

# Turbina Hidrocinética Geração 3

Antonio C. P. Brasil Junior<sup>1\*</sup>, Rudi Van Els<sup>1</sup>, Lucio R. B. Salomon<sup>1</sup>, Thiago Oliveira<sup>1</sup> e Anna Paula Rodrigues<sup>1</sup> e Wandyr O. Ferreira<sup>2</sup>.

**Resumo** - Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma turbina hidráulica tipo Hidrocinética, para uso na conversão de energia em comunidades isoladas. O desenvolvimento tecnológico deste modelo de turbina envolveu metodologias avançadas de concepção de máquinas hidráulicas, utilizando ferramentas computacionais e experimentais, tais como a CFD e ensaios em túnel de vento com modelo reduzido. Complementarmente o presente trabalho apresenta um estudo de caso da inserção sustentável da tecnologia em um projeto piloto em uma comunidade isolada na Amazônia.

**Palavras-chave**—Turbinas hidrocinéticas. Comunidades isoladas. Energia e sustentabilidade.

## I. INTRODUÇÃO

O termo Turbinas hidrocinéticas é dedicado às máquinas hidráulicas que convertem a energia cinética de rios ou de correntes de maré em eletricidade. Por muitos séculos a humanidade explorou este tipo de energia baseada na corrente de rios, utilizando rodas d'água ou outros dispositivos mais rudimentares. Ao longo do tempo tais máquinas foram relativamente esquecidas, e, o desenvolvimento de grandes projetos e de turbinas hidráulicas mais eficientes, compôs o esforço do desenvolvimento tecnológico moderno do uso da hidroeletricidade em todo o mundo. Esta evolução histórica das turbinas hidráulicas permitiu o desenvolvimento tecnológico de grandes e médios sistemas hidrelétricos, com alta taxa e eficiência de conversão de energia. No entanto, impactos ambientais e sociais consideráveis ocorreram nas bacias hidrográficas que foram intensivamente aproveitadas em seu uso energético. A implantação de grandes projetos de conversão, associados à construção de represas e outras obras de infra-estrutura de controle de fluxo de bacias modificou o uso original e simples da hidroenergia. Esta história nos é bastante conhecida.

A exploração de pequenas máquinas hidrocinéticas não é definitivamente um novo conceito, porém uma re-visitação desta tecnologia no momento atual pode significar uma excelente alternativa para a geração de eletricidade sustentável. Em países em desenvolvimento, muitas comunidades, pequenas e remotas, são localizadas ao longo de rios com águas correntes. Sistemas hidrocinéticos, com baixos impactos ambientais na conversão de energia e com baixo custo operacional, podem representar uma excelente alternativa renovável de fonte de energia [14]. Um esforço de desen-

volvimento moderno e eficiente de tais máquinas, que podem ser concebidas com tecnologias atuais de projeto de máquinas hidráulicas, é o foco principal deste trabalho.

Considerando especificamente a região amazônica brasileira, onde grande parte das comunidades pequenas são ribeirinhas, o atendimento dos serviços de eletricidade, descentralizado, pode focar a opção hidrocinética como uma das formas de viabilizar projetos de desenvolvimento sustentáveis, que promovam equidade para as populações enraizadas nas regiões amazônicas mais isoladas.

A literatura técnica sobre a concepção, projeto e uso de turbinas hidrocinéticas não é muito vasta. Apenas poucos artigos são apresentados, e, em geral, muitos deles foram disponibilizados em anais de conferências ou veículos específicos. Vejamos uma pequena revisão sobre o estado da arte desta tecnologia.

Em Tiago-Filho[17] é apresentada uma revisão sobre turbinas hidrocinéticas (THC's) descrevendo aspectos gerais e o potencial de uso desta tecnologia no Brasil. Aborda-se neste trabalho o potencial deste tipo de tecnologia para o uso em comunidades isoladas. Esta mesma abordagem é desenvolvida por Van-Els et al.[19] que apresentam uma visão geral de uma THC instalada em uma comunidade rural no centro-oeste brasileiro (Município de Correntina na Bahia). A máquina apresentada funcionou ao longo de uma década para prover eletricidade para um posto de saúde, e é a origem da pesquisa sobre THC's na Universidade de Brasília - UnB. Os projetos de pesquisa e desenvolvimento na UnB certamente representam um esforço pioneiro no Brasil, que pode compartilhar experiências importantes tanto no que concerne projetos de pequenas máquinas quanto ao uso sustentável da tecnologia.

Uma importante referência bibliográfica sobre o tema é apresentada por Gorban et al. [5], onde se explora os limites de eficiência de máquina em fluxo livre. Este artigo apresenta uma dedução analítica importante baseada na resistência hidrodinâmica de blocagem do escoamento por rotores de THC. Os resultados obtidos estabelecem limites muito mais restritivos de eficiência do que o limites clássicos propostos por Betz. Finalmente este trabalho explora um novo conceito de turbina chamado de turbina Gorlov [4], que contorna esta limitação teórica. A importância do resultado sobre o limite máximo de eficiência de máquinas de rotores livres é que o aumento de eficiência de máquinas hidrocinéticas só é possível com o uso de mecanismos hidrodinâmicos de compensação da resistência hidráulica da máquina, seja pelo uso de difusores ([2],[3][7][8]), seja pela inovação no desenho geométrico não convencional de Mesquita et al. [12][13] apresentam uma metodologia de projeto e análise hidrodinâmica de

<sup>1</sup>Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Energia e Ambiente. 70910-900 Brasília. DF.

<sup>2</sup>ELETRONORTE S/A. Superintendência de Expansão da Geração.

\* Autor para contato (e-mail: brasiljr@unb.br)

turbinas axiais. Esta metodologia baseia-se no equacionamento matemático do equilíbrio de esforços hidrodinâmicos nas pás. Isto é um excelente ponto de partida para o desenvolvimento de projetos de THC's pois proporciona uma formulação rápida e eficaz para o dimensionamento hidrodinâmico de rotores.

Uma interessante concepção de THC são aquelas de eixo vertical ([11],[15],[16]). Nota-se que estas máquinas também apresentam uma restrição de projeto baseada na limitação de Betz. Porém, a grande contribuição da turbina tipo Gorlov é de contornar este limite através do uso de pás helicoidais, demonstrando que as linhas de corrente para esta geometria são re-direcionadas, quebrando assim a limitação devido ao bloqueio do escoamento.

A equipe japonesa do professor Karemoto ([9],[10]) propõe uma concepção simples e eficiente de turbina tipo hélice de eixo inclinado. Esta concepção apresenta muito bons resultados, em particular para rios de pouca profundidade.

Uma linha de desenvolvimento tecnológico atual baseia-se no desenvolvimento de máquinas para correntezas de maré[1]. Embora vários aspectos de desenvolvimento hidrodinâmico destas máquinas possam ser compartilhados para máquinas de correntes de rio, muitas especificações de partida são muito específicas de correntes marinhas. Somente poucas informações técnicas são disponibilizadas por fabricantes de THC (UEK[18], por exemplo).

Como podem ser observadas, muito poucas informações técnicas e científicas são disponibilizadas sobre o assunto na literatura. Observou-se que na atualidade, uma verdadeira re-descoberta das tecnologias de máquinas hidrocínéticas vem sendo incentivadas em vários laboratórios de pesquisa e desenvolvimento no mundo, focando tanto para o aspecto de correntes de rios como de maré. No Brasil a temática P&D vem sendo fortemente incentivadas no setor elétrico, e, a UnB vem sendo pioneiras no desenvolvimento desta tecnologia. Esta temática vem sendo desenvolvida pela UnB ao longo dos últimos 15 anos. A partir do incentivo de desenvolvimento de projetos de várias fontes, a UnB apresenta uma máquina confiável e customizada, que vem sendo instalada em diferentes comunidades isoladas no Cerrado e na Amazônia. Os projetos da UnB caracterizam-se pela combinação de desenvolvimento tecnológico com a avaliação de inserção sustentável de tal tecnologia para comunidades isoladas ([19]- [24]).

A partir de 2004, a UnB, em parceria com a ELETRONORTE, iniciou uma atividade de P&D visando o desenvolvimento de uma máquina hidrocínética para comunidades isoladas na Amazônia. Tal turbina seria então desenvolvida considerando os seguintes aspectos:

- Evolução tecnológica do projeto hidrodinâmico, baseada no uso intensivo de técnicas de simulação numérica e ensaio de modelo reduzido.
- Desenvolvimento de um modelo compacto, de baixo custo que permitisse seu transporte para regiões remotas e a fácil instalação de unidades;
- Redução de custo através do uso de materiais plásticos e layout funcional;
- Avaliação da sustentabilidade do uso de tal tecnologia, comparativamente com alternativas renováveis

para a região (em particular painéis solares fotovoltaicos).

O projeto P&D ELETRONORTE - UnB proporcionou uma nova concepção inovadora de THC que vem respondendo com sucesso a tais premissas ([23][24]). Um protótipo de uma pequena máquina foi desenvolvido e vem sendo testado no presente momento. Tal protótipo foi conhecido como Turbina hidrocínética Geração 3 e fecha um ciclo de desenvolvimento em parceria entre as duas instituições, abrindo uma série de desdobramentos de utilização e aprimoramento da tecnologia.

## II. A TURBINA HIDROCINÉTICA GERAÇÃO 3

A pesquisa sobre turbinas hidrocínéticas na UnB teve início na década de 80, com o projeto da primeira turbina desenvolvida pelo grupo de pesquisas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília-UnB em 1987. A partir deste ano, vários protótipos de máquinas foram concebidos e testados em contextos de pequenos projetos de pesquisa. De fato, a primeira unidade operacional construída, denominada **Geração 1**, foi instalada em julho de 1995 em Correntina-BA, e teve como objetivo atender a um posto médico desta região. Essa turbina possui alguns aspectos inovadores, os quais foram fundamentais para aumentar o aproveitamento da energia hidráulica disponível, e permitiram uma construção bastante robusta. A máquina desenvolvida foi composta por um rotor axial de 2 (duas) pás com uma grade cônica de proteção frontal contra eventuais destroços flutuantes. Um estator com pás diretrizes direcionando o fluxo da água que entra na turbina para melhorar o ângulo de ataque na hélice, otimizando a transformação da energia hidráulica em mecânica. Em testes realizados em campo, os melhores resultados para esta turbina foram obtidos com uma velocidade de escoamento de 2 m/s e seis pás, oitenta centímetros de diâmetro e coeficiente de solidez de 30%. Nestas condições a máquina gera 1,5 kW, atendendo plenamente a necessidade de energia do pequeno posto de saúde. Tal máquina funciona eficientemente até o presente momento.

Com a instalação de um difusor cônico - usando o mesmo conceito de turbinas eólicas com difusor, surgiu a turbina hidrocínética **Geração 2**, instalada também em Correntina-BA em Agosto de 2005 e no Maracá - AP (Outubro 2006) (Município de Mazagão). O uso do difusor gera uma desaceleração do escoamento na saída da turbina criando uma região de baixa pressão neste ponto, aumentando a velocidade do escoamento na entrada e conseqüentemente o coeficiente de potência da máquina. Esta melhora de desempenho foi efetivamente observada em testes realizados, porém, um aumento das dimensões devido ao uso do difusor, torna esta máquina inadequada para uso em certos rios com baixa profundidade.

Com a evolução do projeto e a busca por uma máquina axial livre com difusor mais compacta, portátil e com um desempenho hidrodinâmico melhorado, foi concebida a turbina hidrocínética **Geração 3** (Fig 1 a 3). A superfície interna da carcaça perfilada age como um difusor, reduzindo a pressão na saída. O gerador agora também foi integrado ao

núcleo, formando um conjunto com o rotor. Estas são algumas importantes inovações nesta nova geração.

Este tipo de geometria proposto visa à obtenção de uma máquina axial com um bom desempenho hidráulico, como o de uma turbina axial convencional, que pode alcançar uma eficiência hidráulica próxima a 90%. Por outro lado, como estabelecido pelo limite de Betz para máquinas de fluxo livre, a energia máxima que pode ser convertida da energia cinética na área do rotor de projeção é 59.3% ( $C_{p_{max}} = 0.59$ ). Esta baixa eficiência deve-se à redução da velocidade do fluxo na entrada da turbina e induz a uma baixa exploração de energia cinética. O uso de um difusor partido faz com que o escoamento externo da turbina passe pelo vão entre a carcaça e o difusor, levando a um controle da camada limite na superfície interna deste difusor. Devido a este controle é possível utilizar um difusor mais curto, de um ângulo de abertura maior que  $8^\circ$ , um resultado muito mais econômico do que os difusores longos usados nas gerações anteriores.

A concepção do *design* hidrodinâmico é inovadora, e permite uma plena resposta aos objetivos de evolução tecnológica da máquina.

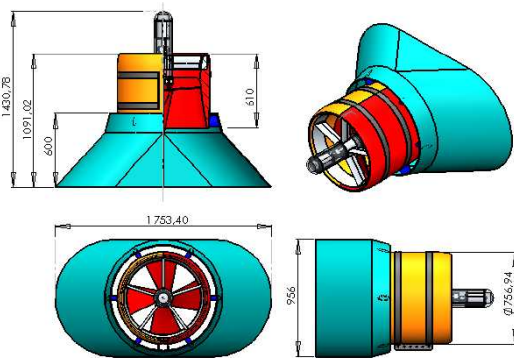


Figura 1. Turbina hidrocínética Geração 3

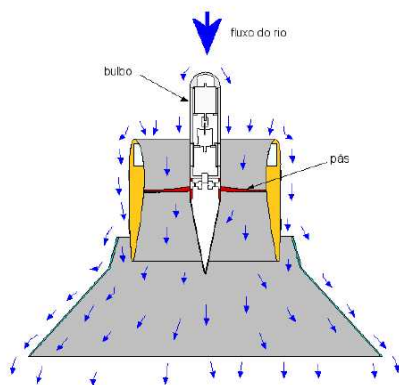


Figura 2. Turbina G2 – Concepção hidrodinâmica

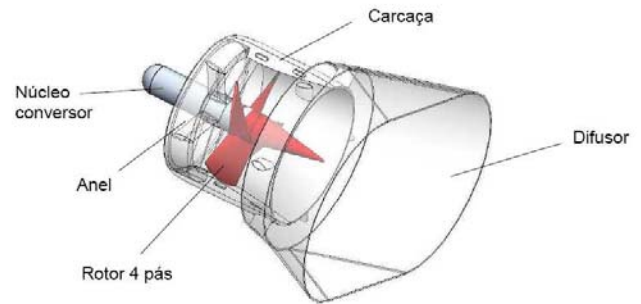


Figura 3. Turbina G3 – Partes principais menção no texto.

Para o desenvolvimento tecnológico desta turbina, três abordagens foram consideradas:

a) Abordagem convencional para o desenvolvimento de projeto hidrodinâmico de máquinas hidráulicas: Nesta etapa foi possível uma concepção preliminar das partes, baseadas na teoria de máquinas de fluxo carenadas;

b) Simulação do escoamento: Através de ferramentas de CFD (Computational fluid dynamics) foi possível a otimização da geometria da máquina, prevendo sua curva de eficiência para diferentes condições de operação;

c) Ensaio em modelo reduzido: A partir de ensaios em túnel de vento foi possível realizar a verificação dos resultados numéricos obtidos e a posterior melhoria dos mesmos;

A partir do desenvolvimento do projeto hidrodinâmico e mecânico da turbina, foi possível uma construção, e posterior ensaio, do protótipo da turbina G3.

Este desenvolvimento tecnológico foi complementado pela avaliação da inserção desta tecnologia em um projeto piloto em uma comunidade isolada.

### III. PROJETO HIDRODINÂMICO DA TURBINA G3

#### A. Simulação computacional (CFD)

Para que sejam executadas simulações de escoamentos na turbina hidrocínética, foi utilizada uma estratégia de cálculo que consiste em considerar um domínio de cálculo completo no interior e no exterior da máquina. De fato este tipo de simulação considera o caso real, de uma máquina axial submetida a uma condição de fluxo livre. Considera-se também nas presentes simulações, uma movimentação relativa do rotor em relação às demais partes da turbina, envolvendo uma simulação em regime não permanente (simulação instacionária com geometria variável). Os atuais códigos de cálculo (tal como o ANSYS/CFX, utilizado no presente trabalho) permitem a utilização desta alternativa. Métodos numéricos não-permanentes devem ser utilizados, considerando cálculos com domínio variável. Este tipo de simulação requer uma inserção no melhor da pesquisa da CFD para a simulação de turbomáquinas, requerendo o uso de algoritmos avançados e exigindo um esforço computacional bastante dispendioso. A partir da simulação recupera-se uma

série de informações de interações entre componentes em regime transiente, e como estes efeitos interagem com o desempenho da máquina. Trata-se de uma estratégia sobre as quais as ferramentas de simulação estão prontas, exigindo-se, no entanto, uma potência de cálculo bastante grande. Este tipo de simulação é ideal para a otimização final de um projeto e para uma análise de desempenho mais refinada da máquina.

A simulação do problema em questão foi realizada em computadores Pentium 4 com 3.5 GHz e 2 GB RAM. Foi considerado o modelo de sub-domínio rotativo em torno do rotor da turbina, no sentido de considerar o movimento rotativo das pás. Simulações em regime permanente foram executadas para três velocidades do escoamento livre, e para diferentes rotações do rotor. Para tais resultados, visualizações foram reproduzidas os torques sobre cada pá foram calculados, utilizando o programa de pós-processamento do CFX. A partir do cálculo do torque foi obtida a potência da máquina para cada condição específica da máquina.

A Figura 4 apresenta a vista 3D da malha sobre o domínio de cálculo. A malha obtida é composta de 179.273 nós, que se conectam para compor 797.468 elementos.

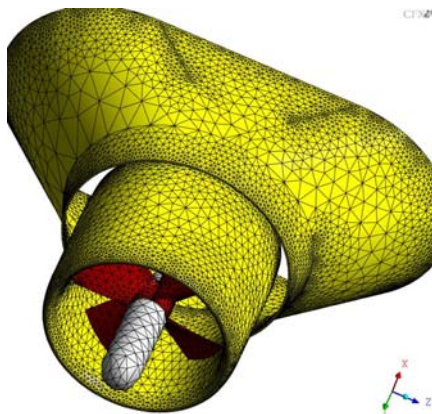


Figura 4 – Detalhe da malha de cálculo 3D para cálculo do escoamento

Apresenta-se uma análise do escoamento na turbina considerando a condição nominal de projeto da máquina ( $V_0=2$  m/s e  $N=100$  RPM). Tais resultados são apresentados em forma de visualização das linhas de corrente e dos campos de velocidade e pressão.

A figura 5 apresenta a visualização das linhas de corrente 3D que fluem na direção da máquina. As cores destas linhas quantificam o valor da velocidade axial. Observa-se que o arranjo geométrico proposto pelo difusor faz com que na entrada pouca desaceleração seja observada. Alinhando as linhas de corrente com o eixo da máquina.

Esta consideração pode ser observada nas vistas 2D dos campos de velocidade axial apresentadas na figura 6. Percebe-se que pouca desaceleração do escoamento é verificada até a entrada do rotor, ou seja, praticamente a turbina dispõe da energia cinética relativa à velocidade de 2 m/s para ser convertida em movimento rotativo. É importante observar que embora a geometria do difusor seja assimétrica e não-cônica, o desenho proposto possibilitou obter um aumento de velocidade na garganta da máquina, com um comprimento reduzido do difusor.

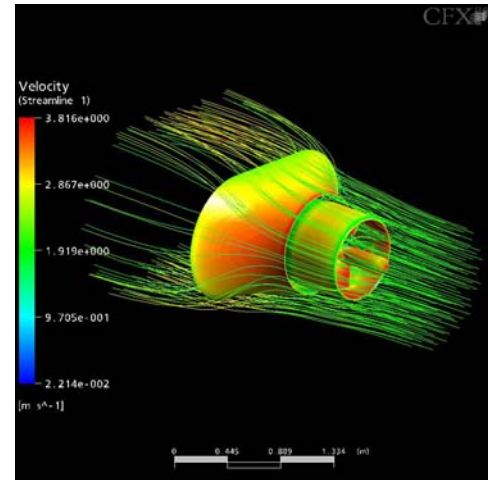


Figura 5. Linhas de corrente na entrada do escoamento na turbina

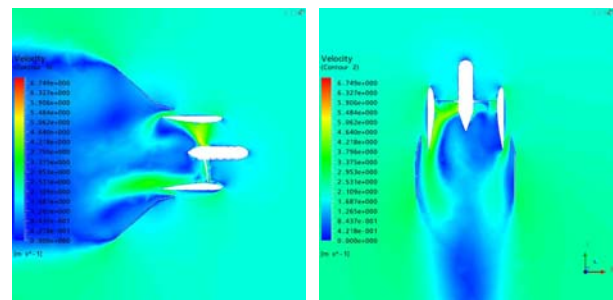


Figura 6. Campo de velocidade na turbina

A partir da simulação numérica para as diferentes condições de operação da máquina foi possível obter as curvas características da turbina expressas em termos da variação de seu coeficiente de potência. Tais parâmetros característicos são definidos como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0} \quad (2)$$

Nestas equações,  $P$  é a potência gerada pela turbina,  $\rho$  é a densidade da água,  $A$  a área da seção transversal do rotor,  $V_0$  a velocidade do escoamento livre,  $R$  o raio do rotor e  $\omega$  a rotação dada em rad/s.

A figura 7 apresenta a curva característica da máquina para diferentes condições de operação.

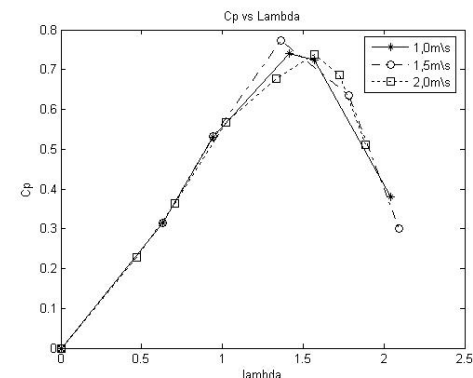


Figura 7. Coeficiente de potência para a máquina G3

### B. Ensaio em túnel de vento

Os ensaios para a análise da performance do modelo reduzido foram realizados no túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB). O túnel tem secção de teste de 2,6 metros de comprimento e uma seção transversal de 0,6 m x 0,6 m, com um intervalo de velocidade média de escoamento livre de 2 a 25 m/s. A intensidade de turbulência dentro do túnel é menor que 2%. No bocal bidimensional convergente de entrada da secção de teste existem telas hexagonais, estilo colméia, para estabilização do escoamento. O motor do túnel é um motor assíncrono de 40 CV de potência. O rotor do túnel de vento é um rotor de oito pás, com 1,5 m de diâmetro.

O túnel de vento opera em ciclo aberto e a pressão dentro da secção de teste é ajustada à pressão atmosférica local. A velocidade do escoamento do ar é medida através de um tubo de Pitot localizado na secção de teste, com precisão de 0,5 mmH<sub>2</sub>O. O modelo reduzido é alinhado no centro da secção de teste onde a velocidade do escoamento é homogênea, fixado por um suporte de alumínio fabricado especialmente com esta finalidade. As dimensões do modelo comparadas à secção de teste são compatíveis para realizar os ensaios em escala reduzida. As figuras 8 e 9 apresentam uma visão geral da montagem experimental utilizada para o ensaio.

A metodologia experimental desenvolvida permitiu a obtenção das curvas do coeficiente de potência do modelo variando com a razão de velocidade periférica do rotor. Esta curva é apresentada na figura 10.

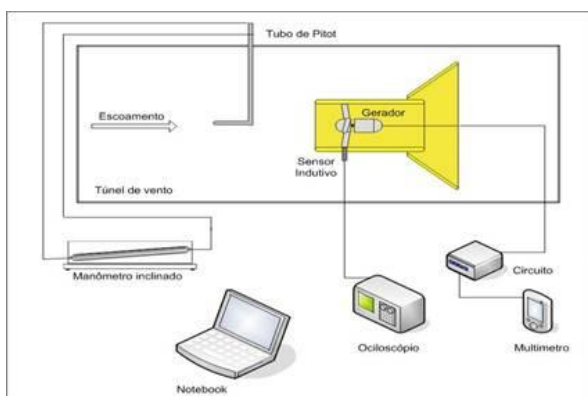


Figura 8. Montagem experimental para ensaio em túnel de vento



Figura 9 Montagem experimental foto do ensaio

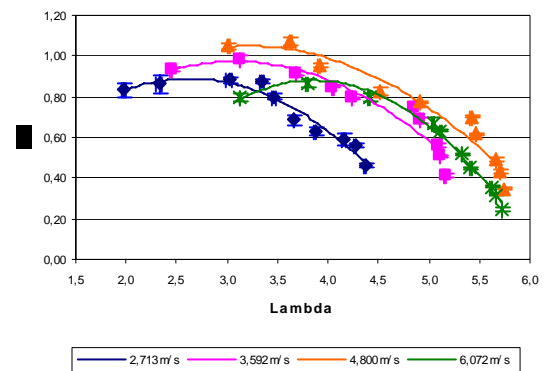


Figura 10. Coeficiente de potência – Ensaios experimentais

### C. Construção e teste do protótipo

Baseado no desenvolvimento do projeto conceitual hidrodinâmico e a partir de ajustes oriundos da análise dos resultados numéricos e experimentais, foi possível a construção de um protótipo. Tal protótipo foi construído com as seguintes características:

- **Carcaça e difusor:** As partes que compõem a carcaça e o difusor foram moldadas em fibras de vidro, recobertos por uma camada de geocolt e pintura automotiva.
- **Núcleo conversor:** No interior da máquina um gerador assíncrono DC, de 750 W (12 V) é instalado acoplado a um sistema de multiplicação com engrenagens planetárias. O eixo principal é suportado por mancais de rolamentos cônicos de esfera, e com um retentor polimérico para garantir a estanqueidade das partes mecânicas internas.
- **Rotor:** As quatro pás da turbina são confeccionadas em material polimérica e usinadas em CNC na forma definidas pelo projeto hidrodinâmico das pás. O cubo do rotor permite uma regulagem de ângulo das pás, no sentido de permitir um melhor aproveitamento hidrodinâmico da conversão para diferentes velocidades do rio;

- **Anel:** O anel metálico que suporta o núcleo da máquina na carcaça; Este anel foi fundido em alumínio ordinário.

Uma imagem geral da vista explodida da turbina é apresentada na figura 11, e uma foto geral do protótipo é mostrado na figura 12.

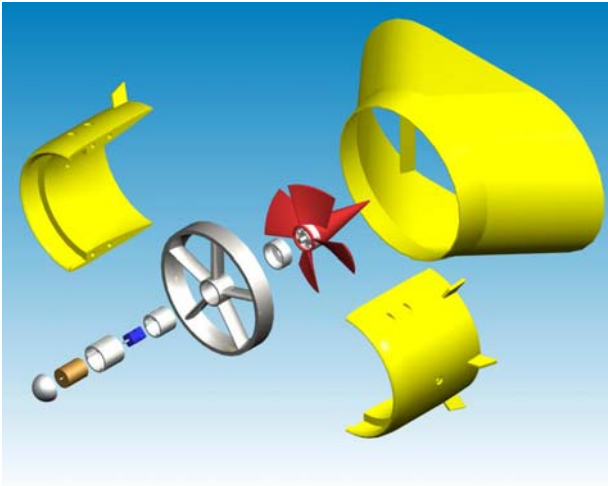


Figura 11. Vista explodida do protótipo da turbina G3

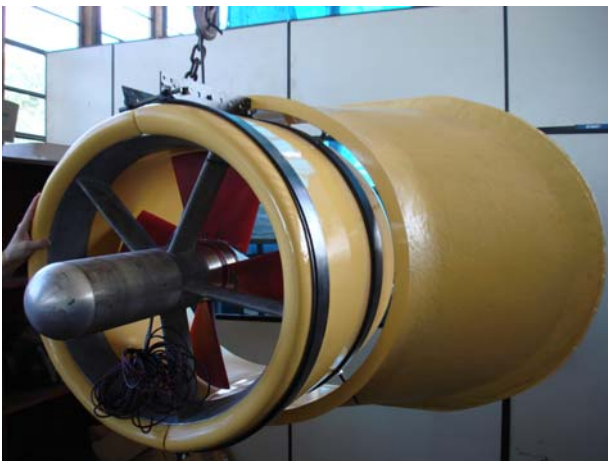


Figura 12. Foto do protótipo

Os ensaios do protótipo foram realizados de maneira equivalente aos ensaios em modelo reduzido. No entanto, uma única velocidade de corrente foi utilizada (~1 m/s). O ensaio foi efetuado nem um canal artificial de profundidade de 1,5 m com largura de 4 m. O protótipo da turbina foi localizado no centro do canal. O gerador foi submetido à diferentes cargas resistivas, providas por um reostato. A velocidade do rio foi medida por um molinete calibrado e a rotação da máquina foi obtida por um sensor capacitivo instalada no núcleo da máquina, que transmitia em tempo real a rotação do eixo. Para diferentes cargas resistivas da máquina, foi mensuradas a potência gerada pelo gerador e sua rotação. Desta maneira a curva de potência pode ser obtida. Tal curva é apresentada na figura 13. Observa-se que os valores obtidos foram compatíveis com as previsões numéricas e de ensaio em túnel de vento.

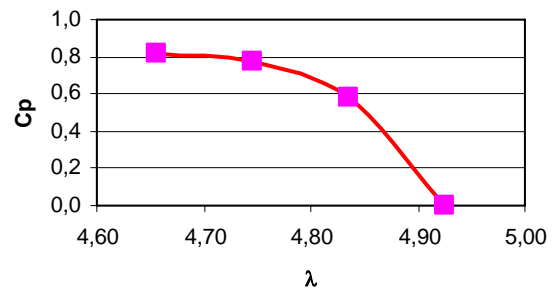


Figura 13. Ensaio do protótipo – Coeficiente de potência

#### IV. COMUNIDADES ISOLADAS E AS TURBINAS HIDROKINÉTICAS

##### A. Comunidade isoladas

O conceito de comunidades remotas assumido aqui considera um assentamento humano de baixa densidade populacional, com restrições ao uso de fontes de energia convencionais (sem acesso a linhas de energia com geração centralizada), com infra-estrutura urbana deficiente, com baixo nível de atividade econômica, com difícil acesso e distante de mercados consumidores. Evidentemente tais parâmetros são pouco específicos para uma caracterização precisa de uma comunidade remota. Esta é uma definição aberta que, no entanto, torna-se operacional quando a comunidade deve ser encaixada em um planejamento de disponibilização de energia. Em geral, comunidades remotas não viabilizam implantações de sistemas de provimento de energia elétrica no senso econômico estrito, utilizando unicamente como parâmetros de análise investimento, demanda e receita.

Na Amazônia, diversos assentamentos humanos podem ser caracterizados como comunidades remotas. Várias comunidades se estabeleceram fora da sede dos municípios, muitas vezes distanciadas de eixos rodoviários. Algumas comunidades foram estabelecidas em ilhas (e. g. Arquipélago do Marajó) e muitas foram construídas a partir de assentamentos de reforma agrária as vezes com difícil acesso. Comunidades estabelecidas em reservas extrativistas ou ainda as comunidades indígenas da região enquadram-se na caracterização de comunidades remotas.

O problema de disponibilização da energia para tais comunidades é sempre um ponto crítico na implantação de infraestrutura mínima para a população isolada. Políticas públicas municipais em geral privilegiam investimentos de infra-estrutura na cidade sede do município. O problema da geração de energia em outras comunidades menores é sempre penalizado visto o baixo retorno de investimento e pela dificuldade de cobrança do uso da energia. A viabilidade deve ser vista considerando-se parâmetros mais amplos, objetivando assim a promoção do desenvolvimento susten-

tável local.

Grande parte das comunidades remotas caracteriza-se por serem compostas por comunidades tradicionais ou serem frutos da política nacional de reforma agrária. Em geral, a sustentação da população baseia-se em uma agricultura de subsistência, associada a uma atividade produtiva adicional como a pesca (peixe, camarão, caranguejo, etc.) ou produção da farinha, látex, castanha ou frutos regionais. A comercialização da produção local envolve uma série de níveis atravessadores que penalizam o preço do produto *in natura*. O extrativismo é penalizado tanto pela condição de acessibilidade do local de produção, quanto pela falta de oportunidades de agregar valor ao produto através de processos de transformação em sub-produtos mais rentáveis. O estabelecimento de ciclos produtivos para produtos extrativistas faz parte de políticas regionais sustentáveis atualmente em discussão (ou implantação) em diferentes estados da região. Este tipo de iniciativa requer sempre o suporte de disponibilidade de energia, recaindo no problema chave do presente trabalho.

### B. O Projeto piloto Poraquê

O presente projeto envolve um estudo piloto que foi instalado no Assentamento Agroextrativista do Maracá, na porção denominada de Alto Maracá (ver mapa da figura 14). Neste assentamento a castanha-da-amazônia (*Bertholettia excelsa*) é a principal fonte de renda para centenas de extrativistas há muitas gerações. Entretanto, as grandes distâncias e os obstáculos geográficos dificultam a coleta e o escoamento da produção e submetem os extrativistas a situações precárias de trabalho.

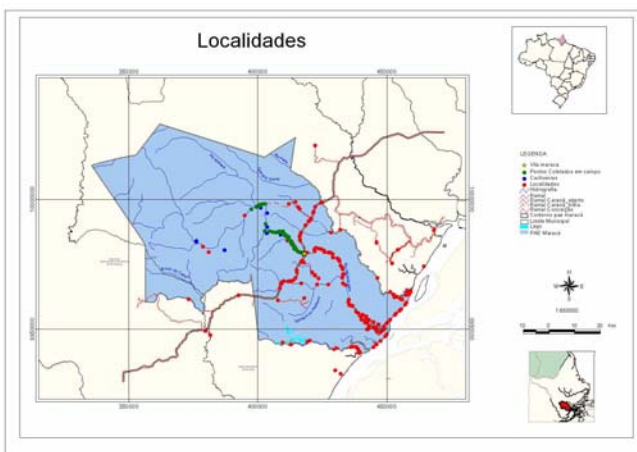


Figura 14. Localização do projeto piloto Poraquê

Para chegar ao local de armazenamento, partindo do ponto de coleta, os extrativistas são obrigados a desviar de mais de vinte corredeiras, contornando pela floresta parte do percurso. No final da safra, que coincide com o início da seca dos rios, são obrigados a arrastar pela floresta a produção e os batelões. Além das dificuldades citadas, existe a possibilidade de comprometimento da qualidade da castanha, devido às condições de armazenamento a que submetem a produção. Com base num diagnóstico sobre o potencial energé-

tico do Rio Caraná no sul do Amapá, observou-se que em suas corredeiras seria possível aproveitar a energia cinética utilizando a turbina hidrocínética para fornecimento de 400 W a 1 kW de energia elétrica. Ao mesmo tempo, o projeto atende as metas de universalização de energia, previstas para serem concluídas em 2013 no município de Mazagão.

O Projeto Poraquê é uma parceria entre o Conselho Nacional dos Seringueiros (CNS) e o Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília. O mesmo possui financiamento adicional do Ministério das Minas e Energia (MME) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), com forte sinergia com o presente projeto.

No PAE Maracá não existe nenhum tipo de beneficiamento da castanha em larga escala. A única iniciativa de agregação ocorre com a fabricação de biscoitos caseiros em Vila Maracá, comercializados localmente e na Feira do Produtor, no município de Macapá. Além do extrativismo da castanha, as atividades madeireira e mineral (exploração de cromita) são atividades potenciais no PAE Maracá. A extração manejada da madeireira está prevista no Plano de Uso Múltiplo (PU), em regime comunitário e a atividade mineral, por outro lado, está sendo negociada com por uma empresa do ramo. As duas atividades têm merecido a atenção das instituições ambientais e motivado conflito entre os assentados. A madeira, por exemplo, representa o principal ativo ambiental da região, muito mais rentável que outros recursos florestais não-madeireiros. Deixar de explorar este ativo implica em deixar de gerar um valor econômico maior. A extração ilegal de ouro representou outra atividade econômica para muitos assentados e forasteiros na década de 90. Contudo, vem sofrendo queda na produção nos últimos anos e já não representa ameaças, segundo relatos dos assentados. Do ponto de vista ambiental, a contaminação da cabeceira dos rios por mercúrio pode trazer danos consideráveis para o bem-estar dos produtores e para o meio ambiente. Entretanto, ainda não foram realizados estudos sobre impactos sócio-ambientais e também da renda potencialmente auferida. Sabe-se, contudo, que, historicamente, a presença de empreendimentos minerais, sejam eles legalizados ou não, costumam trazer mudanças na vida social das comunidades locais. Como alternativa para a racionalidade das atividades econômicas do Alto Maracá, pode-se promover a coleta de castanha complementada com a agricultura. Ressalta-se que essa atividade é tradicionalmente exercida no Alto Maracá. Pretende-se, desta forma, garantir um produto competitivo no mercado e condições mínimas de sobrevivência aos extrativistas, conservando a área de castanhais nativos, ameaçados por atividades degradantes como a exploração ilegal de madeira e garimpos.

O projeto Poraquê, envolvendo também parceiros locais, tem, entre seus objetivos, a instalação de um secador solar multiuso para a pré-secagem de castanha-da-amazônia. Esse processo permitirá melhoria da qualidade do produto ao reduzir as condições favoráveis à proliferação de fungos, comuns em nozes e amêndoas, e que tem sido um fator importante na redução das exportações para a Europa e EUA.

Além disso, a pré-secagem possibilitará um tempo mais longo de armazenamento em condições apropriadas, pelo menos até o período da entressafra. Dessa forma, o extrativista do PAE Maracá terá condições de negociar um preço melhor na entressafra, além de remunerar e manter a estrutura de beneficiamento montada pela comunidade.

A produção de energia é suficiente para atender a infraestrutura local do entreposto (iluminação e eletrodomésticos) e, uma vez que não há consumo de energia pelo secador multiuso à noite, toda a potência da turbina poder ser usada neste horário para a iluminação ou outra demanda de interesse comunitário. Em razão da multiplicidade de benefícios que a energia proporciona, um posto de saúde e uma escola de ensino fundamental são algumas dessas demandas que podem ser reivindicadas pelos assentados.

O modelo de gestão do Projeto Poraquê está sendo construído com a participação dos principais atores locais, organizados em suas entidades representativas: Associação dos Trabalhadores do Assentamento Agroextrativista do Maracá (ATEXMA), Conselho Nacional de Seringueiros (CNS) e instituições públicas como a Prefeitura do Município de Mazagão e a Superintendência Regional do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA/AP). Ao final das atividades coordenadas pelo grupo de pesquisadores, espera-se que os parceiros do Projeto Poraquê, em especial a ATEXMA, estejam aptos a assumir a sua gestão. Para isso, estão previstos treinamentos para membros da comunidade sobre o funcionamento da tecnologia, noções de conversão e uso da energia, e, ainda, procedimentos básicos de operação da turbina e do secador solar multiuso.

Para maior eficácia no gerenciamento, os extrativistas vêm recebendo treinamento que visa à manutenção do sistema em funcionamento. Vale ressaltar que estão sendo respeitadas as especificidades sócio-culturais em todas as fases do Projeto Poraquê. Uma equipe interdisciplinar atua em diversas frentes, procurando agir de maneira participativa com todos os atores locais. Essa metodologia participativa e interdisciplinar constitui um diferencial em projetos de gestão de energia alternativa em comunidades isoladas e tem como finalidade à autonomia na utilização da estrutura disponibilizada pelo projeto, após a saída dos pesquisadores.

### C. Atividades de campo realizadas

No sentido de implantar um projeto piloto com base na geração de energia com turbinas hidrocinéticas, as seguintes etapas foram executadas:

**Estabelecimento de base conceitual de energia para comunidades isoladas:** Uma base conceitual sobre o uso sustentável da tecnologia de turbinas hidrocinéticas foi construída. Este conhecimento permitiu o desenvolvimento de uma metodologia de inserção tecnológica em comunidades isoladas, bem como avaliou comparativamente a tecnologia proposta em face de outras opções de energia renovável.

**Diagnóstico da comunidade:** O diagnóstico da comunidade foi consolidado com base nas informações disponíveis em documentos dos governos do estado e município, assim

como no levantamento de dados pelo grupo de pesquisadores, em missões de campo. Reuniões locais envolvendo a comunidade e a equipe de pesquisadores, assim como uma forte aproximação com a associação de produtores, foram necessárias para um mapeamento das necessidades locais e planejamento da inserção da tecnologia.

**Fortalecimento de uma rede de parcerias locais:** O presente projeto permitiu o estabelecimento de uma rede institucional local em torno do projeto demonstrativo envolvendo o Governo do Estado e do Município do Mazagão, a ELETRONORTE S/A, as associações locais e pesquisadores do IEPA. Este desenho de parcerias permitiu não somente a plena execução do projeto, como também a consolidação do modelo de uso sustentável de unidades geradoras baseadas na tecnologia proposta.

**Instalação do sistema de geração:** Uma unidade de geração com 1kW foi instalada no Maracá (Turbinas G2). O esforço para transporte e instalação da unidade foi uma das grandes dificuldades do projeto, tendo em visto o difícil acesso à comunidade. A rede de parcerias institucionais e a participação contínua da comunidade viabilizou esta ação e proporcionou uma agilidade ao processo de internalização da tecnologia, assim como a adoção da unidade pela comunidade.

**Planejamento participativo para gestão da energia:** A partir do estabelecimento de um ambiente local favorável para o desenvolvimento do projeto, bem como para o fortalecimento do uso da energia para fins produtivos e para melhoria de infra-estrutura social da comunidade (instalação de uma escola), atividades de gestão participativa da energia foram realizadas. A partir de treinamento e oficinas, incentivou-se o repasse da tecnologia para a comunidade e construiu-se um desenho de gestão e uso da eletricidade que permita o aumento de renda da comunidade a partir da secagem da castanha. O planejamento da eletrificação, construído de maneira participativa, consolidou um envolvimento da comunidade com a gestão da unidade e na agregação de valor à produção local.

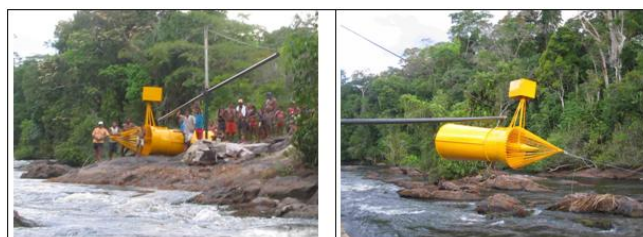


Figura 15. Fotos turbina G2 instalada no projeto Poraquê



Figura 16. Fotos turbina G2 em operação



#### D. Indicadores ambientais da tecnologia de turbinas hidrocínéticas

Para avaliar os indicadores ambientais da turbina hidrocínética inicialmente um conjunto de informações construtivas da turbina é levantado. Foram contabilizados os principais pesos de materiais associados à manufatura do modelo Geração 2, considerando seus diferentes subsistemas. Com base nestas características, são construídos os diferentes indicadores ambientais associados à tecnologia. A estimativa de emissões é efetuada a partir da contabilização dos materiais de base (aço, alumínio, cobre, etc.). Emissões adicionais podem ser consideradas levando-se em conta os processos construtivos das partes (usinagem, soldagem e pintura), assim como no transporte dos materiais entre a zona industrial e a montagem da máquina, até a instalação. No presente trabalho, as emissões associadas ao transporte do sistema não serão consideradas, tendo em vista que tais valores devem ser também estimados para todas as outras tecnologias. Portanto, somente para efeito de inter-comparação entre tecnologias, os componentes de emissões e energia associados ao transporte do sistema até a comunidade não serão apresentados no presente trabalho.

Com base nos resultados obtidos, pode-se observar que os valores de emissão, associados à tecnologia de turbinas hidrocínéticas (**13,64 g de CO<sub>2</sub>eq por kW.h**), é bem próximo às estimativas de turbinas eólicas (tabela 1) e bem inferior às emissões associadas à tecnologia de painéis fotovoltaicos (tabela 2). O mesmo argumento também pode ser feito para energia dependida na manufatura (**0,15 MJ/kW.h**). Tal padrão de emissões é considerado razoável, e é compatível com diferentes tecnologias de energia renováveis.

TABELA I. EMISSÕES E ENERGIA - ENERGIA EÓLICA

| Referências | Energia (MJ/kW.h) | Emissões (g de CO <sub>2</sub> eq/kW.h) |
|-------------|-------------------|---|
| [25]        | 0,15              | 8,0                                     |
| [26]        | 0,118             | 9,59                                    |
| [29]        | 0,1               | 7,1                                     |
| [28]        | 0,12              | 9,2                                     |

TABELA II. EMISSÕES E ENERGIA – PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

| Referências | Energia (MJ/kW.h) | Emissões (g de CO <sub>2</sub> eq/kW.h) |
|-------------|-------------------|---|
| [29]        | -                 | 170                                     |
| [28]        | 0.3               | 178                                     |

Estabelecendo uma relação de custos ambientais a partir da valoração de emissões seguindo a metodologia Externe<sup>[18]</sup>, pode-se quantificar o custo ambiental da tecnologia em **0,41 centavos de R\$** (equivalente à **0,14 Centavos de**

**Euro**). Comparando com os valores da tabela 3, observa-se que a tecnologia é totalmente compatível com os valores obtidos para geração através de turbinas eólicas (0,16 Centavos de Euro) e micro-centrais hidrelétricas (0,11 Centavos de Euro), o que demonstra a competitividade da tecnologia em termos de indicadores ambientais.

Como comentado anteriormente, a presente estimativa necessita ser complementada pelo estudo de transporte até a localidade que o sistema irá operar. Este estudo comparativo deve ser efetuado considerando a acessibilidade da comunidade e o peso do sistema. Nota-se que tal estudo deve ser efetuado para todas as demais tecnologias.

TABELA III. CUSTOS AMBIENTAIS EXTERNE<sup>[25]</sup>

| Tecnologia | Custos (Centavos de Euro/kW.h) |
|------------|--------------------------------|
| Solar (PV) | 0.88                           |
| Eólica     | 0.16                           |
| mHidro     | 0.11                           |

#### D. Indicadores econômicos da tecnologia de turbinas hidrocínéticas

Inicialmente um levantamento de custos de produção e operação é apresentado na tabela 4. Tais valores serão utilizados para o cálculo do custo do kW.h e serão adicionados ao custo ambiental calculado anteriormente. Observa-se nesta tabela que os custos de instalação tem valores que podem ser considerados altos. Isto se deve principalmente devido à questão do transporte e instalação em região de difícil acesso. Este é um dos importantes fatores limitantes da instalação de sistemas descentralizados em comunidades isoladas. A redução do custo da energia, passa pela viabilização de estratégias de redução de custos a partir do compartilhamento de responsabilidades da instalação com a comunidade, envolvendo governos locais e associações, assim como na otimização do transporte do sistema com a logística local de suprimento da comunidade.

A tabela 5 de indicadores econômicos pode então ser construída. Considerando uma taxa de desconto de 10 % ao ano, pode-se obter o custo da energia em torno de **R\$ 1,91 por kW.h**, o que é compatível com custos de sistemas renováveis instalado recentemente no país.

TABELA IV . CUSTOS DE INVESTIMENTO E O&M

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Custo Equipamento       | R\$ 15.000           |
| Transporte              | R\$ 6.500            |
| Obras civis             | R\$ 13.500           |
| Apoio Montagem em campo | R\$ 6.500            |
| <b>Total instalação</b> | <b>R\$ 41.500</b>    |
| Operador                | R\$ 4.550/ano        |
| Manutenção              | R\$ 1.050/ano        |
| <b>Total O&amp;M</b>    | <b>R\$ 5.600/ano</b> |

TABELA V. INDICADORES ECONÔMICOS

| IE1 | Nome              | Valor  | Unidade  |
|-----|-------------------|--------|----------|
| IE2 | Investimento      | 41.500 | R\$/kW   |
| IE3 | Custos O&M        | 0,864  | R\$/kW.h |
| IE4 | Custo energia     | 1,91   | R\$/kW.h |
| IE5 | Variação de renda | 50     | %        |

## V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições do Professor Aldo João de Souza, e do apoio da equipe do Amapá em particular o Dr. Alan Cavalcanti Cunha. Institucionalmente o presente projeto agradece imensamente aos parceiros locais (ATEXMA, Governo do Estado do Amapá – SEDE, IEPA e Prefeitura do Município de Mazagão (AP)).

Ressalta-se ainda que este projeto é germinado às ações do projeto Poraquê, parcialmente financiado pelo Ministério de Minas e Energia (Programa Luz para Todos) através do projeto CNPq/CTEneg no 504822/2003-9.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. S. Bahaj., L. E. Meyers., “Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production”, *Renewable Energy* Vol. 28, pp. 2205-2211, 2003.
- [2] F. Bet., H. Grassmann, “Upgrading conventional wind turbines”, *Renewable Energy* Vol. 28, pp. 71-78, 2003.
- [3] B. Francovic, I. Vrsakovic, “New high profitable wind turbines”, *Renewable Energy* Vol. 24, pp. 491-499, 2001.
- [4] A. M Gorlov, The Helical Turbine: “A New Idea for Low-Head Hydropower”, *Hydro Rev.*, Vol. 14, No. 5, pp. 44-50, 1995.
- [5] A. N. Gorban, A. M. Gorlov, V. M. Silantsev, “Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow”, *ASME J. of Energy Resources Technology*, Vol. 123, pp. 311–317, 2001
- [6] D.R.S. Guerra, A. L. A. Mesquita, “Development and Testing of Small Darrieus-Type Turbine for Tidal Current in the Mouth of the Amazon”, 14th Congress of Mech. Eng., Bauru-Brazil, 1997.
- [7] H. Grassmann, F. M. Bet, M. Ceschia, M. L. Ganis, “On the physics of partially static turbines”, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 491–499, 2003.
- [8] H. Grassman, M. L. Ganis, “On partially static Kaplan turbines”, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 179–186, 2005.
- [9] A. Inagaki., T. Kanemoto, Y. Yonayama, M. Maruyama, “Proposition of gyro-type hydraulic turbine to coexist with natural ecosystem”, 22th IAHR Symp. Hydraulic Machines and Systems, Stockholm, Sweden, 2004.
- [10] T. Kanemoto, H. Misumi., M. Uno, T. Kashiwabara, S. Akaike, M. Nemoto, “Development of New Type Hydraulic Turbine Suitable for Shallow Stream”, Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21<sup>st</sup> IAHR Symposium September 9-12, Lausanne, Switzerland 2002.
- [11] S. Kiho, M. Shion., K. Suzuki, “The power generation from tidal currents by Darrieus turbine”, Proc. of World Renewable Energy Conference, pp. 1242-1245, 1996.
- [12] A. L. A Mesquita., C. M. V. Serra, D. O. A. Cruz, “A Simplified Method for Axial-Flow Turbomachinery Design”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 21, 61–70, 1999.

- [13] A. L. A. Mesquita, C. J. Blanco, M. S. Gouveia, “Análisis Hidrodinámica de Rotores Axiales para Uso de Energía Cinética de los Ríos”. *Revista Informacin Tecnológica del Chile*, vol. 11:2, 2000.
- [14] O. Pish, “Micro-Hydropower: Status and prospect’s”, *Prof. IMechE. A: J. of Power and Energy*, Vol. 216, pp. 31–40, 2002.
- [15] F. Ponta, G. S. Dutt, “An improved vertical-axis water-current turbine incorporating a channelling device”, *Renewable Energy* Vol. 20 pp. 223–241, 2000.
- [16] S. H. Salter, “Proposal for a large, vertical-axis tidal-stream generator with ring-cam hydraulics”, Proc 3rd European Wave Energy Conf, Patras, Greece, 1998.
- [17] G. L. Tiago Filho., “The state of art of Hydrokinetic power in Brazil”, Waterpower XIII Conference, Buffalo - New York, USA, 2003.
- [18] Underwater Electric Kite, <http://uekus.com>, cap. in January 2005.
- [19] R. Van Els, C. O. Campos, A. M. Henriques, L. F. Balduino, “Hydrokinetic Propeller Type Turbine for the Electrification of Isolated Householders or Community and Social End-Users”, 17th Congress of Mech. Eng., S. Paulo, Brazil, 2003.
- [20] J. S. A. Souza, R. Van Els, R., C. O. Campos, A. C. P. Brasil Junior, “Alternativa Energética Sustentável: Considerações Sobre Geração e Utilização de Energia de Recursos Renováveis em uma Comunidade de Castanheiros na Amazônia”, III Encontro da ANPAS, Brasília, 2006
- [21] J. S. A. Souza, R. Van Els, A.C.P. Brasil Junior, “The Use of Sustainable Energy Alternatives With Renewable Resources in The Extratropical Settlement Maracá in Brazil”, IV International Conference for Renewable Energy, Energy Saving and Energy Education., Cuba, 2005
- [22] C. Frate, J. S. A. Souza, A.C.P. Brasil Junior., “Electrification policy for isolated communities in Brazil and sustainable development indicators”, Rio 6 - World climate and energy Event, Rio de Janeiro, 2006.
- [23] A. C. P. Brasil-Junior, L.B.R. Salomon, R. Van-Els, W. Ferreira, “A new conception of hydrokinetic turbine for isolated communities in amazon”, in Proc. of CONEM 2006, Recife 2006.
- [24] F.A.M. Lula, A.C.P. Brasil Junior., L.B.R. Salomon, R. Nogueira, P. Maruzewsky-Gaud, “Experimental Study Of A New Design Of Hydrokinetic Turbine”, Proc. of CONEM 2006, Recife, 2006
- [25] M. Lenzena, J. Munksgaard, Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications, *Renewable Energy*, 26, pp 339–362, 2002.
- [26] L. Schleisner, Life cycle assessment of a wind farm and related externalities, *Renewable Energy*, 20, pp. 279-288, 2000.
- [27] K. R. Voorspools., E. A. Brouwers, W. D. D’haeseleer, Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in emission-free power plants: results for the Low Countries, *Applied Energy*, 67, pp 307-330, 2000.
- [28] Y. Kimmoku, Life cycle CO2 emissions of a Photovoltaic/wind/diesel generating system, *Electr. Eng. In Japan*, 138, 2, 923-930, 2002.
- [29] M. Oliver, T. Jackson, The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics, *Energy Policy*, 28 1011-1021, 2000;