

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIANA KOCK

MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA COM TURBINA HIDROKINÉTICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

JULIANA KOCK

MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA COM TURBINA HIDROcinÉTICA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. César Augusto Portolann

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA COM TURBINA HIDROELÉTRICA**, do(s) aluno(s) **JULIANA KOCK** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **062** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. MSc. César Augusto Portolann

Profa. MSc. Beatriz Vargas

Prof. MSc. Osis Eduardo Silva Leal

RESUMO

KOCK, Juliana. Micro Central Hidrelétrica com Turbina Hidrocinética. 2014. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

O Sudoeste do Paraná e Oeste de Santa Catarina necessitam de incentivos para um desenvolvimento sustentado. O objetivo do trabalho é de desenvolver um estudo sobre uma MCH hidrocinética de custo reduzido e confiável que tenha boa aceitação entre os agricultores, e conseqüentemente facilidade para a difusão do seu uso. Será elaborado um estudo deste tipo de micro-usina, num aproveitamento hidrelétrico do Rio Marmeleiro no município de Marmeleiro (PR).

Palavras-chave: MCH, hidrocinética.

ABSTRACT

KOCK, Juliana. Micro Hydroelectric Turbine with hydrokinetic.2014. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

The South West of Paraná and Santa Catarina West need incentives for sustainable development. The objective is to develop a study on a hydrokinetic MCH reduced cost and reliable that has good acceptance among farmers, and therefore to ease the spread of its use. A project of this type of micro-power plant, a hydroelectric project in the municipality of Marmeleiro (PR) river will be prepared.

Keywords: MCH, hydrokinetic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DA MICRO-CENTRAL PROPOSTA.	14
FIGURA 2 – MAPA DE MARMELEIRO, COM EVIDÊNCIA DO RIO.	15
FIGURA 3 – TURBINA HIDROcinÉTICA TIPO “EÓLICA”	16
FIGURA 4 – TURBINA HIDROcinÉTICA TIPO RODA D’ÁGUA	16
FIGURA 5 – POTÊNCIA X VELOCIDADE DA ÁGUA	18
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DA MÁQUINA CC	19
FIGURA 7 – CORTE LONGITUDINAL DA MÁQUINA CC	20
FIGURA 8 – TENSÃO GERADA POR UMA BOBINA MÓVEL EM CAMPO UNIFORME.	20
FIGURA 9 – GERADOR BIPOLAR COM COMUTADOR DE DOIS SEGMENTOS.	21
FIGURA 10 – A RODA DE BICICLETA UTILIZADA COMO GUIA DAS PÁS DA TURBINA.	22
FIGURA 11 – PÁS DA TURBINA HIDROcinÉTICA	23
FIGURA 12 – DESENHO DE PROJETO DA TURBINA HIDROcinÉTICA	24
FIGURA 13 – ROTOR E PÁS NA TURBINA HIDROcinÉTICA.	24
FIGURA 14 – ANEL DE FIXAÇÃO DAS PÁS	25
FIGURA 15 – TURBINA HIDROcinÉTICA UTILIZADA.	26
FIGURA 16 – PLACA DE IDENTIFICAÇÃO GERADOR DC	27
FIGURA 17 – GERADOR ACOPLADO A TURBINA, FORMANDO A MICRO USINA PROPOSTA.	27
FIGURA 18 – CÂMARAS (FLUTUADORES) PRESAS NA ESTRUTURA.	29
FIGURA 19 – TURBINA ACIONADA POR ÁGUA EM RIO ARTIFICIAL.	29
FIGURA 20 – SIMULAÇÃO DE CORRENTEZA DO RIO.	30
FIGURA 21 – TENSÃO NA SAÍDA E CORRENTE NA SAÍDA DO GERADOR	31
FIGURA 22 – MÁXIMA TENSÃO E CORRENTE COM CARGA RESISTIVA.	32
FIGURA 23 – SISTEMA HIDROcinÉTICO EM TESTE NA PISCINA	32
FIGURA 24 – CANAL ONDE OS TESTES DO 3º ENSAIO FORAM REALIZADOS.	33
FIGURA 25 – ENCONTRO DA ÁGUA DA SAÍDA DA TURBINA COM O RIO MARMELEIRO.	34
FIGURA 26 – MÁXIMA TENSÃO NO TESTE NA SAÍDA TURBINA PARA O ENSAIO 3.	35
FIGURA 27 – GERADOR DE INDUÇÃO	40
FIGURA 28 – RETIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA	41
FIGURA 29 – OPÇÕES DE CONEXÃO DA CARGA	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. Organização do Trabalho.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
4. A MICRO-CENTRAL COM TURBINA HIDROKINÉTICA	15
4.1. Turbinas Hidrocinéticas.....	15
4.2. Potência e Torque Gerado por Turbinas Hidrocinéticas	17
4.3. Gerador de Corrente Contínua	19
4.4. A Implementação da Micro Usina Proposta	21
5. RESULTADOS	28
5.1. Ensaio 1	28
5.2. Ensaio 2.....	31
5.3. Ensaio 3.....	33
6. CONCLUSÕES.....	35
7. REFERÊNCIAS	37
ANEXO 1 – GERAÇÃO HIDROKINÉTICA COM GERADOR DE INDUÇÃO	39
A.1.1. Gerador de Indução	39
A.1.2. Retificador Trifásico de Onda Completa	40
ANEXO 2 – OUTRAS APLICAÇÕES DE MICRO-CENTRALHIDROKINÉTICA	42

1. INTRODUÇÃO

O Sudoeste do Paraná e Oeste de Santa Catarina necessitam de incentivos para um desenvolvimento sustentável. O pequeno e médio agricultor dessas regiões pode contribuir nisso, se tiver uma maior oferta de energia elétrica, que é um elemento chave para a manufatura de produtos. Assim, ele poderá industrializar e agregar valor a produtos antes vendidos “in natura”, como por exemplo, as frutas.

Lembra-se que geralmente o agricultor recebe eletricidade no sistema monofilar, que restringe a potência em 5 KVA, insuficiente para manufatura. Um incremento na oferta de potência elétrica para o agricultor poderá ser feito por meio de micro centrais hidrelétricas (MCH) de baixo custo, mas que sejam atrativas dos pontos de vistas técnico.

As MCH com controle de frequência convencional em geral não são atrativas principalmente devido ao alto custo do regulador de velocidade (RV), que onera o custo global da planta. No sentido de tornar os micro-aproveitamentos hidrelétricos mais atrativos, este estudo propõe o uso de turbinas hidrocínéticas sem controle de velocidade. O ajuste de frequência, quando necessário, é feito posteriormente por meio de um inversor de tensão.

Este tipo de operação se caracteriza principalmente pelo baixo custo aliado à confiabilidade, evitando a construção de barragem, e operando no modo que se chama de “máxima potência” aproveitando toda energia primária para conversão energética. Estima-se que este esquema sintetize propriedades desejáveis como, por exemplo: custo inicial e de manutenção baixos, operação confiável, pouca exigência de manutenção e vida útil longa.

Assim, esse trabalho tem o objetivo geral de desenvolver um estudo sobre uma MCH hidrocínética de baixa potência, destinada à carga de baterias, onde será evidenciada a parte prática, como a verificação da coerência e eficiência de um protótipo construído com materiais reciclados.

Os objetivos específicos são:

Revisar a teoria sobre geração de energia elétrica, em particular quando se utiliza turbina hidrocínética;

Determinar as características do aproveitamento hidrelétrico por meio do levantamento topográfico e medição de vazão d'água;

Efetuar uma montagem de geração, com base nas máquinas supracitadas, no rio Marmeleiro, explorando os aspectos práticos, e estabelecendo conclusões.

Com relação à metodologia a ser utilizada para o desenvolvimento do trabalho, inicialmente, na fase de projeto serão feitos levantamentos dos materiais necessários.

1.1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é basicamente formada pela introdução, desenvolvimento teórico, metodologia, resultados, conclusão e referência.

No primeiro capítulo (introdução), é apresentada uma breve explanação de todo o conteúdo abordado no trabalho de conclusão de curso.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica, onde são vistas generalidades sobre o assunto, vantagens e desvantagens desse tipo de geração de energia, e também algumas aplicações desse sistema como forma de justificar a utilização dessa usina.

No capítulo 3 é feita sucintamente a caracterização do problema.

No capítulo 4, o foco é a discussão de assuntos pertinentes à implementação da micro-usina, como generalidades e descrição dos componentes e detalhes da construção da turbina hidrocínética.

O capítulo 5 trata da discussão de resultados obtidos durante os testes realizados, e sugestões para continuidade do trabalho.

O capítulo 6 mostra quais foram as conclusões obtidas durante a realização desse trabalho. O capítulo 7 relaciona as referências bibliográficas consultadas.

Finalmente, nos Anexos são discutidas umas alternativas de micro-central hidrocínética usando gerador de indução e retificador, e outras aplicações práticas para o esquema de geração proposto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sabe-se que uma das primeiras formas de conversão de energia hidráulica em energia elétrica utilizada pelo homem foi através do uso da roda d'água (MACINTYRE, 1983). Segundo essa mesma referência, um século antes de Cristo foram projetadas e instaladas várias rodas d'água, as quais exploravam pequenas quedas, trabalhando em baixa rotação e gerando pequenas potências.

Devido ao crescente desenvolvimento mundial, a humanidade depende cada vez mais da energia elétrica, o que leva a uma incansável busca por geração de energia renovável e limpa (MEDEIRO, VIANA e REZEK, 2005).

Segundo Shreiber (1977) uma usina hidrelétrica pode ser considerada um projeto arquitetônico complexo, ou seja, é um conjunto de obras e equipamentos que tem a finalidade de transformar energia cinética em energia elétrica através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio.

O Brasil é um dos países que mais usam esse tipo de energia, ficando atrás apenas do Canadá e dos Estados Unidos (BOARATI et al., 1999). De acordo com estudos feitos por Boarati, Shayani, Galvão, & Udeata(1999) o parque gerador hidrelétrico brasileiro é bastante complexo, onde se podem encontrar usinas de diversas capacidades energéticas.

A tabela 1 apresenta a classificação das centrais hidrelétricas quanto à potência.

Tabela 1 – Classificação das Centrais Hidrelétricas
Fonte: (Schreiber, 1977)

Centrais Hidrelétricas	Potência [W]
Micro central	$P \leq 100$
Minicentrais	$100 \leq P \leq 1000$
Pequenas Centrais	$1000 \leq P \leq 10000$
Médias Centrais	$10000 \leq P \leq 100000$
Grandes Centrais	$P > 100000$

Uma das principais características de usinas hidrelétricas é o custo de operação relativamente baixo, a possibilidade de regularização da vazão dos rios, a viabilização da navegação, a baixa emissão de poluentes, dentre outros. Porém

como desvantagem é possível citar a preocupação com florestas alagadas, deslocamento da população, e em alguns casos, emissão de gases de efeito estufa em seu reservatório (BOARATI 1999).

No sentido de lembrar, nas usinas hidrelétricas, a parte onde a água é armazenada é chamada reservatório da usina, ou de montante, fica sempre com o nível da água mais alto do que o outro lado da barragem, conhecida como jusante.

A água captada no reservatório formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis e/ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, a água é restituída ao leito natural do rio, através do canal de fuga.

Dessa forma, a potência hidráulica é transformada em potência mecânica quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire, e, no gerador que também gira acoplado mecanicamente à turbina, a potência mecânica é transformada em potência elétrica. A energia elétrica é transmitida para uma ou mais linhas de transmissão que é interligada à rede de distribuição (BOARATI et al., 1999).

O cálculo da potência instalada de uma usina é efetuado através de estudos energéticos que são realizados por engenheiros mecânicos, eletricitas e civis, onde as grandezas mais importantes são a altura topográfica e a vazão. Existem diferentes tipos de usinas, adequadas para determinadas situações, não sendo todas as hidrelétricas que necessitam de reservatório para gerar energia elétrica, o que vem a ser algo desejável, visto que a barragem é a componente de maior impacto negativo em usinas hidrelétricas.

Sempre que possível são utilizadas outras formas de geração de energia que não necessitam de barragens, cujos exemplos típicos são as usinas a “fio d’água” e as hidrocinéticas. Por outro lado, este tipo de operação de usinas requer condições especiais do rio, com ênfase para a vazão, que deve ser aproximadamente constante, para que um determinado valor de energia possa ser garantido (ELETROBRÁS, 2008).

A geração de energia utilizando turbina hidrocinética surgiu como uma alternativa sustentável. Essa turbina, juntamente com um gerador é capaz de transformar a energia cinética dos rios, correntes marinhas ou até mesmo energia de marés em energia elétrica, sem interromper o curso natural da água (RODRIGUEZ, 2007).

O sistema hidrocínético é uma forma alternativa de geração de energia, pois apresenta um baixo impacto ambiental, devido ao fato de gerar energia elétrica aproveitando a energia cinética dos rios (MEDEIRO, VIANA e REZEK, 2005). Esse sistema é uma forma alternativa, para um país como o Brasil que possui muitos rios e comunidades ribeirinhas para serem atendidas com eletricidade.

Seu princípio de funcionamento depende da energia cinética da água e a transforma em energia elétrica através de equipamentos adequados. Uma das vantagens desse sistema é a possibilidade de funcionar em uma grande variedade de rios, independente das dimensões ou profundidade (SILVA, 2011).

O rotor é o componente mecânico que compõe a turbina hidrocínética, composta por pás que são responsáveis por aproveitar a energia cinética presente no fluxo da água e transformá-las em energia cinética de rotação. A transmissão mecânica funciona como o acoplamento entre o eixo do rotor com o eixo do gerador (SANTOS et al., 2006).

O gerador de energia elétrica é o componente da usina, responsável pela conversão da energia oriunda da transmissão mecânica em energia elétrica. A viabilidade desse sistema depende do estudo das características dos rios, como velocidade da água, profundidade, perenidade e presença de entulhos (SILVA, 2011).

Comparando sistemas sem represamento com aqueles que usam represamento para gerar energia elétrica, é possível verificar que os primeiros apresentam menor eficiência, uma vez que estão sujeitos ao chamado limite de Beltz. Tal limite define como 59,3% o limite máximo da energia cinética incidente que pode ser convertida em potência elétrica (SILVA, 2011; SANTOS et al., 2006). O físico e alemão Albert Beltz definiu em 1919, o que hoje é conhecido como Lei de Beltz. É indispensável o conhecimento dessa lei quando se tratam do estudo de energia cinética, seu aproveitamento e suas aplicações.

Este limite imposto aos sistemas de geração hidrocínéticos, é o mesmo aplicado à geração de energia elétrica eólica. Para aerogeradores, quanto maior for a energia cinética extraída do vento pela turbina, maior será a travagem que sofrerá o vento que deixa o aerogerador.

De forma análoga, isto ocorre para a energia cinética da água. Se a turbina hidrocínética extrair toda a energia cinética da água, a água sairia com velocidade nula, ou seja, teoricamente a água não poderia abandonar a turbina.

Consequentemente, não seria possível extrair nenhuma energia, uma vez que também não seria possível entrar água no rotor (SANTOS et al., 2006).

Esse limite não desqualifica essa tecnologia como uma forma alternativa de geração em pequenos blocos de energia, já que esse sistema apresenta várias vantagens, ou seja, esse sistema apresenta baixo custo nos trabalhos civis de construção, eliminação dos distúrbios no ecossistema e exploração de uma gama maior de lugares, necessitando apenas um fluxo de água constante (SILVA, 2011).

Porém existem os problemas potenciais que não podem ser esquecidos como o crescimento de algas nas pás, o que pode ocasionar a redução do rendimento da turbina, corrosão da máquina, perigo a embarcações e banhistas entre outros problemas (SILVA, 2011).

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Uma das principais questões que motivaram esse estudo foi desenvolver meios para comprovar a viabilidade de uso de micro-centrais hidrocínéticas, de baixo custo, construídas com material reciclado. Em outras palavras, desejava-se ter uma idéia do montante de potência elétrica gerada, com uma micro usina, usando tal turbina, e construída com materiais baratos e de fácil aquisição.

Para esta primeira versão de micro usina, a turbina hidrocínética foi baseada em uma roda de bicicleta, com pás adaptadas na mesma, e o gerador consistiu de uma pequena máquina de corrente contínua usada em esteiras ergométricas elétricas. Foram escolhidas cargas típicas para os testes, com exceção do inversor de tensão, que por ser relativamente oneroso, não foi usado.

Em resumo, o problema consistiu em avaliar o esquema de geração simples, como mostrado na figura 1, no sentido de atestar se o seu desempenho seria suficiente para uso, pelo menos doméstico. O pequeno sistema é composto por uma turbina hidrocínética conectada a um gerador de corrente contínua. A tensão de saída do gerador é aplicada diretamente sobre cargas que podem ser acionadas por corrente contínua, como lâmpadas incandescentes, aquecedores, armazenagem em baterias.

Uma alternativa para cargas que operam com corrente alternada, é um inversor de tensão, alimentado pelo *link* de corrente contínua. O inversor de tensão

se constitui num conversor CC-CA, e providencia a tensão alternada para cargas como motores em geral, iluminação fluorescente e outras cargas, com a frequência fixa, no caso em 60 Hz (JUNIOR, 2005).

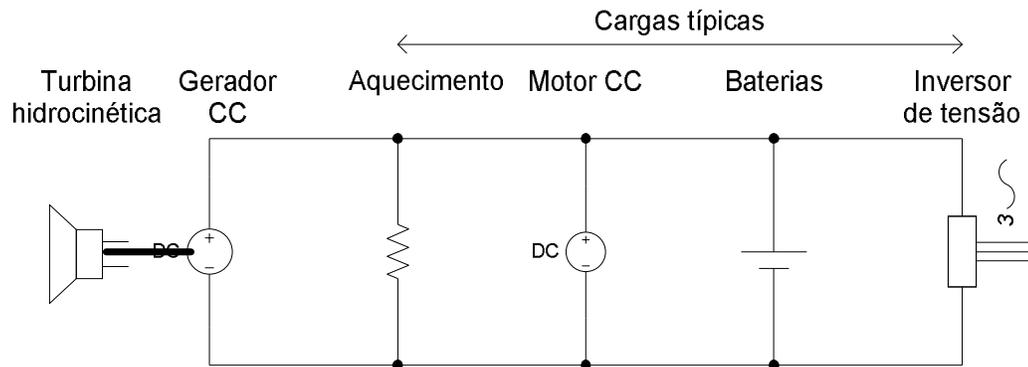


Figura 1 – Esquema da micro-central proposta.
Fonte: autoria própria

Na proposta do trabalho, cogitou-se utilizar principalmente as águas do Rio Marmeleiro para acionar a turbina da micro usina proposta. Então, o parágrafo seguinte mostra sucintamente alguns dados do rio e da cidade de Marmeleiro.

O Rio Marmeleiro é localizado no município de mesmo nome, no Sudoeste do Paraná. A população deste município está estimada em 13.900 habitantes, com densidade demográfica de 33,0 habitantes/km². A economia de Marmeleiro é estritamente voltada à agricultura e agropecuária (Marmeleiro, 2011). O município faz parte da Bacia do Rio Iguaçu, ocupando 0,7% do território da bacia (Meio Ambiente, 2008). A figura 2 mostra parte do rio marmeleiro que contorna a cidade e avança para o interior do município.



Figura 2 – Mapa de Marmeleiro, com evidência do rio.
Fonte: (Cidade Brasil, 2012) (alterado)

4. A MICRO-CENTRAL COM TURBINA HIDROcinÉTICA

4.1. TURBINAS HIDROcinÉTICAS

Algumas máquinas hidráulicas que convertem a energia cinética de rios ou das marés em energia elétrica, são conhecidas como turbinas hidrocinéticas. Durante muitos anos esse tipo de energia foi explorado com as rodas d'água acionadas pela lâmina d'água. Porém com o surgimento das hidrelétricas com reservatório e também do tipo fio d'água, tais máquinas foram relativamente esquecidas.

Segundo Junior (2007), a exploração de turbinas hidrocinéticas não é um conceito novo e sim uma re-visitação desta tecnologia, o que pode significar uma excelente alternativa para a geração de energia elétrica sustentável. Existem vários tipos de turbinas hidrocinéticas. As formas mais comuns são apresentadas por

SILVA (2007), onde a primeira representada pela figura 3 tem os mesmos princípios de uma turbina eólica, já a segunda, representada pela figura 4 tem os mesmos princípios de uma roda d'água.



Figura 3 – Turbina hidrocínética tipo “eólica”
Fonte: (RODRIGUEZ, 2007)

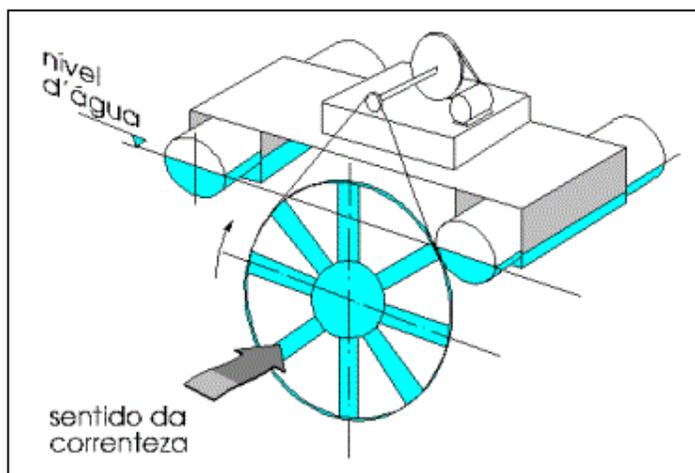


Figura 4 – Turbina hidrocínética tipo roda d'água
Fonte: (RODRIGUEZ, 2007)

Da mesma forma que um sistema de geração de energia a partir do vento a turbina hidrocínética não tem uma rotação síncrona. Dessa forma, para transformar a energia mecânica, produzida pela turbina, em energia elétrica é viável a utilização de geradores de indução (MONTEIRO, 2009), ou geradores de corrente contínua.

Uma revisão completa sobre turbinas hidrocínéticas pode ser encontrada em Tiago Filho (2003) e em Junior (2007). É possível encontrar a aplicação desse sistema em um rio localizado no estado da Bahia.

4.2. POTÊNCIA E TORQUE GERADO POR TURBINAS HIDROCINÉTICAS

A dedução resumida a seguir, considera uma situação ideal, porque não envolve as perdas de conversão. Na prática estas MCH tem rendimento menor do que 60%, mesmo quando o sistema de geração opera de maneira otimizada (Guitarrara, 2012). A potência é obtida através do quociente entre o trabalho (energia) e o tempo:

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (1)$$

O trabalho realizado pela água, que neste caso é igual à sua energia cinética, é dado por:

$$W = E_c = \frac{mV^2}{2} \quad (2)$$

Onde m: massa de água e V: velocidade da água.

Então substituindo na expressão da potência:

$$P = \frac{\frac{mV^2}{2}}{\Delta t} = \frac{mV^2}{2\Delta t} \quad (3)$$

Mas,

$$\frac{m}{\Delta t} = \rho VA \quad (4)$$

Pelo que finalmente se obtém:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (5)$$

Onde p : densidade da água e A : área varrida pelas pás do rotor.

Como exemplo, se a velocidade da água passar de 10 Km/h para 11 Km/h (aumento de aproximadamente 10%), a potência aumenta 33%, o que mostra a importância de se escolher lugar com águas mais velozes p/ um melhor aproveitamento da energia hidráulica (Guitarrara, 2012).

O torque mecânico será:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (6)$$

Onde ω é a frequência angular.

A figura 5 mostra o comportamento aproximado da potência gerada como função da velocidade da água, para turbinas hidrocinéticas.

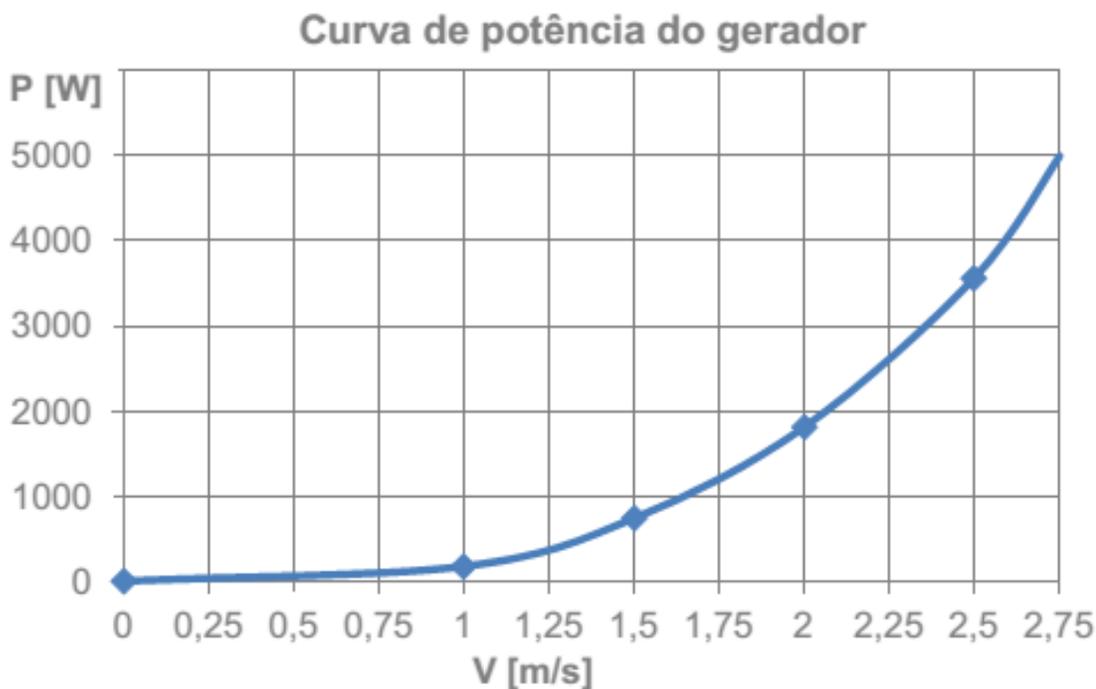


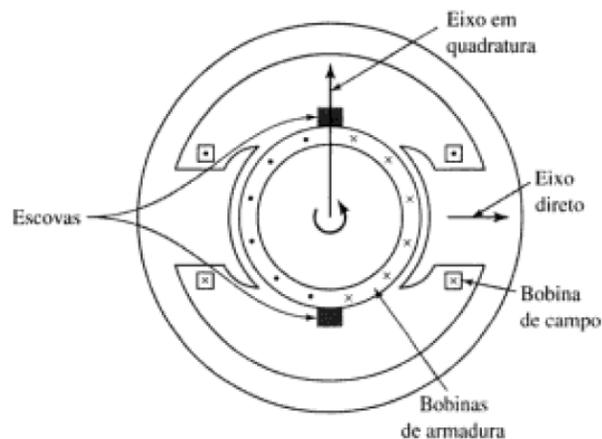
Figura 5 – Potência x velocidade da água
 Fonte: (HIDROGINÉTICA).

4.3. GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA

As máquinas de corrente contínua (CC) são formadas por uma parte móvel e uma parte fixa. O estator, parte fixa, tem a função de criar o fluxo do enrolamento indutor, já a parte móvel, conhecida como rotor, local onde é feita a conversão da energia mecânica em energia elétrica, é formado pelo enrolamento do induzido. Essas máquinas se caracterizam por sua versatilidade, pois são fáceis de ser controladas (A. E. FITZGERALD, 2006).

A máquina CC pode ser definida como uma máquina com pólos salientes excitado por uma ou mais bobinas de campo; o fluxo criado por esses enrolamentos é distribuído no entreferro de forma simétrica em relação à linha central dos polos, também conhecido como eixo em quadratura, como pode ser visto na figura 6 (A. E. FITZGERALD, 2006).

A tensão gerada nos terminais da bobina do gerador CC é CA (Corrente Alternada), porém com a utilização de um comutador rotativo e de escovas estacionárias, é feita a conversão da tensão para CC. A junção do comutador e das escovas formam um retificador mecânico. O posicionamento das escovas é feito de tal forma que a comutação ocorra quando os lados da bobina estejam na zona neutra, então a FMM (Força Magneto Motriz) estará distanciado de 90° elétricos do eixo dos polos. Esse eixo é chamado de eixo em quadratura, como pode também ser visto na figura 6 (A. E. FITZGERALD, 2006).



**Figura 6 – Representação da Máquina CC
(A. E. FITZGERALD, 2006)**

A figura 7 mostra um corte longitudinal da máquina de corrente contínua, identificando as partes supracitadas.

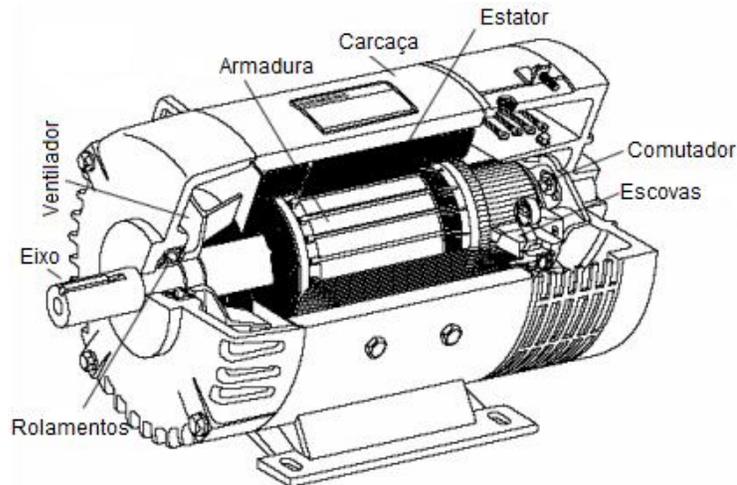


Figura 7 – Corte Longitudinal da Máquina CC
Fonte: (A. E. FITZGERALD, 2006) - Alterado

Com relação ao funcionamento do gerador CC, ele se baseia no fato de que o movimento relativo, que se cria pela aplicação de uma força mecânica entre os condutores da armadura e o campo magnético, dá origem a uma força eletromotriz. Quando uma carga elétrica é ligada aos terminais da armadura, é verificada uma corrente elétrica, e então há produção de energia elétrica. No gerador CC, em geral o campo magnético permanece estacionário e o induzido é o rotor.

A figura 8 ilustra o princípio do gerador elementar. O fluxo que enlaça a bobina varia de intensidade pelo movimento relativo entre o induzido (bobina móvel) e o campo indutor.

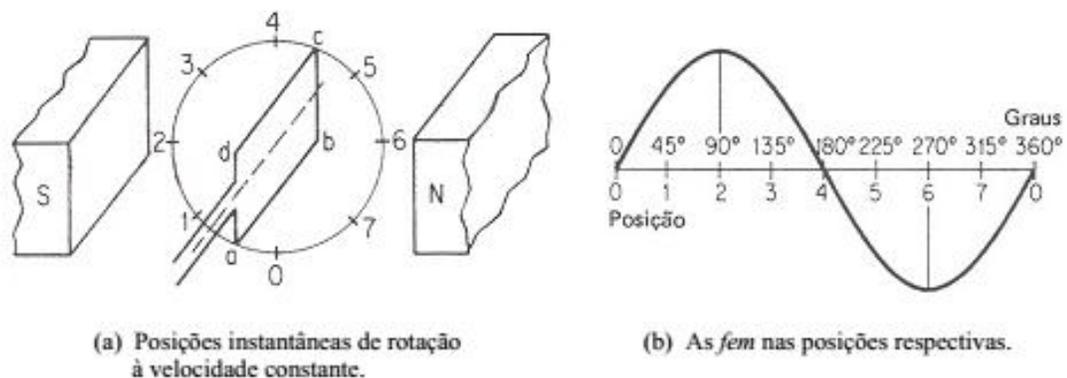


Figura 8 – Tensão gerada por uma bobina móvel em campo uniforme.
Fonte: (VILLAR, 2006).

Na figura 9 verifica-se a ação do comutador, que é de inverter simultaneamente as ligações ao circuito externo, ao mesmo tempo que se inverte o sentido da força eletromotriz, em cada um dos lados da bobina. Como resultado, tem-se uma tensão (corrente) sempre no mesmo sentido, o que permite dizer que é do tipo corrente contínua.

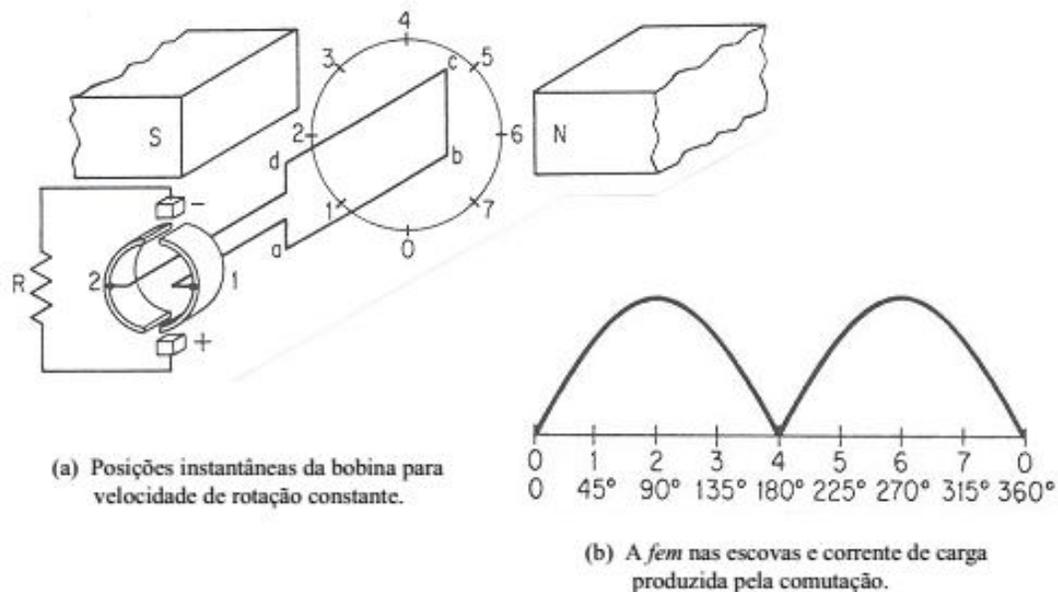


Figura 9 – Gerador bipolar com comutador de dois segmentos.
Fonte: (VILLAR, 2006).

4.4. A IMPLEMENTAÇÃO DA MICRO USINA PROPOSTA

Para verificar a teoria, resumida no item 4.2, foi construída uma micro-central hidrocínética. Ao invés de se tentar otimizar a área das pás da turbina, e procurar riachos com águas velozes, para maximizar a potência gerada, no sentido de se construir uma micro-central de benefício/custo considerável, adotou-se a estratégia de usar materiais reciclados, e verificar se a potência gerada era suficiente ou não, para acionar pequenas cargas. Em outras palavras, construiu-se de forma empírica a turbina, conectou-se o gerador por meio de correia, também de bicicleta e verificou-se o quanto gerava, acionada por córregos típicos da região.

Assim, na construção da turbina, foram utilizados os seguintes materiais, de fácil aquisição, e máquinas utilizadas no serviço de construção:

- Roda de bicicleta;
- Canaletas de ferro;
- Solda Mig;
- Lixadeira;
- Aço silício;
- Cabos para conexão;
- Máquina laser;
- Câmaras de ar, para o papel de flutuador.

Todo o material, com exceção da roda de bicicleta e as câmaras de ar, foi fornecimento por uma empresa que apoiou o projeto, inclusive emprestando as máquinas necessárias. A roda de bicicleta foi adquirida em um ferro velho por preço baixo. Ela é mostrada na figura 10, para ter-se uma ideia da engrenagem que aciona a correia.



Figura 10 – A roda de bicicleta utilizada como guia das pás da turbina

As canaletas foram cortadas em máquina de corte para formar a estrutura do protótipo, e para fazer as fixações foi utilizado solda Mig. Foi necessária a construção de uma base, também de ferro, para encaixar as câmaras de ar (flutuadores), uma base para o gerador. A roda foi presa entre as estruturas, obviamente de forma que não impedisse o seu movimento.

Para formar as pás das turbinas foi utilizado chapas de aço silício. Elas foram cortadas na máquina laser, que resulta em uma peça com pouca rebarba e boa precisão de corte como mostra a figura 11.



Figura 11 – Pás da turbina hidrocínética

A roda foi dividida em doze partes iguais, e obviamente constituída do mesmo número de pás. A figura 12 ilustra o esboço da turbina requerida, enquanto a figura 13 mostra a turbina parcialmente construída.

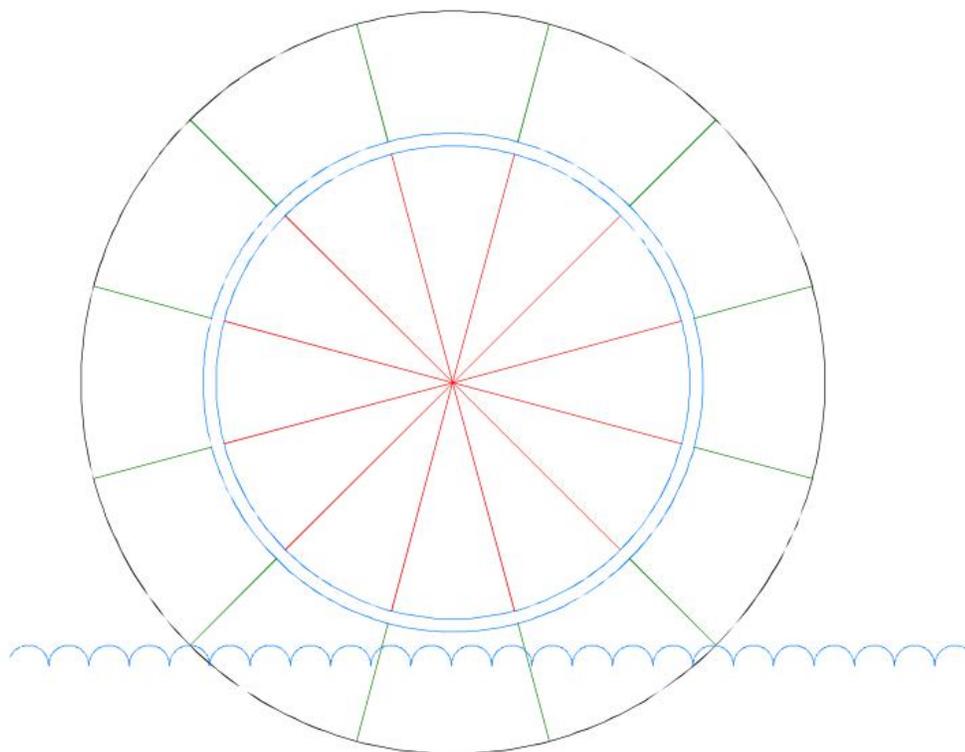


Figura 12 – Desenho de projeto da turbina hidrocínética



Figura 13 – Rotor e pás na turbina hidrocínética.

Para dar estabilidade às pás foi feito um anel de fixação em ambos os lados, como mostra a figura 14.



Figura 14 – Anel de fixação das pás

A figura 15 mostra a turbina hidrocínética já com as pás soldadas à roda e aos anéis, e com toda a sua estrutura pronta.



Figura 15 – Turbina hidrocínética utilizada.

O gerador utilizado nessa etapa do trabalho foi emprestado por uma empresa que colaborou com o projeto. Ele é utilizado em esteiras ergométricas. A figura 16 mostra a placa com as principais características do gerador utilizado.

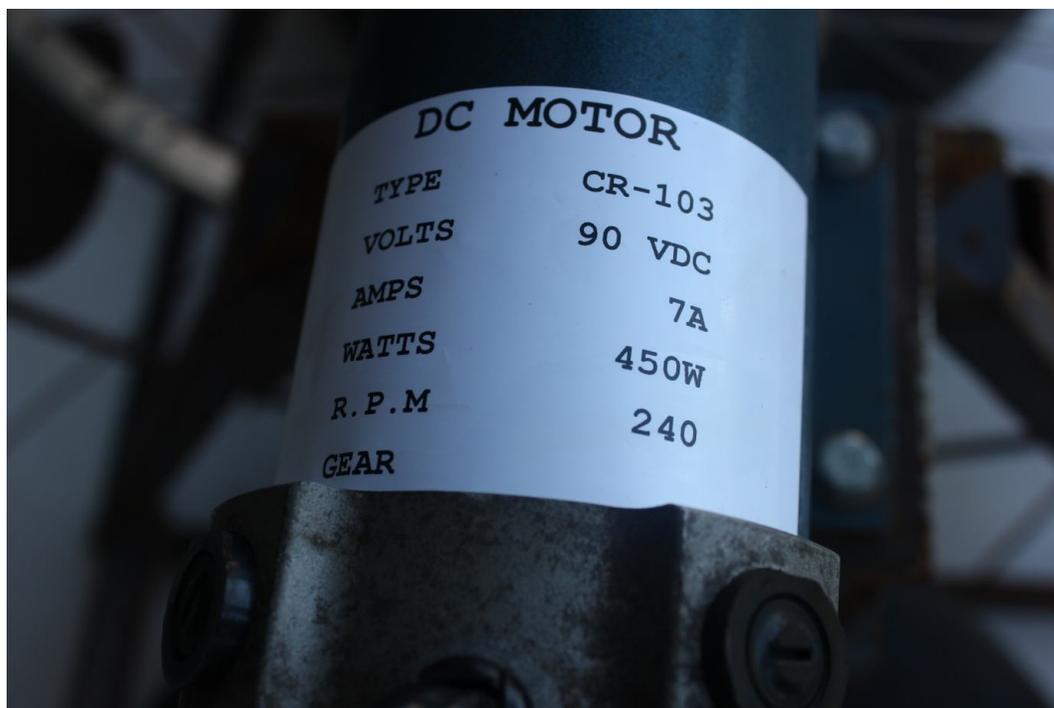


Figura 16 – Placa de identificação Gerador DC

Para finalizar a montagem da micro-central hidrocínética, o gerador CC foi acoplado à turbina com o auxílio de uma engrenagem, como mostra a figura 17.



Figura 17 – Gerador acoplado a turbina, formando a micro usina proposta.

5. RESULTADOS

Para fazer os testes da micro central proposta, foram escolhidos três locais com características supostamente favoráveis, para um melhor desempenho do conjunto turbina-gerador.

O primeiro deles é um rio artificial encontrado em uma propriedade particular, o segundo ensaio foi realizado em uma piscina, também em uma propriedade privada, e o terceiro e último teste foi realizado no rio Marmeleiro, na saída da turbina de uma PCH.

5.1. ENSAIO 1

O ensaio denominado 1, do esquema de geração proposto, foi efetuado em um riacho artificial realimentado com bomba d'água. Ele possui dois metros de profundidade por dois metros de largura. Na execução dos testes, as câmaras de ar foram presas à estrutura do protótipo e colocadas na água de modo conveniente, onde se verificava um deslocamento de água com a melhor velocidade. A figura 18 mostra como os flutuadores são fixados à estrutura da micro usina, enquanto a figura 19 ilustra a ação da água sobre a turbina.



Figura 18 – Câmaras (flutuadores) presas na estrutura.



Figura 19 – Turbina acionada por água em rio artificial.

Para que o sistema hidrocínético não fosse levado pela correnteza, houve a necessidade de ancoragem da estrutura, que foi improvisada com cordas fixadas em materiais estáticos no local, como árvores.

Para melhor simular a realidade de uma correnteza de rio, foi colocada uma curva no cano e uma extensão para levar a água até a superfície do rio, e incidir de forma objetiva nas pás da turbina. O resultado pode ser visto na figura 20.



Figura 20 – Simulação de correnteza do rio.

Com a micro central posicionada e as pás recebendo água de forma constante, um bateria (fazendo o papel de carga) foi conectada nos terminais do gerador, e com um multímetro foi possível ver que a bateria estava sendo carregada como mostra a figura 21. Nesse teste obteve-se uma tensão máxima de 13,26 V e uma corrente elétrica de 60,0 mA, suficiente para o carregamento da bateria. Apesar da potência baixa, isto permite afirmar que a micro usina proposta pode alimentar cargas, pelo menos de uso doméstico. Ela é equivalente a um gerador fotovoltaico, porém com custo desprezível. Também, a partir desse resultado, pode-se observar que um sistema simples com custo baixo de projeto e de materiais atende às expectativas do projeto.

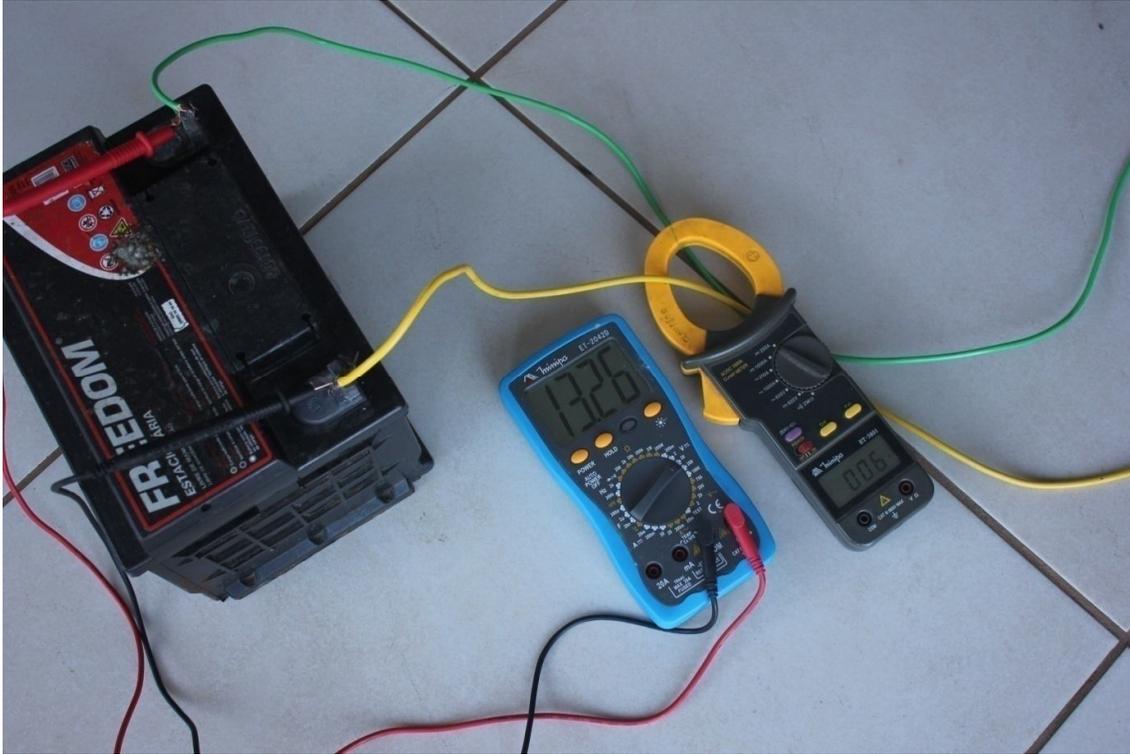


Figura 21 – Tensão na saída e corrente na saída do gerador

5.2. ENSAIO 2

O segundo ensaio foi realizado em uma piscina, na tentativa de aproveitar o movimento da água em função das bombas usadas para fazer circular a água. Nesse ensaio, os testes foram feitos com um gerador também de corrente contínua, porém não o mesmo utilizado no ensaio 1, visto que aquele teve de ser devolvido. Foi usado então um gerador CC com necessidade de velocidade bem maior que o primeiro, para gerar a mesma tensão. Isto caracterizou uma dificuldade adicional, somada ao fato que a velocidade da água era menor que aquela do primeiro ensaio.

A turbina foi colocada na piscina de forma que aproveitasse ao máximo o jato da água, e foram conectadas cargas de iluminação, representada por uma pequena lâmpada (110 V), e posteriormente de aquecimento, sintetizada por um resistor elétrico. Neste ensaio, o desempenho do conjunto turbina-gerador foi insuficiente, e as indicações dos instrumentos foram desprezíveis.

A maior tensão gerada foi de apenas 822 mV e uma corrente igual a 49,12 mA, conforme mostra a figura 22.



Figura 22 – Máxima tensão e corrente com carga resistiva.

Não foi obtido sucesso no segundo ensaio porque o gerador utilizado necessitava uma rotação muito alta e a velocidade da água não era suficiente para alcançar a rotação requerida de 400 rpm.

A figura 23 mostra parte desse ensaio.

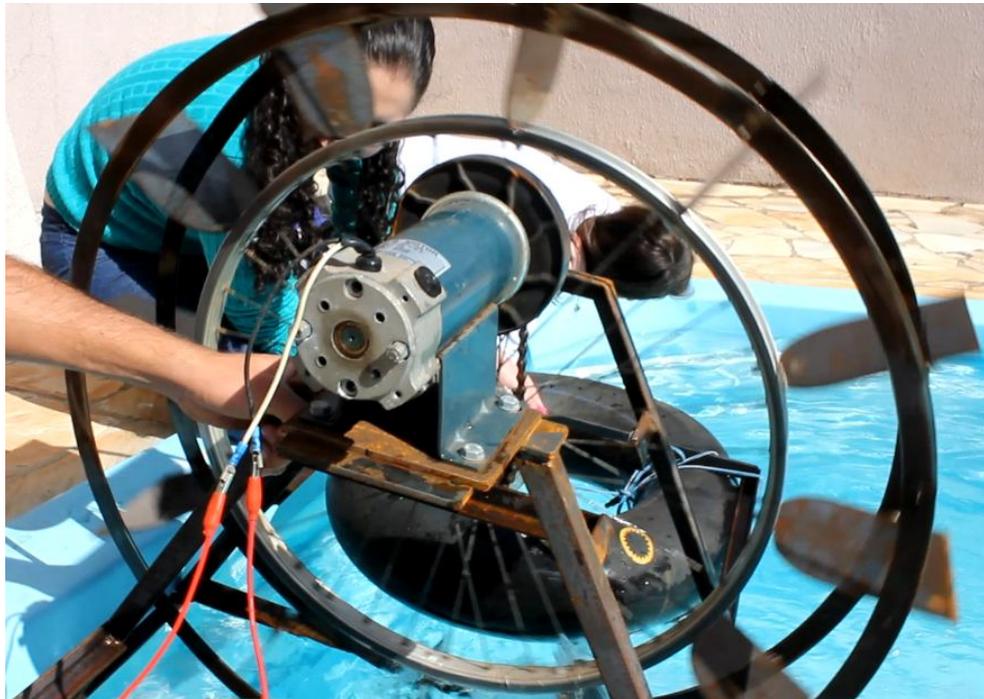


Figura 23 – Sistema hidrocínético em teste na piscina

5.3. ENSAIO 3

O terceiro e último ensaio foi realizado nas águas do rio Marmeleiro, aproveitando-se a saída d'água da turbina de uma PCH existente. Essa PCH instalada no rio Marmeleiro gera aproximadamente 400kW em 380V. Essa energia é utilizada para alimentar uma fábrica de baterias.

Conforme mencionado, esse ensaio foi caracterizado pela instalação da micro central hidrocínética no canal onde a PCH devolve ao rio, a água utilizada na sua geração. As figuras 24 e 25 mostram onde os testes deste ensaio foram realizados.



Figura 24 – Canal onde os testes do 3º ensaio foram realizados.



Figura 25 – Encontro da água da saída da turbina com o Rio Marmeleiro.

O córrego é muito promissor para geração com turbina hidrocínética, visto que tem boa vazão e alta velocidade da água. Isto gerou uma expectativa grande de se obter resultados importantes dos testes com a micro usina.

Para colocar a turbina na água, foram providenciadas ancoragens com cordas em cada lado da estrutura, para fazer coincidir as direções da água e da turbina, e para anular a força de arrasto que a água gera sobre a estrutura (particularmente nos flutuadores). A figura 26 mostra a ação da água sobre a turbina.

Com a micro usina em operação, foram conectadas as cargas e instrumentos de medidas, para se fazer a avaliação de desempenho nesta nova situação. As cargas conectadas (uma de cada vez) foram as mesmas do ensaio 2, e mais a bateria. Apesar das condições favoráveis, as indicações dos instrumentos foram muito baixas, pela mesma razão verificada no ensaio 2, que o gerador requer uma velocidade muito alta para que se verifique em seus terminais uma tensão relativamente alta.

A maior tensão verificada foi de 2,93 V, o que obviamente não foi suficiente para acender a lâmpada, ou aquecer o resistor de potência, apesar de o amperímetro indicar a presença de corrente elétrica com valor de 110 mA. Como a

bateria requer pelo menos 12 V para começar a sua carga, conseqüentemente não haveria corrente circulando no circuito.

Apesar dos baixos valores indicados de tensão e corrente elétrica, do ponto de vista qualitativo, pode-se afirmar que os resultados são razoáveis, visto que com um gerador que requeira menos velocidade, as indicações dos instrumentos com certeza seriam bem mais significativas.



Figura 26 – Máxima tensão no teste na saída turbina para o ensaio 3.

6. CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo sucinto sobre micro centrais hidrocínéticas, com ênfase nos aspectos práticos.

Foi deduzida uma equação aproximada para potência gerada, que resultou função da área submersa da pá da turbina e da velocidade da água. Considero isso como algo positivo no trabalho porque as referências bibliográficas consultadas, que tratam de geração com turbina hidrocínética, não deduzem e quase não apresentam modelos matemáticos dessa natureza.

Com o auxílio de seqüências de fotos, retratou-se a montagem de um protótipo de micro usina com turbina hidrocínética.

Quanto aos ensaios realizados, apesar dos instrumentos indicarem valores baixos, eles permitem fazer algumas afirmações: é possível gerar tensão elétrica e corrente elétrica com o esquema de geração proposto, e consequente gerar potência elétrica. Os valores baixos de tensão gerada são devidos a que o gerador utilizado não foi apropriado, porque requer no seu eixo, velocidades relativamente altas, e que não foram possíveis com os materiais e dispositivos utilizados. Porém, em trabalhos futuros, com um gerador mais adequado, certamente os resultados serão mais promissores.

Outro aspecto que deve ser melhorado por meio de projeto mecânico é a dimensão das pás, a sua quantidade e o seu formato, que inclusive deve facilitar o escoamento da água depois que ela é utilizada.

Em geral, outras melhorias com certeza contribuirão para se chegar a uma micro usina com turbina hidrocínética, viável para várias aplicações práticas. Uma dessas mudanças deve ser feita na base da estrutura, para controlar a altura da turbina, visto que neste caso é mais fácil apoiar a estrutura no leito do rio, do que usar bóias, que podem prejudicar o rendimento do sistema.

Uma outra alternativa para melhorar a eficiência é fazer um sistema de adução para que a correnteza do rio seja direcionada para a turbina.

Outra indicação favorável à proposta, que se caracteriza como incentivo à continuação do estudo, foi que durante a realização do trabalho duas empresas ficaram interessadas no estudo, propondo ideias para trabalhos futuros, além de apoiar financeiramente o projeto, e vislumbrar aplicações desse tipo de geração em parte de suas instalações de iluminação.

Umas das ideias, apresentada por uma das empresas é aproveitar a energia cinética da água na saída da turbina de uma usina existente, colocando-se um grupo de turbinas hidrocínéticas em paralelo, para se ter um melhor aproveitamento da água.

Em resumo, com mais estudos e aprimoramentos, é possível que esse sistema possa alimentar cargas maiores e de maneira continuada no tempo.

7. REFERÊNCIAS

- A. E. FITZGERALD, Charles K. J. S. D. U. **Máquina Elétricas**. 2a Edição. ed. São Paulo: Bookman, 2006.
- BOARATI, J. H. et al. **Espeço Energia**. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/11/ee11_web.pdf>. Acesso em: 26 Janeiro 2014.
- CIDADE Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.cidade-brasil.com.br/vista-satelite-marmeleiro.html>>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- ELETOBRÁS. www.eletobras.gov.br. Disponível em: <<http://www.eletobras.gov.br/elb/portal/main.asp>>. Acesso em: 22 Janeiro 2014.
- FILHO, Solon D. M. **Fundamentos de Medidas Elétricas**. 2 edição. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1981.
- GUITARRARA, Guilherme B. **Estimativa de Vazão para a Implantação de Micro-centrais Hidrelétricas com Utilização do SIG**. São Paulo. 2012.
- HIDROCINÉTICA, Tubina. **Smarthydro PowerGmbH**. Disponível em: <www.smarthydro.de>. Acesso em: 03 nov. 2014.
- JUNIOR, Antonio C. P. B. et al. **Turbina Hidrocinética Geração 3**. ANEEL, 2007.
- JUNIOR, Percy E. G. **Estudo das Tecnologias e Aplicações dos Inversores de Frequência de média Tensão**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2005.
- MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro. 1983.
- MARMELEIRO , 2011. Disponível em: <<http://www.marmeleiro.pr.gov.br/sitio/municipio-de-marmeleiro.php>>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- MEDEIRO, Daniel D. M.; VIANA, Augusto N. C.; REZEK, Ângelo J. J. Estudos de GERadores de Indução na GERAção de Energia Elétrica em Microcentrais Hidrelétricas. **Revista Ciências Exatas**, p. 9-14, 2005.
- MEIO Ambiente, 2008. Disponível em: <http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/corh/Revista_Bacias_Hidrograficas_do_Parana.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2014.
- MONTEIRO, Thiago M. **Análise de Gerador de Indução para Produção de Energia Elétrica a Partir das Ondas do Mar**. Rio de Janeiro. 2009.
- RODRIGUEZ, Ana P. S. P. **Parametrização e Simulação Numérica da Turbina Hidrocinética - Otimização Via Algoritmos Genéricos**. Brasília. 2007.
- SANTOS, Alison A. D. et al. **Projeto de Geração de Energia Eólica**. Universidade Santa Cecília. Santos. 2006.

SCHEREIBER, Gerhard P. **Usinas Hidrelétrica**. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, v. 1, 1977.

SHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo. 1977.

SILVA, Marina M. D. D. **Análise de Filtros Passivos de Harmônicos de Conversores CA/CC de Seis Pulsos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.

SILVA, Teófilo R. M. D. **Construção de um Protótipo Hidrocinético em Escala Reduzida para Geração de Energia Aplicado a Educação**. Universidade Federal do Pará. Pará. 2011.

TIAGO FILHO, G. L. The state of art of Hydrokinetic power in Brazil. **Waterpower XIII Conference**, 2003.

TRAPP, Jordan G. **Gerador de Indução Isolado com Tensão e Frequência Reguladas por Conversor Matricial Esparso**. Santa Maria. 2008.

VILLAR, Gileno J. D. V. **Geradores e Motores CC**. Centro Federal de Educação Tecnológica do RN. [S.I.]. 2006.

ANEXO 1 – GERAÇÃO HIDROKINÉTICA COM GERADOR DE INDUÇÃO

A.1.1. GERADOR DE INDUÇÃO

O gerador de indução é formado por duas partes, o estator e o rotor, e o espaço entre elas é chamado de entreferro. O estator é constituído por chapas de aço com ranhuras no seu interior onde são colocados os enrolamentos de armadura, os quais darão origem ao fluxo magnético no estator. Para conseguir gerar uma tensão trifásica o gerador deve ser montado com três grupos de bobinas de forma que cada grupo fique distanciados de 120° elétricos no espaço (TRAPP, 2008).

O rotor também é formado por chapas de aço, deve apresentar alta qualidade, deve ser termicamente tratada e também devem apresentar ranhuras no seu interior. São colocadas barras de liga de cobre que vão de uma extremidade à outra do rotor. Essas barras são curto-circuitadas utilizando anéis de cobre nas extremidades formando uma gaiola (TRAPP, 2008).

Pode-se dizer que esse tipo de estrutura é simples porque não apresenta polos salientes, o que significa que a velocidade de disparo do gerador é um inconveniente, como acontece com as máquinas síncronas. Por não possuir bobinas, anéis coletores no rotor e escovas, a manutenção no gerador de indução é mínima, o que é uma grande vantagem quando utilizado em micro centrais hidrelétricas. Os GI's utilizam um banco de capacitores para excitação (MONTEIRO, 2009). Esses aspectos construtivos podem ser observados na figura 27.

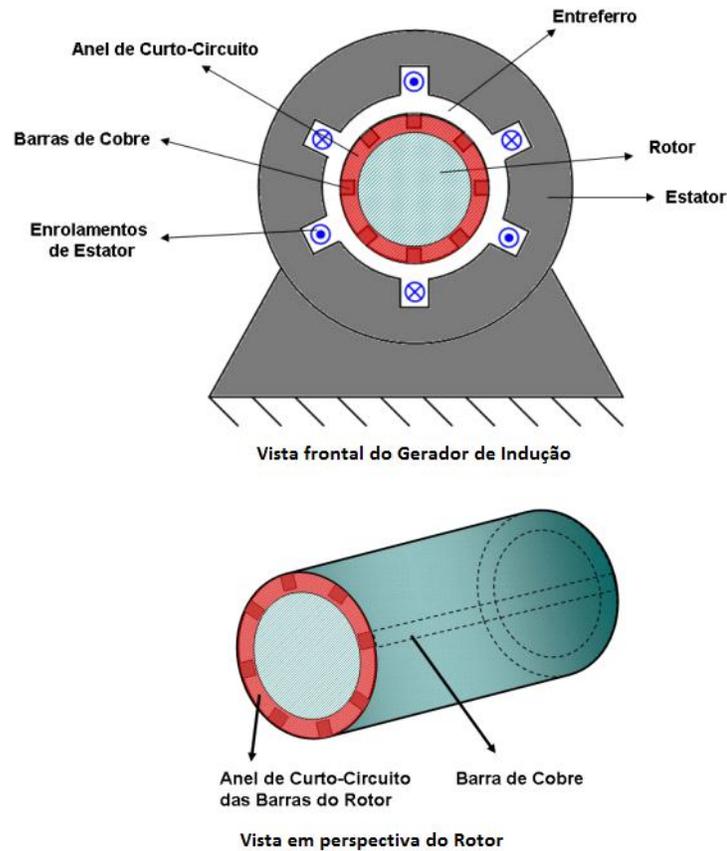


Figura 27 – Gerador de Indução
Fonte: (TRAPP, 2008)

Já que praticamente todas as cargas convencionais aceitam apenas sinais senoidais com frequência constante a tensão de saída do gerador de indução não pode ser conectada diretamente na carga.

Uma solução para isso é retificar o sinal de saída do gerador para isso é utilizado uma ponte de diodos, o qual tem a função de transformar uma forma de onda alterna em um sinal contínuo (FILHO, 1981).

A.1.2. RETIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA

A ponte de diodos, também conhecido como retificador trifásico de onda completa, tem a função de transformar um sinal alternado em um sinal contínuo.

Esse retificador é formado por três pares de diodos que permitem o fluxo de corrente apenas do seu anodo (A) para catodo (K). Quando a tensão alternada passa pelo retificador, a tensão passa a ser contínua (JUNIOR, 2005).

O retificador trifásico da figura 28 resultará em uma onda de saída com pulsos positivos e negativos de tensão, como mostra a figura 5. (JUNIOR, 2005)

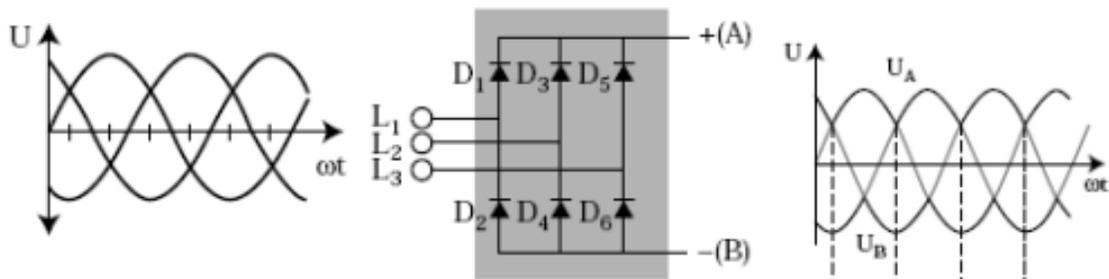


Figura 28 – Retificador trifásico de onda completa
Fonte: (JUNIOR, 2005)

Para dar continuidade ao tratamento do sinal é utilizado um inversor de tensão que nada mais é do que um equipamento que transforma a tensão contínua em tensão alternada. A tensão e a frequência na saída desse inversor pode ser controlada ou não, dependendo da aplicação (JUNIOR, 2005).

Tendo o sinal adequado, o sistema pode ser conectado à carga. Esse sistema pode vir a substituir um gerador a diesel e só alimentar a carga quando não houver fornecimento de energia elétrica pela rede elétrica. Porém em casos de alto rendimento, o sistema pode funcionar ao contrário. Pode-se conectar a rede apenas quando a geração com turbina hidrocínética não atender a demanda de consumo. A figura 29 mostra essas opções.

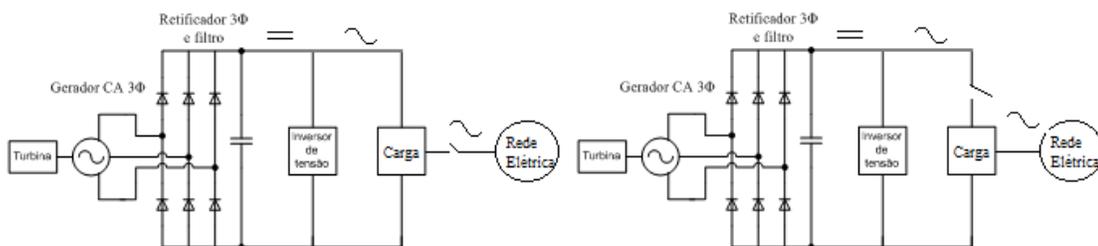


Figura 29 – Opções de conexão da carga
Fonte: (JUNIOR, 2005)– adaptado

ANEXO 2 – OUTRAS APLICAÇÕES DE MICRO-CENTRALHIDROCINÉTICA

Durante os testes, além das melhorias para o a turbina, surgiram ideias para outras aplicações. Como a proposta desse sistema é aproveitar a energia cinética dos rios, levando energia elétrica para o interior, uma alternativa de uso seria a alimentação de cercas elétricas.

Os painéis de cercas elétricas são alimentados pela rede elétrica e operam com tensão de 127 a 240 v, e muitos deles retificam a tensão alternada para obter tipicamente 12 V CC, apropriada para que o oscilador de cerca elétrica possa ser alimentado tanto pela rede elétrica como por baterias, para casos que falte energia da concessionária, ou quando a cerca está muito longe da rede elétrica.

A micro usina hidrocínética pode funcionar como alimentação principal desse sistema, e somente utilizar a energia da rede elétrica em épocas de seca, por exemplo, quando o rio se encontra com nível baixo.

Também, uma aplicação viável da geração proposta é na iluminação do Urio Park, que é um lugar destinado para locação de festas de casamento, aniversários e formaturas, em Marmeleiro. É muito conhecido na cidade por apresentar uma linda iluminação nas arvores durante a noite.

O proprietário da PCH Genova, localizado no Urio Park, apresentou uma ideia de colocar turbinas hidrocínética sem paralelo, variando o diâmetro do rotor, dessa forma seria possível gerar mais energia.

Outro exemplo seria iluminação de emergência para aviário, que é uma atividade muito difundida na região sudoeste.