

RELATÓRIO FINAL PROJETO DE P&D ANEEL

Desenvolvimento de Metodologia para Determinação de Potencial de Energia Hidrocinética em Usinas Hidroelétricas

Código ANEEL: PD-06899-2002/2020

SUMÁRIO

1. IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E EQUIPES EXECUTORAS	3
1.1 EQUIPE	4
2. RESUMO EXECUTIVO	5
2.1 OBJETIVOS DO PROJETO	5
2.2 PALAVRAS CHAVE.....	6
2.3 ESTUDO DE ANTERIORIDADE.....	6
2.4 CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO DA ARTE	10
2.5 ORIGINALIDADE DO PRODUTO	11
2.6 APLICABILIDADE	16
2.6.1 ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO	16
2.6.2 TESTES DE FUNCIONALIDADE	17
2.7 RELEVÂNCIA.....	23
2.7.1 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS.....	23
2.7.2 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS.....	26
2.7.3 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS.....	33
2.7.4 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS.....	38
2.8 ETAPAS E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO.....	43
2.9 RECURSOS EMPREGADOS E JUSTIFICATIVAS.....	49
2.10 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	51
2.11 PEDIDOS DE CESSÃO E DOAÇÃO DE BENS.....	55
3. DETALHAMENTO TÉCNICO DO PROJETO.....	56
3.1 CAPÍTULO 1 – “INTRODUÇÃO”	56
3.2 CAPÍTULO 2: “METODOLOGIA”	57
3.3 CAPÍTULO 3: “RESULTADOS E CONCLUSÕES”	57
3.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
4. ANEXOS.....	64

1. IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E EQUIPES EXECUTORAS

Título do Projeto: Desenvolvimento de Metodologia para Determinação de Potencial de Energia Hidrocinética em Usinas Hidrelétricas.

Código do Projeto: PD-06899-2002/2020

Data de Início do Projeto: 03/04/2020

Duração do Projeto: 31 (trinta e um) meses

Segmento: Geração

Fase de Inovação: Pesquisa Aplicada (PA)

Tipo de Produto: Conceito ou Metodologia (CM)

Tema: Fontes Alternativas de Geração de Energia Elétrica (FA)

Subtema: FA03 – Novos materiais e equipamentos para geração de energia elétrica por fontes alternativas.

Entidade Proponente: Serra do Facão Energia S.A.

Entidades Executoras: Universidade de Brasília (UnB), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec).

Coordenador: Antonio César Pinho Brasil Júnior

Gerente: Pablo Henriques Salgado

Descrição do Produto:

Metodologia para determinação de potencial de energia hidrocinética em usinas hidrelétricas, considerando o impacto ambiental somente sobre cardumes de peixes, tendo em vista que são afetados diretamente pelas turbinas instaladas nos rios no caminho dos mesmos. Esta metodologia foi aplicada na Usina Hidrelétrica da Serra do Facão, objetivando o aprimoramento e validação do processo, a partir da apresentação dos seguintes produtos:

- i. Estimativa de potencial hidrocínético em reservatório de jusante de usinas hidrelétricas.
- ii. Mapeamento do potencial hidrocínético da UHE Serra do Facão indicando pontos de instalação de máquinas bem como na estimativa de geração em anos hidrológicos típicos
- iii. Subsídios para elaboração de estudos ambientais em particular para impacto ambiental decorrente da aplicação da tecnologia de turbinas hidrocínéticas em cardumes de peixes.

1.1 EQUIPE

Pablo Henriques Salgado		SEFAC	Gerente	Especialista	http://lattes.cnpq.br/2620495163953348
Luiz Antonio Gouveia Albuquerque		SEFAC	Pesquisador	Superior	http://lattes.cnpq.br/2646903291476250
Odair Batista Carvalho		SEFAC	Pesquisador	Superior	
Rita de Cassia Maia Resende		SEFAC	Aux. Técnico	Superior	http://lattes.cnpq.br/4325176587944229
Patrícia Nogueira de Souza		SEFAC	Aux. Técnico	Superior	
Cátia Cilene Trovo		SEFAC	Aux. Técnico	Superior	
Carla Daniela Ferreira Ribeiro		SEFAC	Aux. Técnico	Superior	
Danilo Alves Ferreira		SEFAC	Aux. Técnico	Superior	
Jorge de Medeiros Pereira		SEFAC	Pesquisador	Superior	
Weder Franco Martins		SEFAC	Pesquisador	Superior	
Bruno Ricardo Ferreira Lopes		SEFAC	Aux. Técnico	Superior	
Antonio C. Pinho Brasil Junior	118.407.142-04	UnB	Coordenador	Doutor	http://lattes.cnpq.br/3642213701314265
Taygoara Felamingo de Oliveira	864.091.581-49	UnB	Pesquisador	Doutor	http://lattes.cnpq.br/6275750472303225
Rudi Henri Van Els	278.568.443-53	UnB	Pesquisador	Doutor	http://lattes.cnpq.br/5225196180314173
Claudio José Cavalcante Blanco	356.209.192-34	UFPA	Pesquisador	Doutor	http://lattes.cnpq.br/8319326553139808
Nélio M. Figueiredo	304.125.872-20	UFPA	Pesquisador	Doutor	http://lattes.cnpq.br/0023753941604707
Sergio de Oliveira Frontin	129.149.247-04	UnB	Pesquisador	Mestre	http://lattes.cnpq.br/9363537328567858
Rafael Castilho Faria Mendes	030.280.861-23	UnB	Pesquisador	Mestre	http://lattes.cnpq.br/7786038324984159
Marianela Macias Machuca	702.540.411-08	UnB	Pesquisador	Mestre	http://lattes.cnpq.br/4504320064207696
Matheus Montenegro Nunes	078.403.054-58	UnB	Pesquisador	Mestre	http://lattes.cnpq.br/7829390445575765

Felipe Ribeiro de Toledo Camargo	041.364.741-21	UnB	Pesquisador	Superior	http://lattes.cnpq.br/3469795170668647
Miguel Angel Garcia	704.148.481-52	UnB	Pesquisador	Superior	http://lattes.cnpq.br/7816794026644226
Kaajal Rohini Gopie	105.607.101-00	UnB	Pesquisadora	Superior	http://lattes.cnpq.br/2100461091496173
Cleudson	010.255.562-16	UFPA	Pesquisador	Superior	http://lattes.cnpq.br/0159379752296227
Adrielle da Silva O. Santos	020.892.442-67	UFPA	Pesquisadora	Estagiária	-
Denise Valadão Santos	944.241.956-00	UnB	Aux. Administrativo	Superior	-
Guilherme Tabatinga Medeiros (1)	047.240.551-97	UnB	Pesquisador	Estagiário	-
Isadora Montenegro Bugarin (1)	043.180.431-18	UnB	Pesquisadora	Estagiária	-
Raysa Gomes dos Santos (2)	051.316.281-05	UnB	Pesquisadora	Estagiária	-
Felipe Carvalho Andrade (2)	041.364.741-21	UnB	Pesquisador	Estagiário	-

(1) – até o mês 24

(2) – a partir do mês 25 inclusive

2. RESUMO EXECUTIVO

2.1 OBJETIVOS DO PROJETO

Como objetivo geral, o presente projeto visa contribuir com conhecimentos nacionais para o desenvolvimento de estimativas realistas e confiáveis de potenciais hidrocínéticos em reservatórios de jusante de usinas hidrelétricas. Os objetivos específicos foram:

- Desenvolvimento de metodologias de simulação numérica de escoamentos em corpos d'água, com particular interesse em refinar um modelo *Quasi-3D*, baseado na simulação das equações de Saint-Venant. Abordagens de simulação 3D também foram utilizadas, através da modelagem completa do escoamento turbulento com condições de superfície livre.
- Refinamento de rotinas de levantamento de campo, com garantia de confiabilidade de resultados, baseado na medição de campos de velocidade com sensores acústicos (ADCP).

- c) Desenvolvimento de uma estrutura de banco de informações, com o mapeamento do potencial hidrocinético para reservatórios de jusante em UHE's;
- d) Desenvolvimento de uma abordagem metodológica que contribua com o levantamento de impactos ambientais em sistemas hidrocinéticos;
- e) Desenvolvimento de um sistema com telemetria, para medições de longo termo de pontos de interesse para instalação de sistemas hidrocinéticos;
- f) Estudos de caso baseados no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão;
- g) Difusão da abordagem e prospecções de aplicabilidade.

2.2 PALAVRAS CHAVE

potencial hidrocinético, fontes renováveis de energia, turbinas hidrocinéticas

2.3 ESTUDO DE ANTERIORIDADE

Banco de Dados de P&D da Aneel.

Foi realizada busca textual no banco de dados de projetos de P&D na página da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). A pesquisa se concentrou no segmento Geração com os temas Fontes Renováveis de Energia e Meio Ambiente. Foram selecionados e analisados os seguintes projetos que comprovam a originalidade do projeto em pauta:

Código do projeto: PD – 06683-0313

Empresa Proponente: Santo Antônio Energia

Título do projeto: Desenvolvimento de técnica de reprodução artificial e alevinagem para fins de repovoamento de peixes migradores no rio Madeira

Código do projeto: PD - 05161-0004

Empresa Proponente: Light Energia

Título do projeto: Dinâmica da ictiofauna e condicionantes ambientais nos reservatórios da LIGHT e em trechos do rio Paraíba do Sul

Código do projeto: PD - 04 951-0549

Empresa Proponente: Cemig GT

Título do projeto: Programa de repovoamento de peixes da estação de piscicultura de Volta Grande: avaliação proteômica e genômica de *Prochilodus Lineatus*.

Código do projeto: PD - 04 951-0483

Empresa Proponente: Cemig GT

Título do projeto: Migração, sítios de desova e desenvolvimento de duas espécies migradoras do rio Jequitinhonha: subsídios para avaliação da necessidade de transposição da UHE Irapé.

Código do projeto: PD - 04 951-0481

Empresa Proponente: Cemig GT

Título do projeto: Desenvolvimento de índices de integridade Biótica: peixes de riachos como indicadores de água em bacias hidrográficas de empreendimento hidroelétricos da Cemig em Minas Gerais.

Código do projeto: PD - 04 951-0345/2011

Empresa Proponente: Cemig GT

Título do projeto: Desenvolvimento de ferramentas moleculares (DNA) para monitoramento de peixes e plantéis de piscicultura.

Código do projeto: PD - 00 402-1411/2011

Empresa Proponente: Eletrosul

Título do projeto: Turbina hidráulica Magnus (Construção de um protótipo de uma turbina hidráulica hidrocínética).

Código do projeto: PD-5785-2102/2012

Empresa Proponente: CEEE-GT

Título do projeto: Gerador hidrocínético

Código do projeto: PD – 0372-0000/2011

Empresa Proponente: Eletronorte

Título do projeto: Turbinas hidrocínéticas para o aproveitamento do potencial remanescente em usinas hidrelétricas.

Conclusão:

A base de dados de projetos de P&D da Aneel, consultada demonstrou a não existência de projeto de P&D equivalente ou mesmo semelhante ao projeto em pauta, tendo em vista que os projetos de hidrocínéticas listados tem foco no desenvolvimento/testes em campo das turbinas, e não de uma metodologia de simulação numérica para definição de potencial hidrocínético de uma região.

Seminário Nacional da Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE

Considerando as palavras chaves: potencial hidrocinético, turbinas hidrocinéticas, ictiofauna, peixes, foram selecionados e analisados os seguintes informes técnicos apresentados nos Grupos de Estudos:

I – Grupo de Estudos de Geração Hidráulica – GGH

XI – Grupo de Estudos de Desempenho Ambiental de Sistemas Elétricos - GMA (Grupo de Estudos de Impactos Ambientais – GIA)

SNPTEE	Local	Empresa	Título
XXVI 2022	Rio de Janeiro (RJ)	Cemig	Sistemas de transposição de peixes deveriam ser implantados em qualquer empreendimento hidroelétrico?
XXVI 2022	Rio de Janeiro (RJ)	Ferreira Rocha	Contribuições para o projeto e monitoramento de sistemas de transposição de peixes.

XXV 2019	Belo Horizonte (MG)	CERPCH	Uso de turbinas de fluxo reversível, do tipo Wells, para conversão de energia maremotriz.
XXV 2019	Belo Horizonte (MG)	Cemig, UFLA	Por que monitorar a ictiofauna em reservatórios? Diagnóstico e diretrizes.

XXIV 2017	Curitiba (PR)	UNILA	Prospecção de parques hidrocinéticos: análise comparativa entre projetos nos rios Iguaçu e Paraná.
XXIV 2017	Curitiba (PR)	UNIFEI Copel	Estudo de aproveitamento de potenciais remanescentes em PCH por meio de utilização de grupos de baixo custo – BFT (Bomba funcionando como turbina).
XXIV 2017	Curitiba (PR)	UFLA Cemig	Monitoramento de peixes nos revelam fatores que estruturam a comunidade em reservatórios?
XXIV 2017	Curitiba (PR)	Neotropical	Passagem de peixes por estruturas de usinas hidrelétricas: precisão e rapidez na identificação dos movimentos através do uso de técnicas de telemetria.

XXIII 2015	Foz do Iguaçu (PR)	UFAC	Gerador hidrocínético para microgeração de energia elétrica em comunidades isoladas.
XXIII 2015	Foz do Iguaçu (PR)	Duke Energy	Reintrodução adequada de peixes em represas.
XXIII 2015	Foz do Iguaçu (PR)	UFLA Cemig	Comportamento de peixes a jusante de hidrelétrica: subsídios para a mitigação da geração.

XXII 2013	Brasília (DF)	Itaipu Cesp	Atuação do setor elétrico brasileiro na evolução do conhecimento científico sobre migração e transposição de peixes bacia do Alto Paraná.
XXII 2013	Brasília (DF)	UFLA Cemig	Potencial de uso de técnica de ecosondagem para estudo de peixes a jusante e montante de usinas hidrelétricas visando mitigação de impacto na geração de energia elétrica.

XXI 2011	Florianópolis (SC)	Itaipu UEM	Monitoramento eletrônico de espécies migradoras no sistema de transposição de peixes da Itaipu Binacional (Canal de Piracema)
XXI 2011	Florianópolis (SC)	Cemig	Desenvolvimento de metodologia para avaliação de riscos de morte de peixes em usinas da Cemig.

XX 2009	Recife (PE)	Eletronorte UnB	Metodologia para a implantação de turbinas hidrocínéticas na Amazônia
XX 2009	Recife (PE)	Unioeste Cesp	Avaliação da eficiência da escada para peixes na UHE Engenheiro Sérgio Motta.
XX 2009	Recife (PE)	Cemig	Metodologia para o planejamento, implantação e monitoramento de sistemas de transposição de peixes da Cemig.

Conclusão

Após a análise destes informes, a conclusão anterior está mantida com relação a não existência de anterioridade com o escopo e objetivos do projeto em pauta.

2.4 CONTRIBUIÇÃO AO ESTADO DA ARTE

A energia hidrocínética é definida como a energia associada ao movimento de água em rios, zonas costeiras e oceanos, cujas fontes primárias tem origem gravitacional e são associadas à drenagem superficial sobre o relevo de uma bacia hidrográfica, aos efeitos de maré ou às correntes oceânicas de escala planetária e regional. Este movimento de massa de água em correntes aquáticas proporciona um potencial energético relevante, que pode ser aproveitado para conversão em eletricidade por meio de dispositivos eletromecânicos. Neste sentido, este viés de aproveitamento energético tem sido objeto de um importante eixo de desenvolvimento de tecnologias ao longo da última década. Isto pode representar em breve uma importante alternativa para produção de energia elétrica renovável, limpa e sustentável.

Um número importante de tecnologias de turbinas hidrocínéticas para aproveitamentos energéticos em ambiente costeiro (correntes de marés) ou para aplicações fluviais vem sendo reportadas na literatura. Tais dispositivos apresentam uma larga diversidade quanto à sua aplicabilidade, com potências típicas de alguns Watts até grandes máquinas da ordem de Megawatts. Muitos dos sistemas apresentam um desenvolvimento tecnológico já em fase de comercialização, com operação de algumas unidades relatadas na literatura, onde disponibiliza-se relatos regulares de seus desempenhos, assim como avaliações dos desafios tecnológicos para o uso deste tipo de máquina (manutenção, questões ambientais, despacho energético, dentre outros).

O Projeto Lambari patrocinado pela empresa Serra do Facão Energia S.A, executado entre 2020 e 2022 em parceria com a Universidade de Brasília e a Universidade Federal do Pará, apresentou como objetivo uma contribuição para conhecimentos nacionais para o desenvolvimento de estimativas realistas e confiáveis de potenciais hidrocínéticos em reservatórios de jusante de usinas hidrelétricas. Como contribuições ao Estado da Arte pode-se citar:

- a) Metodologia de simulação numérica de escoamentos em corpos d'água, com particular interesse em refinar um modelo *Quasi-3D*, baseado na simulação das equações de Saint-Venant e abordagens 3D utilizadas, através da modelagem completa do escoamento turbulento com condições de superfície livre;
- b) Estabelecimento de rotinas para levantamento de campo, baseado na medição de velocidade com sensores acústicos (ADCP);
- c) Formação de estrutura de banco de informações com o mapeamento do potencial hidrocínético para reservatórios de jusante em UHE's;
- d) Abordagem metodológica que contribui com o levantamento de impactos ambientais em sistemas hidrocínéticos;
- e) Sistema com telemetria, para medições de longo termo de pontos de interesse para instalação de sistemas hidrocínéticos.

O projeto empregou uma abordagem integrada que envolveu metodologias de simulação e medições *in situ* através de sensores acústicos (ADCP). Desta maneira, proporcionou uma base robusta para estudos energéticos para instalações hidrocínéticas em reservatórios a jusante de usinas hidrelétricas. Associando-se a isso o desenvolvimento de uma metodologia de estudos ambientais, que fornece subsídios para o licenciamento ambiental de empreendimentos desta natureza.

2.5 ORIGINALIDADE DO PRODUTO

As tecnologias de sistemas hidrocínéticos representam uma opção diferenciada para o aproveitamento sustentável da energia hidráulica com baixo impacto ambiental. Isto estabelece uma valorização natural de potenciais das correntes de rios e oceanos, em particular para o uso no fornecimento de energia para comunidades isoladas ou para o aproveitamento da energia remanescente em usinas hidrelétricas. A implantação deste tipo de sistema, requer o desenvolvimento de estudos preliminares calcados em uma abordagem confiável que garanta valores realísticos para prognósticos energéticos e econômicos do projeto. Desta maneira, o caráter inovador do projeto caracteriza-se pelos seguintes pontos:

- Abordagens de simulação numérica que permitem uma confiabilidade do mapeamento de potencial hidrocínético em todo o ciclo anual de uma UHE, tendo como base as séries temporais de vazão turbinada e vertida;
- Nova metodologia que garante confiabilidade de medição *in situ* de campos de velocidade utilizando ADCP e telemetria de longo termo;
- Determinação de parâmetros específicos sobre o impacto ambiental em sistemas hidrocínéticos em reservatório de jusante de UHE's; e
- Uma nova abordagem para a composição de banco de dados de potencial energético para energia remanescente em UHE's.

O engajamento de recursos de P&D em um sistema robusto de geração de informações de potencial hidrocínético em Usinas Hidrelétricas, contendo uma metodologia precisa de estudo de impactos ambientais, é uma iniciativa inédita no Brasil e no exterior. Neste sentido, os seguintes argumentos corroboram para garantir o caráter inovador do projeto:

Avanço do conhecimento em metodologias de simulação numérica e medidas experimentais do potencial hidrocínético.

Sistemas hidrocínéticos podem ser instalados com pouco impacto sobre o meio ambiente e com compatibilidade com a navegação fluvial. Uma alternativa possível para o uso de tecnologia de turbinas hidrocínéticas é a localização de instalações em reservatórios de jusante de usinas hidrelétricas (Liu & Packey, 2014; Lalander & Lejon, 2011; Silva Holanda et al., 2017).

A energia remanescente de usinas hidrelétricas é disponível no reservatório de jusante em forma de energia hidrocínética, onde a velocidade do escoamento é uma consequência da vazão de água que passa pelas turbinas e pela parcela vertida. Esta energia pode ser convertida por instalações de turbinas hidrocínéticas na região do canal de fuga, compartilhando a mesma infraestrutura de despacho e gestão energética da usina principal.

A utilização de sistemas de turbinas hidrocinéticas para a conversão de energia remanescente de reservatório de jusante de usinas hidrelétricas é um dos pilares do presente projeto. Neste sentido, o levantamento de potencial hidrocinético para os reservatórios de hidrelétricas, avaliando a potencialidade de uso da tecnologia desenvolvida, é um dos importantes componentes da presente pesquisa.

O levantamento de potencial hidrocinético em condições oceânicas ou fluviais é um importante dado para o estudo de viabilidade técnica e econômica para instalação de sistemas hidrocinéticos. Basicamente, o mapeamento de velocidade do escoamento em um determinado corpo d'água assim como um levantamento batimétrico conveniente, determinam a energia cinética das correntes. Para avaliar tais condições (para todo o ciclo hidrológico e operacional que uma usina hidrelétrica é submetida), modelagem e simulação numérica devem ser utilizados (e.g. Work et al., 2013, Bitencourt et al., 2016). Esta abordagem deve ser complementada por levantamento de campo, utilizando medidas adequadas da velocidade de corrente, com uma distribuição estatística que reflita o comportamento da usina (Petrie et al., 2014, Lalander & Lejon, 2013).

A UnB e a UFPA apresentam uma grande experiência na determinação do potencial hidrocinético em reservatórios de jusante de usinas hidrelétricas. Em projeto de P&D com a empresa Eletronorte, uma metodologia numérica e experimental foi desenvolvida para o grande reservatório da UHE Tucuruí (e.g. Holanda et al., 2017). Alguns anos mais tarde, esta metodologia foi aplicada em partes do reservatório de jusante das UHE's Bariri e Ibitinga, junto com a AES-Tietê (Bitencourt et al., 2016).

Os estudos realizados pelo presente projeto permitiram avanço nestas tecnologias, comprovadas por campanhas de campo realizadas ao longo dos meses de execução do projeto. As seguintes lacunas identificadas na época foram analisadas estudadas e superadas no projeto atual:

- Os procedimentos de simulação numérica, utilizando somente modelos bidimensionais, não proporcionavam valores realísticos em muitas situações longe da linha d'água (profundidade onde turbinas são instaladas, entre 3-10 metros);

- Necessidade de uma sistematização de resultados de forma georeferenciada, bem como um refinamento da metodologia de prognósticos, proporcionando elementos mais claros ao planejamento de fazendas de turbinas na área de reservatório de jusante (mapa de potencial hidrocínético);
- Possibilidade de avanços com a utilização de metodologias avançadas de prospecção de potencial, através de sistemas telemétricos e de sobrevoo por drones.

Neste sentido, novos ingredientes metodológicos abordados pela presente pesquisa compõem um importante avanço em relação aos estudos anteriores. Ela proporciona robustez na estimativa de produção energética deste tipo de tecnologia através de uma nova elaboração de protocolos de ensaios de campo envolvendo drones e medidas ADCP, bem como introduz definitivamente a simulação 3D com abordagem de referência complementar. Trata-se de um estudo inédito na literatura internacional, o qual proporciona uma nova abordagem mais confiável para o potencial energético da tecnologia.

Assim, a grande novidade metodológica consiste no protocolo de convergência de levantamentos experimentais em campo, associados a dados de séries temporais da vazão da UHE e simulação numérica 3D e 2D. Enfatizamos, mais uma vez, que estes aspectos caracterizam um estudo inédito no Brasil e no exterior.

Deve-se mencionar que igualmente, o tema ambiental foi objeto de pesquisa teórica e experimental para determinar os impactos vinculados às turbinas. Os mesmos dependem principalmente do tipo e projeto da turbina e das características do ambiente no qual são implantadas (rio, maré ou oceano) (EPRI, 2006).

As turbinas são desenhadas para diversas profundidades e condições, a maioria ocupam profundidades médias das águas afetando espécies da zona pelágica. Pequenas turbinas podem ser instaladas em água contígua à terra podendo também afetar espécies bentônicas (Hammar, 2013).

Em 2012, a Comissão Europeia concluiu que existem poucos estudos de impacto ambiental de turbinas hidrocinéticas no mundo, e essa situação permanece principalmente devido à falta de instalações operando. Na América do Sul não existem pesquisas a esse respeito porque é uma inovação tecnológica recente, sendo que somente o Brasil está na fase de implementação da tecnologia e estudos de caráter ambiental sobre ela. A maioria das considerações sobre os efeitos ambientais têm sido na forma de estudos preditivos e avaliações ambientais teóricas que ainda não foram verificadas.

De forma prática, a busca de respostas precisas sobre o impacto ambiental de turbinas hidrocinéticas é necessária para viabilizar a instalação de unidades, em face à legislação ambiental brasileira, que exige uma identificação sistemática de impactos sobre o meio ambiente, e em particular sobre o risco de impactos sobre cardumes de peixes. Esta é uma questão em aberto na comunidade científica internacional (Hammar, 2015) ao qual o presente projeto contribuiu com respostas precisas quanto ao risco de colisão de espécies de peixes brasileiras, sobre pás de turbinas hidrocinéticas.

Sendo assim, a determinação de impactos ambientais sobre cardumes de peixe é uma inovação importante, com poucos estudos realizados no mundo e com nenhum estudo pragmático elaborado no Brasil.

A originalidade tem sido uma característica fundamental das pesquisas desenvolvidas, já que o estudo de impactos ambientais não tem residido apenas na questão prática de avaliar os efeitos e causas de instalar uma turbina hidrocinética em um local determinado. Os pesquisadores envolvidos nestas atividades direcionaram os esforços, em questões pouco estudadas pela comunidade científica de forma que os resultados obtidos foram inovadores e originais. Desse modo, pode-se apontar os seguintes pontos referente à originalidade do trabalho desenvolvido na área ambiental:

- Elaboração do termo de referência sobre os impactos ambientais da tecnologia hidrocinética sobre a ictiofauna do local de estudo;
- Geração da matriz de impactos ambientais, relacionados as turbinas hidrocinéticas e cardumes de peixes;

- Geração de metodologia inovadora para simulações numéricas envolvendo turbinas hidrocínéticas e peixes, onde este último encontra-se nadando na esteira induzida pela turbina. Não se encontraram trabalhos com simulações similares;
- Caracterização cinemática de um peixe (lambari) mediante ensaios em laboratórios com tanque de água. Não se encontraram trabalhos estudando a biomecânica desse peixe de forma experimental;
- Contribuição para o estado da arte na questão de interação peixe - turbina e de impactos ambientais das tecnologias hidrocínéticas.
- Produção de resultados originais e relevantes para o mercado nacional de geração de energia e a comunidade científica;
- Desenvolvimento de estudos que venham a contribuir em problemas do setor das energias renováveis.

2.6 APLICABILIDADE

2.6.1 ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO

Uma alternativa promissora para instalação de sistemas hidrocínéticos fluviais concerne à localização de unidades à jusante de centrais hidrelétricas. A energia remanescente de uma central hidrelétrica no canal de jusante, contida na velocidade da corrente fluvial, é uma consequência da energia cinética ainda disponível no fluxo de saída d'água das turbinas, ou ainda, na energia contida na água vertida.

Em médias e grandes hidrelétricas, o potencial energético é relevante, tornando possível seu aproveitamento em um contexto técnico e econômico, que pode ser viabilizado com despacho de energia no *grid* ou para uso local complementar (comunidades circunvizinhas, sistemas auxiliares, etc.).

Neste sentido, a aplicabilidade deste modelo é muito ampla, pois pode ser considerado como uma alternativa de complementaridade energética aplicada em rios, oceanos e reservatórios de centrais hidrelétricas de qualquer porte. Através de ensaios de campo, associados à simulação numérica, o mapeamento de potencial hidrocínético em um reservatório de jusante de qualquer UHE, proporcionará elementos técnicos para a tomada de decisão para investimento em parques de turbinas hidrocínéticas para aproveitamento de energia residual. Elementos adicionais como a compatibilidade com a operação no nível de reservatório de jusante, bem como com as características ambientais do reservatório, foram objeto da pesquisa.

Uma visão crítica da tecnologia, considerando o estudo de caso da UHE Serra do Facão, foi elaborada, no sentido de estabelecer limites operacionais para este tipo de tecnologia, em face aos modelos de turbina disponíveis no mercado.

Considera-se que o presente estudo proporciona elementos de referenciais metodológicos, que podem ser aplicados em muitas outras usinas hidrelétricas no país.

Além do mais, a aplicação da metodologia servirá para avaliações de potencial hidrocínético em locais, por exemplo, com demandas de comunidades isoladas e/ou específicas de produção industrial, incluindo o agronegócio. Nesse último caso, o estado de Goiás, onde fica situada a UHE Serra do Facão, e a região Centro-Oeste são centros do Agronegócio no Brasil.

2.6.2 TESTES DE FUNCIONALIDADE

MEDIÇÕES E TESTES NO LABORATÓRIO

Para estudar a aerodinâmica do Lambari, foi executada uma montagem experimental em laboratório baseada no túnel de água disponível no Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília.

Foi considerado para estes experimentos o peixe Lambari, tendo em vista ser este o espécime de peixe mais comum nos rios da região.

Esse túnel de água foi projetado inicialmente para o estudo experimental do estado dinâmico aerofólios e hidrofólios (perfis de seções transversais de pás de turbinas ou bombas) em condições de cavitação. Trata-se de um túnel de água de circuito fechado Armfield modelo HAN 5, com 2750 mm de altura, 4900 mm de comprimento e 1100 mm de largura, alimentado por um conjunto motor/bomba de 5500 W.



Teste no túnel de água

O impacto ambiental dos peixes na presença de turbinas hidrocínéticas em rios é uma preocupação real onde há uma falta de descrições de risco de colisão na literatura. Estudos sobre nado de peixes são em maioria focados na hidrodinâmica e baseados na observação de peixes nadando em fluxo imperturbado.

Desta forma, este trabalho propôs uma metodologia para estudar o nado de peixes nos limites de turbinas hidrocínéticas axiais com base em uma abordagem experimental.

Os testes experimentais foram realizados para determinar a forma do corpo e parâmetros cinemáticos para usar como entrada para as simulações CFD. A forma do peixe foi modelada seguindo a metodologia onde as seções corpo-núcleo são assumidas como elipses com razão de aspecto constante ao longo de todos os peixes. O eixo maior corresponde à altura e é definido pela distância entre as curvas de contorno superior e inferior. Para cauda e barbatanas, a seção foi considerada o perfil NACA0012, onde o bordo de ataque e o bordo de fuga também foram limitados por duas equações, chamadas de curvas de contorno, e tomadas de equações de aproximação da geometria do peixe

Estudos utilizando a técnica PIV (particle image velocimetry) mostram excelentes resultados em termos de cinemática e caracterização de esteira para inúmeros casos de exemplos de mecânica dos fluidos. Desta forma, as variáveis medidas durante os experimentos PIV fornecem informações suficientes para a caracterização dos vórtices induzidos na esteira dos peixes, sendo informações relevantes sobre o regime de natação dos peixes e a força propulsiva que eles experimentam na água.

Entre as principais razões pelas quais a esteira é estudada, aparece a relação entre sua topologia e a capacidade de produzir força propulsora. Outros motivos relevantes relatados na literatura são a importância da esteira na eficiência natatória de cardumes de peixes sob diferentes configurações e as informações que ela pode fornecer aos predadores, no sentido de direção e tempo em que os peixes passam em cada local. Nesse cenário, o objetivo principal deste trabalho foi estudar um Lambari, um peixe comum em águas doces brasileiras mediante a técnica experimental do PIV.

Como já mencionado os experimentos foram realizados em um túnel de água em circuito fechado, a vazão foi controlada pela velocidade da bomba e a vazão foi normalizada por um favo de mel colocado a montante da seção de teste. Para evitar qualquer movimento vertical do peixe, o nível da água era constante e foi ajustado para ficar na mesma altura no topo do peixe. Uma folha de luz horizontal foi colocada para cruzar a seção de peixes do meio. A câmera BFS-U3-32S4C-C FLIR Blackfly foi posicionada para capturar o visualizador de peixes. Tanto a câmera quanto o laser estavam fora do túnel. Para o PIV, foi semeada uma partícula de 0,15 mm com flutuabilidade neutra.

MEDIÇÕES E TESTES NO CAMPO

Medições e testes foram realizados no Rio São Marcos para subsidiar as abordagens experimentais empregadas na caracterização hidrodinâmica e morfológica do reservatório da UHE Serra do Facão. As seguintes atividades foram realizadas na organização do processo de medição e testes no campo:

- Constituição de um banco de dados de operação. Com base na operação da UHE, um banco de dados de informações foi constituído. Desta maneira, uma organização sistemática dos dados medidos em campo foi elaborada para avaliação da densidade energética. O banco de dados foi composto pelas medidas experimentais de batimetria, perfis de velocidades oriundos do ADCP, medidas de velocidade de superfície com a técnica LSPIV e série histórica de vazões medidas pela própria usina.
- Aquisição de equipamentos e desenvolvimento de rotinas. Nesta etapa a plataforma de levantamento de campo foi organizada, através de equipamentos e estabelecimento de rotinas para medições experimentais. O mapeamento de dados georeferenciados compôs o escopo da determinação do potencial de energia hidrocínética do reservatório.
- Desenvolvimento de estrutura da base de informação. A concepção e desenvolvimento do conjunto de informações sobre o potencial hidrocínético foi desenvolvido, com teste conceitual para a usina de estudo.
- Estudo de casos – validações finais da metodologia. O levantamento complementar no campo foi elaborado, objetivando a consolidação da metodologia desenvolvida no primeiro ano de projeto. Uma compilação final de resultados foi elaborada.
- Desenvolvimento do sistema com telemetria. Um sistema de medição da velocidade de corrente, com transmissão de dados, foi desenvolvido. Trata-se de uma boia com medidor de velocidade de corrente, que transmite dados on-line via rádio para uma base de dados. Este sistema, compôs o conjunto de informações necessárias

para a validação metodológica, através da medição de dados em um único ponto, no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

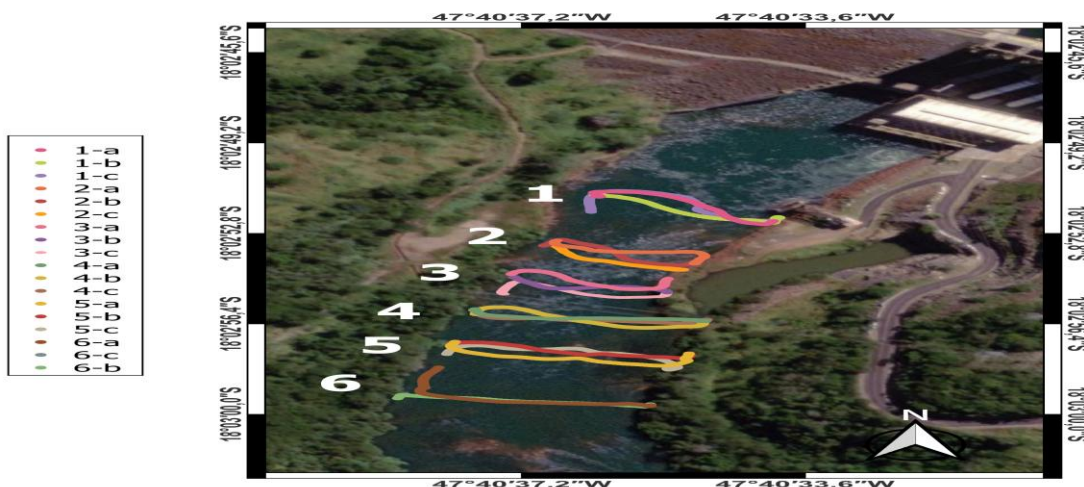
Com a formação desta base de informações, foram realizadas medidas de batimetria e medidas de velocidade.

Os medidores de Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) foram instalados numa embarcação de serviço da SEFAC. A metodologia experimentada baseou-se na translação do barco dentro do reservatório a jusante com a ADCP acionada. Desta forma, a ADCP realiza a medição da profundidade de todo caminho percorrido pelo barco. Partindo dessa metodologia, foi possível medir 14829 pontos de profundidade.



ADCP instalada na embarcação

As medidas de velocidade foram realizadas com o ADCP, para perfis de velocidade distintos, conforme mostrado na figura a seguir, apresentados para diversas condições de operação da usina.



Os testes iniciais do módulo de medição de velocidade da água e o sistema de telemetria no Rio São Marcos, apresentaram algumas dificuldades, uma das grandes dificuldades foi o acesso ao ponto escolhido que só pode ser acessado por meio de barco. Não havia possibilidade de acessar o ponto pela margem do rio. Outra dificuldade foi a ancoragem do módulo no rio. No ponto escolhido existia a presença de boias de sinalização que marcam os limites da área de influência da UHE e a opção de usar essas boias para também ancorar o módulo de sinalização não deu certo.

Uma segunda alternativa foi usar a vegetação da mata ciliar para fixar o módulo de medição, e essa opção permitiu avaliar as condições de flutuação do módulo. O sistema de flutuação não se mostrou muito apropriado em regiões com velocidade maiores, mas mesmo assim, foram feitos diversos testes de ancoramento.

Finalmente, o módulo foi colocado em funcionamento e ficou na água. Entretanto na sua retirada, percebeu-se que o sensor de velocidade tinha perdido uma das pás logo depois da sua inserção no rio. Dessa forma não se obteve dados confiáveis dessas medições.

Com a experiência obtida, o sensor de velocidade do módulo de medição foi construído no formato de uma turbina Savonius com três pás e foi calibrado no túnel de água do LEA. Os testes de campo mostraram a necessidade de adequar o projeto do módulo às condições do rio.



Módulo remoto de medição de velocidade

2.7 RELEVÂNCIA

2.7.1 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS

O impacto econômico do projeto, está direcionado ao mercado de geração de energia, de importância tanto para a empresa proponente como para as demais empresas de geração de energia elétrica do setor; tendo em vista os fatos apresentados a seguir.

A importância da geração hidrelétrica para a matriz energética brasileira baseia-se no fato de que ela representa uma parte relevante do suprimento dos recursos energéticos nacionais e apresenta uma relevante característica estratégica para o desenvolvimento do país. Ao longo de pouco mais de um século, a geração hidráulica e seu vasto parque de geração caracteriza-se como uma referência mundial no aproveitamento energético de recursos hídricos, respondendo ao longo de sua história à grande parte da demanda de eletricidade para o país e se adequando continuamente às restrições socioambientais formuladas pela sociedade brasileira.

O planejamento brasileiro para sua matriz elétrica prevê uma manutenção da hegemonia da geração hidrelétrica, com 106 GW instalados previstos no plano decenal para 2030 (EPE, 2021). Esta expansão terá como base usinas pequenas e médias, nas bacias hidrográficas do Sudoeste e Centro-Oeste, que em conjunto com as grandes usinas brasileiras comporão um sistema nacional que depende, sobretudo, do clima e do balanço hidrológico em uma escala continental.

As diferentes crises energéticas brasileiras, associadas às tendências previstas de mudança dos regimes hidrológicos das bacias brasileiras em face das mudanças climáticas, vêm colocando o sistema brasileiro de geração hidroenergético em uma condição de risco em determinadas épocas do ano, em condições limites da operação segura e confiável das usinas. Neste sentido, ações que proporcionem alternativas confiáveis para o fortalecimento da matriz brasileira, fortemente dependente da hidroeletricidade, são uma necessidade estratégica para a estruturação futura do setor.

Diversos trabalhos recentes induzem a uma tendência para a aceleração da implantação de empreendimentos de energias renováveis (solar, eólica e biomassa) como uma das soluções viáveis e eco-compatível para a matriz brasileira. Fato este já previsto no planejamento energético nacional, o que reflete uma boa estratégia para com o compromisso com soluções sustentáveis.

As condições desfavoráveis de mercado e dos cenários climáticos, bem como todo o arcabouço de restrições ambientais, colocam um componente restritivo à viabilidade de expansão do setor hidroenergético. No entanto, soluções complementares às usinas já existentes podem representar um ganho marginal relevante à geração hidrelétrica nacional. A melhoria de eficiência de usinas, seja ela de origem em implementações tecnológicas ou pela gestão de despacho e produção de eletricidade, podem significar um complemento de geração no parque já existente. Neste sentido, a busca de soluções inovadoras por projetos de pesquisa e desenvolvimento para o setor hidroenergético pode direcionar esforços em temas relevantes tais como:

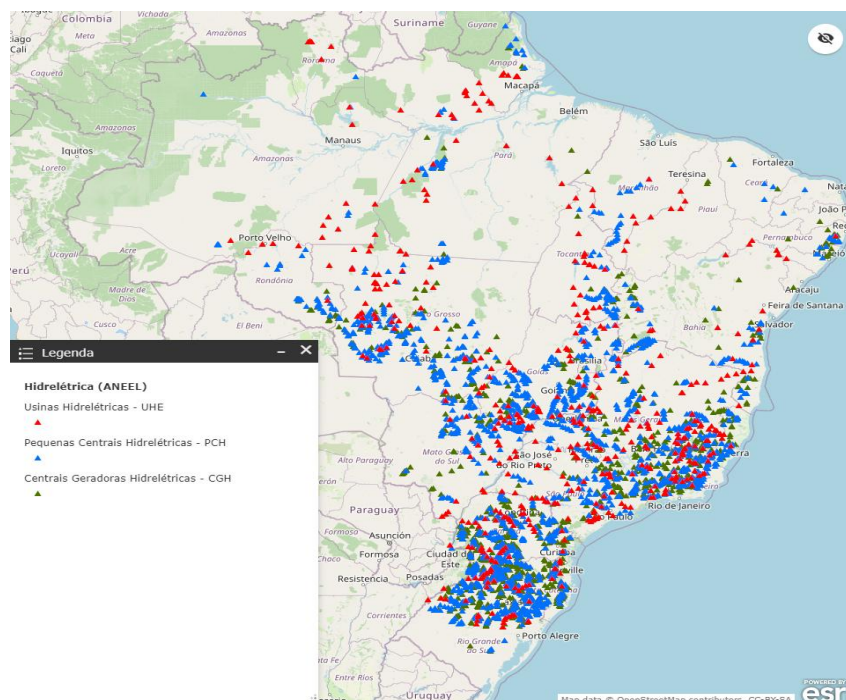
- i. Aumento da geração através de processos de modernização tecnológica de usinas (*uprating ou upgrading*), proporcionando uma confiabilidade operativa e de redução de custos;
- ii. Melhoria da gestão da geração, com uma abordagem de otimização de despacho considerando a sazonalidade de comportamento do reservatório e integração regional entre usinas;
- iii. Utilização de estratégias de armazenamento de energia em usinas para prover eficácia na temporalidade de produção e despacho de energia;

- iv. Aproveitamento de potenciais energéticos complementares, envolvendo a hibridização com fontes renováveis (solar, eólica, hidrocinética, etc.)

Este projeto atuou na procura por uma melhor eficácia de uma usina hidrelétrica (ou de um conjunto de unidades) através de soluções integradas que visem uma reestruturação de procedimentos e de aportes tecnológicos diferenciados, que compensem perdas pela depleção de recursos hídricos devido à mudança climática.

Foram avaliadas soluções tecnológicas complementares que aproveitem potenciais hidroenergético marginais em usinas hidrelétricas (potencial hidrocinético).

Logo, o impacto econômico está baseado na possibilidade de aumento incremental de geração de energia elétrica decorrente do aproveitamento hidrocinético dos rios localizados junto as usinas hidrelétricas (UHE), as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e centrais elétricas geradoras (CGH), que apresenta um vasto território a ser explorado, conforme apresentado na figura a seguir.



Mapa de localização de UHEs, PCHs, CGHs instaladas no Brasil.
Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SINRH)

Em outubro de 2021, o Brasil tinha em operação 1.373 empreendimentos de geração de energia hídrica, sendo 219 UHE, 424 PCH, 730 CGH.

2.7.2 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS

Infraestrutura laboratorial

As pesquisas foram realizadas no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Universidade de Brasília. O LEA compreende um conjunto de laboratórios físicos e computacionais que possibilitam o estabelecimento de pontes entre as tecnologias de conversão de recursos energéticos com as pessoas e a natureza. Sua infraestrutura possibilita o desenvolvimento de projetos de PD&I que promovam uma melhor utilização de recursos energéticos - renováveis e fósseis - para o bem-estar social e serviços ecossistêmicos. As principais infraestruturas que compõem o LEA são:

Plataforma de Ensaio de Modelos de Dispositivos Hidrocinéticos (Túnel de Vento): ensaios de modelos de turbinas; experimentos de convecção mista e forçada. O Túnel de Vento do LEA é o maior em uma universidade pública no Brasil.

Plataforma de Medição de Fluxos Biosfera: está instalada na Fazenda Água Limpa (FAL) da UnB, localizada Núcleo Rural Vargem Bonita no Distrito Federal; A plataforma é constituída por duas torres de fluxo, uma em Cerrado nativo e outra em uma plantação de Eucalipto cultivada especificamente para o propósito. Principais Equipamentos: Dinamômetro (duas unidades); Bancada de Micro Turbina a Gás 1: turbo-compressor, com câmara de combustão equipada com sistema de geração de vortividade de geometria fixa (*swiller*); Bancada de Micro Turbina a Gás 2: câmara de combustão transparente do tipo Lean Premixed and Pressurized Combustor e *swiller* de pás móveis para ensaios com controle de intensidade de vortividade na câmara de combustão.

Laboratório de Energia Solar: visa estabelecer relações entre o recurso solar e as tecnologias de conversão disponíveis, através de medições do recurso solar, protótipos experimentais e modelagem de sistema de conversão. Principais equipamentos: Estação solarimétrica: completa com medição independente de três componentes da irradiância solar (global horizontal; direta normal; difusa); rastreador solar SOLYS 2; dois piranômetros; coletor de dados através de um datalogger Campbell Scientific CR1000 conectado diretamente a um computador; Estação meteorológica: completa para aquisição de dados ambientais auxiliares; câmera de imagens do céu para capturar a presença de nuvens, a sua formação e movimentação para estudos de previsão solar de curta duração.

A esta infraestrutura foi instalado um túnel de água para pesquisa do impacto das turbinas hidrocinéticas sobre o cardume de peixes, realizando assim, experimentos do estudo mecânico do nado de peixes.



Para a implantação deste túnel de água, foram necessários os seguintes serviços para adequação do espaço físico existente: reparos dos furos nas paredes; instalação de novos pontos de tomadas e adequação das antigas para padrões novos; instalação de uma tubulação de água partindo de uma torneira já instalada, remoção das divisórias; Instalação do forro de PVC; armários embaixo das bancadas de concreto; restauração da bancada de madeira, substituição das fórmicas e pintura com verniz na madeira; pintura das paredes e pintura do chão com tinta do tipo epóxi.

Estas alterações permitiram ainda que o espaço físico ficasse apto a realização dos experimentos com os peixes reais. O aquário, apresentado abaixo, para criação da espécie de peixe Lambari foi montado dentro do laboratório para estudo da cinemática do seu movimento. Este aquário serviu como ambiente principal de criação dos peixes, possuindo, também, um sistema de alimentação e filtragem automática.

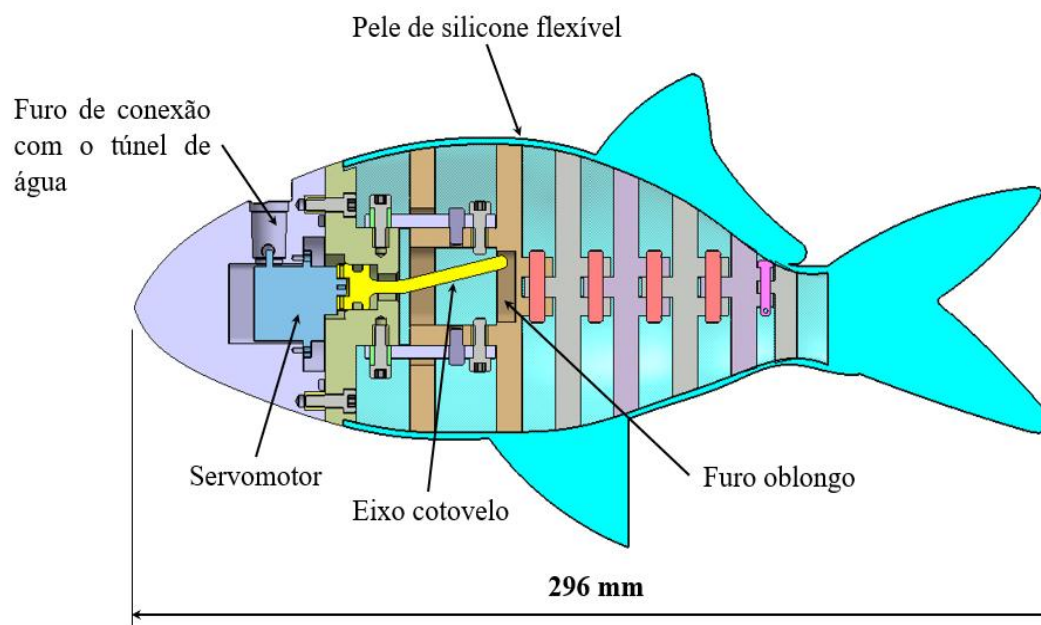


Lambari mecatrônico:

Um peixe robô autônomo foi desenvolvido para replicar o peixe *Astyanax bimaculatus*, também conhecido como Lambari, uma espécie comum encontrada no Brasil. Tal espécie foi considerada por sua cinemática carangiforme e pelo fato que o modelo geométrico já foi construído em um trabalho anterior.

O peixe foi fabricado empregando impressão 3D. O movimento oscilante foi produzido por meio de um servomotor, inserido dentro do modelo, onde foi controlado por um sinal senoidal obtido a partir de um modelo matemático estabelecido em experimentos reais de nado. O objetivo principal foi validar os parâmetros hidrodinâmicos, arrasto e coeficiente de pressão, do nado dentro do túnel de água e compará-los com dados numéricos.

Ver as figuras a seguir:



Corte longitudinal do robô lambari.

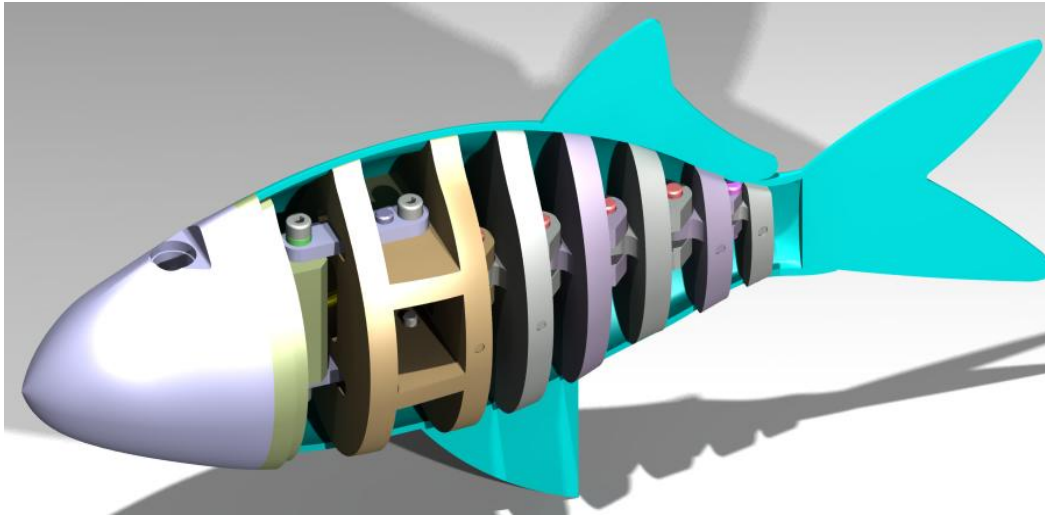


Imagem do robô lambari movido por servomotor.

Workshop

O Workshop sobre Intercomparação de Simulação de Potencial Hidrocinético, foi realizado no dia 03/03/2022, com a participação de membros da equipe de pesquisadores, colaboradores da SEFAC e convidados externos. Foram apresentados resultados das investigações numéricas (2D e 3D) realizadas, com enfoque nos aspectos metodológicos desenvolvidos e estudos de campo (batimetria, ADP) que permitem a caracterização do canal de jusante da UHE SEFAC quanto ao seu potencial para conversão hidrocinética.

Foram apresentadas as pesquisas realizadas pelas equipes dos seguintes Workpackages:

- WP 1 - Simulação numérica de potencial hidrocinético
- WP 2 - Levantamento de campo – Abordagens experimentais
- WP 3 - Estudo de impactos ambientais da tecnologia
- WP 4 - Prospeção tecnológica para aplicabilidade da tecnologia
- WP 5 - Difusão e gestão de tecnologia

Seminário Final do Projeto

O Seminário final do projeto, foi realizado no dia 01.09.2022 na Usina Serra do Facão em Catalão com a seguinte programação:

- Visão Geral do Projeto- Prof. Antonio C.P. Brasil Junior
- Metodologia Experimentais – Prof. Rafael Castilho Faria Mendes
- Potencial de Energia Hidrocinética – Prof. Nélcio Moura de Figueiredo
- Metodologias de Simulação de Escoamento - Prof. Claudio José Cavalcante Blanco
- Formulação Tridimensional de Escoamentos Ambientais – Prof. Taygoara F. Oliveira
- Impactos Ambientais de Turbinas Hidrocinéticas sobre a Ictiofauna - Prof. Antonio C.P. Brasil Junior

Cursos

A equipe do projeto, formatou o curso de especialização a seguir detalhado. Este curso foi programado para ser realizado durante a realização do projeto, entretanto devido a pandemia do Covid-19, o seu início foi postergado para novembro de 2022, quando vagas serão ofertadas para os técnicos da SEFAC e especialistas do setor de energia interessados no tema.

Curso de Especialização - Sistemas de Energia Renovável: Gestão e Tecnologias,

Objetivos

Complementar a formação de profissionais em nível de pós-graduação com competências em sistemas tecnológicos de energia renovável, fornecendo amplo conhecimento em temas associados a suas fontes e possibilitando sua atuação como integradores de sistemas de transformação de energias renováveis. Para isso, as competências desenvolvidas ao longo do curso incluem conhecer os sistemas de conversão e distribuição de energia das diferentes fontes renováveis, conhecer e aplicar métodos de integração entre esses sistemas, analisar seu desempenho, formular soluções de aproveitamento energético que combinem diferentes fontes, articulando aspectos tecnológicos e ambientais.

Os objetivos específicos do curso são capacitar os participantes para atuarem no mercado profissional de energia renovável com as seguintes habilidades:

- Compreender a relação entre os aspectos técnicos, econômicos e ambientais das diversas tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis;
- Coordenar projetos de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis;
- Avaliar projetos de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis;
- Gerenciar sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis;
- Realizar análises de viabilidade econômica de empreendimentos de geração de energia a partir de fontes renováveis;
- Analisar impactos ambientais de sistemas de geração a partir de fontes renováveis;
- Elaborar políticas públicas que sejam efetivas para cumprimento de metas de redução de emissões.

Programa do Curso

O programa completo do curso, com carga horária total de 360 horas, aborda três grandes pilares no campo da energia sustentável: tecnologia, economia e sociedade constituídas assim por três grupos num total de 16 disciplinas.

O primeiro grupo, Grupo I (disciplinas de Gestão), versa sobre conceitos fundamentais de sistema energético renovável com foco na estratégia energética empresarial, visando apresentar aos participantes concepções e discussões atuais sobre a utilização de fontes de energia renovável. Neste grupo, será apresentada uma visão sistêmica sobre o ciclo de vida dos processos produtivos e da relevância dos sistemas de energias renováveis para a construção de uma sociedade sustentável, baseada em uma economia circular, com elevada eficiência no uso de recursos materiais e energéticos.

O segundo grupo, Grupo II (disciplinas de Economia e Regulação), trata de aspectos regulatórios da legislação brasileira e instrumentos de análise econômica e de empreendimentos de energia renovável, considerando o arcabouço regulatório pertinente.

Já o terceiro grupo, Grupo III (disciplinas de Tecnologia), aborda os aspectos tecnológicos de cada fonte renovável. As fontes renováveis consideradas no curso são àquelas mais relevantes no cenário nacional, a saber, Eólica, Solar, Biomassa e Biocombustíveis e Hídrica. Neste contexto serão discutidos aspectos técnicos, econômicos e regulatórios de hibridização de fontes de energia, como por exemplo, UHE's com complementariedade de energia proveniente de turbinas hidrocinéticas.

Adicionalmente, a Recuperação Energética de Resíduos Sólidos, apesar de não ser propriamente renovável, será abordada, pois pode contribuir para mitigação de emissões de gases de efeito estufa, além de fazer parte da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Inovações tecnológicas e outras tecnologias menos relevantes para a realidade brasileira serão apresentadas em uma disciplina concebida especialmente para o propósito. Por fim, uma disciplina específica em Hidrogênio Verde foi incluída devido ao papel relevante que se espera do hidrogênio no futuro próximo como sistema de armazenamento de energia em um contexto de alta inserção de renováveis na matriz energética.

As disciplinas do Grupo I e II têm um caráter transversal em relação as tecnologias de conversão, ou seja, seus conteúdos são pertinentes à todas as tecnologias. Já as disciplinas do Grupo III são verticalizadas, com conteúdos específicos para cada fonte renovável. A exceção é a disciplina Hidrogênio Verde por ser inerente a todas as tecnologias.

2.7.3 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

As teses, artigos em conferência, artigos em periódicos e informes técnicos listados a seguir estão incluídos em anexo.

Teses

MACIAS M.M., **Interação Hidrodinâmica de Turbinas Hidrocinéticas e Peixes**. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília. Defesa realizada em outubro 2021 pela banca Professor Antonio Cesar Pinho Brasil Junior (orientador), Professor Taygoara Felamingo de Oliveira, Juliana Braga Rodrigues Loureiro e Marcelo Hissakiti Kobayashi.

Resumo

O objetivo principal da tese é analisar a interação hidrodinâmica entre uma turbina hidrocínética e um peixe, no contexto dos impactos ambientais da tecnologia sobre a ictiofauna. Em primeiro lugar, foram estudados de forma independente o nado de peixes sob a cinemática carangiforme e a esteira de uma turbina hidrocínética, visando a criação de duas metodologias validadas e robustas para posteriormente realizar o acoplamento entre ambas e estudar o problema completo. Foram realizadas simulações numéricas empregando a abordagem URANS com modelo de fechamento para turbulência $k - \omega$ - SST . As simulações do peixe foram desenvolvidas empregando algoritmos de malha deformável de acordo à cinemática real dos peixes. O estudo da turbina foi abordado de forma simplificada mediante o método da linha atuadora. Na resolução do problema acoplado, diferentes configurações foram analisadas variando parâmetros como: frequência de natação do peixe, posição do mesmo na esteira e condições de operação do rotor. A partir dos resultados extraídos foi observada a dependência da produção de esforços do peixe com a sua localização na esteira, o que foi atribuído à mudança das variáveis turbulentas na esteira e as estruturas de vórtices coerentes, cambiantes para as diferentes localizações. Finalmente, o novo parâmetro proposto, o número de Strouhal local St_l , estabelece uma relação de dependência direta entre a cinemática do peixe, a vorticidade do escoamento e o coeficiente de esforços médio na direção do escoamento. Permitindo qualificar a admissibilidade do peixe nadar na esteira sob diferentes configurações e concluindo que sob as mesmas condições cinemática um peixe é capaz de produzir forças propulsivas maiores quando posicionado próximo ao rotor e alinhado com a ponta da pá.

MENDES R.C.F., **Interação entre Esteiras Aerodinâmicas de Turbinas de Eixo Horizontal em Arranjos**. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília. Defesa realizada em setembro de 2020 pela banca Professor Taygoara Felamingo de Oliveira (Orientador), Professor Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, Professor Luciano Gonçalves Noletto e Professor Luís Fernando A. Azevedo.

Resumo

O principal objetivo desta tese é investigar o comportamento do escoamento de turbinas de eixo horizontal operando dentro de arranjos. Partindo de metodologias experimentais e numéricas pretende-se observar as interações entre esteiras devido a proximidade de outro rotor. Os testes foram executados em túnel de vento, utilizando um modelo reduzido de escala 1:10 de uma turbina hidrocínética, aplicando de técnicas de anemometria de fio quente e velocimetria por imagem de partículas (PIV). Já os métodos numéricos foram baseados em simulações CFD, empregando uma modelagem da turbulência baseada em médias de Reynolds (RANS) e simulações de grandes escalas (LES). Validações entre os resultados numéricos e experimentais foram executadas a partir da comparação do coeficiente de potência e de algumas medições de campos de velocidade. A esteira aerodinâmica foi analisada em três etapas distintas, sendo elas: a operação isolada, o par de turbinas laterais e o arranjo triangular, variando em 10 configurações distintas. A partir dos contrastes observados durante os testes, notou-se a correlação entre a eficiência com sua posição relativa à outras turbinas, podendo em alguns casos ultrapassar o coeficiente de potência da operação isolada. Durante o estudo da esteira, foram considerados aspectos das propriedades médias juntamente com séries temporais medidas com anemometria de fio quente. Deste modo, utilizou-se de técnicas de análise estatísticas para determinação do comprimento característico das estruturas típicas do escoamento de um rotor de eixo horizontal, juntamente com toda morfologia do comportamento de esteiras aerodinâmicas em operação na proximidade de um ou mais rotor.

Artigos em Conferências

FIGUEIREDO N.M., BLANCO C.J.C., BRASIL A.C.P. MESQUITA A.L.A., SECRETAN Y., CAMPOS L.C. P. **Remaining Energy and Defluent Flow Forecasting Model Coupled with Reservoir Operation Systems Used in Estimating Hydrokinetic Potential Downstream of Hydropower Plants.** 3th LA Sdewes Conferences. São Paulo, Brasil. 2022.

SILVA C.A., BLANCO C.J.C., BRASIL A.C.P. MESQUITA A.L.A., SECRETAN Y., HOLANDA P. S., FIGUEIREDO N.M., **Quasi 3D Modeling of Streamflow in Hydropower Plants Downstream Reservoirs to Use the Remaining Energy Through Hydrokinetic Turbines.** COBEM. 26th International Congress of Mechanical Engineering. Virtual Congress. 2021.

CAMARGO F.R.T., BRASIL A.C.P, MENDES R.C.F. **LSPIV from the Rodeador Channel, using an UAV and a Fixed Camera to Compare with an ACDP Instrument of Measure.** ENCIT. 18th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering. Online. 2020.

MACIAS M.M., MENDES R.C.F., GARCIA M. A., BRASIL A.C.P., OLIVEIRA T. F. **Fish Swimming Admissibility in the Hydrokinetic Turbine Wake.** (COBEM-2021-2251) COBEM. 26th International Congress of Mechanical Engineering. Virtual Congress. 2021.

MACIAS M.M., MENDES R.C.F., GARCIA M. A., BRASIL A.C.P. **Experimental Fish Swimming Investigation over Astyanax Species.** 1st Spanish Fluid Mechanics Conference. Cádiz, Espanha. 2022.

CAMARGO F.R.T., SILVA R. N., BRASIL A.C.P. **Estimativa de Velocidade Transversal em canais para fins de Aproveitamento Hidrocinético – Modelagem e Experimentos.** XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.

GARCIA M. A., MACIAS M.M., MENDES R.C.F., BRASIL A.C.P., OLIVEIRA T. F. **Development of an Autonomous Robot Fish to Study Swim Pattern Hydrodynamics.** (COBEM-2021-2225) COBEM. 26th International Congress of Mechanical Engineering. Virtual Congress. 2021.

GOPIE K., BUGARIN I.M., MENDES R.C.F., OLIVEIRA T. F. **Determination of Installation Sites of Hydrokinetic Turbines Downstream of the SEFAC Hydroelectric Facility.** (COBEM-2021-1953) COBEM. 26th International Congress of Mechanical Engineering. Virtual Congress. 2021.

MACIAS M.M., LAFUENTE L., BRASIL A.C.P. **Biomechanics of Fish Swimming in a Hydrokinetic Turbine Wake.**

CAMARGO F.R.T, NUNES R., MENDES R.C.F., OLIVEIRA T. F., BRASIL A.C.P. **Applying the Large-Scale Particle Image Velocimetry with Drone Images for Determining the Hydrokinetic Potential in Rivers.** (COBEM-2021-2278) COBEM. 26th International Congress of Mechanical Engineering. Virtual Congress. 2021.

MEDEIROS G.T., NUNES R., MENDES R.C.F., OLIVEIRA T. F., BRASIL A.C.P. **An Experimental Study on Ground Influence at Horizontal Axis Turbines.** (COBEM-2021-2246) COBEM. 26th International Congress of Mechanical Engineering. Virtual Congress. 2021.

Artigos em Periódicos

NUNES R., CAMARGO F., GOPIE K., SOUZA T.V., BRASIL A.C.P. **On an Anisotropic-mixing Length Turbulent Flow Model for Open-channel Flows.** Elsevier. 2020. Submetido ao Journal of Energy Resources Technology (ASME). Categoria Qualis A2.

MACIAS M.M., SOUZA I.F., BRASIL A.C.P, OLIVEIRA T.F. **Three- dimensional Viscous Wake Flow in Fish Swimming – ACFG Study.** Elsevier 2020. Submetido ao Mechanics Research Communications. Categoria Qualis A2.

MENDES R.C.F, CAPUI B., OLIVEIRA T.F., NOGARA R., BRASIL A.C.P. On the power output and flow characteristics of a triangular array of horizontal axis propeller turbines. Elsevier 2022. Submetido ao Renewable Energy. Categoria A1.

Informes Técnicos

ESPENCHITT A.A.N., MACIAS M.M., SOUZA I.F., BRASIL A.C.P, OLIVEIRA T.F. **Hydrodynamics of Fisch Swimming in Quasi-steady Flow Regime.**

2.7.4 CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

O projeto, como já mencionado, teve como objetivo primordial propor uma abordagem metodológica para o levantamento do potencial hidrocínético de usinas hidrelétricas, visando a instalação de turbinas hidrocínéticas a jusante destas centrais hidrelétricas convencionais. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de impactos ambientais associados à instalação e operação desta incipiente tecnologia resulta fundamental para tornar futuros empreendimentos desta natureza possíveis e respeitosos com o entorno.

Os impactos ambientais associados à instalação e operação de turbinas hidrocínéticas são ainda um tema em aberto na literatura devido à incipiência da tecnologia, por encontrar-se ainda em fase de maturação, pois ainda são poucas as unidades operando comercialmente.

Na literatura são descritas as principais causas que podem afetar na vida aquática após a instalação de dispositivos hidrocínéticos tais como suspensão de sedimentos, alteração dos regimes hidráulicos do rio, ruídos, campos eletromagnéticos, colisões dos peixes com as pás da turbina, toxicidade por pinturas e outros químicos, e a instalação de várias unidades hidrocínéticas formando um arranjo.

Algumas dessas questões vêm sendo estudadas há quase duas décadas, como é o caso das colisões entre peixe e rotor. Sem embargo, existem outros problemas importantes que ainda não tem sido abordado, como por exemplo, o efeito da esteira na biomecânica do nado de peixes ou o risco de colisão de cardumes de peixes com parques hidrocínéticos. Este tipo de situação coloca um problema hidrodinâmico de trajetórias admissíveis de peixes, em sua situação de nado, na região de esteira de turbinas hidrocínéticas. Sendo que, esse tipo de estudo e de descrição hidrodinâmica adequada é inédito na literatura internacional.

Este projeto, portanto, direcionou esforços de pesquisa na hidrodinâmica de turbinas e peixes no sentido de investigar o comportamento do nado de peixes na região de esteiras de turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal.

No Brasil, com um importante potencial hídrico, aproximadamente 70% da energia elétrica produzida vem de usinas hidrelétricas convencionais, nos últimos anos, tem aumentado o interesse pela energia hidrocínética, alternativa hídrica para produção de eletricidade onde se aproveita a velocidade de corrente ou energia cinética de um escoamento.

Devido a este elevado potencial energético, o estudo dos sistemas hidrocínicos em todos seus conjuntos vem sendo objeto de interesse por uma grande parte da comunidade científica e conseqüentemente, esforços em pesquisa estão sendo realizados para conseguir a implantação de unidades hidrocínicas. Neste sentido, o estudo dos impactos ambientais torna-se um assunto de elevado interesse no que concerne a aplicação desta fonte renovável de energia já que, de forma prática, nunca será possível a implantação comercial de sistemas deste tipo sem um licenciamento ambiental que ratifique o impacto causado pela tecnologia.

Todos os resultados obtidos como consequência da realização das mencionadas atividades terão impactos positivos na implantação e operação da tecnologia hidrocínética, necessária para a geração de energia hidrocínética. Ademais de gerar conhecimento científico sobre a questão dos impactos ambientais sobre a ictiofauna e contribuir ao estado da arte neste assunto, que apresenta lacunas importantes sobre o estudo de cardumes circundantes às turbinas e sobre a interação hidrodinâmica dos peixes nadando em escoamentos tridimensionais turbulentos tais como a esteira induzida por máquinas hidrocínicas.

A aplicabilidade das pesquisas desenvolvidas vem baseadas no desenvolvimento e utilização das metodologias geradas para o estudo dos impactos ambientais, junto ao termo de referência e matriz de impactos ambientais. Neste sentido, se contribui na aplicabilidade dos sistemas hidrocínicos como uma alternativa de complementaridade energética em reservatórios de centrais hidrelétricas de qualquer porte mediante a avaliação dos impactos ambientais da tecnologia.

Mediante a revisão bibliográfica, os estudos experimentais e as simulações numéricas tem se obtido elementos chaves para criar uma base de conhecimento que pode ser empregada nos estudos dos impactos ambientais. Ademais, o desenvolvimento metodológico realizado e os resultados obtidos durante o período de pesquisa poderão ser aplicados em outras instalações hidrocínicas.

Na atividade *“Desenvolvimento conceitual do impacto sobre cardume de peixes”* foi coletado uma grande quantidade de informações sobre outros estudos de impacto ambiental. Em uma primeira abordagem, foram analisados os impactos de forma geral, para depois centrar o foco da pesquisa na problemática dos peixes. O conjunto da análise tem sido realizada para um caso geral, onde o cenário contemplado fica na interação de peixes e turbinas hidrocínética de forma genérica, sem fazer escolhas específicas de espécies de peixes, geometrias de turbinas ou locais de implantação.

Nas atividades *“Impacto sobre peixes - Estudo de campo”* e *“Impacto sobre peixes - Estudo de laboratório”*, os estudos foram mais específicos.

Nas atividades referentes a ensaios no laboratório encontra-se uma aplicabilidade mais abrangente já que a metodologia construída nos ensaios em túnel de água se poderá aplicar a qualquer experiência similar. Por último, os experimentos em tanque de água com peixes do tipo lambari poderão ser utilizados para qualquer ensaio onde a cinemática de peixes carangiformes seja avaliada.

Como resultados obtidos, pode-se citar:

Elaboração de termo de referência sobre os impactos ambientais de turbinas hidrocínéticas em peixes. O termo de referência contém informações relevantes sobre o assunto permitindo mediante o mesmo extrair pautas para elaborar um estudo de impactos ambientais no referente a sistemas hidrocínéticos interagindo com peixes.

Elaboração de matriz dos impactos ambientais onde se recolhem as causas e efeitos da instalação e operação de máquinas hidrocínéticas sobre a ictiofauna de um local genérico. Esta matriz contém também uma serie de critérios biológicos informando sobre valores limites de algumas variáveis de interesse do problema turbina-peixe que permitirão estabelecer viabilidade da instalação.

Ademais dos produtos acima mencionados existe um volume de resultados importante no referente a estudos de peixes e a interação dos mesmos com turbinas hidrocínéticas. Nessa linha, são apresentados os resultados obtidos a partir de simulações numéricas computacionais onde se avalia a biomecânica de dois tipos de peixes (atum e lambari).

Investigando-se a cinemática dos peixes, forças de propulsão dos mesmos, eficiência de nado e esteira de vórtice induzida durante o nado.

Simulações numéricas realizadas para uma turbina hidrocínética de eixo horizontal e 4 pás. Foi necessária a realização deste estudo prévio, para poder realizar o estudo acoplado de turbina-peixe mediante simulações computacionais. Sem a criação de metodologias próprias para o estudo numérico do nado de um peixe e de uma turbina hidrocínética, respectivamente, não seria possível realizar a simulações conjuntas. Destacar ademais que o estudo da turbina foi realizado empregando um método simplificado e inovador conhecido como Método da Linha Atuadora, o que também aporta originalidade e relevância para o estudo numérico.

Resultados do conjunto turbina-peixe assim como a discussão sobre a admissibilidade de nado dos peixes na esteira da turbina hidrocínética. Neste sentido são avaliados parâmetros turbulentos do escoamento, tanto de forma quantitativa como qualitativa, extraindo algumas conclusões sobre os impactos que essa tecnologia poderia causar sobre os peixes que nadam no seu entorno. As simulações aqui realizadas serão empregadas para examinar a matriz de bio-critérios sob as condições impostas no problema. O estudo conceitual de peixes nadando nas vizinhanças de turbinas hidrocínéticas é um estudo inédito tal e como tem sido realizado neste projeto já que abrange simulações numéricas computacionais onde o escoamento turbulento é modelado e apresenta estruturas tridimensionais. Deste estudo tem-se extraído as principais conclusões sobre a admissibilidade dos peixes nadarem na esteira de turbinas hidrocínéticas.

Por um lado, foi investigada a cinemática de um peixe nadando em um tanque de água mediante técnicas experimentais de velocimetria. Ademais, foi concebido e construído pela equipe de experimentalistas um robô-peixe mecatrónico para a realização de ensaios em um túnel de água.

Com base nas discussões e nos resultados alcançados foi realizado um estudo dos impactos ambientais da tecnologia hidrocínética (especificamente na ictiofauna de um local) conclui-se que de forma geral os impactos ocasionados por esses dispositivos são muito menos relevantes que se comparados aos produzidos pelas tecnologias hidrelétricas

convencionais. Ademais, este projeto conclui com uma base de conhecimento robusta e validade, obtida mediante metodologias inovadoras, onde o desempenho e a caracterização de um peixe nadando na vizinhança de uma turbina hidrocínética é avaliada.

Desde a perspectiva da admissibilidade do nado do peixe na esteira de turbinas hidrocínéticas, foi proposto que independentemente do lugar da esteira um peixe poderá nadar nessa região dependendo da sua frequência de natação. Porém, em uma determinada frequência seu desempenho vê-se muito mais afetado quando nada na região de esteira distante que na próxima, possivelmente ajudado pelos vórtices de ponta de pá. Ademais, foi analisado também como, um peixe posicionado a 2D a jusante do rotor, poderia segundo sua frequência de nado manter-se nadando no lugar ou ser arrastado pela correnteza.

Contudo, se propõe que admissibilidade de nado na esteira venha determinada pelo coeficiente de esforços médio na direção do escoamento, que sendo do tipo empuxo, permitirá a realização de manobras evasivas para sair da esteira ao escoamento livre ou evitar à entrada ao rotor. Por último, importante destacar que existe também aumento nas forças transversais (em todas as posições devido ao escoamento rotativo da esteira), que devem ajudar ao peixe a sair do tubo da esteira em direção à corrente livre. Embora, altos valores destes esforços poderiam produzir translações ou incluso rotações indesejadas no peixe, que dificultariam o retorno à posição escolhida pelos mesmos.

Finalmente, deve-se ressaltar que os estudos de peixes nadando em escoamentos perturbados estão em auge na literatura nos últimos anos, e que não existe um consenso sobre o efeito das variáveis turbulentas nos mesmos. Existem trabalhos relatando à necessidade do peixe de afastar-se de regiões onde a intensidade de turbulência é alta, outros onde o consumo de oxigênio em regiões de altos níveis viu-se reduzido e também, trabalhos onde se expõem as vantagens do nado de peixes em regiões de vorticidade.

Nesta pesquisa, se conclui que em regiões onde as variáveis próprias de um escoamento turbulento são mais altas o peixe apresenta forças propulsivas reduzidas, ademais de que a vorticidade poderia ser uma variável positiva em relação ao nado.

Em resumo, sobre as contribuições e impactos socioambientais, pode-se apresentar as seguintes constatações:

ISA1 – Possibilidade de impactos ambientais (água, ar ou solo):

Sobre as possibilidades de impactos ambientais foram somente identificadas aquelas decorrentes dos efeitos sobre os peixes quando da instalação das turbinas nos rios.

ISA2 – Possibilidade de diversificação da matriz energética:

As turbinas hidrocínéticas se caracterizam com o aproveitamento remanescente do potencial hidráulico dos rios e, portanto, se insere na matriz energética na categoria de energia hidráulica sem possibilidade de diversificação da matriz energética.

ISA3 – Possibilidade de desenvolvimento de nova atividade socioeconômica (lazer, turismo, pesca, agricultura, etc.):

Não foram identificadas desenvolvimento de novas atividades decorrentes da instalação de turbinas hidrocínéticas.

ISA4 – Possibilidade de impactos na segurança ou na qualidade de vida da comunidade:

Não foram identificados impactos sobre a segurança e qualidade de vida da comunidade.

2.8 ETAPAS E CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Foram as seguintes etapas realizadas no projeto:

WP1: Simulação numérica de potencial hidrocínético

Atividade WP1-1: Desenvolvimento de abordagem quasi-3D

Nesta etapa de pesquisa foi elaborado um modelo bidimensional do reservatório de jusante da Usina Serra do Facão, que considera uma variação paramétrica na direção vertical (modelo quasi-3D). A base de desenvolvimento da modelagem consiste na adequação das equações de Saint-Venant através de uma modelagem da turbulência na direção vertical, considerando o atrito no fundo e nas condições de superfície livre (Miglio et al., 1999). O esforço computacional do modelo é pequeno e proporciona resultados rápidos para estudos hidrodinâmicos no reservatório. As abordagens de simulação baseiam-se no método de elementos finitos.

Atividade WP1-2: Simulações 3D

No sentido de validar modelos e compor elementos de parametrização realistas, simulações 3D completas foram obtidas através de modelos de escoamento implementados na plataforma OPEN TELEMAC-MASCARET (EDF, 2015). Uma intercomparação de metodologias foi elaborada para estimativas de incertezas relativas aos modelos escolhidos (*numerical simulation assessment*).

Atividade WP1-3: Estudo de casos – Validações preliminares da metodologia

Nesta etapa, um conjunto de casos de validação foram implementados, associados a condições de laboratório, sob as quais resultados experimentais estejam disponíveis. Em um segundo momento, um estudo sobre a UHE Serra do Facão foi conduzido independentemente pelas duas equipes de projeto (UnB e UFPA). Intercomparações entre resultados obtidos pelas duas equipes de pesquisa estabeleceram os referenciais de uso e confiabilidade de modelos. A extensão da área de estudos no reservatório de jusante, foi objeto de avaliação durante a primeira missão de campo.

Atividade WP1-4: *Workshop* intercomparação numérica

No sentido de validar dados e consolidar a metodologia numérica, um *workshop* de discussão dos resultados foi realizado na modalidade remota.

WP2: Levantamento de campo – Abordagens experimentais

Atividade WP2-1: Constituição de um banco de dados de operação

Com base na operação da UHE, um banco de dados de informações foi constituído. Desta maneira, uma organização sistemática dos dados foi elaborada (geometria de reservatório, batimetria, vazões, etc.) para posterior avaliação de densidade energética.

Atividade WP2-2: Aquisição de equipamentos e desenvolvimento de rotinas

Nesta etapa a plataforma de levantamento de campo foi organizada, através de aquisição e operacionalização de equipamentos e estabelecimento de rotinas para medições experimentais.

Atividade WP2-3: Desenvolvimento de estrutura da base de informação.

A concepção e desenvolvimento do conjunto de informações sobre o potencial hidrocínético foram desenvolvidos, com teste conceitual para a usina de estudo.

Atividade WP2-4: Estudo de casos – validações finais da metodologia.

Levantamento complementar no campo foi elaborado, objetivando a consolidação da metodologia desenvolvida no primeiro ano de projeto.

Atividade WP2-5: Desenvolvimento do sistema com telemetria.

Um sistema de medição da velocidade de corrente, com transmissão de dados, foi instalado para medições. Trata-se de uma boia com medidor de velocidade de corrente, que transmite dados on-line via rádio para uma base de dados. Este sistema, comporá o conjunto de informações necessárias para a validação metodológica, através da medição de dados em um único ponto, no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

WP3: Estudo de impactos ambientais da tecnologia**Atividade WP3-1:** Desenvolvimento conceitual do impacto sobre cardumes de peixes.

Nesta etapa um estudo conceitual foi desenvolvido sobre o risco de mortandade de peixes em máquinas axiais. Trata-se de um estudo inédito, que complementa o conhecimento sobre a tecnologia, visando avaliar o tempo de resposta sobre espécies de peixes em aproximação das superfícies móveis da máquina. Um modelo numérico será desenvolvido para avaliar o mecanismo de manobrabilidade de peixes em face ao campo hidrodinâmico da turbina.

Atividade WP3-2: Impacto sobre peixes - Estudo de campo

Com base na monitoração por câmaras subaquáticas, bem como na observação de possíveis eventos de mortandade, um estudo *in situ* foi elaborado. O acompanhamento de cardumes de espécies nativas e o registro de seu comportamento na vizinhança de possíveis locais de instalação de máquinas, foi objeto deste componente do projeto.

Atividade WP3-3: Impacto sobre peixes – Estudo de laboratório

De forma a validar o modelo do comportamento de peixe na vizinhança de turbinas axiais, um estudo de laboratório, com espécies piloto, foi elaborado.

WP4: Prospecção tecnológica para aplicabilidade da tecnologia**Atividade WP4-1:** Estado da arte e turbinas hidrocínéticas comerciais

Estabelecer o estado da arte de máquinas hidrocínéticas, identificando as alternativas de referência que possuam possibilidades técnicas e econômicas de serem aplicadas ao potencial identificado para a Usina de Serra do Facão.

Atividade WP4-2: Avaliação energética e econômica de instalações hidrocínéticas

Tendo como base o mapeamento do potencial hidrocínético da usina de referência, complementado com informações das curvas de desempenho de máquinas disponíveis no mercado, esta etapa sugeriu uma instalação de sistema de conversão hidrocínético na usina hidrelétrica utilizada como estudo de caso.

WP5: Difusão e gestão de tecnologia**Atividade WP5-1:** Realização de eventos

Foi realizado um workshop e seminário sobre os resultados do projeto.

Atividade WP5-2: Divulgação em mídia. Produção científica. Publicação de livro

Foram elaborados de informes técnicos, trabalhos de final de curso e dissertações e teses sobre o tema. Um livro contendo os resultados finais do projeto foi publicado.

Atividade WP5-3: Elaboração do Relatório Final

CRONOGRAMA

ATIVIDADES ANO 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WP1-1: Desenvolvimento de abordagem quasi-3D												
WP1-2: Simulações 3D												
WP1-3: Estudo de casos – Validações preliminares												
WP1-4: <i>Workshop</i> intercomparação numérica												
WP2-1: Constituição de um banco de dados de operação												
WP2-2: Aquisição de equipamentos e desenvolvimento de rotinas												
WP2-3: Desenvolvimento de estrutura da base de informação												
WP2-4: Estudo de casos – validações finais da metodologia												
WP2-5: Desenvolvimento do sistema com telemetria												
WP3-1: Desenvolvimento conceitual do impacto sobre cardumes de peixes												
WP3-2: Impacto sobre peixes - Estudo de laboratório												
WP3-3: Impacto sobre peixes – Estudo de campo												
WP4-1: Estado da arte e turbinas hidrocínéticas comerciais												

ATIVIDADES ANO 2 + 6 Meses	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
WP1-1: Desenvolvimento de abordagem quasi-3D																	
WP1-2: Simulações 3D																	
WP1-3: Estudo de casos – Validações preliminares																	
WP1-4: <i>Workshop</i> intercomparação numérica																	
WP2-3: Desenvolvimento de estrutura da base de informação																	
WP2-4: Estudo de casos – validações finais da metodologia																	
WP2-5: Desenvolvimento do sistema com telemetria																	
WP3-1: Desenvolvimento conceitual do impacto sobre cardumes de peixes																	
WP3-2: Impacto sobre peixes - Estudo de laboratório																	
WP3-3: Impacto sobre peixes – Estudo de campo																	
WP4-1: Estado da arte e turbinas hidrocínéticas com																	
WP4-2: Avaliação energética e econômica de instalações hidrocínéticas																	
WP5-1: Preparação e realização de evento																	
WP5-2: Produção científica. Publicação de livro																	
WP5-3: Relatório final.																	

2.9 RECURSOS EMPREGADOS E JUSTIFICATIVAS

Para este projeto, foram os seguintes os recursos empregados:

Recursos Humanos

Referente a remuneração dos pesquisadores indicados no item 1.1

Material Permanente

Foram adquiridos equipamentos para realização de pesquisas no campo (Usina de Serra do Facão) como: sonar, drone aéreo e drone flutuante e pesquisas no Laboratório de Energia e Ambiente localizado na Universidade de Brasília como: computadores, impressoras e aplicativos. Os equipamentos adquiridos estão listados no item 2.11

Serviços de Terceiros

Foram contratados os seguintes serviços: adequação de espaço físico do Laboratório de Energia e Ambiente; revitalização do túnel de água, diagramação e publicação de livro, desenvolvimento de aplicações via web, aluguel de carro para deslocamento da equipe para a usina de Serra do Facão.

Material de Consumo

Foram adquiridos diversos materiais e peças de reposição de instrumentos de medição tanto para serem utilizados nos serviços de campo como nas pesquisas em laboratório como: módulo GPS, sensor de corrente, adaptadores, cartão de memória, carregadores de baterias, antena wireless, suporte e ferro de solda eletrônica, jumpers, conversores etc.

Viagens e Diárias

Foram as seguintes as viagens realizadas

- a) Viagem – Itinerário Brasília a Catalão (GO)

Período de 01/12/2020 a 02/12/2020

Participantes: Rafael Mendes, Felipe Camargo e Guilherme Tabatinga

Objetivo - Primeira visita de campo a UHE Serra do Facão. Esta visita teve como principal objetivo a prospecção das instalações da usina, focando na observação da infraestrutura do reservatório jusante.

b) Viagem – Itinerário Brasília a Catalão (GO)

Período de 27/07/2021 a 29/07/2021

Participantes: Rafael Mendes, Felipe Camargo e Guilherme Tabatinga

Objetivo - Medidas de vazão com o equipamento ADCP, captura de imagens para implementação da técnica de LSPIV e instalação de uma boia para monitoramento remoto de longo prazo.

c) Viagem – Itinerário Brasília a Catalão (GO)

Período de 17/11/2021 a 19/11/2021

Participantes: Rafael Mendes, Felipe Camargo, Matheus Montenegro Nunes e Rudi Henri Van Els

Objetivo - Medição de velocidade de rio e testes no sistema de telemetria do sensor de velocidade do rio.

d) Viagem – Itinerário Brasília a Catalão (GO)

Período de 26/07/2022 a 28/07/2022

Participantes: Rafael Castilho Faria Mendes, Matheus Montenegro Nunes

Objetivo – Aprimoramento do sistema de monitoramento de peixes.

e) Viagem – Itinerário Brasília a Catalão (GO)

Período de 31/08/2022 a 01/09/2022

Participantes: Antonio C.P. Brasil Junior, Rafael Castilho Faria Mendes, Matheus Montenegro Nunes, Taygoara F. Oliveira, Nélio Moura de Figueiredo, Rudi Henri Van Els, Claudio José Cavalcante Blanco, Kaajal Rohini Gopie.

Objetivo – Realização de seminário sobre o projeto

f) Viagem – Itinerário Brasília a Paris (França)

Período de 17/10/2021 a 06/01/2022

Participantes: Antonio C.P. Brasil Junior

Objetivo - O objetivo geral da missão de trabalho no Laboratório de Engenharia de Fluidos e Sistemas energéticos da ENSAM Paris relaciona-se no fortalecimento da parceria técnica do Laboratório de Energia e Ambiente da UnB no contexto das atividades do projeto Lambari (SEFAC-UnB).

Resumo - Trata-se de uma missão de longo termo centrada em atividades de pesquisa colaborativa e de consolidação de resultados em termos de finalização de dois artigos e planejamento para novas ações de P&D com envolvimento da ENSAM UnB. A interlocução com os Professores Ricardo Nogueira e Smaïne Kouidri estava prevista no plano de trabalho original. O aporte de co-financiamento da missão por recursos da ENSAM, junto com recursos previstos em projeto, permitiu uma intensa agenda de trabalho que viabilizou a realização dos objetivos previstos e o planejamento e abertura de oportunidades de parcerias com novos membros do laboratório francês e com disponibilidade da infraestrutura de pesquisa local (em particular do Túnel de vento e dos equipamentos de visualização e medição baseado na metodologia PIV – *Particle Image Velocimetry*).

2.10 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A razoabilidade de custo deste projeto pode ser demonstrada a partir da quantificação do montante de energia que poderia ser comercializado no caso do aproveitamento hidrocínético de usinas hidrelétricas.

Os resultados relativos ao potencial de geração hidrocínético, levou em consideração uma fazenda de turbinas hipotética concebida para ser instalada nas regiões de maior velocidade do escoamento. A fazenda hipotética de turbinas considera 22 turbinas idênticas distribuídas em três seções transversais do rio. A geração anual foi determinada considerando regimes representativos das vazões medidas no ano de 2018 no canal da UHE SEFAC.

O projeto do rotor para as condições do escoamento do rio constitui o elemento final necessário para uma estimativa do potencial hidrocínético do canal, uma vez que ficam definidos o diâmetro e a taxa de conversão de energia. No cenário de uma vazão de 91000 kg/s, verificou-se ser viável a instalação de turbinas hidrocínéticas em três seções ao longo do canal, nomeadas aqui como seções 1, 2 e 5. A seção 1 é capaz de receber até dez turbinas, a 2, sete e a 5, cinco unidades. Nessas condições, estimou-se um potencial de 61 kW de potência de eixo para o trecho analisado.

No caso da estimativa do potencial anual, simulações adicionais com 4 vazões foram realizadas, seguindo um banco de dados de vazões ocorrendo diariamente no ano 2018. O estudo dos perfis da velocidade nas seções mencionadas acima, forneceu a configuração final mais vantajosa. Somando-se a estimativa da potência individual gerada em cada trecho, esta configuração geraria uma energia anual de cerca de 524 MWh.

Por outro lado, a densidade de energia produzida por turbinas hidrocínéticas pequenas é muito baixa. Embora viáveis economicamente para pequenas aplicações (comparativamente por exemplo a fonte solar fotovoltaico), para grandes aplicações ela não compete com a usina hidrelétrica convencional. A profundidade (muito rasa) do Rio São Marcos só proporciona a instalação de máquinas pequenas que podem contribuir para suporte aos sistemas auxiliares da usina, ou despacho para energia de caráter social para comunidades circunvizinhas à área da usina.

A avaliação econômica foi feita com base no modelo de turbina Hydro-K, desenvolvida pela Universidade de Brasília, em 2017. Esta foi uma plataforma projetada para atuar na recuperação de energia remanescente a jusante de reservatórios de usinas hidrelétricas. A produção energética foi estimada com base no histórico de velocidade do escoamento da UHE Serra do Facão, utilizando dados de velocidade coletados em campo juntamente com os dados de vazão a jusante da barragem.

O custo total da turbina contabiliza apenas as despesas de capital (CapEx) e as despesas de operação (OpEx). O CapEx refere-se aos custos relacionados a turbina, estrutura, conformidade ambiental, montagem, transporte, mão de obra e embarcação, resultando em R\$ 85.590,00 por turbina, cada uma com capacidade máxima de 10kW. Devido

a tamanho da turbina hidrocínética e a sua inserção em uma UHE existente, considerou-se que os custos do OpEx se referem somente aos custos de reposição de equipamento e seguro. Operadores, embarcações e consumíveis já constam da operação da própria usina e poderão ser aproveitados quando necessário.

A tabela abaixo analisa três alternativas de projeto: situações com uma, onze e vinte e duas turbinas instaladas. Devido a distribuição do curso do rio, a eficiência de cada turbina decai com o número de turbinas instaladas, aumentando o pay back time. Devido a isso, a configuração de apenas uma turbina apresenta a maior eficiência. Em contrapartida, a configuração de vinte e duas turbinas apresenta a maior receita anual com um tempo de pay back excedente em apenas três anos em relação a alternativa com uma turbina.

Alternativas Número de Turbinas Instaladas	Energia Produzida Anual (MWh)	Investimento (R\$)	Receita Anual da Venda da Energia (R\$)	Pay back time (anos)
1	27	85.590,00	12.780,00	11
11	277	941.499,00	132.607,00	12
22	524	1.882.998,00	249.258,00	14

Para o cálculo da receita decorrente da venda energia foi utilizado o valor de R\$ 300,00/MWh, média do preço de referência de R\$ 315,00/MWh e média dos preços negociados de R\$ 280,00/MWh para PCHs e CGHs, decorrentes do 36º Leilão Energia Nova (A-4) realizado no dia 27/05/2022. (dados obtidos no site www.ccee.org.br) Acrescido a isso foi também considerada uma taxa de desconto de 11,45% no valor da moeda.

Os indicadores econômicos mostram que as soluções de turbinas hidrocínéticas, embora se mostrem viáveis tecnicamente para pequenas aplicações e sistemas isolados, ainda não é viável economicamente para aplicações em larga escala. Esta constatação

decorre principalmente do custo do investimento para a fabricação de turbinas para operação em rios de profundidade rasa e velocidade baixa.

Entretanto a sua aplicabilidade é bastante abrangente, considerando a possibilidade de aumento incremental de geração de energia elétrica decorrente do aproveitamento hidrocínético dos rios localizados junto as usinas hidrelétricas (UHE), as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e centrais de geração hidroelétricas (CGH), o que apresenta um vasto território a ser explorado. (Em outubro de 2021, o Brasil tinha em operação 1.373 empreendimentos de geração de energia hídrica, sendo 219 UHEs, 424 PCHs, 730 CGHs).

Neste sentido, espera-se que sejam desenvolvidas pesquisas no sentido do aprimoramento técnico dos componentes que conduzam tanto o aumento da energia produzida, quanto a redução do investimento.

Como exemplo, segue a tabela abaixo considerando um avanço tecnológico estimado de dois anos sobre a tecnologia, aumentando sua eficiência energética e reduzindo o investimento em aproximadamente 20%, resultando numa redução em 4/5 anos do Pay back time.

Alternativas Número de Turbinas Instaladas	Energia Anual Produzida (MWh)	Investimento (R\$)	Receita Anual da Venda da Energia (R\$)	Pay back time (anos)
1	30	68.473,00	14.521,00	7
11	308	753.199,00	148.561,00	7
22	536	1.506.398,00	255.640,00	9

Em conclusão, pode-se verificar que as turbinas hidrocínéticas, que atualmente são tecnicamente aplicáveis para suprimento energético em sistemas isolados e em outras situações especiais, apresentam grande potencial para redução de custos, que podem ser

alcançada a partir de pesquisas complementares, neste sentido, as turbinas hidrocinéticas, se constituirão numa alternativa igualmente passível de ser considerada sob o ponto de vista econômico, para outras situações.

2.11 PEDIDOS DE CESSÃO E DOAÇÃO DE BENS

Para este projeto, foram adquiridos os equipamentos a seguir relacionados para os quais solicitamos que sejam doados para a Universidade de Brasília. Estes equipamentos foram instalados no Laboratório de Energia e Ambiente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília se incorporando a infraestrutura laboratorial para realização de pesquisas voltadas primordialmente para as fontes de energia renováveis.

Equipamento	Quantidade	R\$ total
Sonar para peixe (importado) - HUMMINBIRD HELIX7X MSI Tela 7.0 com GPS - G3N	01	8.271,00
Drone aéreo (importado) DJI MAVIC AIR 2 FLY MORE COMBO	01	11.200,00
Drone flutuante (importado) CHASING DORY - ROV PN DORY01 74900-05	01	7.397,18
Sistema de medição acústica ADCP (importado)	01	200.930,23
Periféricos Adicionais de Sistema ADCP (importado)	01	42.344,00
Notebook DELL INSPIRON 15 CORE I5-8265U, RAM 8GB, SSD 256 GB, WIN 10 PRO, SERVICE TAG CSXL63	03	13.767,00
Computador DESKTOP I9-9900K 32 GB SSD256 HD 1TB W10P VGA 4GB GT730 C/ MONITOR 23	01	10.865,00

Estações de trabalho (CFD e CAD)	03	23.367,00
Licença de Software ANSYS-CFX	01	75.799,02
Impressora Multifuncional Laser - Colorida HP 1200W NEVERSTOP NS: BRBSN3KNPR	02	1.935,26
Impressora HP 6476 DESKJET PLUS INK NS: TH0CG3I113	01	507,18
TOTAL		396.382,87

3. DETALHAMENTO TÉCNICO DO PROJETO

3.1CAPÍTULO 1 – “INTRODUÇÃO”

O detalhamento do projeto foi apresentado no livro “Turbinas Hidrocinéticas Fluviais – Projeto Lambari. Tecnologias, potencial hidrocinético e impactos ambientais”, com os seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Estado da Arte da Tecnologia

Capítulo 2 – Avaliação do Custo Nivelado de Energia Hidrocinética

Capítulo 3 – Sobre o Potencial de Energia Hidrocinética

Capítulo 4 – Metodologias Experimentais

Capítulo 5 – Metodologias de Simulação de Escoamentos

Capítulo 6 – Formulação Tridimensional de Escoamentos Ambientais

Capítulo 7 – Estudo de Caso UHE Serra do Facão – Simulação 3D

Capítulo 8 - Estudo de Caso UHE Serra do Facão – Modelo Quase-3D

Capítulo 9 – Impactos Ambientais de Turbinas Hidrocinética sobre a Ictiofauna

3.2 CAPÍTULO 2: “METODOLOGIA”

A metodologia utilizada para o desenvolvimento das pesquisas foi baseada em Workpackage, (etapas de trabalho) conforme detalhado no item 2.8 deste relatório.

3.3 CAPÍTULO 3: “RESULTADOS E CONCLUSÕES”

Os resultados e conclusões foram apresentados por capítulo de livro e estão resumidos a seguir:

3.3.1 – Metodologia para determinação do potencial hidrocínético

Foi desenvolvida uma metodologia numérica de simulação de escoamentos turbulentos em canais naturais, voltada para a determinação do potencial de conversão de energia hidrocínética em trabalho mecânico associado ao canal. Para isso foram empregados métodos de simulação numérica de escoamentos turbulentos, que permitem a previsão dos campos de velocidade média e de intensidade de turbulência, empregando medidas *in situ* da topologia e dados de vazão do canal.

Reunindo essas informações, pontos no canal com as melhores condições para a instalação de turbinas hidrocínéticas são determinados, com a posterior avaliação da capacidade de conversão, considerando projeto de rotor hidrocínético elaborado para operar especificamente nas condições do escoamento. A metodologia foi aplicada ao caso do canal a jusante da UHE Serra do Facão, no rio São Marcos, considerando toda a extensão com dados topográficos disponíveis, após campanha de medição batimétrica realizada especificamente para o presente projeto de pesquisa.

O framework adotado para a simulação de escoamentos turbulentos foi a decomposição de Reynolds para a geração das equações médias (temporais) de Navier-Stokes (RANS). Para o estabelecimento de um referencial seguro para o desenvolvimento da metodologia, escoamentos gerados em condições controladas de laboratório, cujos dados estão disponíveis na literatura, foram reproduzidos em simulações exploratórias e de validação da metodologia. Usando os dados de referência, um estudo de sensibilidade do refinamento da malha foi

conduzido usando variações relativas de velocidade média e intensidade de turbulência em pontos específicos do escoamento.

Também uma investigação sobre as variações relativas entre essas grandezas, considerando três modelos de turbulência mais frequentemente utilizados na literatura, sempre em relação aos dados experimentais de referência, foi realizada. O processo de simulação e análise permitiu estabelecer as etapas metodológicas necessárias para a simulação do canal natural. As principais conclusões desse estudo de validação com benchmark foram:

- Taxas de convergência, mais acentuadas para a velocidade média e mais lentas para intensidade de turbulência, foram observadas consistentemente em todas as simulações, sendo que resultados independentes do refinamento puderam ser gerados em todos os casos.
- Os modelos de turbulência $k-\epsilon$ e RSM produziram resultados similares para velocidade média e intensidade de turbulência e em concordância com os resultados experimentais, sendo que o RSM tem uma aderência com a referência da literatura ligeiramente mais consistente. Dessa forma, o modelo de turbulência adotado para a simulação do escoamento no canal natural será o RSM.
- A metodologia foi capaz de prever a ocorrência de escoamentos secundários típicos de canais com curvas. Esse fenômeno foi simulado claramente pelos três modelos de turbulência escolhidos para a seção 3 do canal *Benchmark*.

Uma vez sedimentada a metodologia de simulação do escoamento do canal, o estudo do escoamento do rio São Marcos, a jusante da UHE Serra do Facão, iniciou com o levantamento topográfico do leito do rio, realizado pela equipe do projeto, empregando técnicas de batimetria com ADCP. Os dados topográficos foram convertidos em uma malha computacional representativa da geometria do rio São Marcos a jusante da UHE SEFAC.

Trata-se de rio raso, com baixa velocidade média, sem trechos de afunilamento, sem curvas acentuadas, com pequeno potencial de aproveitamento energia hidrocínética.

3.3.2 – Simulações numéricas

Foram realizadas simulações numéricas seguindo a metodologia estabelecida, as quais indicaram velocidades ligeiramente superiores a 1,0 m/s ocorrendo a jusante da depressão do canal. Considerando essas informações, um projeto preliminar de rotor foi elaborado, prevendo diâmetro de 1.0 m e velocidade de corrente livre de 1.0 m/s. Nessas condições, empregando técnicas clássicas de projeto de rotores, o coeficiente de potência esperado de unidades de conversão hidrocínética é de 30%.

O projeto do rotor para as condições do escoamento do rio constitui o elemento final necessário para uma estimativa do potencial hidrocínético do canal, uma vez que ficam definidos o diâmetro e a taxa de conversão de energia. No cenário de uma vazão de 91000 kg/s, verificou-se ser viável a instalação de turbinas hidrocínéticas em três seções ao longo do canal, nomeadas aqui como seções 1, 2 e 5. A seção 1 é capaz de receber até dez turbinas, a 2, sete e a 5, cinco unidades. Nessas condições, estimou-se um potencial de 3.9 kW de potência de eixo para o trecho analisado. No caso da estimativa do potencial anual, simulações adicionais com 4 vazões foram realizadas, seguindo um banco de dados de vazões ocorrendo diariamente no ano 2018. Um estudo dos perfis da velocidade nas seções mencionadas acima, fornece-se a configuração final mais vantajosa.

Nessa configuração final, permite-se a instalação de dez, oito e cinco turbinas respectivamente nos planos 1, 2 e 5. Somando-se a estimativa da potência individual gerada em cada trecho, a nova configuração geraria uma energia anual de cerca de 70 MWh.

De maneira geral, o estudo numérico conduzido permite concluir que o rio São Marcos, em trecho de 345 m a jusante da barragem da UHE Serra do Facão, não tem potencial de geração de energia hidrocínética elevado, quando considerada uma tecnologia convencional. O principal limitador para a captação da energia cinética do rio nessa região é sua

profundidade, que limita o diâmetro do rotor e a capacidade de captação das turbinas isoladamente. Os níveis de velocidade observados também tendem a reduzir o coeficiente de potência de turbinas livre de eixo horizontal, tendo impacto na taxa de conversão esperada. Algumas alternativas tecnológicas podem fazer frente ao desafio de converter energia cinética de canais naturais com tais características.

No contexto das turbinas de eixo horizontal, o uso de difusores hidrodinâmicos pode levar a maior captação energética por rotor, desde que esses dispositivos elevem a área efetiva de sucção a montante das turbinas. Considerando a pouca profundidade disponível, o uso de difusores elipsoidais é uma possibilidade promissora a ser investigada. Finalmente, turbinas de eixo vertical do tipo Darrieus representam uma opção tecnológica a ser considerada.

3.3.3 – Abordagem numérica quase 3D

Com relação ao desenvolvimento de abordagem numérica quase-3D, a calibração do modelo, que foi realizada com dados observados de vazão do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão, demonstrou um bom ajuste entre as vazões observadas e simuladas. Esse resultado é importante, pois as velocidades e profundidades simuladas pelo modelo são dados de entrada para o modelo Quasi-3D. O bom desempenho do modelo favoreceu a modelagem Quasi-3D, a qual se mostrou propícia para a simulação de perfis verticais de velocidade. Nesse caso, a validação com dados experimentais de velocidade, que foram medidos em campo através de ADCP, confirma que os perfis simulados de velocidade são bens próximos aos perfis medidos. A validação permitiu o uso do modelo Quasi-3D para simulações de perfis de velocidade em três seções do reservatório de jusante da UHE Serra do Facão.

Nas seções foi projetada a instalação de turbinas hidrocínéticas, formatando parques hidrocínéticos. A quantidade de turbinas de cada parque variou com as vazões oriundas da curva de permanência corrigida e consideradas no estudo, as quais balizaram as velocidades e profundidades simuladas nas três seções analisadas. Para a primeira vazão analisada, sendo igual a $91,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e representando uma permanência igual a 88,46% do tempo, o parque hidrocínético teria 61 turbinas hidrocínéticas com uma estimativa de energia anual gerada igual a 105,2 MWh/ano. Para a segunda vazão analisada, sendo igual a $104,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e representando

uma permanência igual a 75% do tempo, o parque hidrocinético teria 46 turbinas hidrocinéticas com uma estimativa de energia anual gerada igual a 114,6 MWh/ano. Para a terceira vazão analisada, sendo igual a 140,0 m³/s e representando uma permanência igual a 50% do tempo, o parque hidrocinético teria 37 turbinas hidrocinéticas com uma estimativa de energia anual gerada igual a 114,8 MWh/ano.

Assim, a opção com a vazão de 75% de permanência, em relação à quantidade de energia gerada, seria a melhor opção de vazão de projeto para a possível instalação de um parque hidrocinético no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão, pois teve praticamente a mesma produção, entretanto com 25% de tempo a mais de operação em relação ao parque analisado com a vazão de 50% de permanência. Se for desejado produzir energia hidrocinética por mais tempo, ainda se tem a opção de um parque hidrocinético com 61 turbinas, funcionando quase 90% do tempo e com uma geração estimada em 105,2 MWh/ano.

No que diz respeito, as velocidades de projeto para cada seção, as mesmas variariam de 1,4 a 1,7 (seção 1), de 1,5 a 1,6 (seção 2) e de 1,5 a 1,7 (seção 3). Essas velocidades estão coerentes com as velocidades de projeto determinadas via análise de densidade de potência hidrocinética apresentadas, as quais, de maneira geral, ficaram entre 1,4 e 1,7 m/s.

As opções apresentadas e analisadas de parques hidrocinéticos que poderiam ser instalados no reservatório de jusante da UHE Serra do Facão precisam de análises de fabricação e custos das turbinas; e da montagem dos parques hidrocinéticos, entre outras. Além de uma análise de arranjo do posicionamento das turbinas, ou seja, ficando todas em paralelo, ou em módulos triangulares, por exemplo. Apesar das análises que ainda precisam ser elaboradas, o desenvolvimento da modelagem Quasi-3D, permitiu o projeto de parques hidrocinéticos, demonstrando o potencial remanescente de energia proveniente das vazões turbinadas e vertidas da UHE Serra do Facão.

3.3.4 – Impactos Ambientais

Com relação aos estudos de impactos ambientais decorrentes da aplicação da tecnologia, conclui-se que de forma geral os impactos ocasionados por esses dispositivos são muito menos relevantes que se comparados aos produzidos pelas tecnologias hidrelétricas

convencionais. Ademais, este projeto conclui com uma base de conhecimento robusta e validade, obtida mediante metodologias inovadoras, onde o desempenho e a caracterização de um peixe nadando na vizinhança de uma turbina hidrocínética é avaliada.

Desde a perspectiva da admissibilidade do nado do peixe na esteira de turbinas hidrocínéticas, foi proposto que independentemente do lugar da esteira um peixe poderá nadar nessa região dependendo da sua frequência de natação. Porém, em uma determinada frequência seu desempenho vê-se muito mais afetado quando nada na região de esteira distante que na próxima, possivelmente ajudado pelos vórtices de ponta de pá. Ademais, foi analisado também como, um peixe posicionado a 2D a jusante do rotor, poderia segundo sua frequência de nado manter-se nadando no lugar ou ser arrastado pela correnteza.

Contudo, se propõe que admissibilidade de nado na esteira venha determinada pelo coeficiente de esforços médio na direção do escoamento, que sendo do tipo empuxo, permitirá a realização de manobras evasivas para sair da esteira ao escoamento livre ou evitar à entrada ao rotor. Por último, importante destacar que existe também aumento nas forças transversais (em todas as posições devido ao escoamento rotativo da esteira), que devem ajudar o peixe a sair do tubo da esteira em direção à corrente livre.

Embora, altos valores destes esforços poderiam produzir translações ou incluso rotações indesejadas no peixe, que dificultariam o retorno à posição escolhida pelos mesmos.

Deve-se enfatizar que os estudos de peixes nadando em escoamentos perturbados estão em auge na literatura nos últimos anos, e que não existe um consenso sobre o efeito das variáveis turbulentas nos mesmos. Existem trabalhos relatando à necessidade do peixe de afastar-se de regiões onde a intensidade de turbulência é alta, outros onde o consumo de oxigênio em regiões de altos níveis viu-se reduzido e também, trabalhos onde se expõem as vantagens do nado de peixes em regiões de vorticidade como a esteira de vórtices de von Kármán. Nesta pesquisa, se conclui que em regiões onde as variáveis próprias de um escoamento turbulento são mais altas, o peixe apresenta forças propulsivas reduzidas, ademais de que a vorticidade poderia ser uma variável positiva em relação ao nado.

O impacto ambiental dos peixes na presença de turbinas hidrocínéticas em rios é uma preocupação real onde há uma falta de descrições de risco de colisão na literatura. Estudos

sobre nado de peixes são em maioria focados na hidrodinâmica e baseados na observação de peixes nadando em fluxo imperturbado. Desta forma, este trabalho propôs uma metodologia para estudar o nado de peixes nos limites de turbinas hidrocínéticas axiais com base em uma abordagem experimental.

Um peixe robô autônomo foi desenvolvido para replicar o peixe *Astyanax bimaculatus*, também conhecido como Lambari, uma espécie comum encontrada no Brasil. Tal espécie foi considerada por sua cinemática carangiforme e pelo fato que o modelo geométrico já foi construído em um trabalho anterior.

O peixe foi fabricado empregando impressão 3D. O movimento oscilante foi produzido por meio de um servomotor, inserido dentro do modelo, onde foi controlado por um sinal senoidal obtido a partir de um modelo matemático estabelecido em experimentos reais de nado. O objetivo principal foi validar os parâmetros hidrodinâmicos, arrasto e coeficiente de pressão, do nado dentro do túnel de água e compará-los com dados numéricos.

3.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As referências bibliográficas citadas no item 2.5 – Originalidade, foram

Y LIU AND D. J. PACKKEY. **Combined-cycle hydropower systems and the potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations.** *Renewable Energy*, 66:228–231, 2014.

J. PETRIE, P. PANAYIOTIS DIPLAS, M. GUTIERREZ, AND S. NAM. **Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites.** *Renewable Energy*, 69:393–401, 2014.

E. LALANDER AND M. LEIJON. **In-stream energy converters in a river e effects on upstream hydropower station.** *Renewable Energy*, 36:399–404, 2011.

P. A. WORK, K. A. HAAS, Z. DEFNE, AND T. GAY. **Tidal stream energy site assessment via three-dimensional model and measurements.** *Applied Energy*, 102:510–519, 2013.

M. BITENCOURT, M. A. NUNES, P.S. HOLANDA, C. BLANCO, A. L. AMARANTE MESQUITA, AND A. C. P. BRASIL JUNIOR. **Avaliação de potencial hidrocínético remanescente a jusante de UHE's na bacia hidrográfica do rio Tietê.** In 17th Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2016.

L. HAMMAR, L. EGGERTSEN, S. ANDERSSON, J. EHNBERG, R. ARVIDSSON, M. GULLSTRÖM, AND S. MOLANDER. **A probabilistic model for hydrokinetic turbine collision risks: Exploring impacts on fish.** PLoS ONE, 10(3):1–25, 2015.

Cada capítulo do livro do projeto, apresenta para o tema em análise, referencial bibliográfico detalhado, que foi utilizado no desenvolvimento dos estudos e pesquisas. Segue a quantidade de referências apresentadas por capítulo do livro:

Capítulo 1 – 38 referências

Capítulo 2 – 15 referências

Capítulo 3 – 65 referências

Capítulo 4 – 38 referências

Capítulo 5 – 30 referências

Capítulo 6 – 35 referências

Capítulo 7 – 05 referências

Capítulo 8 – 16 referências

Capítulo 9 – 187 referências

4. ANEXOS

