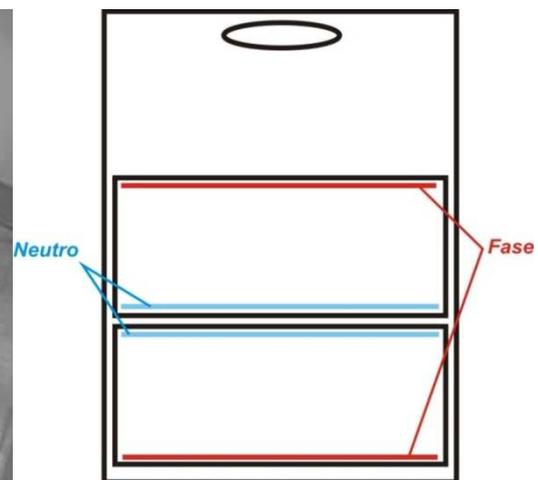
(a) Tanque de restituição

(b) Bombas centrífugas

Figura 4-15. Fotografias do tanque de restituição e das bombas centrífugas.



(a) Fotografia da barreira eletromecânica

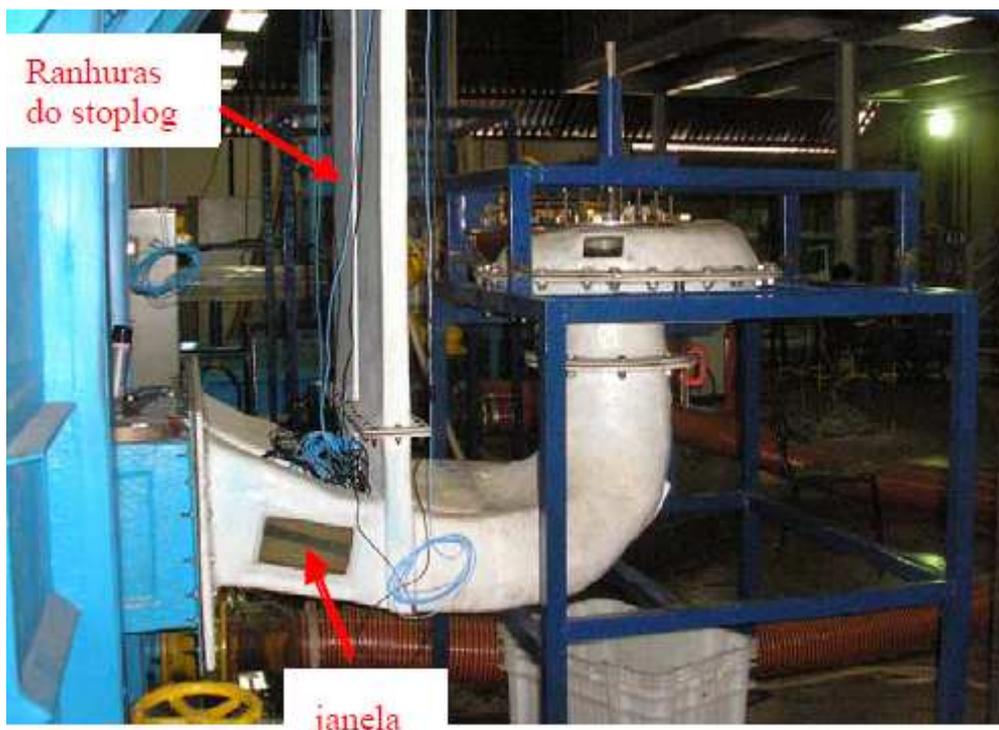


(b) Energização dos eletrodos

Figura 4-16. Barreira Eletromecânica projetada.

Foram fabricadas duas barreiras eletromecânicas que foram instaladas nas ranhuras da comporta Stoplog introduzidas no modelo do tubo de sucção. Janelas transparentes são instaladas nas seções do tubo de sucção para permitir a visualização da movimentação dos peixes em seu interior.

Uma fotografia da montagem completa do modelo em escala projetado para testar a eficiência da barreira eletromecânica pode ser vista na FIG 4-17.



*Figura 4-17. Fotografia da montagem final do modelo de turbina hélice com barreira eletromecânica*

#### 4.3.3 Teste de barreira tipo Stoplog em tanque circular

Visando melhor interpretação dos dados e maior reprodutibilidade dos testes de eficiência das barreiras eletromecânicas tipo stoplog foram elaborados testes no tanque circular inicialmente utilizado para manutenção dos peixes (FIG 4-3 – Aquário 2).

Neste experimento a barreira eletromecânica também foi montada em estrutura de acrílico de 550mm de altura, 450mm de largura e 35mm de espessura e dois vãos com dimensões 235mm de altura e 430mm de largura, onde foram afixados os eletrodos.

Diferentemente da barreira utilizada no teste descrito em 4.3.2, neste caso os eletrodos recobriram todos os lados internos dos vãos, formando eletrodos em anéis. O eletrodo do vão superior (Eletrodo 1) foi ligado a um dos terminais do varivolt monofásico e o eletrodo inferior (Eletrodo 2) ao outro pólo de saída, conforme FIG 4-

18. A leitura de tensão e corrente do circuito formado pelos dois eletrodos foi realizado através de multímetros modelo Minipa ET-2042C.

Como estímulo à passagem dos peixes através da barreira, foi criado um sistema de atração de peixes através de fluxo contínuo de água utilizando-se um bomba hidráulica de 1/2cv, altura manométrica total máxima de 12mca e vazão de 4,5m<sup>3</sup>/h.

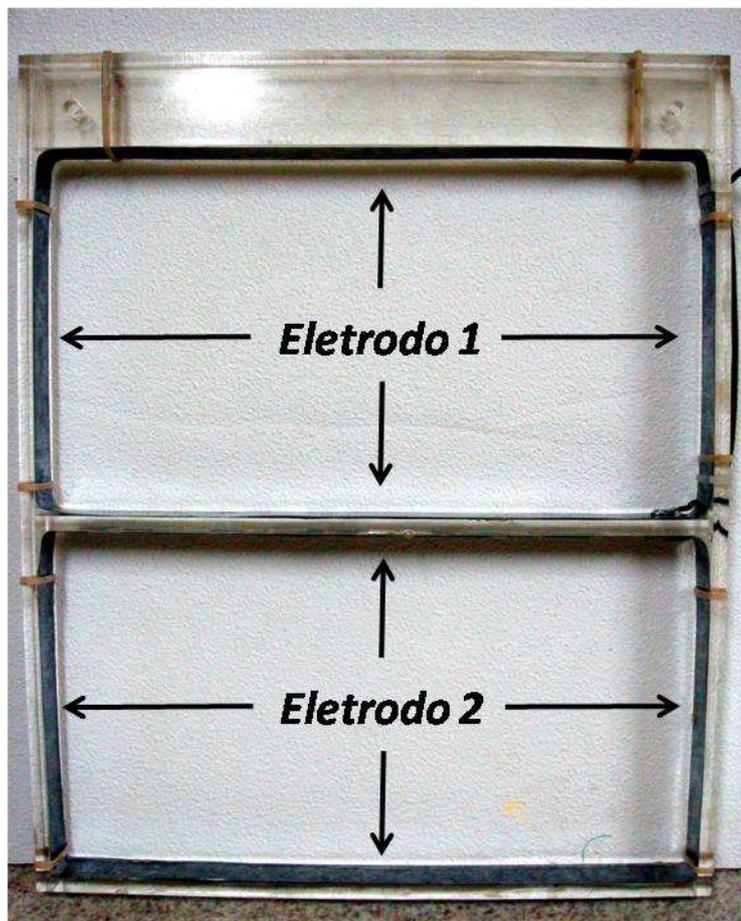


Figura 4-18. Fotografia da barreira eletromecânica montada para teste em tanque circular.

#### 4.4 Metodologia de teste adotada

##### 4.4.1 Teste de eletrosensibilidade

Para se movimentar uma carga pontual  $Q$ , de um ponto A para um ponto B, em um campo elétrico  $E$ , a força sobre  $Q$  dada pela Lei de Coulomb, é  $F = Q * E$ . Assim, o trabalho realizado para provocar um deslocamento  $dl$  da carga é:

$$dW = -F \cdot dl = -QE \cdot dl \quad [4.1]$$

O sinal negativo indica que o trabalho é feito por um agente externo. Dessa maneira, o trabalho total realizado, ou a energia potencial necessária, para movimentar Q de A para B é

$$W = -Q \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad [4.2]$$

Ao dividir W por Q na equação [4.2], resulta o valor da energia potencial por unidade de carga. Essa quantidade, denotada por  $U_{AB}$ , é conhecida por diferença de potencial entre os pontos A e B. Assim:

$$U_{AB} = \frac{W}{Q} = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad [4.3]$$

Como o meio condutor é homogêneo (água), o campo elétrico no interior do tanque pode ser considerado uniforme, e podemos simplificar a equação [4.3] como:

$$|U_{AB}| = E \int_A^B dl \quad [4.4]$$

$$|U_{AB}| = E \cdot dl$$

onde d representa a distância entre os pontos A e B. Assim, o campo elétrico no interior do tanque de experimentação pode ser calculado como a razão da tensão entre os eletrodos pela distância entre os mesmos. Como o campo elétrico pode ser considerado uniforme, a equação [4.4] pode ser utilizada para calcular sua intensidade em qualquer porção dl.

Um software livre baseado no método dos elementos finitos para cálculo de problemas eletromagnéticos em baixa frequência e 2 dimensões, FEMM, foi utilizado para analisar o campo elétrico e gradiente de potencial gerado pelas placas energizadas. O software é livre, *OpenSource* e está disponível em <http://www.femm.info>. O gradiente de tensão, as linhas de campo elétrico e as superfícies equipotenciais no interior do tanque de teste são apresentadas na FIG 4-19. As cores mais próximas ao violeta representam as tensões mais elevadas.

Como já descrito em 4.3.1, os testes de eletrosensibilidade foram iniciados em um tanque de vidro de seção retangular de dimensões (980x260x600)mm. À medida que o campo elétrico ia sendo aumentado, os peixes buscavam uma posição no interior do aquário onde ficassem sujeitos a uma menor diferença de potencial, ou seja, se alinhavam às linhas equipotenciais e permaneciam nesta posição por tempo indeterminado (FIG 4-20). Como a tensão entre placas era continuamente aumentada, ao tentar deixar esta posição de conforto, o peixe testado era submetido abruptamente a

uma grande diferença de potencial, o que não condizia com a metodologia do teste. O ensaio era então descartado.

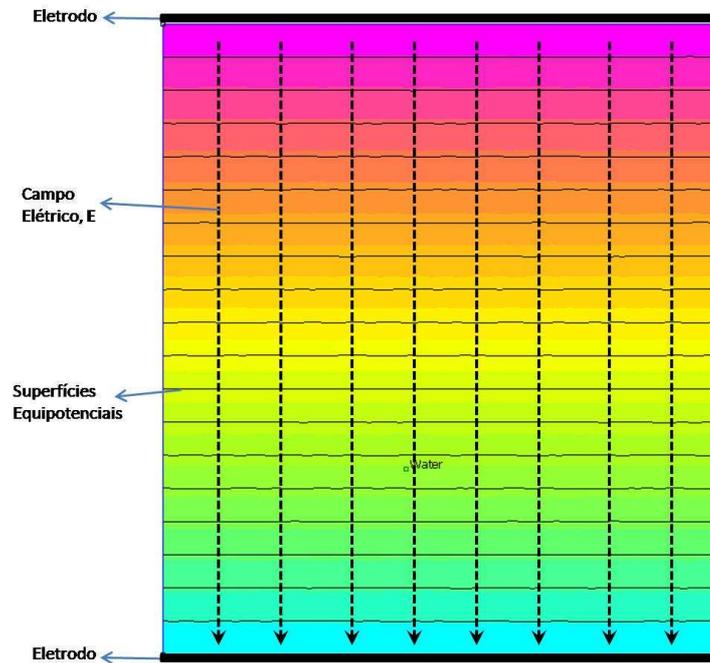


Figura 4-19. Gradiente de tensão, campo elétrico e superfícies equipotenciais no interior do tanque de teste em um instante de tempo  $t$ .

Para reduzir o número de testes descartados devido ao alinhamento dos peixes com as superfícies equipotenciais, foi utilizado um tanque com largura inferior ao comprimento médio total (medida da cabeça à ponta da nadadeira caudal) dos indivíduos testados, que era da ordem de 17cm. O tanque utilizada possui dimensões de (490 x 200 x 100 mm).

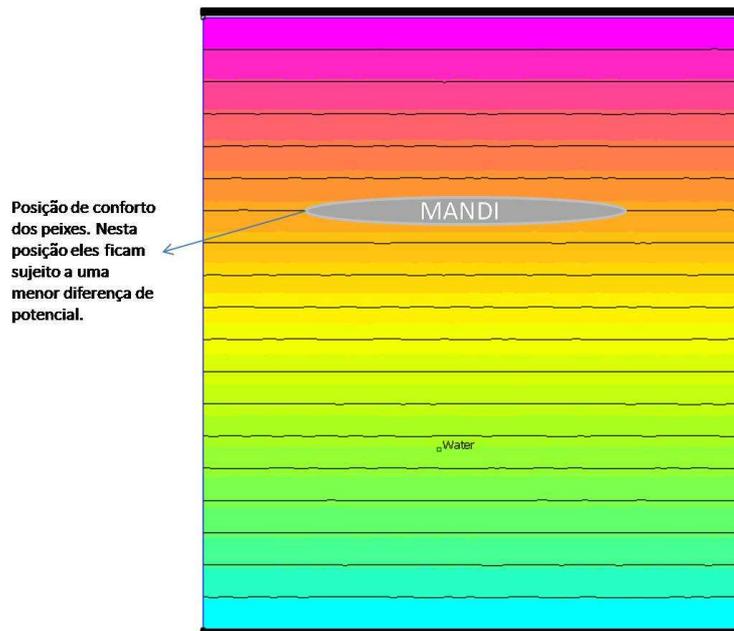


Figura 4-20. Posição de conforto para os peixes nos testes de eletrosensibilidade

Nos testes de eletrosensibilidade, cada peixe era testado individualmente e uma única vez, sendo utilizados lotes com vinte a trinta peixes para cada forma de onda estudada. Os testes nos quais o peixe pareceu muito estressado desde o início ou quando uma eventualidade externa influenciava de alguma forma os resultados, foram descartados.

Todos os testes utilizaram a água dos tanques de manutenção para reduzir o stress dos animais e facilitar adaptação ao tanque de teste. A cada cinco peixes utilizados a água era trocada para garantir uma maior uniformidade aos testes.

Os procedimentos adotados nos testes de eletrosensibilidade foram os seguintes:

1. Posicionar as placas (eletrodos) no tanque e fazer ligações elétricas necessárias;
2. Completar tanque de teste sempre como mesmo volume de água dos tanques de manutenção;
3. Medir resistividade da água para garantir pouca variação desta variável em todos os testes;
4. Selecionar aleatoriamente peixe para ser testado;
5. Transferir peixe selecionado para tanque teste e aguardar o período de adaptação de 3 minutos;
6. Posicionar e ligar câmera filmadora;

7. Elevar tensão do varivolt continuamente até que os limiares de campo elétrico para cada nível de reação seja alcançado. Anotar todos os dados nas planilhas de dados;
8. Desligar câmera filmadora;
9. Medir peso, comprimento, largura e altura do peixe testado e anotar na planilha de dados;
10. Transferir peixe para tanque de manutenção de peixes já experimentados;

Segundo (Cowx & Lamarque, 1990) a reação apresentada pelos peixes depende diretamente do tipo de campo aplicado (contínuo, alternado ou pulsante), sua intensidade e duração. Para as formas de onda utilizadas, identificou-se basicamente 3 diferentes níveis de reação:

- Percepção / Sensibilidade: Qualquer alteração no estado em que o peixe se encontra como movimento das nadadeiras laterais, dorsal ou caudal, alteração na frequência respiratória ou mudança vagarosa de posição dentro do aquário.
- Movimento sem direção / Agitação: Movimento brusco do peixe. O peixe sai do estado de repouso e se coloca em deslocamento horizontal de forma muito rápida, como se tentasse fugir de algum predador ou perturbação, não conseguindo permanecer na mesma posição de conforto inicial.
- Tetania / Paralisia: O peixe já não consegue nadar de forma natural. Movimenta-se com ondulações largas. Os músculos ficam constantemente contraídos, a nadadeira e esporão dorsal ficam eretos e a boca aberta. Neste estado nota-se que o peixe já não tem controle sobre a direção de seu deslocamento, suas nadadeiras ficam paralisadas e sua natação prejudicada.

Após a coleta dos dados de campo elétrico necessário para estimular as reações em cada indivíduo, os testes eram cuidadosamente revistos através das filmagens e o valor exato dos limiares de campo elétrico eram corrigidos, se necessário.

Segundo (Kolz A. L., 1989) a eletrosensibilidade de peixes também pode ser avaliada em função da potência e densidade de potência transferida para cada peixe. O procedimento metodológico utilizado nos testes de eletrosensibilidade permite avaliar a corrente, tensão, potência e densidade de potência em cada peixe testado. Para isso é necessário obter o valor da densidade média ( $\text{g/cm}^3$ ) e da resistividade média de indivíduos jovens de *Pimelodus maculatus*.

Foi realizado o levantamento da densidade média do mandi para que se pudesse obter uma estimativa do volume de cada indivíduo. Para isso, procedeu-se da seguinte forma:

1. Utilizando-se um tanque de dimensões reduzidas, completava-se água sempre a um nível estabelecido (volume constante).
2. Escolhia-se aleatoriamente um mandi, media-se comprimento e massa e em seguida este era colocado no tanque.
3. Media-se então o nível de água após a colocação do peixe.
4. A diferença entre os níveis de água, antes e depois da colocação do mandi no tanque, multiplicada pela largura e comprimento do tanque, representa o volume de cada peixe.
5. Conhecendo-se assim massa e volume de cada indivíduo, pode-se determinar a densidade de cada peixe.

O valor da resistividade média do *Pimelodus maculatus* foi obtido por (Lopes R. E., 2009), sendo  $\rho_{peixe} = 21,5\Omega * m$ . Ainda de acordo com (Lopes R. E., 2009) a situação do peixe dentro do tanque de teste, contendo um certo volume de água, pode ser modelado eletricamente conforme FIG 4-21.

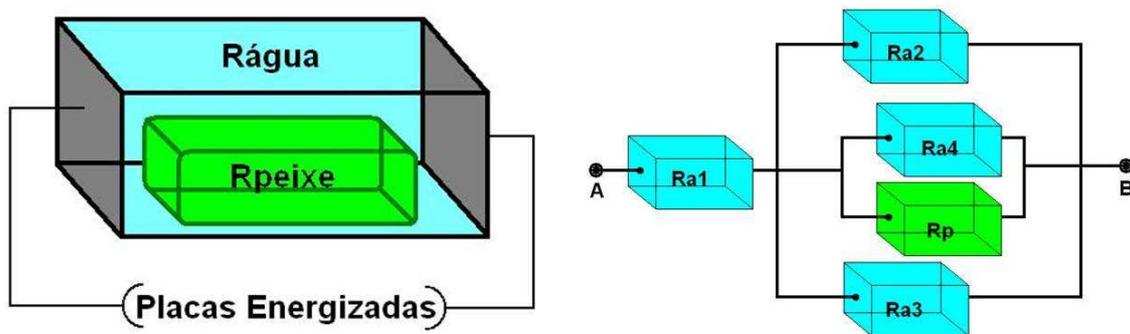


Figura 4-21. Modelo elétrico do teste de eletrosensibilidade. Fonte: (Lopes R. E., 2009)

Sabe-se que o valor da resistência elétrica de um corpo qualquer pode ser aproximado por

$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad [4.5]$$

Assim, sendo o volume (V) de cada peixe dado por  $V = A * l$ , onde 'A' representa a área da seção média do peixe e 'l' o comprimento, a equação 4.5 pode ser reescrita como:

$$R_{peixe} = \rho_{peixe} * \frac{l_{peixe}^2}{V_{peixe}} \quad [4.6]$$

Como o valor da densidade média do *Pimelodus maculatus* já foi anteriormente calculado, o volume de cada peixe pode ser obtido como  $Volume = Massa / Denstidade$ . Como a massa e o comprimento de cada indivíduo foi medida em todo experimento, a resistência de cada peixe pode ser calculada.

As resistências  $R_{a2}$ ,  $R_{a3}$  e  $R_{a4}$ , representam a resistência da porção de água que ocupa o aquário proporcionalmente ao comprimento do peixe. Assim, o equivalente destas resistências pode ser calculado como:

$$R_{equivalente} = \rho_{\acute{a}gua} * \frac{l_{peixe}}{A_{tanque}} \quad [4.7]$$

A resistência  $R_{a1}$ , representa a resistência da porção de água que não “circula” o peixe e pode ser representada por:

$$R_{a1} = \rho_{\acute{a}gua} * \frac{(l_{tanque} - l_{peixe})}{A_{tanque}} \quad [4.8]$$

Assim, o circuito equivalente do modelo proposto na FIG 4-21 é:

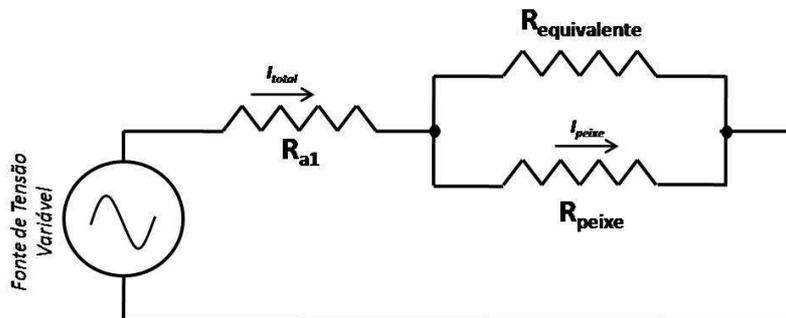


Figura 4-22. Circuito equivalente do modelo apresentado na FIG 4-21.

Como os valores de todas as resistências podem ser calculados e o nível de tensão aplicado é controlado e medido através de multímetros e osciloscópio, a partir da análise do circuito da FIG 4-22 consegue-se determinar facilmente a corrente total fornecida pela fonte, que também foi medida através de multímetros, além de corrente, tensão e a potência sobre cada um dos elementos do circuito

Desta maneira, foram calculados, para cada peixe ensaiado, os valores das resistências  $R_{a1}$ ,  $R_{peixe}$  e  $R_{equivalente}$ , assim como o valor da corrente total do circuito ( $I_{total}$ ) e grandezas relacionadas ao peixe, como corrente ( $I_{peixe}$ ), tensão ( $U_{peixe}$ ), potência

transferida  $(P_{peixe} = U_{peixe} * I_{peixe})$  e densidade de potência

$$\left( D_{peixe} = \frac{P_{peixe}}{Volume_{peixe}} \right)$$

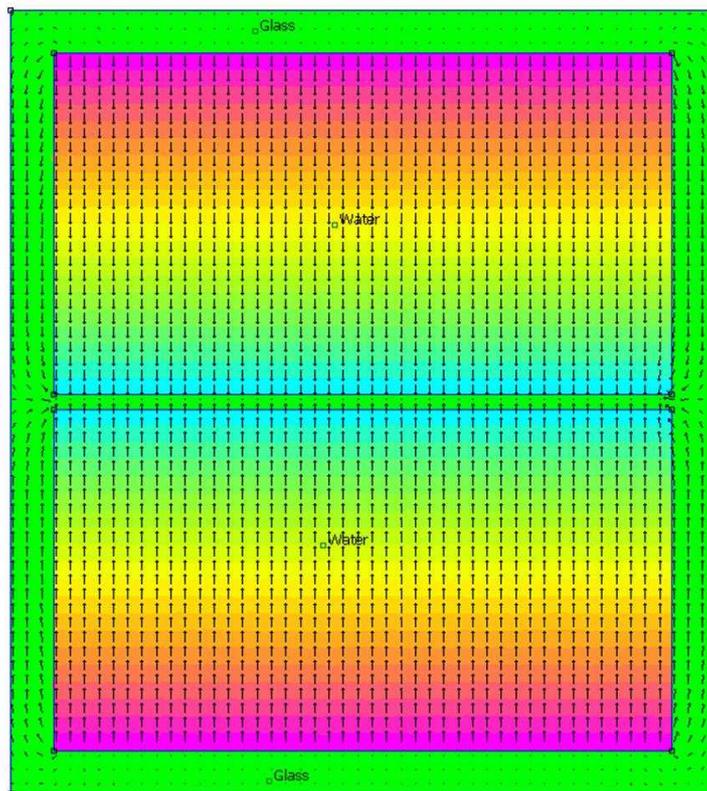
#### 4.4.2 Teste de barreira Tipo Stoplog em modelo reduzido

Os testes com a barreira eletromecânica tipo Stoplog utilizaram tensão senoidal a 60Hz pela facilidade de obtenção desta em laboratório e em campo, por ser esta a forma de onda padrão do sistema elétrico brasileiro, e devido aos resultados obtidos nos testes de eletrosensibilidade, que demonstraram uma clara reação de tetania para certos níveis de campo elétrico.

A reação de tetania/paralisia em regiões próximas à barreira é desejável pois para conseguir entrar no tubo de sucção o peixe primeiramente deve vencer a velocidade de escoamento da água que deixa a turbina, o que está relacionado com a capacidade natatória de cada espécie (Santos, Pompeu, & Martinez, 2006). À medida que o peixe se aproxima da barreira, o efeito do campo elétrico se torna mais intenso e, se o peixe entra em tetania, seus músculos se contraem e sua natação é interrompida. Desta maneira o próprio escoamento da água se encarrega de levá-lo novamente para fora do tubo de sucção.

Não se cogitou a utilização da barreira em tensão contínua pois este tipo de forma de onda pode gerar reações de eletrotaxia e a barreira passar a exercer atração de peixes ao invés de repulsão, já que cada espécie apresentará diferentes níveis de atração e repulsão.

Os testes de eficiência da barreira eletromecânica em modelo reduzido foram realizados com os eletrodos geometricamente instalados na primeira configuração projetada e estudada durante os trabalhos. A barreira eletromecânica nesta configuração produzirá um campo elétrico e conseqüente gradiente de potencial com a distribuição mostrada na FIG 4-23.



*Figura 4-23. Campo elétrico (representado pelas setas) e gradiente de potencial na barreira eletromecânica – Vista frontal da barreira*

Com este tipo de configuração, nota-se que as linhas de campo elétrico ficam direcionadas de um eletrodo a outro e tanto o gradiente de potencial quanto as linhas equipotenciais não são favoráveis à aproximação dos peixes, que é feita ortogonalmente à barreira, conforme FIG 4-24. Nota-se que os peixes se aproximam seguindo superfícies equipotenciais, o que indica que a diferença de potencial a qual ele estará sujeito será reduzida, assim como a eficiência da barreira. Portanto, para que ela seja eficaz, devem ser utilizados níveis de tensão elevados de modo a garantir a reação desejada nas proximidades da barreira.

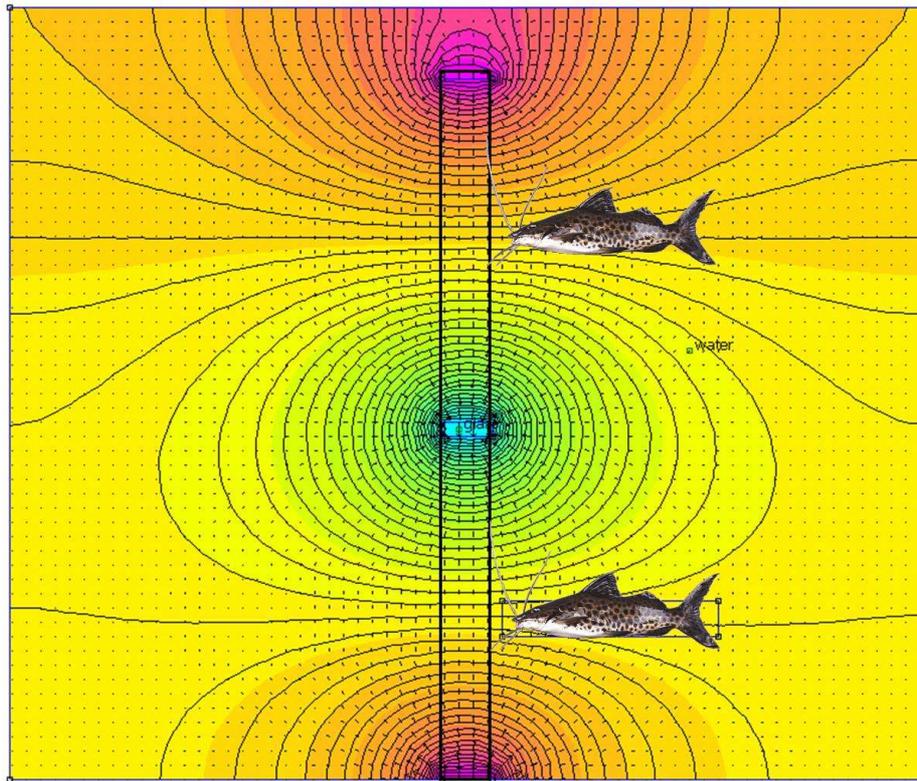


Figura 4-24. Aproximação do peixe à barreira – Vista lateral da barreira.

Os ensaios preliminares de eficácia das barreiras eletromecânicas na repulsão de peixes foram realizados variando-se a velocidade das duas bombas centrífugas de alimentação e as tensões aplicadas nos eletrodos. Arquivos de imagens da movimentação dos peixes nas seções de observação do tubo de sucção (janelas) foram gerados durante os testes para posterior análise. Conforme descrito em 4.3.2, o aparato experimental empregado nos ensaios de eficácia das barreiras é composto por: 1. Uma bancada de turbina hélice vertical (FIG 4-14), modelo reduzido da máquina hélice da UHE Itutinga em escala 1:10,5; 2. Dois inversores de frequência WEG CFW09 – 20 c.v.; 3. Duas bombas centrífugas EH, Modelo HF150, 20 c.v., 1750 rpm (associação em paralelo para acionamento da turbina); 4. Um varivolt Vortex M-2412, 0-240 V; 5. Dois multímetros digitais Minipa ET-2042C para medição de corrente elétrica e tensão nos eletrodos; 6. Duas câmeras digitais portáteis, tipo webcam, para registro de imagens dos ensaios; 7. Dois microcomputadores para aquisição das imagens; 8. Duas lâmpadas vermelhas de 40 W (tipo spot).

As lâmpadas vermelhas são utilizadas pois frequências luminosas próximas ao vermelho tendem a perturbar menos o *Pimelodus maculatus*.

Para viabilizar a realização dos ensaios do sistema de eletrodos para repulsão de peixes, 49 (quarenta e nove) indivíduos da espécie mandi (*pimelodus maculatus*) foram

aclimatados no interior do tanque de restituição. Esse número representa o número de indivíduos disponíveis em laboratório para os ensaios. Os ensaios foram realizados a partir das 18 (dezoito) horas, quando o nível de luz natural incidente sobre o modelo de turbina é baixo. As luminárias do teto, localizadas sobre a bancada de turbina, também foram desligadas para evitar qualquer efeito de estímulo óptico sobre os peixes. O procedimento de ensaio utilizado para teste de eficácia das barreiras eletromecânicas pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Passo 1: Posicionar as câmeras portáteis de vídeo e as luminárias de luz vermelha nas janelas de observação laterais do tubo de sucção.
2. Passo 2: Ligar os computadores e preparar o programa para gravação de imagens das duas seções do tubo de sucção.
3. Passo 3: Energizar os eletrodos das barreiras eletromecânicas, ajustando o varivolt no nível de tensão desejado. A leitura da tensão é efetuada por meio de multímetro com resolução de 0,1 V. Quatro níveis de tensão são empregados nesses ensaios: 50V, 40V, 30V e 20V.
4. Passo 4: Comandar os inversores para acionamento da associação em paralelo das duas bombas em velocidade nominal de operação (1750 rpm). Seis velocidades de operação das bombas - 1750 rpm(nominal), 1520 rpm, 1290 rpm, 1060 rpm, 830 rpm e 600 rpm - são utilizadas para cada nível de tensão nos eletrodos. Os testes sempre se iniciam com velocidade máxima de operação das bombas.
5. Passo 5: Iniciar a gravação de atividades dos peixes no interior do tubo de sucção. Cada gravação é efetuada em intervalo médio de tempo de 9 (nove) minutos. Seis arquivos de vídeo, no mínimo, são gerados para cada tensão. O primeiro arquivo de vídeo é gerado para velocidade nominal nas bombas.
6. Passo 6: Alterar o nível de tensão nos eletrodos e repetir os passos 5 e 6.
7. Passo 7: Encerrada a rodada de testes planejados para o dia escolhido, desligam-se os inversores e bloqueia-se a entrada do tubo de sucção. Por fim, desliga-se o varivolt.

A FIG 4-25 apresenta uma fotografia da bancada em funcionamento.

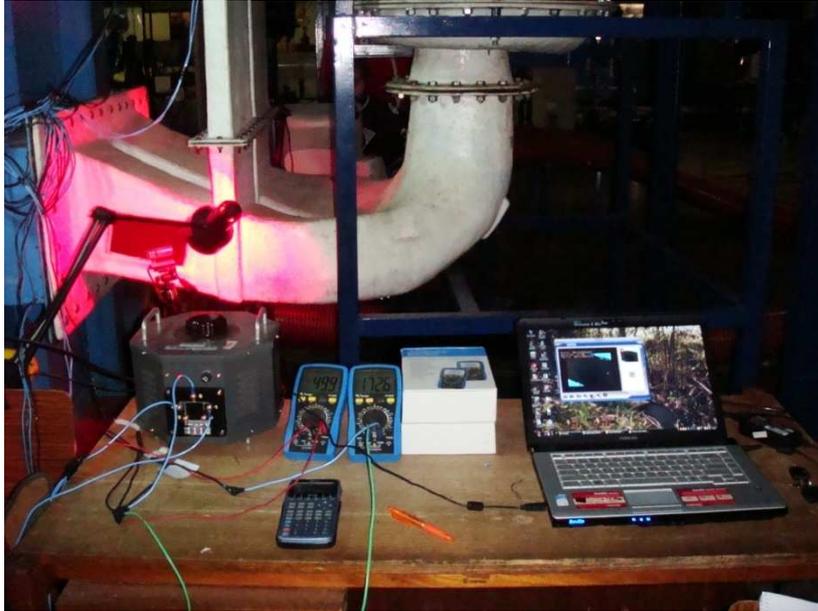


Figura 4-25. Bancada de teste montada e em operação.

Encerrados os testes, todos os vídeos feitos foram analisados para contagem mais precisa do número de peixes que conseguiram transpor a barreira eletromecânica.

Os mostradores dos inversores de frequência indicam as velocidades das duas bombas. A velocidade de rotação do eixo de turbina foi medida durante os testes por meio de tacômetro óptico Minipa MDT-2244B. A curva de velocidade da turbina em função da velocidade das bombas está mostrada na FIG 4-26.

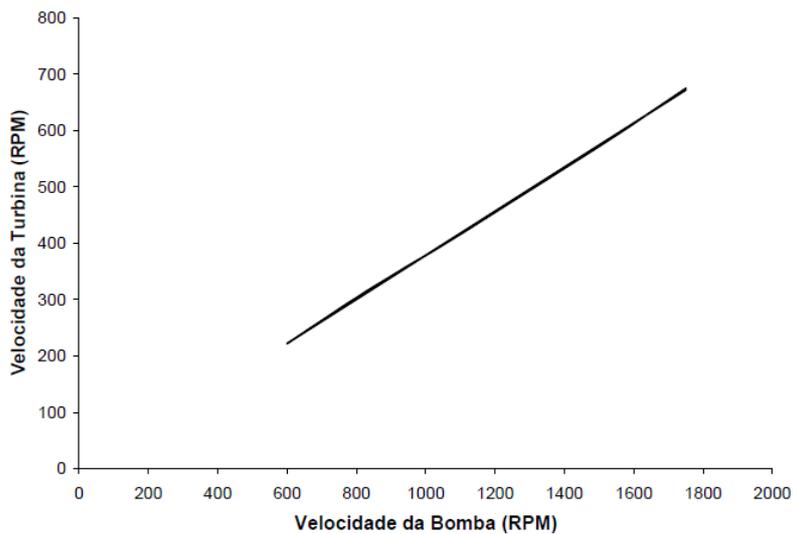


Figura 4-26. Curva de velocidade do eixo da turbina hélice em função da velocidade das bombas.

#### 4.4.3 Teste de barreira Tipo Stoplog em tanque circular

Assim como os testes com a barreira tipo stoplog em modelo reduzido, os testes em tanque circular também utilizaram tensão alternada com frequência de 60Hz pelos mesmos motivos apresentados anteriormente. A utilização de tensão contínua também não foi cogitada, pois se considerada a hipótese de que nas usinas hidrelétricas a barreira deverá impedir a passagem de diversas espécies de peixes e que o nível de campo elétrico que induz taxia anódica é diferente para cada uma delas, a barreira poderia funcionar de maneira inversa para a qual foi projetada, atraindo os peixes para o interior do tubo ao invés de expulsá-los.

A disposição dos eletrodos na barreira mecânica foi reavaliada de modo a se obter uma melhor distribuição de campo e conseqüentemente uma maior eficiência da barreira em tensões mais reduzidas. Os peixes deveriam se aproximar de forma ortogonal às linhas equipotenciais, para que fosse garantida uma maior diferença de potencial no peixe. Assim, energizou-se o eletrodo 1 (janela superior da barreira) com uma das saídas do autotransformador monofásico e o eletrodo 2 (janela inferior) com o outro pólo de saída (FIG 4-18). A distribuição de campo no entorno da barreira ficou então como mostrado na FIG 4-25.

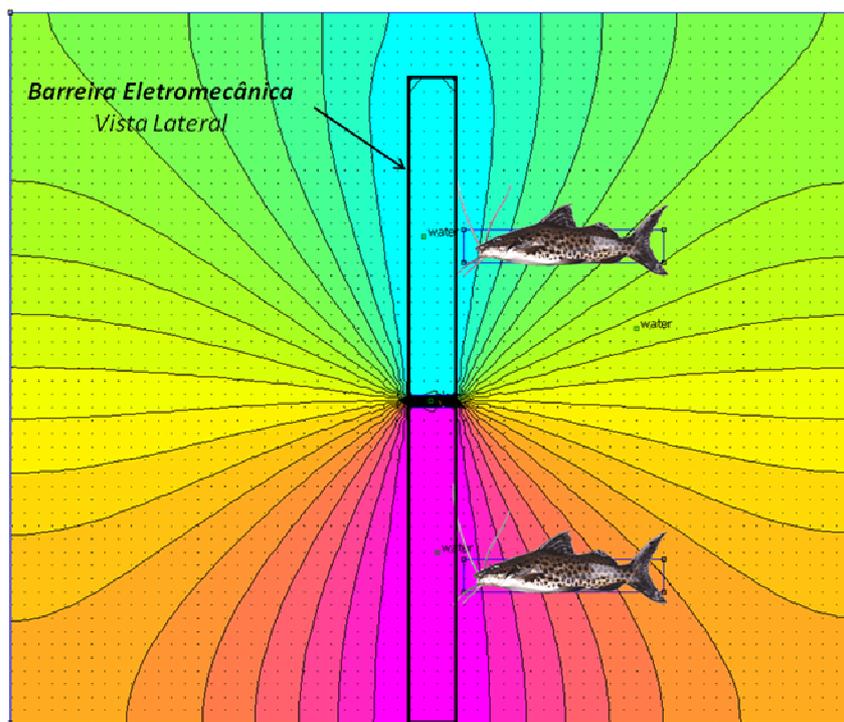


Figura 4-27. Aproximação dos peixes à barreira eletromecânica – Vista lateral da barreira

Nota-se pela FIG 4-25 que ao se aproximar da barreira, o peixe fica sujeito a uma maior diferença de potencial se comparado com a barreira eletromecânica utilizada para os testes em modelo reduzido. A quantidade de linhas equipotenciais que “cortam” o peixe é significativamente superior ao modelo anteriormente proposto.

Os testes de eficiência da barreira elétrica foram realizados com tensão entre eletrodos de 5, 10 e 15V<sub>rms</sub> e forma de onda senoidal a 60Hz. Os valores de tensão de operação da barreira foram selecionados a partir da experiência acumulada com os testes de eletrosensibilidade e de acordo com os valores encontrados para os limiares de agitação e paralisia para mandis de aproximadamente 40 gramas e 17 centímetros de comprimento (peso e comprimento médio dos peixes mantidos no laboratório). Para as condições de teste, de peixes se aproximando da barreira de forma gradativa, consegue-se tal amplitude sem o peixe ter que se aproximar muito da barreira, onde os níveis de campo são bem mais elevados.

Para cada nível de tensão entre eletrodos, foram separados seis grupos de quinze indivíduos cada, sendo que três serviram como grupo controle, no qual todo o procedimento de teste é realizado, porém a barreira não é energizada, o que confere aos testes efetivos (com barreira energizada) uma importante base de comparação e referência. Considerando-se os grupos submetidos aos testes com barreira energizada e os grupos controle, foi utilizado um total de duzentos e setenta mandis.

Os quinze indivíduos eram soltos na Região 1 do tanque teste (vide FIG 4-26) onde permaneciam por 20 minutos para aclimação. Após este período, ligava-se a câmera filmadora, energizava-se a Barreira Elétrica, ligava-se o sistema de atração e retirava-se a tela que dividia as Regiões 1 e 3. A partir deste momento os peixes tinham, por 40 minutos, livre circulação por estas regiões a menos da barreira elétrica, que dificultava a migração. Como a passagem pela barreira no movimento de descida (a favor do fluxo) também era de interesse da pesquisa, decidiu-se por seccionar o tanque, criando-se uma região inacessível para os peixes (Região 2) e impossibilitando-os de retornar da região 3 para a região 1 sem passar pela barreira. O estabelecimento desta região também foi importante para reduzir a área transitável do aquário, o que de certa forma aumentava a movimentação dos peixes na região da barreira elétrica.

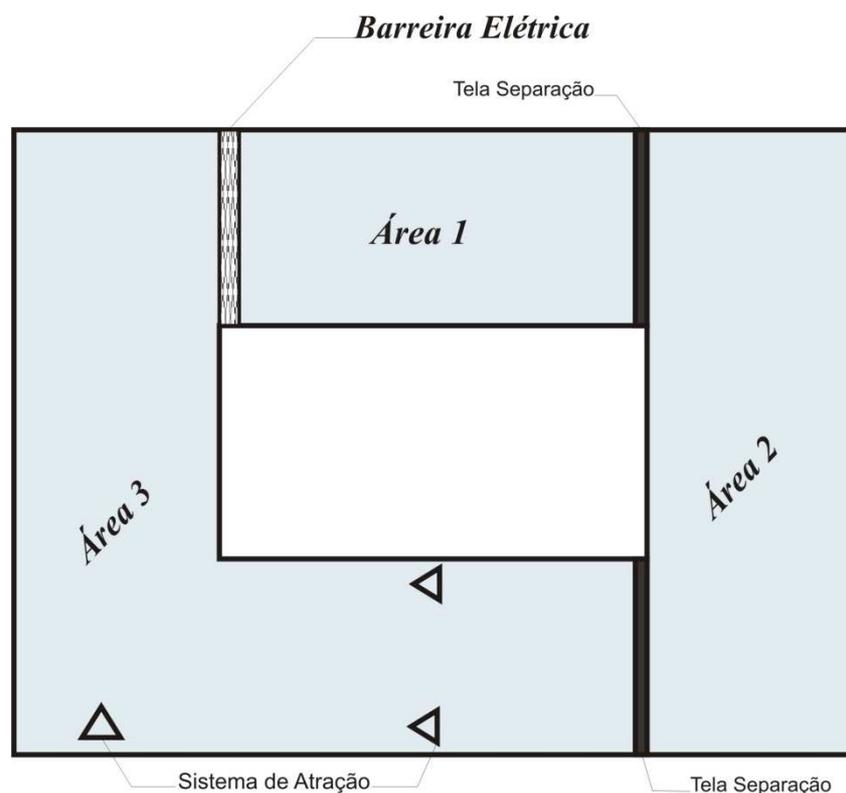


Figura 4-28. Tanque circular utilizado para teste de eficiência da barreira eletromecânica

Diariamente eram feitos um teste controle e um teste efetivo, em um período do dia que não houvesse muita variação de temperatura e luminosidade, para que tais fatores não interferissem no comportamento dos peixes. Todos os testes foram filmados, já que a presença física de qualquer pessoa na sala de teste poderia influenciar a movimentação dos peixes. Terminados os testes, os vídeos eram avaliados para contagem do trânsito de peixes através da barreira eletromecânica.

A contagem de indivíduos transitando pela barreira foi feita em intervalos de cinco minutos para que se pudesse determinar o grau de adaptabilidade dos peixes à situação. Quantificou-se o trânsito de indivíduos, ou seja, a quantidade de movimentos de passagem através da barreira, não se analisando movimentos individuais de cada peixe.

O procedimento de ensaio utilizado para teste de eficácia da barreira eletromecânica pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Passo 1: Separar as regiões 1 e 3 com tela de PVC e colocar 15 peixes na região 1;
2. Passo 2: Posicionar a câmera de vídeo e as luminárias de luz vermelha nas regiões do entorno da barreira.
3. Passo 3: Aguardar 20 minutos para aclimação;

4. Passo 4: Ligar a câmera de vídeo e iniciar gravação;
5. Passo 5: Energizar os eletrodos das barreiras eletromecânicas, ajustando o varivolt no nível de tensão desejado. A leitura da tensão é efetuada por meio de multímetro com resolução de 0,1 V.
6. Passo 6: Ligar sistema de atração de peixes;
7. Passo 7: Retirar tela de separação entre as regiões 1 e 3;
8. Passo 8: Deixar a sala de testes e garantir que ninguém entre até o final do teste, com duração de 40 minutos;
9. Passo 9: Desligar o varivolt, desligar câmera de vídeo, desligar sistema de atração e recolher os peixes testados.

Os testes com grupos controle seguiram o mesmo procedimento, porém o passo 5 não era executado.

## 5 RESULTADOS

Conforme descrito na seção 4, todos os resultados obtidos foram avaliados por meio de filmagens. Os arquivos de vídeo gerados estão disponíveis para pesquisas e avaliações futuras no acervo técnico do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.

A condutividade da água durante todos os ensaios de eletrosensibilidade variou de  $270\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $350\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 5.1 Ensaios de Eletrosensibilidade

Os peixes ensaiados apresentavam comprimento e peso compatíveis com os de indivíduos em maturação sexual e que, segundo os agentes geradores de energia são os mais afetados pela operação de turbinas hidráulicas.

Cada ensaio forneceu três valores de tensão e corrente referentes aos limiares de percepção, movimento sem direção (agitação) e tetania (paralisia). Por se tratar, porém, de animais de fundo e portadores de barbilhões, que são órgãos sensoriais bastante desenvolvidos, o limiar de sensibilidade para todas as formas de onda testadas apresentou valores bastante reduzidos e não será mostrado nas curvas de eletrosensibilidade, haja vista que tal reação não interessa para o desenvolvimento da barreira elétrica.

Assim as curvas de resposta elétrica para as três formas de onda testadas são apresentadas a seguir.

#### 5.1.1 Curvas de Campo Elétrico em função do peso e Comprimento

##### 5.1.1.1 Testes PDC 1kHz

Alguns pesquisadores, como (Bird & Cowx, 1993) sugerem que a utilização de tensões pulsadas é mais vantajosa, pois possuem menores tempos de recuperação se comparadas às tensões alternadas, porém, necessitam de uma fonte de tensão contínua para operação. As curvas dos limiares de agitação e tetania do Campo Elétrico[V/m] em

função do comprimento e peso para o *Pimelodus maculatus* são apresentadas nas FIG 5-1.

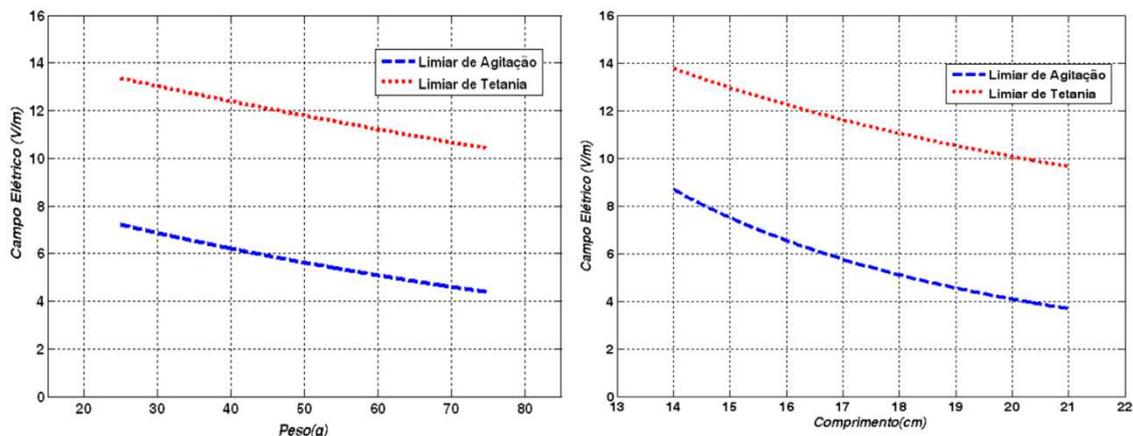


Figura 5-1. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão pulsada 1000Hz, duty cycle 50%. (Fonte própria)

#### 5.1.1.2 Testes AC senoidal 10kHz

Os testes com forma de onda senoidal a 10.000Hz não foram conclusivos. Os peixes não apresentaram nenhuma das reações descritas em 4.4.1 ou sequer reações descritas na literatura.

Ao energizar os eletrodos e aumentar gradativamente a tensão, os peixes não se moveram e a presença do campo elétrico pareceu não surtir efeito sobre o organismo dos peixes.

#### 5.1.1.3 Testes AC senoidal 1kHz

De acordo com (Lines & Kestin, 2004) a utilização de uma frequência de 1000Hz senoidal diminui os ferimentos causados por atordoamento elétrico, no caso de exposição a campos elétricos elevados. Assim, optou-se por testar os níveis de Campo Elétrico senoidal de 1000Hz necessários para que o *Pimelodus maculatus* apresente os estados de paralisia e agitação. Os resultados obtidos são apresentados na FIG 5-2.

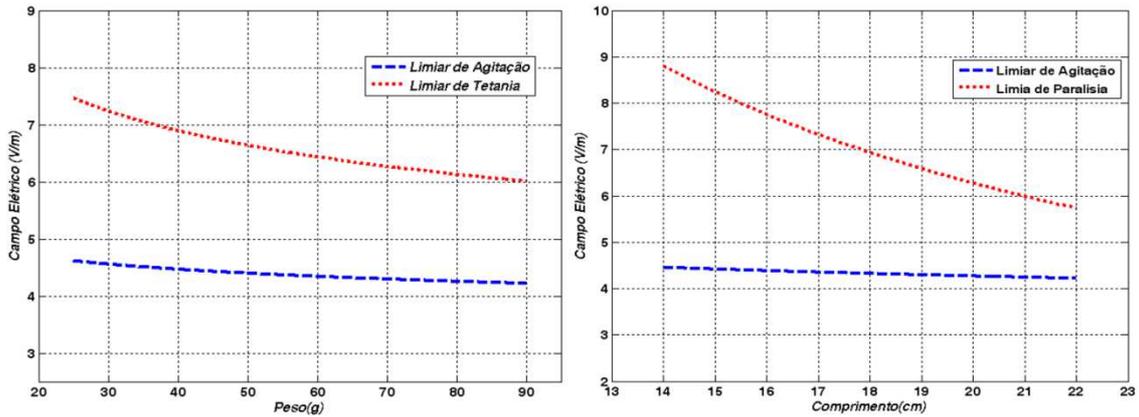


Figura 5-2. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão senoidal 1000Hz. (Fonte própria).

#### 5.1.1.4 Testes AC senoidal 60Hz

Segundo (Cowx & Lamarque, 1990), certos níveis de tensões alternadas e pulsadas afetam o sistema nervoso central dos peixes, produzindo um estado de eletronarcose(paralisia completa), o que não ocorre com campos contínuos. Outra vantagem dos campos alternados é a inexistência de eletrotaxes e a possibilidade de tetania a maiores distâncias dos eletrodos. Assim sendo, se campos alternados de 60Hz produzirem as reações esperadas com níveis de tensões próximas às dos testes com formas de onda senoidais a 1000Hz, seria mais vantajoso utilizar 60Hz, já que esta representa a frequência padrão do Sistema Elétrico brasileiro.

A FIG 5-3 apresenta o campo elétrico necessário para levar o *Pimelodus maculatus* aos estados de agitação e paralisia.

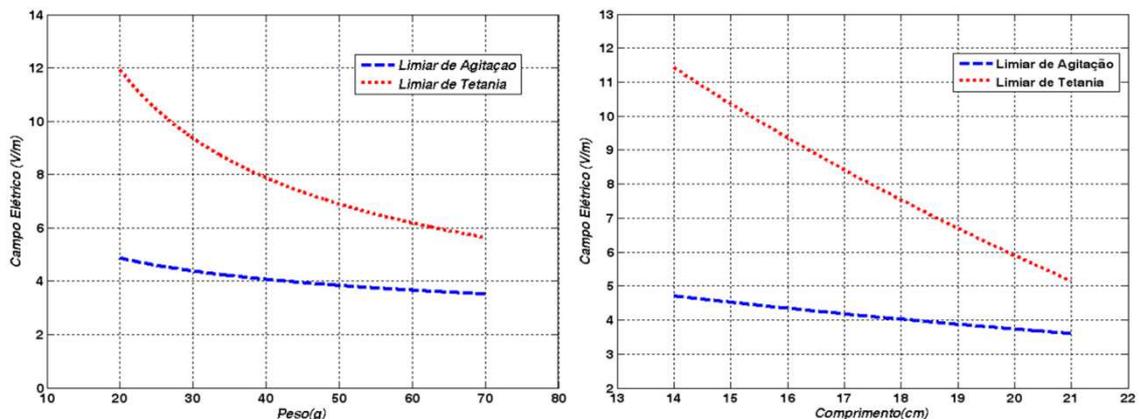


Figura 5-3. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão senoidal a 60Hz. (Fonte própria)

### 5.1.1.5 Testes AC senoidal 50Hz

Devido a vários países utilizarem a geração de energia em 50Hz, procedeu-se a pesquisa dos limiares de movimento inibido (agitação) e tetania para tensão senoidal com tal frequência. Esperava-se encontrar valores próximos aos obtidos para os testes de 60Hz, pois em se tratando de efeitos fisiológicos, a variação de frequência é irrisória. Os resultados obtidos para os testes com onda senoidal a 50Hz são apresentados na FIG 5-4.

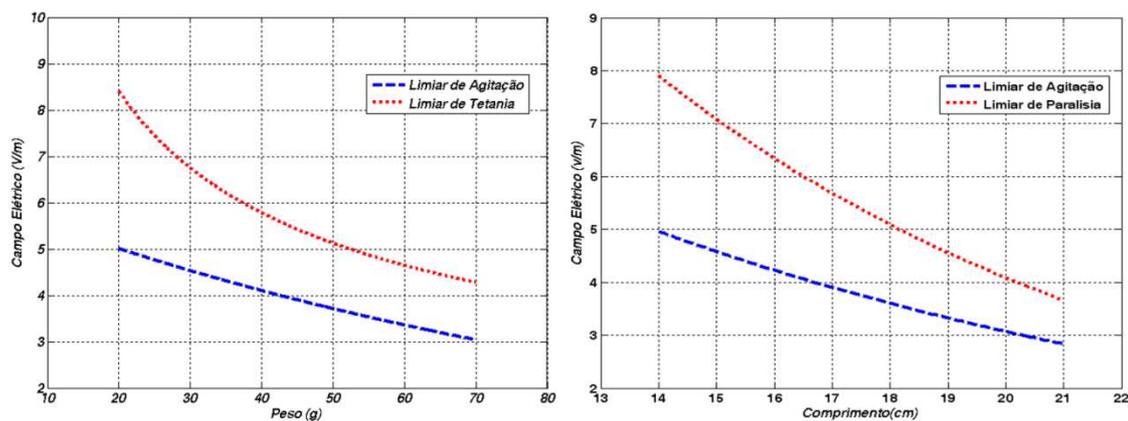


Figura 5-4. Curvas de eletrosensibilidade em função do peso e comprimento para tensão senoidal a 50Hz. (Fonte própria)

### 5.1.1.6 Testes Corrente Contínua

Os testes de corrente contínua, assim como os testes com corrente senoidal a 10kHz, não foram conclusivos. O limiar de percepção acontecia com valores muito baixos de campo elétrico, ou até mesmo no momento em que a fonte de tensão era ligada. Não se identificou movimento de taxia anódica. A reação de eletronarcese, que segundo (Lamarque, 1990) ocorre com este tipo de corrente, não foi claramente identificada, pois ela é facilmente confundida como inatividade ou falta de sensibilidade.

## 5.1.2 Análise da Eletrosensibilidade em função da potência e densidade de potência transferida para o peixe

Na fase inicial dos estudos de eletrosensibilidade, foi previsto avaliar a amplitude de campo elétrico necessária para provocar os diferentes níveis de reação no *Pimelodus maculatus*, com o intuito de construir curvas contínuas que representassem a relação entre campo elétrico, peso e comprimento para as diferentes reações desta

espécie. Esperava-se que as curvas encontradas para os testes de 60 e 50Hz fossem bastante próximas, pois estes testes utilizaram a mesma forma de onda (senoidal) e a frequência das duas é bastante próxima. Esperava-se ainda obter valores semelhantes aos obtidos por (Lopes, Silva, & Martinez, 2008), onde foi utilizada a mesma metodologia de teste, porém em tanque com dimensões superiores.

Analisando-se as FIG 5-3 e 5-4, observa-se as os valores de campo elétrico obtidos para campos senoidais a 50 e 60Hz são significativamente diferentes, além de que a curva obtida para o campo de 60Hz difere do resultado obtido por (Lopes, Silva, & Martinez, 2008).

Desta maneira, buscou-se avaliar quais grandezas elétricas deveriam ser estudadas de maneira que os resultados não fossem dependentes de características do meio, como por exemplo dimensões do tanque e condutividade da água. Segundo (Kolz A. L., 1989), estímulos nervosos são induzidos por sinais elétricos com uma determinada potência, sendo esta independente do meio onde se encontra o animal. Assim, para produzir uma resposta elétrica em qualquer organismo bastaria transferir para este um sinal com uma potência elétrica igual ou superior para disparar, interferir, bloquear ou controlar seus estímulos nervosos inerentes.

Os resultados obtidos com a medição de densidade volumétrica de cada peixe e a média da densidade calculada são apresentadas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1. Medição de densidade média de Indivíduos jovens de *Pimelodus maculatus*. (Fonte própria)

Indivíduo	Comprimento (mm)	Massa (g)	Altura s/ peixe (cm)	Altura c/ peixe (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade Média (g/cm <sup>3</sup> )
1	17	38	4,7	5,2	48,48	0,78383	0,96
2	17,5	50	4,6	5,1	48,48	1,03135	
3	16,6	36	4,5	4,9	38,784	0,92822	
4	16,5	48	5,5	5,95	43,632	1,10011	
5	20	66	6	6,6	58,176	1,13449	
6	17,2	36	5,6	6	38,784	0,92822	
7	17	42	6	6,5	48,48	0,86634	
8	17,9	48	5,5	6	48,48	0,99010	
9	18,3	46	5,5	6	48,48	0,94884	
10	17,5	50	5,3	5,8	48,48	1,03135	
11	19,2	70	7,1	7,8	67,872	1,03135	
12	18,1	56	5,7	6,25	53,328	1,05011	
13	15,3	32	4,7	5,1	38,784	0,82508	
14	16,2	36	3,9	4,3	38,784	0,92822	
15	16,6	40	5,05	5,5	43,632	0,91676	
16	14,6	26	4,7	5	29,088	0,89384	
17	16,6	32	4,65	5	33,936	0,94295	
18	15,1	32	3,6	4	38,784	0,82508	
19	21,2	78	7,4	8,2	77,568	1,00557	
20	16,5	40	5,3	5,7	38,784	1,03135	

A partir do cálculo individual da potência e densidade de potência sobre cada peixe, calculou-se a potência média e densidade de potência média para cada forma de onda estudada. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5-2 a seguir:

Tabela 5-2. Valores médios de potência e densidade de potência necessários para provocar reações de movimento sem direção (Agitação) e Tetania (paralisia). (Fonte Própria)

Forma de Onda	Potência ( $\mu W$ )		Densidade de Potência ( $\mu W/cm^3$ )		Condutividade média da água durante ensaios ( $\mu S/cm$ )
	Agitação	Paralisia	Agitação	Paralisia	
Pulsada 1kHz	33,83	123,06	0,76	2,85	346,13
Senoidal 10kHz	----	----	----	----	286,37
Senoidal 1kHz	38,72	104,72	0,816	2,257	346,84
Senoidal 60Hz	26,79	65,26	0,635	1,41	276,61
Senoidal 50Hz	24,33	56,22	0,6	1,33	345,39
Contínua	----	----	----	----	354,35

## 5.2 Teste de barreira Tipo Stoplog em modelo reduzido

Foram registrados cerca de 30 (trinta) arquivos de vídeo sobre as atividades dos peixes no interior do tubo de sucção, referentes a cerca de quarenta ensaios realizados. Durante todos os testes realizados, não foi observada a passagem de nenhum indivíduo pelas barreiras eletromecânicas, em direção ao interior do tubo de sucção. O tempo total dos ensaios ultrapassou 10 (dez) horas de operação.

Algumas observações pertinentes aos resultados dos ensaios podem ser listadas a seguir:

- 1) A combinação de altas tensões (50 V nos eletrodos) com altas velocidades de fluxo (1750 rpm nas bombas) tem um efeito aparentemente eficaz na repulsão de peixes. Não foi observada a entrada de nenhum peixe na seção de entrada do tubo de sucção nessas condições.
- 2) Poucos indivíduos adentraram a região de visualização do tubo de sucção, em condições de alto fluxo (1750 rpm nas bombas) e de tensões médias (30 V), na tentativa de alcançar a seção do “stop log”.
- 3) Em velocidades mais baixas (abaixo de 1290 rpm), foi observada a presença de indivíduos na seção de entrada do tubo de sucção em todos os níveis de tensão. Para as tensões mais elevadas (50V e 40V), o movimento de saída dos peixes do tubo de sucção aparentemente foi mais intenso.
- 4) A permanência prolongada do mesmo grupo de peixes, no interior do tanque de restituição, provoca um certo nível de condicionamento no grupo, que acaba afetando os resultados dos ensaios. No primeiro dia de testes, a quantidade de indivíduos adentrando a seção de visualização do tubo de sucção foi maior do que aquela observada no dia subsequente de testes, em condições similares de ensaio. Para se evitar o efeito do condicionamento dos indivíduos ao ambiente, deve-se efetuar periodicamente a troca do grupo de peixes a ser utilizado nos ensaios.
- 5) Foi observada a morte de dois indivíduos do grupo de 49 peixes. A primeira morte ocorreu no dia seguinte à primeira bateria de testes. Aparentemente, essa primeira morte pode ter sido causada por problemas de temperatura ou oxigenação da água. A segunda morte foi de um indivíduo jovem, com ferimentos nas guelras, que podem ter sido provocados por choque elétrico. Nos dois eventos, a morte ocorreu em instantes posteriores aos ensaios das barreiras.
- 6) Durante alguns testes, nos quais foi observada atividade quase nula dos peixes no interior do tubo de sucção, a velocidade de operação das bombas era reduzida

a fim de estimular a entrada de peixes. Em alguns testes com tensão de 20 V, as bombas foram desligadas para facilitar a entrada de peixes no tubo de sucção. Entretanto, não houve a passagem de nenhum indivíduo pela seção do “stop log”, mesmo com velocidade de fluxo zero.

Algumas limitações dos ensaios realizados são o pequeno número de amostras de peixes disponíveis em laboratório e o tempo curto de observação. Mesmo assim, apesar de estudos da influência de máquinas e equipamentos sobre seres vivos demandarem um tempo mais longo de observação e análise, os resultados obtidos nos ensaios preliminares de eficácia das barreiras eletromecânicas indicam o seu potencial como mecanismo tecnologicamente viável para repulsão de peixes em protótipos de turbinas hidráulicas.

### **5.3 Teste de barreira Tipo Stoplog em tanque circular**

Foram realizados testes com a barreira energizada a 5V, 10V e 15V. Cada teste se estendeu por um período de quarenta minutos sendo as observações realizadas em intervalos de cinco minutos, o que garantiu oito observações para cada teste.

Cada nível de tensão de teste foi repetido 3 vezes, sendo que para todos eles realizou-se um teste controle (com a barreira desenergizada) para efeitos de comparação. Os movimentos de subida e descida foram contados independentemente e, conforme descrito em 4.4.3, quantificou-se o trânsito de indivíduos, ou seja, a quantidade de movimentos de passagem através da barreira, não se analisando movimentos individuais de cada peixe. O trânsito de peixe em cada experimento é apresentado nas Tabelas 5-3, 5-4 e 5-5 a seguir:

Tabela 5-3. Trânsito de peixes pela barreira energizada a 5V. (Fonte própria)

5V						
Tempo	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	Controle	Teste	Controle	Teste	Controle	Teste
0 a 5 minutos	6	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
5 a 10 minutos	2	1	0	0	1	0
	2	0	0	0	1	0
10 a 15 minutos	5	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
15 a 20 minutos	5	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0
20 a 25 minutos	9	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0
25 a 30 minutos	1	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0
30 a 35 minutos	0	0	0	0	0	2
	0	0	0	0	0	0
35 a 40 minutos	3	2	3	2	0	1
	3	0	1	0	0	0
Temperatura da água (°C)	23,5		22,3		22,5	
Condutividade da água (μS/cm)	305,0		300		325	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></div> Movimento de Subida         </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffffff; border: 1px solid black;"></div> Movimento de Descida         </div>						

Tabela 5-4. Trânsito de peixes pela barreira energizada a 10V. (Fonte própria)

10V						
	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	Controle	Teste	Controle	Teste	Controle	Teste
0 a 5 minutos	2	0	0	0	17	1
	1	0	0	0	14	0
5 a 10 minutos	1	0	5	0	5	0
	0	0	2	0	5	0
10 a 15 minutos	0	0	4	0	2	1
	0	0	1	0	1	0
15 a 20 minutos	0	0	2	2	2	0
	0	0	0	2	1	0
20 a 25 minutos	0	0	2	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
25 a 30 minutos	0	0	0	0	2	0
	0	0	0	0	1	0
30 a 35 minutos	0	0	2	1	4	1
	0	0	0	1	3	1
35 a 40 minutos	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0
Temperatura da água (°C)	21,8		22,7		23,5	
Condutividade da água(µS/cm)	310		324		307	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></div> Movimento de Subida         </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffffff; border: 1px solid black;"></div> Movimento de Descida         </div>						

Tabela 5-5. Trânsito de peixes pela barreira energizada a 15V. (Fonte própria)

15V						
	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	Controle	Teste	Controle	Teste	Controle	Teste
0 a 5 minutos	15	0	8	1	31	0
	10	0	7	0	26	0
5 a 10 minutos	19	0	19	2	18	0
	20	0	12	2	16	0
10 a 15 minutos	12	1	8	0	14	0
	12	0	8	0	14	0
15 a 20 minutos	19	0	1	0	6	0
	19	0	1	0	5	0
20 a 25 minutos	15	0	3	0	6	0
	15	0	3	0	6	0
25 a 30 minutos	18	0	0	1	1	0
	15	0	0	1	1	0
30 a 35 minutos	13	0	4	0	11	0
	14	0	3	0	11	0
35 a 40 minutos	11	1	2	0	13	0
	11	1	3	0	13	0
Temperatura da água (°C)	24,2		24,2		23,3	
Condutividade da água(μS/cm)	313		310		311	
<div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; gap: 20px;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></div> Movimento de Subida           <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #ffffff; border: 1px solid black;"></div> Movimento de Descida         </div>						

Se considerado o número total de peixes que conseguem cruzar a barreira para cada nível de tensão utilizado e para cada tipo de movimento (subida ou descida) e comparado com os respectivos experimentos controle, chega-se a seguinte relação:

Tabela 5-6. Transito total de peixes nos testes efetivos e controle para cada tipo de movimento (Fonte própria)

	Trânsito de peixes pela barreira	Redução %
5V / Controle / Descida	27	100,00%
5V / Teste / Descida	0	
5V / Controle / Subida	35	74,29%
5V / Teste / Subida	9	
10V / Controle / Descida	31	87,07%
10V / Teste / Descida	4	
10V / Controle / Subida	50	88,00%
10V / Teste / Subida	6	
15V / Controle / Descida	245	98,36%
15V / Teste / Descida	4	
15V / Controle / Subida	267	97,75%
15V / Teste / Subida	6	

Para manipulação e análise estatística dos dados apresentados nas Tabelas 5-3, 5-4 e 5-5, foi utilizado o software de análises estatísticas STATISTICA 7.0. Para tal, primeiramente verifica-se o tipo de distribuição dos dados (normal ou não-normal) por meio do teste de Normalidade. Neste caso utilizou-se o teste “W” de Shapiro-Wilk, que retornou como resultado a informação de que os dados apresentam distribuição não-normal. Na estatística inferencial, nos casos de distribuição não-normal, utilizam-se os testes não paramétricos para identificar relações entre variáveis. Assim, prosseguiu-se com o teste de Friedman ANOVA e Kendall para analisar a variância entre os grupos de dados, que foi positiva, ou seja, há variância entre os grupos de dados analisados.

Os resultados obtidos até então demonstraram que há variância entre os experimentos realizados. Partiu-se então para a análise pareada entre grupos com o teste de Wilcoxon, que retorna como resultado a informação se há ou não variações estatísticas entre dois grupos de dados. A variável de saída é o índice-p (*p-level*) que representa um grau de confiabilidade do resultado. Quanto maior o valor de ‘p’, menos se pode acreditar que a relação observada entre as variáveis na amostra é um indicador confiável da relação entre as respectivas variáveis do conjunto amostral. Por exemplo,  $p = 0,05$  indica que há uma probabilidade de 5% que a relação entre as variáveis encontradas na amostra seja uma “casualidade”. Como em várias áreas do conhecimento, consideraremos que valores de  $p < 0,05$  (probabilidade menor que 5%) demonstram que há diferenças significativas entre variáveis.

Nos casos de distribuição não-normal, costuma-se apresentar os resultados com os valores de mediana, máximo e mínimo. Neste caso, porém, apresentaremos os valores de média e desvio-padrão pois como o experimento possui baixa quantidade de amostras, envolve comportamento animal e estudo de eficiência de uma barreira que dificulta o trânsito de peixes, há várias amostras em que o trânsito de animais foi nulo. Assim, a mediana de vários grupo de teste é zero, o que impossibilita qualquer tipo de comparação.

Para os testes de eficiência da barreira eletromecânica, deve ser avaliado então se há variação estatística entre os resultados obtidos com os experimentos de controle e os experimentos com a barreira energizada, além de comparar os valores de mediana, máximo e mínimo. Os resultados obtidos com esta análise estatística são apresentados nas figuras a seguir, onde as legendas são apresentadas da seguinte maneira: “Cont”

representa Teste Controle; “D” significa movimento de descida; “S” movimento de subida; “5V” representa a tensão aplicada. Desta maneira, “Cont/D/5V” na FIG 5-5 representa, por exemplo, os movimentos de descida nos testes controle a 5V. Da mesma forma, “D/5V” representa os movimentos de descida nos testes com barreira energizada a 5V.

A análise dos dados pelo teste de Wilcoxon apresenta não variação estatística entre os experimentos controle e teste efetivo com a barreira energizada a 5V para os movimentos de subida, ou seja, a barreira pode não estar exercendo influência sobre a movimentação dos peixes neste nível de tensão, já que a análise pareada destes dados nos retornou um valor de  $p = 0,0711$ , ou seja,  $p > 0,05$ .

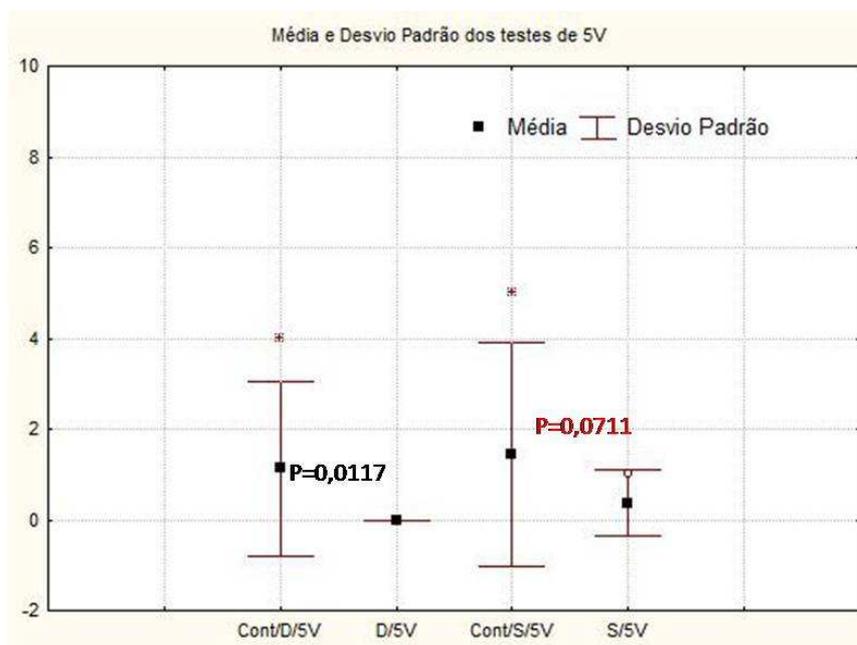


Figura 5-5. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os testes com a barreira energizada a 5V. (Fonte própria)

Os experimentos com barreira energizada a 10V apresentaram variação estatística em relação aos experimentos com grupo controle (FIG 5-6). Tanto os movimentos de subida quanto os movimentos de descida foram reduzidos com a aplicação do campo elétrico.

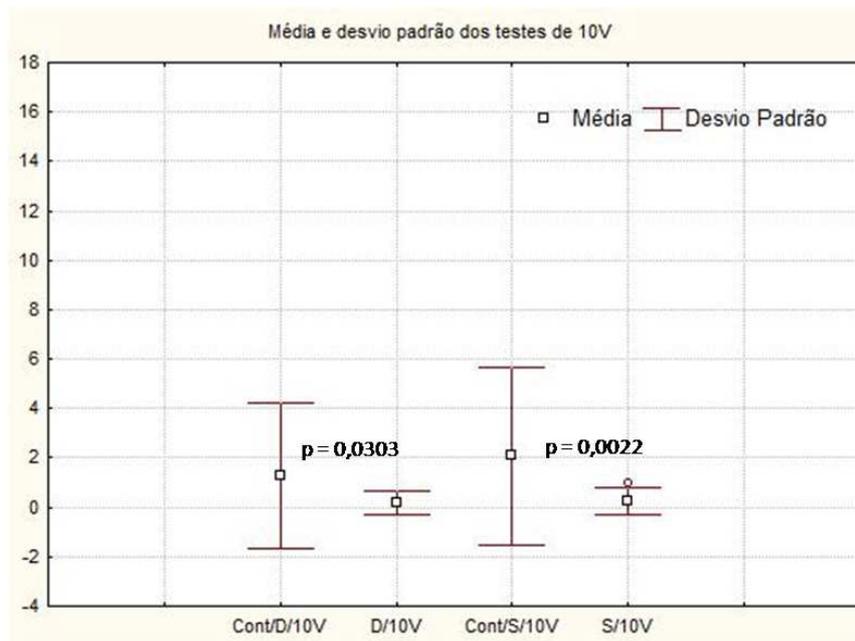


Figura 5-6. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os testes com a barreira energizada a 10V. (Fonte própria)

Os dados apresentados na FIG 5-7, mostram que a barreira energizada a 15V é ainda mais eficiente do que a barreira energizada a 10V. Diferenças significativas entre grupo controle e teste foram encontradas para este nível de tensão. Tanto os movimentos de subida quanto de descida foram reduzidos consideravelmente.

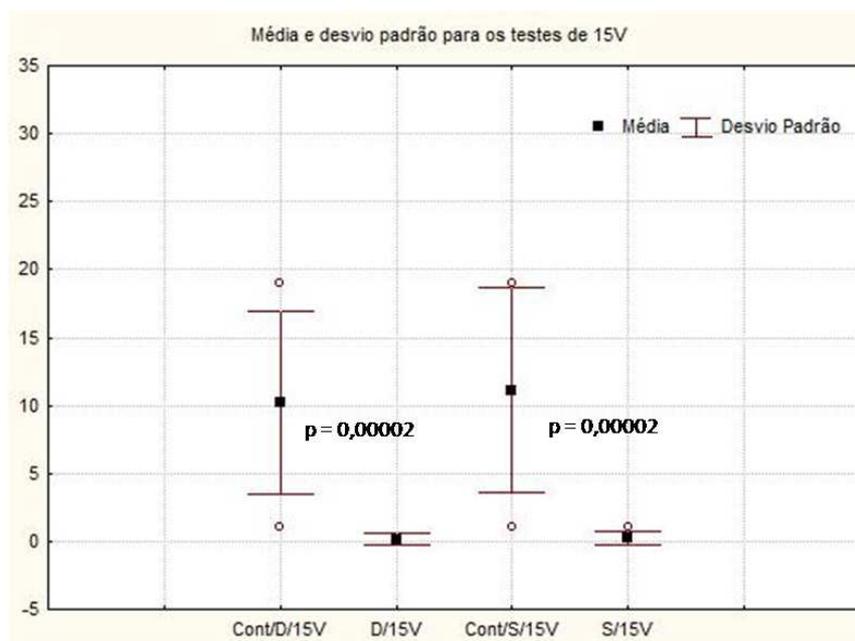


Figura 5-7. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os testes com a barreira energizada a 15V. (Fonte própria)

Se comparados os testes com os três grupos de tensão utilizados, não são encontradas diferenças estatísticas entre suas amostras (FIG 5-8). Isto pode ser explicado pelo baixo número de amostras dos testes realizados ou pela pequena faixa de variação de tensão dos testes, ou seja, tensões inferiores a 5V poderiam ter sido testadas.

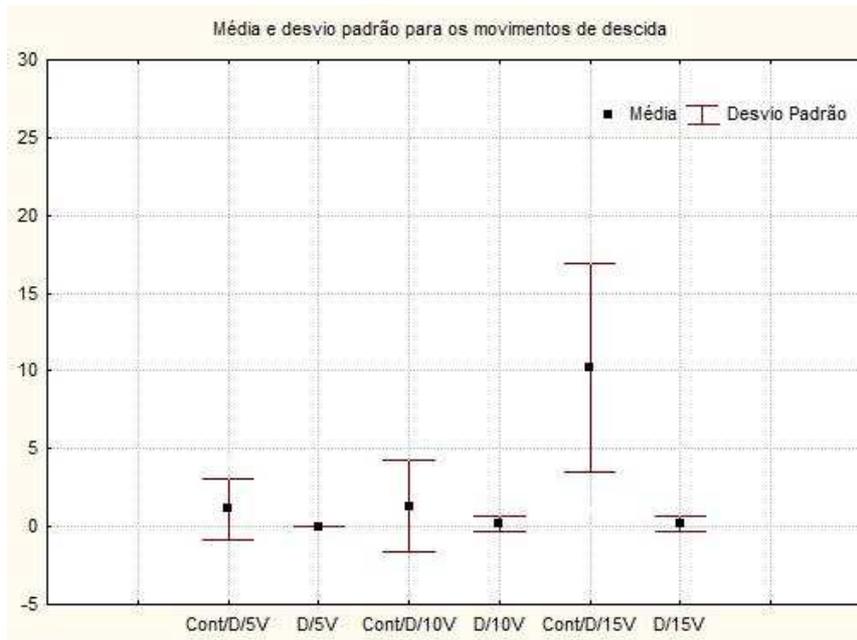


Figura 5-8. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os movimentos de descida dos peixes. (Fonte própria)

Assim como os movimentos de descida, a análise pareada entre os experimentos com barreira energizada com os movimentos de subida revela que não há diferenças significativas entre os três níveis de tensão utilizados (FIG 5-9). Os motivos pelos quais isso ocorre são os mesmos apresentados anteriormente.

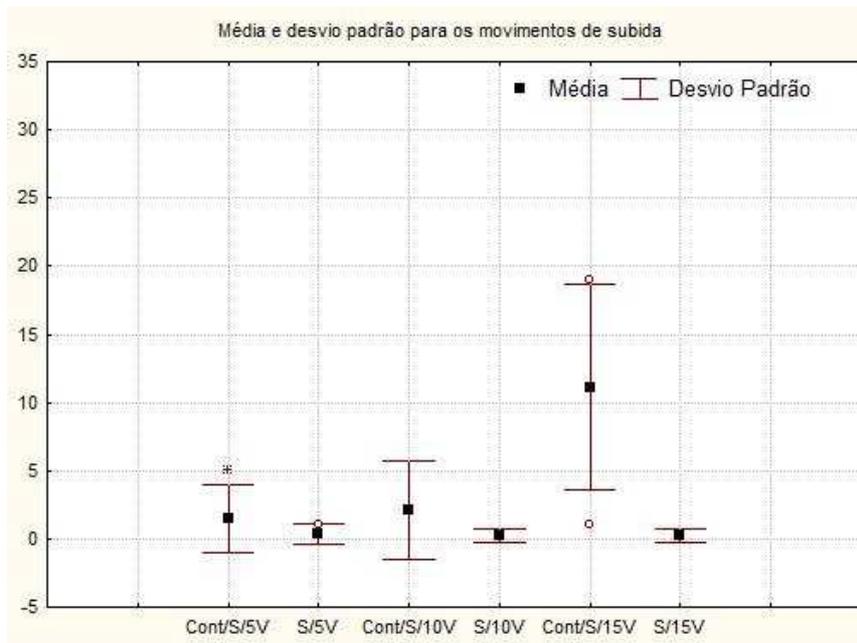


Figura 5-9. Valores de média, desvio padrão e resultado do teste de Wilcoxon para os movimentos de subida dos peixes. (Fonte própria)

O grau de adaptabilidade do *Pimelodus maculatus* à barreira pode ser qualitativamente analisado se comparado o trânsito de peixes nos instantes iniciais dos testes com o trânsito de peixes nos instantes finais. As FIG 5-10, 5-11 e 5-12 apresentam o número absoluto de indivíduos que conseguem ultrapassar a barreira em movimento ascendente (subida) no decorrer dos ensaios.

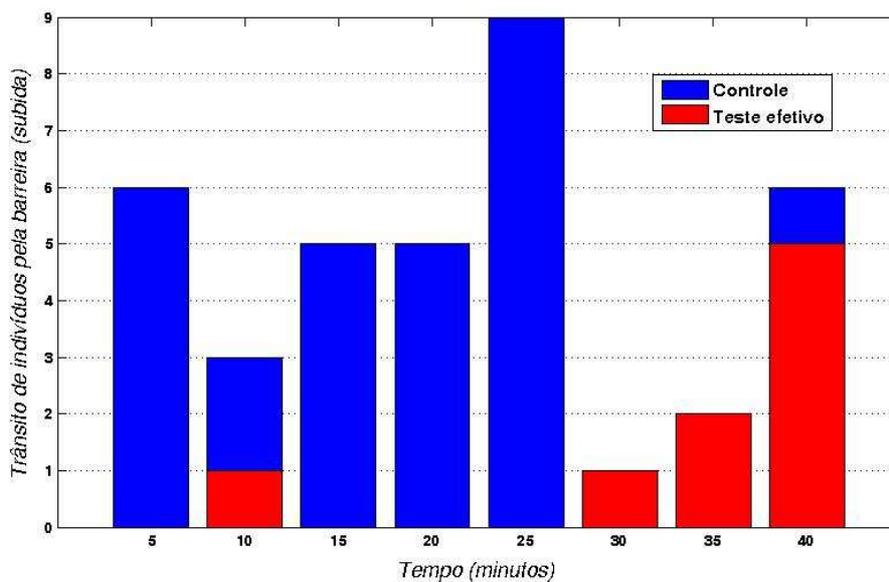


Figura 5-10. Valor absoluto de peixes transitando pela barreira no decorrer dos testes de 5V. (Fonte própria)

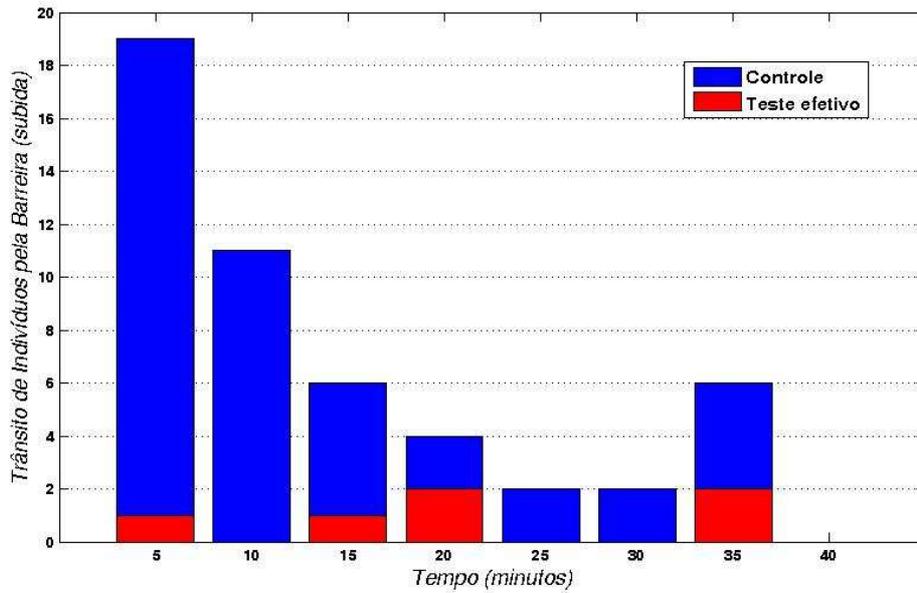


Figura 5-11. Valor absoluto de peixes transitando pela barreira no decorrer dos testes de 10V. (Fonte própria)

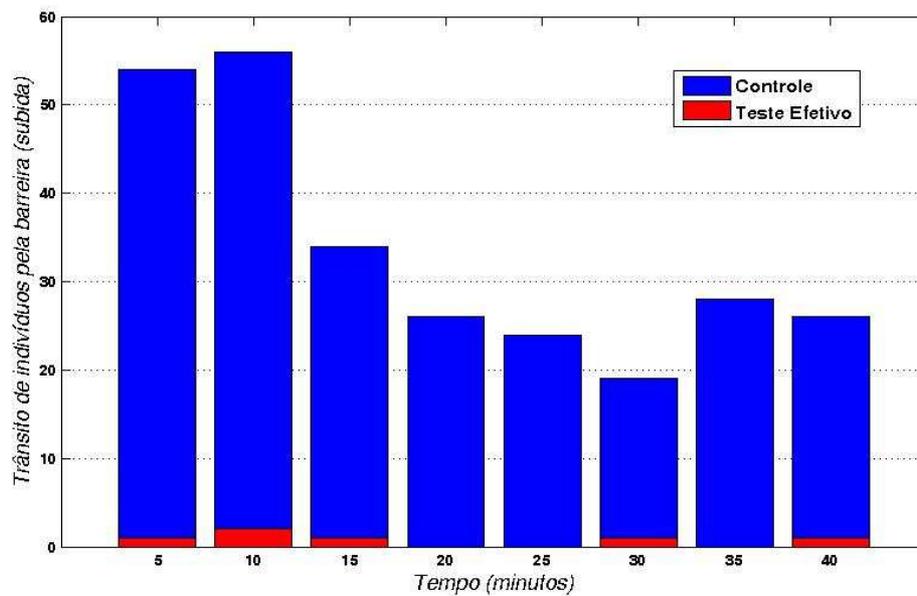


Figura 5-12. Valor absoluto de peixes transitando pela barreira no decorrer dos testes de 15V. (Fonte própria)

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 Ensaios de Eletrosensibilidade

As curvas de eletrosensibilidade obtidas apresentam valores de campo elétrico necessários para causar reações de agitação e tetania no *Pimelodus maculatus* em função do peso e comprimento desta espécie. Os resultados mostram que quanto maior o comprimento ou a massa do peixe, menor a amplitude do campo elétrico que provoca tais reações. Esta característica também pode ser observada nos resultados obtidos por (Lopes R. E., 2009) que utilizou bancadas e metodologias diferentes deste trabalho, e pode ser explicada pelo fato de que um peixe com maiores medidas está sujeito a uma maior diferença de potencial entre cabeça e cauda e, conseqüentemente, uma maior circulação de corrente pelo seu corpo.

Os ensaios de eletrosensibilidade com tensão senoidal a 10kHz não geraram resultados conclusivos. Todos os peixes ensaiados pareceram não se “incomodar” com a circulação de corrente no tanque teste e o aumento gradativo da tensão aplicada entre as placas não causou reação nos peixes. Esta falta de sensibilidade à frequências elevadas se deve:

1. ao efeito pelicular, fenômeno que relaciona a profundidade de penetração da corrente à sua frequência, sendo ambos inversamente proporcionais, ou seja, correntes alternadas de elevadas frequências tendem a fluir apenas nas regiões mais externas dos condutores.
2. à impedância do sistema, que em altas frequências cai consideravelmente. Se considerarmos a capacitância existente no sistema, o circuito equivalente da FIG 4-22 pode ser remodelado como:

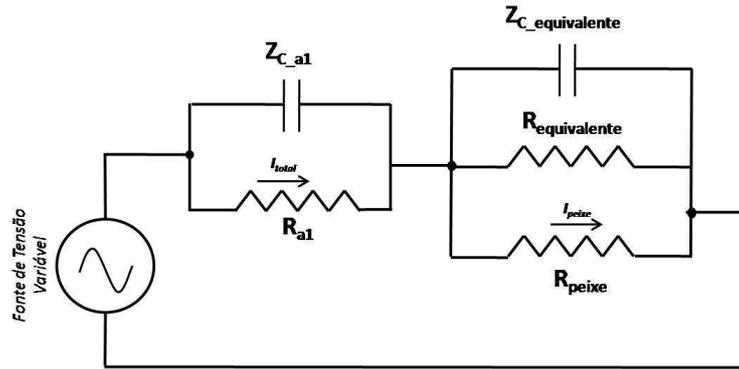


Figura 6-1. Circuito equivalente do modelo apresentado na FIG4-22, considerando-se efeitos capacitivos.

Com o aumento da frequência do sinal gerado pela fonte de tensão, o valor das reatâncias capacitivas  $Z_{C\_a1}$  e  $Z_{C\_equivalente}$  diminuem segundo a relação  $|Z_c| = 1/\omega C$ , sendo  $\omega$  a frequência angular do sinal dada por  $\omega = 2 * \pi * f$ . Se o valor de  $Z_{C\_equivalente}$  é significativamente menor que o valor das resistências  $R_{equivalente}$  e  $R_{peixe}$ , há uma tendência natural da corrente no capacitor ser maior que a corrente nos resistores. Assim sendo, a corrente que atravessa o peixe é praticamente desprezível em relação à corrente do circuito.

Os ensaios em corrente contínua, também não apresentaram resultados conclusivos. Não foram identificadas a taxa anódica, a qual (Lamarque, 1990) faz referência, nem mesmo reações de agitação como nos demais ensaios. Os limiares de campo que provocam narcose elétrica também não puderam ser estabelecidos, pois o comportamento natural desta espécie quando colocada no tanque teste sem aplicação de campo elétrico se confunde com a reação de narcose, quando o peixe fica paralisado, com os músculos relaxados e respiração reduzida. A bancada de teste utilizada não permitia que valores superiores a 80V/m fossem aplicados, por esse motivo os valores de campo sugeridos por (Lamarque, 1990) para início da tetania não foram alcançados. Uma importante observação a ser feita é que como os níveis de tensão utilizados nos ensaios de corrente contínua foram mais elevados, os peixes ensaiados eram retirados do tanque teste com evidente cansaço físico.

Nos ensaios com tensão pulsada, duty cycle 50% a 1kHz, a identificação do estado de agitação não era tão evidente quanto nos ensaios com tensão senoidal, porém o estado de tetania era muito bem caracterizado. De acordo com (Bird & Cowx, 1993), a utilização de campos pulsantes diminui o tempo de recuperação dos peixes e seus

efeitos representam o meio termo entre a tensão alternada e a contínua (Cowx & Lamarque, 1990). Campos alternados geram reação de tetania elétrica mais rapidamente, o que pode ser vantajoso para a eficiência de uma barreira elétrica e, a utilização de campos elétricos a 1000Hz diminui os ferimentos causados por atordoamento elétrico, no caso de exposição a campos elétricos elevados. Assim sendo, é pertinente a comparação entre os níveis de campo elétrico necessários para provocar as reações desejadas para os campos pulsante e alternado de 1000Hz, conforme FIG 6-2.

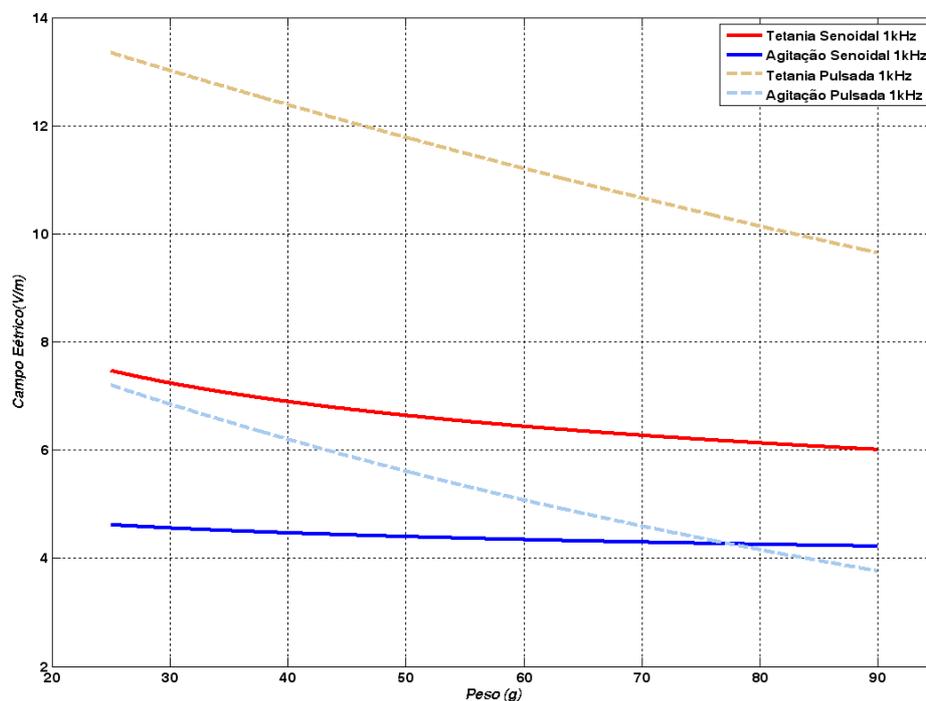


Figura 6-2. Curvas de eletrosensibilidade para campos pulsantes e alternados de 1000Hz sobrepostas. (Fonte própria)

A partir da análise da FIG 6-2 nota-se que os níveis de campo elétrico exigidos para que o *Pimelodus maculatus* entre em tetania ou paralisia são significativamente maiores se utilizado campo pulsante. Seria necessário, por exemplo, um campo pulsante de 1kHz de aproximadamente 11,2V/m para paralisar um peixe de 60g, enquanto que um campo elétrico senoidal 1kHz de 6,4V/m seria suficiente para provocar a mesma reação em um indivíduo do mesmo peso.

Apesar de o campo pulsante a 1kHz exigir maiores amplitudes, de acordo com o item 5.1.1, a potência elétrica transferida para o peixe, necessária para agitar ou paralisar o mandi com esta forma de onda é bastante próxima da potência necessária para campos senoidais a 1kHz. Ainda de acordo com o item 5.1, como os limiares de

agitação e tetania dos peixes são mais bem representados por níveis de potência elétrica transferida, conclui-se que a escolha entre uma ou outra forma de onda dependerá do tipo de reação que se deseja alcançar (campos pulsantes representam o meio termo entre alternada e contínua) e da tecnologia e aparatos disponíveis para construção da bareira (fontes contínuas e/ou alternadas).

Como os níveis de potência necessários para agitar e paralisar o mandi para ondas senoidais e pulsadas a 1kHz são bastante próximos, torna-se interessante analisar, dentre as três frequências senoidais ensaiadas, as diferenças entre as curvas registradas. As FIG 6-3 e 6-4 apresentam, respectivamente, as curvas de agitação e tetania para as três frequências ensaiadas.

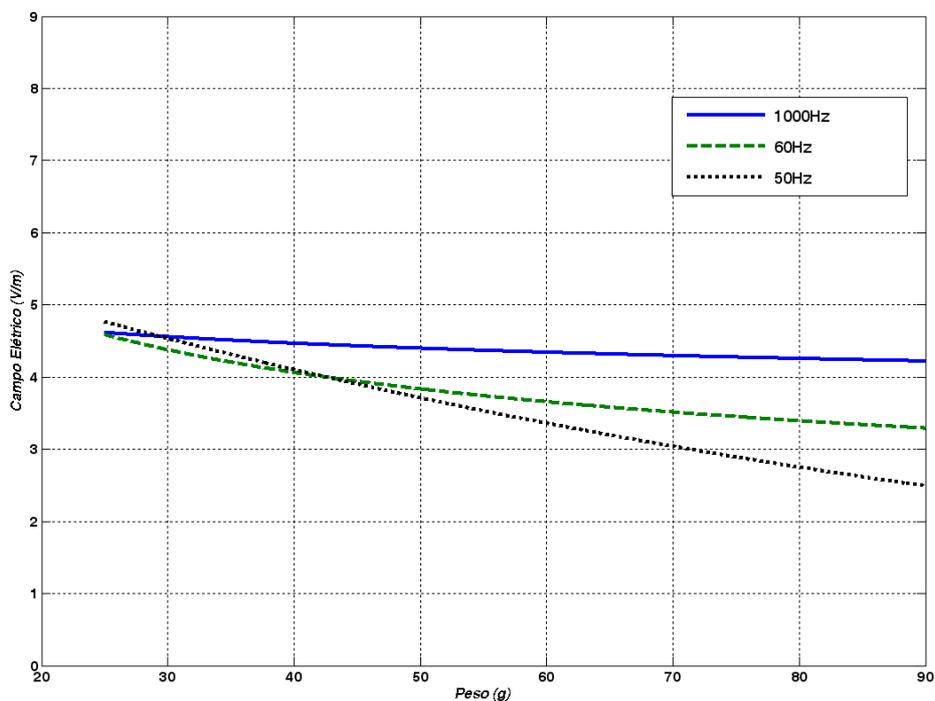


Figura 6-3. Curvas sobrepostas de agitação para campos senoidais. (Fonte própria)

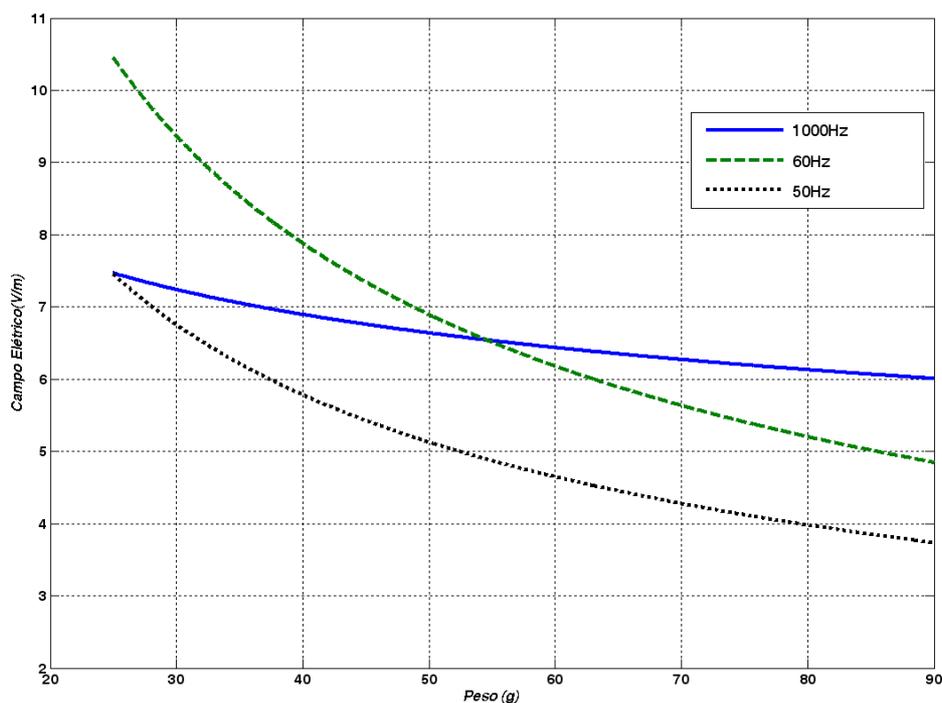


Figura 6-4. Curvas sobrepostas de tetania para campos senoidais. (Fonte própria)

A análise das curvas de eletrosensibilidade para as três formas de onda utilizadas, sugerem que os níveis de campo elétrico necessários para agitar ou paralisar o *Pimelodus maculatus* são menores para campos senoidais de 50Hz.

Embora as curvas de agitação para 50 e 60Hz tenham apresentado valores médios bastante próximos e as curvas de tetania curvaturas semelhantes, os valores pontuais nas curvas de tetania apresentaram significativa diferença. Esperava-se que tais curvas fossem bastante semelhantes em valores ponto a ponto, já que não há grande variação de frequência entre estas duas formas de onda. Uma possível causa da ocorrência desta diferença pode estar na quantidade de pontos utilizados para o levantamento destas curvas, que somaram um total de 25 para cada curva. Apesar de os estímulos elétricos provocarem uma reação fisiológica com características bem determinadas nos peixes, há uma parcela dos experimentos que conta com uma análise subjetiva e/ou comportamental do *Pimelodus maculatus* quando submetido à corrente elétrica.

As curvas de agitação e tetania para a frequência de 1kHz apresentaram pouca variação da amplitude do campo elétrico com o peso e comprimento dos peixes, o que pode ser vantajoso para utilização na barreira pois para uma mesma amplitude de campo elétrico consegue-se a reação desejada para uma ampla faixa de comprimento de peixes.

Apesar desta vantagem, a senoide de 1kHz apresentou um valor médio superior às curvas de 50 e 60Hz. Possíveis explicações para tal fenômeno são o efeito pelicular e o efeito da reatância capacitiva da água, que é menor que a do peixe.

De um modo geral as curvas obtidas diferem, em amplitude, consideravelmente das obtidas por (Lopes R. E., 2009) que utilizou um tanque de teste com volume significativamente superior ao adotado neste trabalho. A partir da análise da FIG 4-22 conclui-se que o valor da resistência  $R_{a1}$  é fator limitante à corrente do circuito e, conseqüentemente, à corrente que atravessa o peixe. Desta maneira, apenas a análise da amplitude do campo elétrico ou da tensão entre placas não é suficiente para estabelecer os limiares das reações do *Pimelodus maculatus*, pois esta não leva em consideração as características do circuito formado por água e peixe.

A análise das parcelas de corrente e tensão resultantes apenas sobre o peixe ( $R_{peixe}$  na FIG 4-22) permitiu avaliar a potência e densidade de potência necessária para estimular o *Pimelodus maculatus* sem a interferência de fatores como resistividade e volume de água. Os resultados obtidos na análise de eletrosensibilidade em função da potência e densidade de potência transferida para o peixe apresentam um valor médio para cada forma de onda e, apesar de não haver na literatura resultados publicados para esta espécie, a ordem de grandeza dos valores obtidos se aproximam dos resultados apresentados por (Kolz & Reynolds, 1989) para estudos feitos com a espécie o Goldfish (*Carassius auratus*).

A Tabela 5-2 apresenta os resultados obtidos para potência e densidade de potência que confirmam a análise realizada para as curvas de eletrosensibilidade, às quais demonstram que utilizando-se tensão pulsada os níveis de densidade de potência necessários para paralisar o *Pimelodus maculatus* são significativamente superiores aos níveis exigidos quando se utiliza forma de onda senoidal. Para as frequências senoidais estudadas, os valores obtidos tanto para agitação quanto para paralisia, para 50 e 60Hz, foram bastante próximos, conforme esperado. A frequência senoidal de 1kHz apresentou valores superiores pelos motivos já expostos anteriormente.

## **6.2 Teste de Barreira Tipo Stoplog em modelo reduzido**

Os testes da barreira tipo Stoplog em modelo reduzido foram satisfatórios e comprovaram a eficiência da barreira elétrica, apesar de a distribuição geométrica dos eletrodos não ter sido otimizada neste experimento (vide FIG 4-22). A combinação de altas tensões com altas velocidades de fluxo apresentou efeito eficaz na repulsão de

peixes, pois nesta situação, para ultrapassar a região da barreira, o peixe deve apresentar capacidade natatória suficiente para vencer a velocidade de escoamento da água que deixa a turbina e ainda suportar o choque elétrico imposto pela barreira. Velocidades de escoamento mais baixas possibilitaram que uma maior quantidade de peixes se aglomerasse na entrada do tubo de sucção, ficando visíveis ao campo de visualização do tubo, porém, os níveis de tensão utilizados garantiram 100% de eficiência da barreira neste experimento.

A falta de movimentação de peixes na entrada do tubo de sucção em alguns testes pode ser explicado pelo condicionamento dos peixes ao experimento, ou seja, os animais associaram a região do tubo de sucção ao choque elétrico e passaram a evitar o local.

### **6.3 Teste de Barreira Tipo Stoplog em tanque circular**

Os testes da barreira tipo Stoplog em tanque circular permitiram melhor compreensão e detalhamento da eficiência e uso da barreira elétrica. Os níveis de tensão utilizados foram menores e mais condizentes com os valores encontrados a partir dos ensaios de eletrosensibilidade. A movimentação e o comportamento dos peixes pôde ser melhor avaliado com a utilização do tanque de vidro, e a o real desempenho da barreira elétrica pôde ser comparado com a utilização de grupos controle.

Apesar da pouca movimentação dos peixes nos testes controle a 5V, os resultados obtidos demonstram que a utilização de tensões mais elevadas garantem uma maior eficiência da barreira que, conforme apresentado na Tabela 5-6, foi da ordem de 74,3% para a tensão de 5V, 88% para 10V e 97,8% para 15V nos movimentos de subida.

A Tabela 5-6 demonstra também que a barreira é eficiente para a redução dos movimentos de descida dos peixes. A redução de tais movimentos é vantajosa quando a barreira for utilizada à montante da barragem, ou seja, na tomada d'água das usinas, com o intuito de evitar a passagem de peixes de montante à jusante através das turbinas. Porém, se utilizada à jusante, esta característica da barreira torna-se um ponto negativo, pois uma vez que os peixes conseguem ultrapassá-la grande parte ficaria “aprisionada” na região entre a barreira e a turbina, o que é justamente o oposto do objetivo proposto pela implantação da barreira elétrica.

A análise estatística validou os resultados obtidos para cada tensão de teste, exceto para os movimentos de subida a 5V. A pouca movimentação de peixes nos testes controle é o motivo pelo qual não houve diferença estatística entre os testes controle e efetivos neste nível de tensão.

A comparação entre os testes efetivos não resultou em variação estatística significativa, pois a movimentação de peixes com a barreira energizada é bastante reduzida para todas as tensões. Assim, a comparação estatística das amostras de cada teste resultou em valores de 'p' superiores a 0,05 (5%), conforme apresentado nas FIG 5-8 e 5-9.

A comparação estatística através dos testes de Wilcoxon confere ainda uma noção da eficiência da barreira a partir da análise do nível-p. Teoricamente, quanto menor o valor de 'p' maior a eficiência da barreira, o que confirma o resultado obtido para a tensão de 15V ( $p=0,00002$ ).

As FIG 5-10, 5-11 e 5-12 apresentam, em valores absolutos, o trânsito de peixes em movimento ascendente em intervalos de tempo de 5 minutos. A comparação entre os instantes finais e iniciais de cada teste sugere adaptabilidade ou não dos peixes à imposição imposta pela barreira. Assim sendo, nota-se para os testes a 5V certa adaptação do *Pimelodus maculatus* à barreira, já que o trânsito de peixes é crescente nos instantes finais do ensaio, o que não ocorreu nos testes de 10 e 15V, pois apresentaram uniformidade no trânsito de peixes no decorrer de todo o teste.

Outra importante observação que se faz a partir das FIG 5-10, 5-11 e 5-12 é a intensa movimentação dos peixes nos minutos iniciais do experimento controle, ou seja, os indivíduos inicialmente confinados na Área 1 do tanque buscam se acomodar e preencher melhor o espaço disponível, enquanto nos testes efetivos não se identifica tal padrão de movimentação. Este fato sugere que a barreira foi também efetiva no confinamento dos peixes na Área 1, e pode ser usada com este intuito em canais ou tanques de manipulação.

Como os níveis de tensão utilizados nestes testes não foram suficientes para causar nenhum tipo de lesão interna ou externa aos indivíduos experimentados, conclui-se que para as condições de teste da barreira no tanque circular utilizado, levando-se em conta as dimensões da barreira, volume e características da água, a tensão de 15V é a mais recomendada.

## 7 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este trabalho investigou os efeitos da eletricidade sobre o comportamento do *Pimelodus maculatus*, popularmente conhecido como mandi, com o intuito de desenvolver um dispositivo elétrico (barreira elétrica) capaz de impedir ou reduzir a entrada de peixes nos tubos de sucção de usinas hidroelétricas, reduzindo assim a mortandade de peixes devido à operação das mesmas.

O trabalho foi iniciado com o estudo de eletrosensibilidade da espécie alvo a fim de se entender o comportamento da mesma em diferentes níveis de tensão e, principalmente, a fim de se obter informações suficientes para a configuração e parametrização da barreira elétrica. Uma observação importante é que os níveis de tensão utilizados nestes testes de eletrosensibilidade não foram suficientes para causar nenhum tipo de lesão interna ou externa aos indivíduos experimentados.

Foram obtidas curvas de eletrosensibilidade em função do campo elétrico aplicado com o peso e comprimento dos peixes. Posteriormente avaliou-se a potência e densidade de potência elétrica que devem ser transferidas aos peixes a fim de se obter os padrões de comportamento identificados. Em ambas análises concluiu-se que os níveis de campo elétrico ou potência elétrica necessários para causar reações de agitação e tetania utilizando-se ondas pulsantes de 1000Hz foram maiores se comparados com ondas senoidais. As tensões pulsantes necessitam de uma fonte de tensão contínua (Vdc) e por isso são bastante utilizadas em equipamentos de pesca elétrica, que são instrumentos portáteis que levam consigo bancos de baterias.

A utilização de baixas frequências senoidais reduziu ainda mais a amplitude necessária. Isso ocorre devido ao efeito pelicular causado pela utilização da alta frequência ou ainda devido ao efeito da reatância capacitiva da água, utilizada neste caso como condutor/dielétrico.

Optou-se então por utilizar corrente senoidal de 60Hz para energização da barreira, pois, ao contrário da corrente DC, não provoca eletrotaxes nos peixes (reação de atração), é o tipo de tensão gerada na usina e necessita de amplitudes menores para paralisar o *Pimelodus maculatus*.

Para os teste de eficiência da barreira elétrica proposta foi utilizada uma turbina hélice em escala reduzida (1:10,5) baseada na turbina instalada na usina de Itutinga. O

tubo de restituição projetado possui uma janela de observação que permitiu monitorar a movimentação dos peixes na região da barreira, que foi testada utilizando-se tensão entre eletrodos de 20V, 30V, 40V e 50V. Para cada nível de tensão, variou-se a velocidade de rotação da turbina de 600 a 1750rpm. Todos os testes foram filmados e nenhum peixe conseguiu ultrapassar a barreira durante todo o teste.

Apesar de fornecer resultados que elucidam bem o funcionamento da barreira em campo, devido às suas dimensões, o aparato utilizado dificulta consideravelmente a manipulação dos peixes e torna praticamente inviável a utilização de grupos controle ou a réplica dos testes para diferentes grupos de peixes. Assim, para uma melhor compreensão da operação da barreira e da interação dos peixes com esta, optou-se por continuar os testes de eficiência da barreira em tanque circular de vidro, com dimensões menores.

Os testes da barreira elétrica em tanque circular possibilitaram melhor compreensão da eficiência da barreira já que foram realizados ensaios com grupos controle e a contagem do transito de peixes através desta foi realizada em intervalos de 5 minutos. A análise estatística dos dados demonstrou que não há diferença estatística entre grupo controle e teste para a barreira energizada a 5V. Porém, para os testes a 10V e 15V os testes estatísticos apresentaram diferenças significativas entre os testes controle e efetivos, com a eficiência chegando próximo a 98% de redução. A análise da adaptabilidade dos peixes ao choque elétrico também não foi satisfatório para 5V. Já para 10 e 15V não houve adaptação dos peixes nos momentos finais do teste.

A barreira elétrica proposta possui construção bastante simples e poderá ser utilizada em plantas hidroelétricas em construção ou já em funcionamento. Poderá ser instalada aproveitando-se a ranhura da válvula Stoplog ou simplesmente instalando-se um guia ou trilho que dê sustentação à barreira na saída do tubo de restituição, conforme mostrado na figura a seguir:

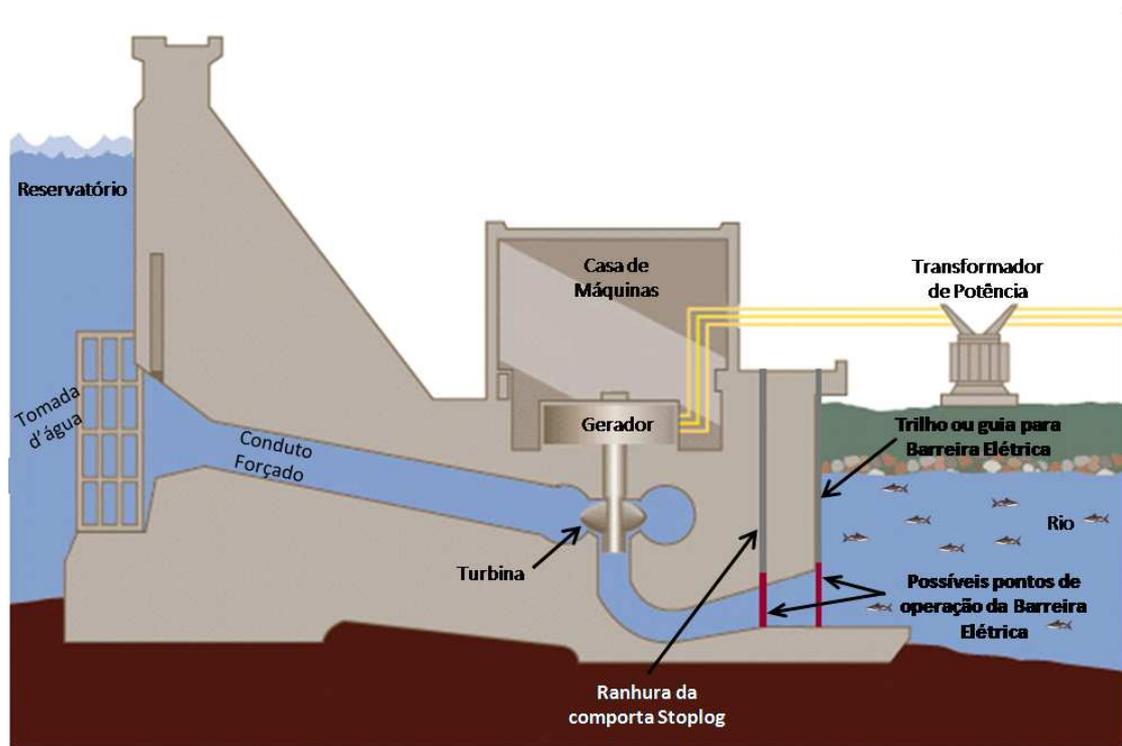


Figura 7-1. Vista em corte de uma usina hidrelétrica com proposta de instalação da barreira elétrica.

A utilização deste tipo de barreira à passagem de peixes torna-se interessante e tecnicamente viável, pois ela não representa uma barreira física no sistema, não afetando assim o comportamento do conjunto hidrogerador. Outra vantagem deste sistema é o reduzido custo de instalação, operação e manutenção, além da elevada eficiência se comparada a outras barreiras comportamentais, como por exemplo barreira de bolhas e luz estroboscópica.

Resultados ainda melhores podem ser alcançados com a utilização de barreiras mistas. A associação da barreira elétrica com alguma outra barreira comportamental que proporcione uma percepção visual como por exemplo a barreira de bolhas, pode elevar ainda mais a eficiência do sistema, pois neste caso o peixe associa as bolhas com o choque elétrico e passa a evitar o local onde as bolhas existem.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agência Nacional de Águas - ANA. (2007). *GEO Brasil: Recursos Hídricos: Componente da Série de Relatórios sobre o Estado e Perspectiva do Meio Ambiente no Brasil*. Brasília: Editora da ANA.
2. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (2008). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil-3a. edição*. Brasília: Centro de Documentação - CEDOC.
3. Agostinho, Â. A., Gomes, L. C., & Pelicice, F. M. (2007). *Ecologia e Manejo de Recursos Pesqueiros em Reservatórios do Brasil*. Maringá: Editora da Universidade Estadual de Maringá.
4. Bird, D., & Cowx, I. (1993). "The selection of suitable pulsed currents for electric fishing in fresh waters". *Fisheries Research*, pp. 363-376.
5. Cada, G. F. (2001, Setembro). *American Fisheries Society - Publications*. Retrieved Julho 2009, from American Fisheries Society: <http://www.fisheries.org>
6. Cada, G. F., Brookshier, P., Flynn, J., Rinehart, B., Sommers, G., & Sale, M. (2009, Julho). *DOE Scientific and Technical Information*. Retrieved Julho 2009, from Site da DOE: <http://www.osti.gov/bridge/index.jsp>
7. Canadian Electricity Association. (2001, Julho). *"Considering Fish and Fish Habitat in Existing Hydroelectric Operations and Maintenance: Electricity Industry Practices"*. Retrieved Janeiro 2009, from Canadian Electricity Association: <http://www.canelect.ca/en/Pdfs/RevCEA.pdf>
8. Canadian Electricity Association. (2001). *Considering Fish and Fish Habitat in Existing Hydroelectric Operations and Maintenance: Electricity Industry Practices*.
9. Centro de Transposição de Peixes. (n.d.). *CTPeixes*. Retrieved Agosto 19, 2009, from Centro de Transposição de Peixes: <http://www.ctpeixes.ufmg.br>
10. Clarkson, R. W. (2003). *Effectiveness of electrical fish barriers associated with the Central Arizona Project, 1988-2000*. U.S. Bureau of Reclamation.
11. Companhia Energética de Minas Gerais. (2006). *Guia Ilustrado de peixes do rio São Francisco*. São Paulo: Empresa das Artes.

12. Companhia Energética de Minas Gerais. (2005). *Pesquisa e desenvolvimento de barreira mecânica para evitar mortandade de peixes na sucção de turbinas hidráulicas*. Belo Horizonte.
13. Companhia Energética de Minas Gerais; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. (2000). *Guia ilustrado de peixes da bacia do rio Grande*. Belo Horizonte: CEMIG/CETEC.
14. Coutant, C. C. (2001). Integrated, Multi-Sensory, Behavioral Guidance Systems for Fish Diversions. In C. C. Coutant, *Behavioral Technologies for Fish Guidance* (pp. 105-114). Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.
15. Cowx, I., & Lamarque, P. (1990). Fishing With Electricity - Applications in fresh water fisheries management. *Fishing News Books* , p. 245pp.
16. Dolan, C. R., & Miranda, L. E. (2003). Immobilization Thresholds of Electrofishing Relative to Fish Size. *Transactions of the American Fisheries Society* 132 , pp. 969-976.
17. Faria, M. T., Viana, E. M., Martinez, C. B., Silva, F. N., Lopes, R. E., & Louzada, R. G. (2009). Desenvolvimento de Procedimento Experimental para Avaliação da Eficácia de Barreiras Eletromecânicas em Turbinas Hidráulicas. 9º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica , pp. 29-40.
18. Filho, E. Z., & Weingartner, M. (2007). Técnicas de indução da reprodução de peixes migradores. *Revista Brasileira de Reprodução Animal* , 31, 367-373.
19. Goetz, F. A., Dawson, J. J., Shaw, T., & Dillon, J. (2001). Evaluation of Low-Frequency Sound Transducers for Guiding Salmon Smolts Away from a Navigation Lock. In C. C. Coutant, *Behavioral Technologies for Fish Guidance* (pp. 91-104). Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.
20. Hanson, C. H., Hayes, D., & Urquhart, K. A. (1997, May 6-8). Biological evaluations of the Georgiana Slough experimental acoustical fish barrier. Phases I-IV during 1993-1996. *Fish Passage Workshop in Milwaukee* .
21. Harrevel, A. V. (1938). On Galvanotropism and Oscillotaxis in fish. *The Journal of Experimental Biology* , 197-208.
22. Holliman, F. M., Reynolds, J. B., & Kwak, T. J. (2003). Management Briefs. *North American Journal of Fisheries Management* 23 , pp. 962-966.
23. Knudsen, F. R., Enger, P. S., & Sand, O. (1994). Avoidance responses to low frequency sounds in downstream migrating Atlantic salmon smolt, *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology* , 45:227-233.

24. Kolz, A. L. (1989). A Power Transfer Theory for Electrofishing. In A. L. Kolz, & J. B. Reynolds, *Electrofishing, A Power Related Phenomenon* (pp. 1-10). Washington, D.C.: U.S. Fish and Wildlife Service.
25. Kolz, A. L., & Reynolds, J. B. (1989). Determination of Power Threshold Curves. In A. L. Kolz, & J. B. Reynolds, *Electrofishing, A Power Related Phenomenon* (pp. 15-24). Washington, D.C.: U.S. Fish and Wildlife Service.
26. Lamarque, P. (1990). Electrophysiology of Fish in Electric Fields. In I. G. Cowx, & P. Lamarque, *Fishing with Electricity* (pp. 4-33). Oxford: Fishing News Books, Blackwell Scientific.
27. Lamarque, P. (1967). Electrophysiology of fish subject to the action of an electric field. In R. Vibert, *Fishing with electricity: its application to biology and management* (pp. 65-92).
28. Larinier, M. (2001). Environmental Issues, Dams and Fish Migration. *Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution.* , FAO (FAO Fisheries Technical Paper No 419), 166.
29. Larinier, M., & Travade, F. (2002). Downstream migration: problems and facilities. pp. 181-207.
30. Lines, J., & Kestin, S. (2004). Electrical Stunning of fish: the relationship between the electric field strength and water conductivity. *Aquaculture* , p. 241.
31. Lopes, R. E. (2009). Estudo de barreiras elétricas para impedimento de entrada de peixes em turbinas hidráulicas. Belo Horizonte, Minas Gerais: Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais.
32. Lopes, R. E., Silva, F. N., & Martinez, C. B. (2008, Abril 21 a 25). Efeito de campos elétricos sobre peixes - Um estudo sobre o comportamento de espécies neotropicais. *VI Simpósio Brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas* . Belo Horizonte, MG, Brasil: Comitê Brasileiro de Barragens.
33. Ministério de Minas e Energia. (2007). *Balanço Energético Nacional Ano Base 2006*. Rio de Janeiro.
34. Miranda, L. E., & Dolan, C. R. (2003). Test of a Power Transfer Model for Standardized Electrofishing. *Transactions of the American Fisheries Society* 132 , pp. 1179–1185.
35. Nestler, J., & Polskey, G. (1996). Sound way to save fish. *Civil Engineering magazine*, 66(9) , 59-61.

36. Patrick, P. H., Poulton, J. S., & Brown, R. (2001). Responses of American eels to strobe light and sound (preliminary data) and introduction to sound conditioning as a potential fish passage technology. In C. C. Coutant, *Behavioral Technologies for Fish Guidance* (pp. 1-11). Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.
37. Pratt, V. S. (1955, January). Fish Mortality Caused by Electrical Shockers. *Transactions of the American Fisheries Society* , pp. 93-96.
38. Reis, L. B. (2003). *Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade* (3ª edição ed.). Barueri, SP: Manole.
39. Roth, B., Imsland, A., & Moeller, D. (2003). Effect of Electric Field Strength and Current Duration on Stunning and Injuries in Market-Sized Atlantic Salmon Held in Seawater. *North American Journal of Aquaculture* , 65:8-13.
40. Santos, E. (1954). *Peixes de água doce*. Rio de Janeiro: Briguit.
41. Santos, H. A., Pompeu, P. S., & Martinez, C. B. (2006, Abril). Determinação de capacidade natatória de peixes visando a otimização dos mecanismos de transposição de peixes em usinas hidrelétricas. *V Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas* .
42. Scheminzky, F. (1924).
43. Shea, C. (2005). *Chicago Sanitary and Ship Canal Aquatic Nuisance Species Dispersal Barriers*. Chicago: U.S. Army Corps of Engineers.
44. Silva, F. N., Lopes, R. E., & Martinez, C. B. (2009). Levantamento de curvas de eletrosensibilidade de peixes brasileiros e concepção de barreira elétrica para repulsão de peixe . *The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission* . Brasil.
45. Snyder, D. E. (2003). *Electrofishing and its harmful effects on fish, Information and Technology Report USGS/BRD/ITR--2003-0002*. Denver: U.S. Government Printing Office.
46. Snyder, D. E. (2003). Invited overview: conclusions from a review of electrofishing and its harmful effects on fish. *Fish Biology and Fisheries* , pp. 445-453.
47. Spencer, S. L. (1967, July). Internal Injuries of Largemouth Bass and Bluegills Caused by Electricity. *The Progressive Fish-Culturist* , pp. 168-169.

48. Taft, E. P., Dixon, D. A., & Sullivan, C. W. (2001). Electric Power Research Institute's (EPRI) Research on Behavioral Technologies. In C. C. Coutant, *Behavioral Technologies for Fish Guidance* (pp. 115-124). Bethesda: American Fisheries Society.
49. Therrien, J., & Bourgeois, G. (2000, March). Fish Passage at Small Hydro Sites. Ottawa, Ontario, Canada.



## 9 ANEXOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
COMITÊ DE ÉTICA EM EXPERIMENTAÇÃO ANIMAL  
- CETEA -

### CERTIFICADO

Certificamos que o **Protocolo nº 188/2008**, relativo ao projeto intitulado "**Estudo de barreiras elétrica para impedimento de entrada de peixes em turbinas hidráulicas**", que tem como responsável(is) **Carlos Barreira Martinez**, está(ão) de acordo com os Princípios Éticos da Experimentação Animal, adotados pelo **Comitê de Ética em Experimentação Animal (CETEA/UFMG)**, tendo sido aprovado na reunião de **12/ 11/2008**.

Este certificado expira-se em **12/ 11/ 2013**.

### CERTIFICATE

We hereby certify that the **Protocol nº 188/2008**, related to the project entitled "**Electrical barriers study to avoid fish estrance in hydraulic turbines**", under the supervisors of **Carlos Barreira Martinez**, is in agreement with the Ethical Principles in Animal Experimentation, adopted by the **Ethics Committee in Animal Experimentation (CETEA/UFMG)**, and was approved in **November 12, 2008**.

This certificate expires in **November 12, 2013**.

Belo Horizonte, 14 de Novembro de 2008.

**Prof. Humberto Pereira Oliveira**  
Coordenador do CETEA/UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais  
Avenida Antônio Carlos, 6627 – Campus Pampulha  
Unidade Administrativa II – 2º Andar, Sala 2005  
31270-901 - Belo Horizonte, MG - Brasil  
Telefone: (31) 3499-4516 – Fax: (31) 3499-4592  
[www.ufmg.br/bioetica/cetea](http://www.ufmg.br/bioetica/cetea) - [cetea@prpq.ufmg.br](mailto:cetea@prpq.ufmg.br)

(Mod Cert. v1.0)