

JOSÉ LEANDRO CASA NOVA ALMEIDA

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO
DE UMA MICROUSINA HIDRELÉTRICA

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá
2007

A447a	<p>Almeida, José Leandro Casa Nova Análise da viabilidade técnica e econômica de implantação de uma microusina hidrelétrica / José Leandro Casa Nova Almeida . – Guaratinguetá : [s.n.], 2007 52 f. : il. Bibliografia: f. 50-52</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2007 Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza Co-orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho</p> <p>1. Microusina hidrelétrica I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.311.21</p>
-------	--

UNESP  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá

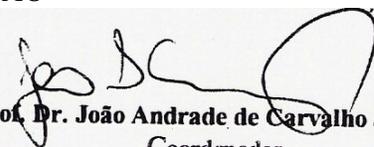
**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
IMPLANTAÇÃO DE UMA MICROUSINA HIDRELÉTRICA**

JOSÉ LEANDRO CASA NOVA ALMEIDA

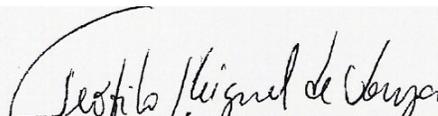
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

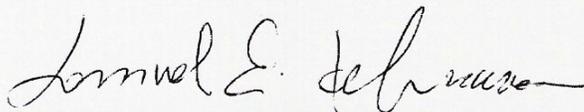
ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO


Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. SAMUEL EUZEDICE DE LUCENA
Unesp-Feg


Prof. Dr. OSIRIS CANGILIERI JÚNIOR
PUC/PR

DEDICATÓRIA

A todos que nunca desistiram de realizar os sonhos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

Aos meus orientadores e co-orientador, *Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza e Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho*, que jamais deixaram de me incentivar. Sem as orientações, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos professores *Prof. Dr. Perrella, Prof. Dr. Petrônio, Prof. Dr. Carrocci, Prof. Dr. Oscar, Prof. Dr. Agnelo*, que ao longo do curso fizeram a diferença, contribuindo de forma decisiva para a construção sólida de meu conhecimento e de minha formação acadêmica.

Aos meus pais, *Mário Sergio e Maria Antônia*, que, apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

À minha namorada, *Cíntia*, pela compreensão, amor e dedicação.

Ao meu padastro, *Edson*, pela apoio, incentivo, determinação e contribuição na instalação da microusina do Centro de Energia Renovável.

Ao meu irmão, *João Paulo*, pelo incentivo.

Às minhas sobrinhas, *Steffane e Vitória*, pelo sorriso e carinho.

Às funcionárias da Biblioteca do *Campus* de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

Às secretárias da pós-graduação, *Regina e Elisa* pela dedicação e alegria no atendimento,

Aos funcionários da fábrica de máquinas, Bemfica LTDA, *Guaraci Antonio Leite, Luis Geraldo, Rogério Cláudio da Conceição, Sebastião, João Mario, Almir, Tadeu*, pelo apoio fundamental nas adaptações realizadas na Oficina da Fabrica.

A fábrica de máquinas, Bemfica LTDA, em particular e especialmente na pessoa do Engenheiro Carlo Costa, pelo apoio e principalmente pela colaboração na liberação, no horário de trabalho, para cursar as matérias do Programa de Pós-Graduação.

EPIGRAFE

“São quatro os homens: aquele que não sabe e não sabe que não sabe; é um tolo. Evita-o. Aquele que não sabe e sabe que não sabe; é um simples. Ensina-o. Aquele que sabe e não sabe que sabe; está dormindo. Acorda-o. E aquele que sabe, e sabe que sabe; é um sábio. Siga-o.”

Provérbio Árabe

RESUMO

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DE UMA MICROUSINA HIDRELETRICA

José Leandro Casa Nova Almeida

Março, 2007

Orientador: Teófilo Miguel de Souza

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

A proposta desta dissertação foi a de apresentar o desempenho de uma microcentral hidrelétrica, instalada no Centro de Energias Renováveis da Unesp, *Campus* Guaratinguetá. As análises apresentadas são de desempenho elétrico e mecânico. A microcentral hidrelétrica utiliza roda Pelton com 0,4m de diâmetro no ponto de incidência do jato de água. O gerador utilizado foi com rotor de ímãs permanentes de ferrite. Tanto o gerador quanto a microusina são de baixo custo de aquisição e instalação. Foram feitos os testes em bancada com o gerador aproximando o máximo possível das condições ideais de funcionamento. Também foram realizadas algumas alterações físicas na microhidrelétrica para manter a rotação constante com a variação de carga. Utilizaram-se cargas resistivas e não-lineares. Os resultados contribuíram para a melhoria da qualidade da energia e o controle do fluxo de água no processo de geração de energia. O conjunto composto de gerador e a turbina Pelton, durante o experimento, apresentaram rendimentos eletromecânicos da ordem de 20% a 30% comparados com a teoria.

PALAVRAS-CHAVE: Microusina, controle de rotação, gerador de rotor de ímã permanente e Energia Renovável.

ABSTRACT

AN ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMICAL VIABILITY OF IMPLANTING A MICRO-HYDROELECTRICAL POWERPLANT

José Leandro Casa Nova Almeida

March, 2007

Advisor: Teófilo Miguel de Souza

Program of Masters Degree in Mechanics Engineering - Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

This proposal of this work is to demonstrate the performance of a Micro-Hydroelectrical Powerplant (MHP), which has been installed at the UNESP – FEG - Renewable Energy Center, in Guaratinguetá-SP. The present analysis refers to the electrical and mechanical performances. The micro-hydroelectrical powerplant employs a Pelton turbine with a diameter of 0,4m at the incidence of water flow. The generator is provided with permanent ferrite magnet rotor. Costs were low for both the acquisition of parts and installation of the generator and the micro-hydroelectrical powerplant. Bench tests carried out with the generator reached the maximum possible ideal functioning conditions. Some physical modifications were necessary to maintain constant rotation with load variations. Resistive and non-linear loads were used in the essays. The results contributed for an improvement in the quality of energy and the control of water flow in the process of generating energy. The assembly composed of the generator and the Pelton turbine presented an electro-mechanical revenue between 20% to 30%

KEYWORDS: Renewable energy, Micro-hydroelectrical powerplant, Pelton turbine, Electrical generator, Rotation control.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
EPIÍGRAFE.....	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS.....	15

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Breve Histórico	16
1.2 Importância	18
1.3 Justificativas	19
1.4 Delimitações do Assunto e Formulação de Hipóteses.....	19
1.5 Objetivo da Pesquisa.....	20
1.5.1 Objetivo Geral.....	20
1.5.2 Objetivo Específico.....	21
1.6 Estrutura da Dissertação.....	21

CAPÍTULO 2

2. MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

2.1 Classificação e Determinação de uma Microcentral Hidrelétrica.....	22
2.1.1 Tipos de Usinas em Relação à Capacidade de Regularização do Reservatório ..	22
2.1.2 Tipos de Usinas em Relação ao Sistema de Adução	23
2.1.3 Tipos de Usinas Quanto à Potência Instalada e Queda.....	23

2.2 Roteiro para a Elaboração do Projeto	24
2.2.1 Fases.....	24
2.2.2 Estudos	25
2.2.3 As Obras Civas.....	26
2.2.4 Os Equipamentos Mecânicos	27
2.2.5 Os Equipamentos Elétricos	27
2.3 As Vantagens e as Desvantagens do Uso das Microcentrais Hidrelétricas sobre Outras Fontes.....	28
2.4 Os Aspectos Sociais.....	30
2.5 O Desenvolvimento do Meio Rural.....	31
2.6 A Legislação para uma Microcentral Hidrelétrica	32

CAPÍTULO 3

3. CUSTO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

3.1 A Estimativa de Custos	34
3.1.1 Roteiro de Trabalho	34
3.1.2 Estudo de Caso: Estimativa de Custo para Microcentral Hidrelétrica	36
3.2 A Operação e a Manutenção de Microcentral Hidrelétrica	39
3.2.1 A Operação.....	39
3.2.2 A Manutenção.....	40

CAPÍTULO 4

4. ESTUDO DE CASO: MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA DO CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

4.1 Dados Técnicos da Microcentral Hidrelétrica.....	43
4.2 A Hipótese e os Desenvolvimento do Projeto.....	43
4.2.1 Detalhes do Projeto de Controle.....	44
4.3 O Procedimento e os Materiais usados para a Avaliação Técnica de Microcentral do Centro de Energia Renovável.....	47

4.3.1 Os Materiais.....	47
4.3.2 Os Procedimentos para Análise da Microusina Hidrelétrica	47
4.4 As Delimitações Iniciais para a Avaliação Técnica	47
4.5 O Levantamento e as Análises dos Dados	49
4.5.1 A Análise do Gerador na Bancada.....	50
4.5.1.1 A Análise com Ligação do Gerador na Baixa Rotação	50
4.5.1.2 A Análise com Ligação do Gerador na Alta Rotação.....	54
4.5.1.3 O Comportamento do Gerador na Bancada	55
4.5.2 Análise do Gerador Instalado na Microhidrelétrica Utilizando Bocais com Diversos Diâmetros.	55
4.5.3 Análise do Gerador Acoplado a Microhidrelétrica Utilizando a Válvula Injetora de Acionamento Motorizado.....	56
4.5.3.1 Análise com a Conexão dos Terminais do Gerador para Baixa Rotação Instalado na MCH.....	56
4.5.3.2 Análise com a Conexão dos Terminais do Gerador para Alta Rotação Instalado na MCH.....	59
4.5.4 A Relação os Dados Experimentais e a Teoria	60
4.5.5 As Considerações Finais	61
 CAPÍTULO 5	
5. CONCLUSÕES	62
 CAPÍTULO 6	
6. PESQUISAS FUTURAS	64
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1 – Vista Externa da Microusina do Centro de Energia Renovável	20
---	----

CAPÍTULO 2

FIGURA 2 – Microcentral Hidrelétrica do Centro de Energia Renovável	27
---	----

CAPÍTULO 4

FIGURA 3 – Microusina Antes das Modificações	44
FIGURA 4 – Microusina Depois das Modificações	45
FIGURA 5 – Sistema de Controle de Duas Posições.....	45
FIGURA 6 – Localização do Bico da Setía.....	46
FIGURA 7 – Injetor Adaptado na Microusina	46
FIGURA 8 – Diagrama Unifilar das Cargas Resistivas	48
FIGURA 9 – Cargas não-Lineares	49
FIGURA 10 – Motor Acoplado na Ponta do Eixo do Gerador	50
FIGURA 11 – Rotação x Tensão sem Carga	51
FIGURA 12 – Curva a 1200 rpm	51
FIGURA 13– Curva a 1800 rpm	52
FIGURA 14 – a) DHT a 1800rpm e b) 1200rpm.....	52
FIGURA 15 – Instabilidade de Frequência à Rotações Abaixo de 1000rpm.....	53
FIGURA 16 – Utilização do Controle Automático da Vazão do Bico Injetor.....	57
FIGURA 17 – Painel das Lâmpadas	61

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

TABELA 1 – Classificação das Centrais quanto à Potência Instalada	23
TABELA 2 – Fonte de Energia não-Renovável	28
TABELA 3 – Fonte de Energia Renovável	29

CAPÍTULO 3

TABELA 4 – Custo para Aquisição de Microcentral Hidrelétrica.....	36
TABELA 5 – Estimativa dos Custos para a Implantação de um Microusina	37
TABELA 6 – Custo das Modificações	37
TABELA 7 – Manutenção nas Microcentrais Hidrelétricas.....	40

CAPÍTULO 4

TABELA 8 – Comportamento na Alta Rotação	54
TABELA 9 – Situação da Geração na Alta Rotação	54
TABELA 10 – Vazão dos Bocais.....	55
TABELA 11 – Potência Gerada de acordo com a Abertura do Injetor Automatizado.	57
TABELA 12 – Vazão com o Injetor Totalmente Aberto	58
TABELA 13 – Injetor Automatizado – Ligação para Alta Rotação à 50Hz.....	59
TABELA 14 – Injetor Automatizado – Ligação para Alta Rotação à 60Hz.....	60
TABELA 15 – Comparativo entre o Teórico e o Experimental	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	- Operador Nacional do Sistema
CCC	- Conta Consumo de Combustíveis Fósseis
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
PCH	- Pequena Central Hidrelétrica
MCH	- Micro Central Hidrelétrica
CHR	- Centrais Hidrelétricas de Represamento
CHV	- Centrais Hidrelétricas de Derivação
CHD	- Centrais Hidrelétricas de Desvio
CMEB	- Centro de Memória da Eletricidade no Brasil
GCH	- Grande Central Hidrelétrica
BEN	- Balanço Energético Nacional
SIN	- Sistema Interligado Nacional
ISO	- International Standard Organization
EMATER	- Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado
CREA	- Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura
O&M	- Operação e Manutenção
SPE	- Sociedade de Propósito Específico
RGR	- Reserva Global de Reversão
PCH-COM	- Programa de Desenvolvimento e Comercialização de Energia Elétrica de Pequenas Centrais Hidrelétricas
PROINFA	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
MME	- Ministério de Minas e Energia
PCF	- Prototype Carbon Found
mCH	- Mini Central Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

		UNIDADE
Hd	Queda d'água do projeto	<i>m</i>
P	Potência	<i>kW</i>
Q	Vazão	<i>m³/s</i>
V	Tensão	<i>V</i>
A	Corrente	<i>A</i>
rpm	Rotação por minuto	<i>rpm</i>
s	Tempo	<i>s</i>
min	Tempo	<i>minuto</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 BREVE HISTÓRICO

O processo de geração de eletricidade é bastante amplo e complexo, envolvendo vários campos da engenharia. Através de estudos geológicos é possível detectar na natureza locais que forneçam condições para a implantação de uma usina hidrelétrica. A partir daí surgem o desenvolvimento do projeto, as negociações de desapropriação para as áreas inundadas, a busca de financiamentos, contatos com fornecedores de materiais e mão-de-obra, busca de alternativas e compensações ao meio ambiente, a aprovação do governo, execução dos projetos civis, mecânico, elétrico, recepção e comissionamento dos equipamentos e finalmente a entrada em operação da instalação. Muitas destas atividades têm de ser desenvolvidas pautadas em normas de qualidade (ISO 9000) e de meio ambiente (ISO 14000) como forma de agilizar o processo, facilitar a obtenção de licenças e ter um elevado conceito perante a sociedade.

Uma usina hidrelétrica, dependendo do local da instalação, poderá aproveitar a energia sob as formas de vazão e queda. As usinas de vazão são instaladas em pontos de grande fluxo e velocidade, possuindo pequena variação no reservatório e sem grandes extensões inundadas, visto não haver necessidade de acúmulo. As usinas de reservatório aproveitam quedas e necessitam de grandes reservatórios, havendo a inundação de grandes porções de terra. Estas instalações regularizam a vazão dos rios sendo responsáveis por parte da energia que será utilizada futuramente em caso de necessidade, pois suas reservas são suficientes para vários meses.

Na barragem existem comportas que dão acesso à água às tubulações e que levam às unidades geradoras, onde a energia potencial da água se transforma em energia cinética. Ao chegar à turbina da máquina a água realiza trabalho mecânico sobre a mesma, transformando a energia cinética em rotação do eixo da unidade onde está acoplado o gerador. Com isto, devido as leis do eletromagnetismo, um campo magnético produzido no rotor do gerador da unidade criara o fluxo magnético girante no estator gerando assim uma força eletromotriz induzida.

Uma ampla rede de serviços auxiliares, porém essencial, das formas mais variadas é exigida para garantir a eficiência e a qualidade final do produto que é a energia para o consumidor. Destes sistemas citam-se: sistemas de ventilação e exaustão; circuito de água industrial (refrigeração da unidade) e água de serviço (uso geral); circuitos de ar comprimido para diversas finalidades; sistema de proteção contra-incêndio; equipamentos de transformação física, como filtros e equipamentos de troca térmica. Os sistemas de medição e proteção possuem, no entanto, maior influencia sobre a qualidade do produto como mostram as descrições a seguir:

- O sistema de medição: de temperatura, nível e pressão, no aspecto mecânico e de corrente e tensão no aspecto elétrico, podendo-se obter daí varias medidas compostas. Existem medidas que necessitam ser transduzidas como, por exemplo, a vazão. São estas medidas que serão referencias para os reguladores e para o acompanhamento do processo.
- O sistema de proteção: muitos são os pontos que necessitam de permanente monitoramento em uma hidrelétrica. Uma maneira fácil e barata é a utilização de relés, que são basicamente controladores *On-Off*, e circuitos elétricos, estes com a finalidade de proteger os vários equipamentos e mantê-los em níveis admissíveis e adequados de operação. Existe um valor ajustado de limite, ou *setpoint*, que é colocado em comparação com a grandeza medida, direta ou por meio de transdução. Estando esta dentro do valor de ajuste nada ocorre, porém ultrapassando o mesmo, acima ou abaixo, dependendo da característica de proteção, o circuito é desligado. Através de esquemas elétricos e/ou eletrônicos é feita toda a automatização das unidades geradoras. Os circuitos elétricos com seus contadores e relés realizam a amplificação de sinal permitindo o comando de grandes sistemas.
- Os sistemas de regulação: é de suma importância para a unidade de produção possuir um sistema de controle e supervisão adequado às necessidades do processo. A figura do operador serve em alguns casos como um elemento final de controle, alternador de *setpoint*, ou ainda peça chave na supervisão de todo o processo.

1.2 IMPORTÂNCIA

Uma fração expressiva da população brasileira – cerca de 15%, ou seja, 25 milhões de pessoas vivem privada do acesso à energia elétrica. Essas pessoas vivem em grande parte no meio rural. O meio rural é, por sua vez, um nicho de mercado para as fontes renováveis de energia, em função da disponibilidade de recursos, dos potenciais benefícios à atividade econômica local e dos altos custos de abastecimento via extensão da rede elétrica, ou mesmo com geração por óleo diesel.

A baixa capacidade energética para irrigação das lavouras, dentre outras atividades importantes para o desenvolvimento sustentável utilizando energia elétrica aliada às monoculturas existentes, falta de conforto em pequenas propriedades rurais, tais como televisão, freezer, computadores, estimula o grande êxodo rural para os grandes centros.

O governo tem disponibilizado extensas linhas que geram um custo altíssimo para manutenção das mesmas, mesmo sabendo que 80% a 90% dessas propriedades consomem menos de 3 kVA, o que gera um prejuízo ainda maior para as grandes centrais.

Levando-se em conta o custo para o governo das grandes linhas existentes no meio rural, a falta de recursos para construção das grandes hidrelétricas, o tempo para construí-las e a alta demanda existente, será mais econômico aproveitar os pequenos recursos hídricos existentes nas pequenas propriedades rurais suficientes para micro usinas, liberando uma linha de crédito de fácil acesso para o produtor?

O Governo Federal iniciou em 2004 o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – “Luz para Todos” com o objetivo de levar energia elétrica para a população do meio rural.

O Programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia com participação da Eletrobrás e de suas empresas controladas. A ligação da energia elétrica até os domicílios é gratuita.

As famílias sem acesso à energia estão majoritariamente nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano e nas famílias de baixa renda. Cerca de

90% destas famílias têm renda inferior a três salários-mínimos e 80% estão no meio rural (MME, 2006).

Por isso, o objetivo do Programa é levar a energia elétrica a estas comunidades para que elas a utilizem como vetor de desenvolvimento social e econômico, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar.

Além disso, a chegada da energia elétrica facilita a integração de outros programas sociais, como o acesso a serviços de saúde, educação, abastecimento de água e saneamento.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Segundo aspecto socioeconômico, a geração de energia elétrica através das microcentrais hidrelétricas apresenta uma solução favorável para o suprimento da demanda energética do setor rural. A descentralização da geração inserindo as microcentrais hidrelétricas no cenário atual em contraponto ao sistema interligado composto pelas grandes hidrelétricas justificaria o uso dessas microcentrais reduzindo os gastos com grandes perdas advindas pelas grandes extensões de linhas de transmissão e a enorme devastação ao ecossistema provocado pelos alagamentos para a construção das barragens de grande porte. A microcentral desenvolvida e avaliada deverá ser considerada como mais uma opção de geração de energia com qualidade na geração para o homem do campo trazendo benefícios a qualidade de vida da população rural.

1.4 DELIMITAÇÕES DO ASSUNTO E FORMULAÇÃO DE HIPOTÉSES

A proposta deste estudo é a realização de uma alteração física na estrutura da planta da microcentral do Centro de Energias Renováveis, mostrada na Figura 1, fazendo uma análise detalhada do comportamento do gerador de ímã permanente. A microcentral é composta de uma roda Pelton, constituída de uma rodízio de conchas, de eixo horizontal, com caixa metálica de proteção e acionada por meio de um único jato d'água através de um bocal cônico, conhecido no interior do país com a

denominação de “setia”. O estudo propõe a substituição da setia por uma válvula denominada de injetor. O injetor é usado para a regulação da descarga de água e, conseqüentemente, da potência fornecida, por meio de uma peça móvel, colocada na parte interna do injetor e acionada por mecanismo manual, hidráulico ou motorizado, denominado agulha. O mecanismo é atuado por um pequeno motor recebendo sinal, para abertura ou fechamento do injetor, através do tacômetro digital microprocessado com resolução de um pulso por volta do eixo do gerador.



Figura 1 – Vista externa da microusina do Centro de Energia Renovável

1.5 OBJETIVO DA PESQUISA

1.5.1 Objetivo geral

Apresentar os equipamentos e os procedimentos necessários para a implantação e aquisição de uma microcentral apresentando uma estimativa atualizada dos seus custos.

1.5.2 Objetivo específico

Avaliações técnicas elétricas e mecânicas, a operação e a manutenção da microcentral hidrelétrica do centro de energia renovável.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O objetivo no próximo capítulo 2 foi apresentar uma abordagem sobre a relevância dos aspectos ambientais das microcentrais em relação as demais fontes de geração além de descrever o quanto é importante a utilização de energia elétrica para o desenvolvimento do meio rural. Este capítulo capacita o leitor para a construção da microcentral hidrelétrica, relatando os estudos necessários para a elaboração do projeto.

O capítulo 3 visa o levantamento dos materiais para a aquisição de uma microcentral hidrelétrica contemplando todos os custos e é relatado uma estimativa sobre os custos para a montagem deste tipo de geração. São apresentados os motivos pelos quais se utilizou o gerador de ímãs permanentes, os custos das modificações implantadas na microcentral do centro de energia renovável, a operação e a manutenção da microcentral do estudo.

Tem-se no último capítulo o objetivo específico de analisar o comportamento do gerador na bancada e na microcentral utilizando instrumentos e ferramentas para a validação e verificação da qualidade da geração. Para tanto foi projetado e desenvolvido um sistema de controle de velocidade, no eixo do gerador com rotor de ímãs permanentes de ferrite, de baixo custo, capaz de apresentar um desempenho satisfatório no controle da frequência de tensão, mesmo com variação da carga.

Assim apresenta-se uma opção de geração de qualidade, com impactos ambientais reduzidos, para o atendimento à demanda da população que não tem acesso a energia elétrica.

2. MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA UMA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

As microcentrais hidrelétricas possuem características próprias quanto à capacidade máxima instalada e área do reservatório, definidas por resolução da ANEEL, além de possibilidades de adução e regularização de reservatórios.

2.1.1 Tipos de usinas em relação à capacidade de regularização do reservatório

Um estudo hidrológico sobre a quantidade de água escoada diariamente num riacho faz-se necessário para a classificação do tipo de usina. Veja as suas classificações, com relação:

a) A MCH com reservatório de acumulação, com regularização diária e mensal:

Quando a vazão do riacho no qual a MCH está instalada é inferior à necessidade do projeto para que a usina gere a potência máxima desejada, adota-se formação de um reservatório para regularizar a vazão da central.

Este reservatório pode ser regularizado diariamente ou mensalmente. A adoção de reservatórios com regularização diária ou mensal pode ser definida segundo estudos de dimensionamento de parâmetros físico-operativo do projeto.

b) A MCH sem reservatório de acumulação, a Fio d'água:

Quando a vazão de estiagem de um riacho é igual ou maior que a descarga necessária à potência necessária para atender à demanda máxima pretendida, é dispensável a utilização de reservatório de acumulação.

Nesse caso, o sistema de adução deverá conduzir a descarga necessária para o fornecimento de potência suficiente para atender à demanda máxima. Em usinas desse tipo, o vertedouro é utilizado praticamente na totalidade do tempo para extravasar o excesso de água.

2.1.2 Tipos de usinas em relação ao sistema de adução

A escolha pela adoção de um dos sistemas de adução anteriormente especificados dependerá de estudos das condições topográficas e geológicas do local do aproveitamento.

O sistema de adução em baixa pressão com escoamento livre em canal ou alta pressão em conduto forçado é indicado como solução economicamente mais viável quando a inclinação da encosta e a fundação apresentarem condições propícias à construção de um canal.

O sistema de adução em baixa pressão por meio de tubulação ou alta pressão em conduto forçado é indicado caso haja condições contrárias às apresentadas acima, a opção por tubulação deve ser a economicamente mais viável.

2.1.3 Tipos de usinas quanto à potência instalada e queda

As microcentrais hidrelétricas podem ser ainda diferenciadas pela potência instalada, diretamente ligada à queda do projeto, uma vez que, isoladamente, a potência pode não caracterizar efetivamente o tipo de usina.

Veja a Tabela 1 de classificação de pequenas centrais hidrelétricas quanto à potência instalada e quanto a queda do projeto.

Tabela 1 – Classificação das centrais quanto a potência instalada

CLASSIFICAÇÃO	POTÊNCIA - P (kW)	QUEDA - Hd(m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	$P < 100$	$Hd < 15$	$15 < Hd < 50$	$Hd > 50$
MINI	$100 < P < 1000$	$Hd < 20$	$20 < Hd < 100$	$Hd > 100$
PEQUENAS	$1000 < P < 30000$	$Hd < 25$	$25 < Hd < 130$	$Hd > 130$

Fonte: Centro Nacional de Desenvolvimento de PCH - 2006

As ressalvas sobre as delimitações básicas, encontradas no manual sobre microcentrais hidrelétricas da eletrobrás, são:

- prevê barragens e vertedouros com alturas máximas de até aproximadamente 3,0 metros (notar que não se refere a queda do projeto);
- admite sistemas adutoras somente com canais e/ou tubulações;
- não se aplica a barragens em vales em que o desvio do rio necessitaria ser feito por túneis;
- prevê obras civis projetadas sem sofisticações, com dimensões mínimas e materiais econômicos;
- considera instalação de equipamentos eletromecânicos simples, mas funcionais;
- admite que a distância do local do aproveitamento ao centro consumidor não será grande, para não aumentar o custo do sistema de transmissão;
- as estruturas preconizadas para o circuito de geração permitem descargas até 2,0 m³/s;
- as dimensões da casa de máquinas e os diagramas elétricos são previstos para a instalação de apenas uma unidade geradora, o que pode ser considerado como um módulo a ser repetido caso se deseje mais de uma unidade geradora na mesma central.
- não foi prevista a interligação com outros sistemas, caso em que o interessado deverá procurar a concessionária local.

2.2 ROTEIRO PARA A ELABORAÇÃO DO PROJETO

A implantação de microcentrais hidrelétricas, cuja potência máxima é de 100kW, deve ser executada em uma única etapa a qual pode abranger de 1 a 12 meses.

2.2.1. Fases

De modo simplificado, para MCH, em princípio, em cada uma das suas etapas, em maior ou menor grau distinguem-se as seguintes fases: estudos, obras civis, equipamentos mecânicos, equipamentos elétricos, custos e avaliações.

2.2.2 Estudos

Esta fase, cujo objetivo principal é avaliar as possibilidades do aproveitamento. É compreendida pelos estudos topográficos, hidrológicos, geológicos e geotécnicos, ecológicos e sócio-econômicos e mercado.

Os estudos topográficos, com maior ou menor detalhamento, devem ser realizados, preferencialmente, em toda a área que terá influência na central. Caso a central seja uma MCH, o estudo topográfico se restringirá ao lado do riacho onde o arranjo será lançado, com abrangência da área a ser inundada pelo pequeno lago, devendo ser realizado de uma só vez, com curvas de nível de metro em metro.

O mapeamento existente e visita a região são de grande valia no planejamento dos estudos topográficos.

Os estudos topográficos permitem estabelecer quais os melhores arranjos para os componentes da central, bem como, em primeira aproximação, a queda bruta para o projeto.

Os estudos hidrológicos permitem determinar três vazões que são fundamentais para o projeto da central:

- a) A vazão normal do aproveitamento, em m^3/s , que será utilizada no dimensionamento de vários componentes da central e para determinação de sua potência normal;
- b) A vazão da cheia, em m^3/s , para dimensionamento das obras de desvio, normalmente com recorrência de 5 anos para MCH, para arranjos com barragem de concreto e de terra;
- c) A vazão de cheia, em m^3/s , para o dimensionamento dos extravasores, obras permanentes, normalmente de 500 anos para estruturas de concreto.

Além destas vazões, juntamente com as quedas resultantes dos possíveis arranjos, os estudos hidrológicos permitem determinar vazões máxima e mínima turbinadas e do aproveitamento, níveis máximos e mínimos de montante e jusante, áreas inundadas e, em primeira aproximação, as potências da central, as quais somente podem ser determinadas em caráter definitivo quando, pelo menos, as etapas de estudos de mercado e obras civis estiverem concluídas.

Para que os estudos hidrológicos apresentem alto grau de confiabilidade, é indispensável o conhecimento do comportamento do riacho em longo período. Em casos que tais dados não estão disponíveis, metodologias de transposição de dados podem ser usadas com as devidas reservas.

O projeto, a implantação e a utilização das estruturas que compõe o arranjo exigem conhecimento local da geologia e das cargas possíveis de serem suportadas, logo, estudos geológicos e geotécnicos com maior ou menor precisão, dependendo do porte da central, devem ser executados. Estradas existentes, depósitos de materiais possíveis de serem usados nas obras, também fazem parte destes estudos.

Os estudos ecológicos e sócio-econômicos delimitam o impacto da central no ecossistema e deve ser avaliado no local, antes de qualquer tomada de decisão sobre a viabilidade da central, de seu arranjo final e sua operacionalidade.

A implantação da central parte da necessidade presente e futura do mercado onde a energia será consumida. Assim, seu perfeito delineamento e balisamento são indispensáveis desde o início dos estudos para implantação da central.

2.2.3. As Obras Civis

Basicamente, existem três tipos de arranjos para os componentes das centrais hidrelétricas: centrais hidrelétricas de represamento – CHR, centrais hidrelétricas de desvio – CHD e centrais hidrelétricas de derivação – CHV (SOUZA, 1992).

Os principais componentes da obra civil são vias de acesso, canteiro ou acampamento, barragem, desvio do riacho, tomada d'água, sistema de baixa pressão, canal ou suportes para o conduto de baixa pressão, câmara de carga, chaminé de equilíbrio, suportes para tubulação forçada, casa de máquinas e canal de fuga.

A microcentral hidrelétrica do centro de energia renovável mostrada na Figura 2 pode ser classificada como uma central hidrelétrica do tipo de desvio, pois não existe barragem somente a simulação do riacho pelos reservatórios. O importante neste esquemático é representar com clareza o exemplo das obras realizadas na encosta junto ao centro de energia renovável para a construção da microcentral para o estudo.

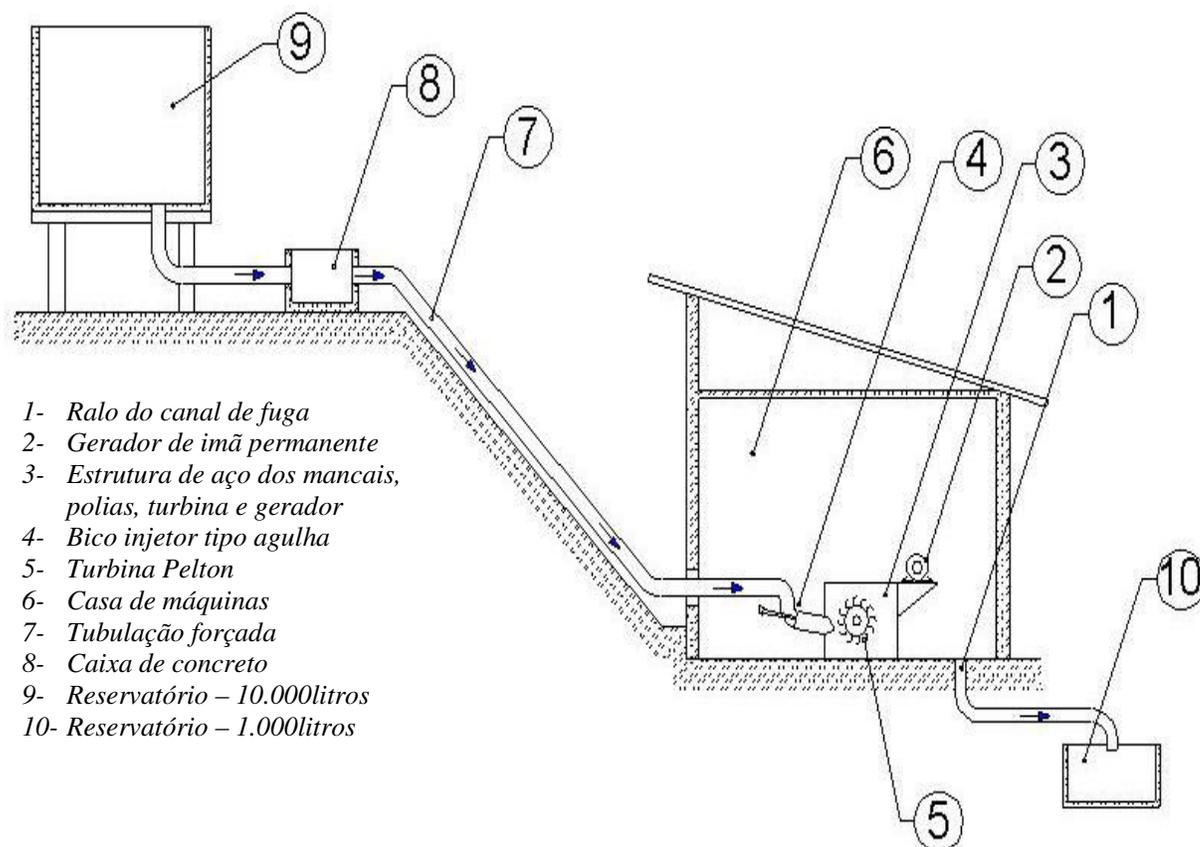


Figura 2 – Microcentral hidrelétrica do centro de energia renovável

2.2.4. Os Equipamentos Mecânicos

Os principais equipamentos mecânicos das centrais hidrelétricas são grades, limpadores de grades, comportas permanentes e desmontáveis (Stop Log), válvulas, tubulações, juntas de dilatação, turbinas hidráulicas, mancais e volantes.

2.2.5. Os Equipamentos Elétricos

Os equipamentos elétricos das centrais hidrelétricas são conjuntos constituídos pelos sistemas de acionamento eletro-eletrônico, sistemas de proteção, geradores, reguladores de velocidade, de tensão e de carga, quadro de comando, proteção, sistemas eletro-eletrônico de baixa e alta tensão e linhas de transmissão.

2.3 AS VANTAGENS E AS DESVANTAGENS DO USO DAS MICROCENTRIAS HIDRELÉTRICAS SOBRE OUTRAS FONTES

A vitalidade dos seres humanos consiste na dependência da ingestão de água potável, da respiração de ar puro, do solo rico em nutrientes próprio para o plantio, e de condições climáticas estáveis e confortáveis. Mediante estes fatos, pergunta-se: Algumas destas características de sobrevivência do homem têm preço? Onde é comercializado? Quanto custa? A resposta é simples: “Não está à venda”, mas não desanime o caminho é a preservação do ecossistema.

Pesquisas indicam que os maiores vilões à devastação do meio ambiente, principalmente são os desmatamentos, a poluição dos veículos automotivos, as indústrias e as fontes de energia elétrica não-renováveis. Limita-se a discussão sobre a influência da geração de energia por fontes que afetam, poluem e ou causam impactos ambientais. Sabe-se que a matriz energética mundial tem como base o uso de combustíveis fósseis e que no Brasil mais do que 85% da energia são de hidrelétricas. É neste contexto que se justifica a escolha da geração distribuída via microcentrais, minicentrais e pequenas centrais hidrelétricas.

Veja alguns dados importantes, num breve comparativo, entre as tabelas: Tabela 2 fonte de energia não-renovável ou esgotável a curto prazo e a Tabela 3 fontes de energia renovável ou inesgotável a longo prazo (MAGALHÃES, 2006).

Tabela 2 - Fonte de Energia não-renovável

TIPO DE GERAÇÃO	FONTE PRIMARIA	DESVANTAGEM	VANTAGEM
Termelétrica	Derivados do petróleo Carvão mineral	Emissão de gases poluentes e particulados, originados da combustão, nocivos ao ser humano. Chuva ácida.	Baixo custo de implantação e operação. O diesel, por exemplo, pode ser facilmente estocado.
	Gás natural	Emissão de gases poluentes e partículas, provenientes da combustão.	Baixo custo de implantação e operação. Comparado com outras fontes primárias de combustíveis fósseis, o gás é considerado de reduzida emissão de poluentes e particulados. Largamente usado na cogeração em indústrias atingindo valores de eficiência >85%.
Termonuclear	Urânio	Dificuldade para destinação definitiva dos resíduos radioativos. Potencial de vazamentos e explosão radioativa. A usina necessita de grande volume d'água para o resfriamento dos reatores, condição em que aquece a água dos rios e ou a costa litoral onde está instalada.	Não gera gases poluentes e particulados.

Tabela 3 - Fonte de Energia Renovável

TIPO DE GERAÇÃO	FONTE PRIMARIA	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Biomassa	Lixo Resíduos Agrícolas Resíduos Industriais	Apesar de emitir gases poluentes e particulados, conclui-se que a queima do resíduo agrícola é favorável, visto pelo lado do balanço de gás carbônico, porque no cultivo deste resíduo ocorre a absorção de gás carbônico da natureza. Redução das áreas destinadas aos lixões. Aplicação na cogeração nas usinas sucroalcooleiras.	Emissão de gases poluentes e particulados.
Eólica	Vento	Não gera gases poluentes e particulados. A captação do vento pode ser usado para o bombeamento d'água além da produção de energia elétrica	Necessita de área aberta, ventos em condição favorável e o uso de baterias. Grandes ruídos
Solar	Fotovoltaica Fototérmica	Não gera gases poluentes e particulados, pode ser usado no aquecimento de água, principalmente em países tropicais como o Brasil.	Alto custo. Necessidade de baterias para geração fotovoltaica.
Hídrica Fluvial	Grandes centrais Hidrelétrica	Não gera gases poluentes e particulados. Alta capacidade de geração de grandes blocos de potência	Impactos ambientais por causa do alagamento de grandes áreas
	Pequenas, Mini e Micro Centrais Hidrelétricas	Não gera gases poluentes e particulados. Impactos ambientais reduzidos. Geração distribuída	Necessidade de queda e volume d'água em condições favoráveis.
Geotérmica	Água Fonte térmica do interior da terra	Não gera gases poluentes e particulados.	Necessidade da perfuração de grandes profundidades para o uso das fontes térmicas do interior da terra. Instabilidade do interior da terra
Hídrica Oceano	Ondas do mar Mares	Não gera gases poluentes e particulados.	Usina instalada no litoral, tendo á desvantagem da transmissão para os centros de consumo no interior do país - custo da transmissão.
Célula a combustível	Hidrogênio	Não gera gases poluentes e particulados.	Alto custo de fabricação do combustível hidrogênio. Em algumas aplicações, gera vapores d'água, aquecendo indiretamente o planeta.
Fusão nuclear	União de átomos	Não gera gases poluentes e particulados.	Potencial para explosões.
Biodigestor	Resíduos Orgânicos	Queima do metano proveniente da decomposição dos resíduos orgânicos para geração de energia, eliminação dos odores de mau cheiro.	Gera gases poluentes e particulados.

Analisando a Tabela 3, as fontes de energias renováveis são vantajosas em termos ambientais. É considerado o uso das fontes de energia não renováveis sob dois aspectos básicos são o custo e a indisponibilidade dos recursos renováveis. Acredita-se que o custo de implantação e de operação de uma planta das fontes não-renováveis são

baixo. É preciso a inserção do custo dos impactos ambientais dessas fontes energéticas, assim sendo, mesmo que a tecnologia atual das fontes renováveis tenha custo elevado, num balanço entre estes fatores, a expectativa é que a energia renovável é de menor custo.

2.4 OS ASPECTOS SOCIAIS

Em 2002, enquanto milhões de brasileiros das regiões urbanas se surpreendiam com a possibilidade de um “apagão” que os deixaria sem os confortos da eletricidade, outros desconheciam essa angústia, pois viviam no campo diariamente com a ausência deste serviço.

Essa realidade, que hoje é ainda inacessível para mais de 25 milhões de pessoas no século XIX (WALTER, 2000), embora tenha data prevista em lei para acabar, ainda é razão de preocupação e muito empenho das entidades responsáveis pelo setor elétrico brasileiro, diante do desafio que representa para um país de distâncias continentais e limitações orçamentárias, dentre outras tantas dificuldades.

Os resultados da primeira fase revelavam que, em quase a totalidade do universo pesquisado, a perspectiva do uso da energia elétrica estava limitada ao conforto doméstico, mediante a intenção declarada de se adquirir um televisor, geladeira, ferro elétrico e, em algumas regiões, um chuveiro elétrico, além, evidentemente, da iluminação.

Com uma visão míope, para o homem do campo, o sonho da eletricidade pouco ultrapassava a perspectiva de não mais se utilizar o ferro de carvão sobre a roupa impregnada pelo cheiro do querosene das lamparinas que iluminavam o atraso da roça. Muito poucos vislumbravam a eletricidade como algo que permitisse uma melhoria de seu padrão econômico. É verdade que alguns, sobretudo nas regiões centro-oeste, sul e sudeste, entendiam que ela poderia ser utilizada de uma forma produtiva, mas eram exceções.

Mais do que um fator de consumo capaz de oferecer bem-estar, a energia elétrica pode ser considerada um insumo, cujos resultados revertem-se diretamente aos agricultores, agregando valor a seus produtos submetidos a um processo de

beneficiamento. Um empreendimento onde geralmente não há volume nem condições que possibilitem, de uma forma rentável, o investimento em equipamentos, máquinas e instalações necessárias para o processamento ou armazenagem de produtos agrícolas, inviáveis para serem implantadas individualmente.

2.5 O DESENVOLVIMENTO DO MEIO RURAL

A sociedade pode se beneficiar em diversos pontos quando ocorre a implantação de uma central hidrelétrica de pequeno porte. Em muitos casos, é interessante considerar outros usos da água além de apenas a geração de energia elétrica. As possibilidades de uso múltiplo do reservatório são o abastecimento de água, a agricultura de vazante, a agricultura irrigada, a pesca em geral e a piscicultura intensiva.

Caso se destine o uso do reservatório para fins de abastecimento de água a populações e lazer, deverá ser verificado se a água apresenta características adequadas a esses fins, através da coleta e exame de amostras em laboratório de órgão especializado. Devem-se definir as providências para controlar o despejo de esgotos sanitários ou industriais na bacia.

Outro fator que pode ser realizado é uma espécie de sociedade da energia gerada. Vizinhos de propriedades podem juntar-se e realizarem a implantação de uma central hidrelétrica com investimentos acordados entre eles. Com isso, o custo de implantação pode ser rateado entre os sócios e a energia gerada pode ser distribuída para os mesmos.

Apesar de a tecnologia de baixo custo não contemplar reservatórios para acumulação e regularização sensíveis, pode ser recomendável, por exemplo, estudar-se a viabilidade econômica do projeto de centrais de pequeno porte em conjunto com um açude para irrigação, ao mesmo tempo em que se prestaria à piscicultura, criação de aves, abastecimento d'água e lazer, bem como implantação de algum tipo de beneficiamento da produção local. Neste caso, pode ser necessária uma reavaliação de todo o projeto, visando analisar-se a viabilidade dessa implantação, o que pode ser obtido com o apoio de entidades de fomento como, por exemplo, a EMATER, a

SUDEPE (Superintendência de Desenvolvimento da Pesca e entidades estaduais diversas).

2.6 A LEGISLAÇÃO PARA UMA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

A legislação brasileira classifica os aproveitamentos hidrelétricos em dois tipos, conforme a finalidade da energia produzida, em serviços públicos e de uso exclusivo.

Os aproveitamentos destinados aos serviços públicos são aqueles cuja energia elétrica gerada, independentemente da potência da usina, se destina ao uso geral, sendo para isso comercializada pelo seu produtor, ou seja, a concessionária de serviços públicos. Dependem sempre, portanto, de uma concessão outorgada pelo Governo Federal.

Já os aproveitamentos destinados ao uso exclusivo são aqueles cuja energia elétrica gerada se destina ao uso exclusivo de seu produtor, que no caso é denominado Autoprodutor. Podem depender simplesmente de uma notificação para fins estatísticos, ou de autorização federal, ou ainda de uma concessão federal, conforme o valor da potência instalada. A legislação vigente até o momento estabelece faixas de potência para tal fim, segundo a Lei Nº 10.848, de 15 de março de 2004, (ANNEL, 2004).

Para o perfeito cumprimento dos requisitos legais sobre o potencial das microcentrais hidrelétricas, deverão ser observadas as normas para apresentação de estudos e de projetos de exploração de recursos hídricos para geração de energia elétrica, aprovadas através da Lei Nº 9.074, de 07 de julho de 1995 que estabelece normas para a outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências.

“**Art. 8º.** O aproveitamento de potenciais hidráulicos, iguais ou inferiores a 1.000 kW, e a implantação de usinas termelétricas de potência igual ou inferior a 5.000 kW, estão dispensadas de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas ser comunicados ao poder concedente.” (Parágrafo acrescentado pela Lei nº 10.848, de 15.03.2004).

Os interessados em aproveitamentos hidrelétricos para uso exclusivo deverão ter a propriedade da área onde será construída a central, inclusive as inundadas pelo eventual reservatório, ou obter uma autorização dos proprietários ribeirinhos.

A notificação acima referida e feita através de correspondência ao Diretor-Geral da ANEEL.

Para solicitar o registro, o empreendedor deve utilizar formulário próprio e entregue à Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração – SCG – da ANEEL junto com o registro do CREA do responsável técnico, além dos documentos de propriedade ou de direito de uso da área onde será implantada a microcentral.

3 CUSTO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

3.1 A ESTIMATIVA DE CUSTOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar o roteiro de trabalho usado para discriminar as obras e os equipamentos adotados para os cálculos. Na segunda parte apresentam a estimativa dos custos das obras para a implantação, a estimativa dos custos para a aquisição dos equipamentos eletro-mecânicos até 30kW, o levantamento dos custos das modificações realizadas na microcentral do centro, a explicação técnica do baixo custo do gerador de ímãs permanente e um breve relato sobre as variações dos custos apresentados por BALARIM *et al* para que o leitor possa comparar com os custos apresentados em percentuais para a implantação e aquisição da microcentral do centro de energia renovável.

3.1.1. Roteiro de Trabalho

A estimativa inicial de custo deve ser feita segundo os principais componentes e obras civis de uma microusina hidrelétrica. Eles abrangem todas as estruturas e equipamentos do aproveitamento, incluindo também os custos indiretos.

As principais obras civis e componentes para a instalação de uma microcentral hidrelétrica são constituídas de casa de máquinas, desvio do riacho, barragem, canal adutor e os equipamentos eletromecânicos, que representam uma parte dos custos. Os custos diretos, indiretos e os custos totais sem juros fazem parte desta estimativa.

O custo de obras civis da casa de máquinas é fornecido em função da área construída, dado em R\$/m². O valor é baseado em uma construção de alvenaria. Caso haja possibilidade de execução da casa de máquinas em madeira ou em taipa, ou com reaproveitamento de materiais de edificações já existentes, ou ainda aproveitando a ociosidade de mão-de-obra e equipamentos disponíveis para outras tarefas, dever-se-á

levar em conta essas hipóteses, adotando-se, conseqüentemente, custos reduzidos em relação ao valor apresentado.

Prevê-se que o desvio do riacho é necessário apenas no caso da barragem ser construída. As microcentrais hidrelétricas, por serem de pequeníssimo porte em relação às pequenas centrais hidrelétricas, PCH(s), necessitam a construção de uma barragem pequena, apenas no sentido de regularizar o nível d'água do riacho e garantir o fornecimento total da potência instalada na usina.

O custo da barragem é dado em função da área construída, em R\$/m³. O valor é baseado em uma barragem de pedra argamassada pequena. Alerta-se para o fato de que, caso tivesse sido adotado barragem de terra e canal extravasor, as obras teriam dimensões reduzidas e, portanto, sem um valor de investimento significativo. Aqui se escolhe um arranjo de microcentral que mais encarecesse seu custo, como garantia de se chegar a um valor bem aproximado do investimento necessário a uma microcentral.

O canal adutor pode ser tanto em canal aberto ou em tubulação. O custo aqui engloba toda a captação d'água desde a barragem (quando houver) até a casa de máquinas. O custo associado é dado em R\$/m de construção ou tubulação, independente se feito por um ou outro esquema. Indica-se tubulação em PVC por se tratar de material alternativo de fácil aquisição.

O custo dos equipamentos eletromecânicos é fornecido em função da potência a ser instalada, dado em R\$/kW. O valor inclui turbina, regulador de velocidade, transmissão, comporta, válvula borboleta, volante de inércia, curva de sucção, tubo de sucção, grade, gerador e quadro de comando, com os devidos equipamentos de proteção e controle da geração elétrica. Quando o projeto admitir simplificações, como a não utilização do regulador automático de velocidade, ou a substituição de comportas metálicas por pranchões de madeira, o custo global dos equipamentos poderá sofrer redução significativa. Nesta hipótese, o caso deverá ser analisado em particular e deverão ser adotados valores adequados para o projeto.

O custo direto total corresponde à soma das contas relativas aos itens anteriores.

Adotam-se para o cálculo dos custos indiretos os custos referentes ao canteiro, engenharia e administração do proprietário, o valor global obtido a partir de percentuais aplicados sobre o custo direto total. Considera-se que cerca de 20% do

custo direto total, incluindo-se o transporte dos equipamentos, ferramentas e materiais para a construção de uma central hidrelétrica de pequeno porte.

O custo total sem juros corresponde à soma dos custos diretos e dos custos indiretos.

3.1.2. Estudo de Caso: Estimativa de custo para microcentral hidrelétrica

O objetivo é o de estabelecer uma rápida referência sobre os custos para a aquisição e a implantação de microcentrais hidrelétricas, para diversas faixas de potência.

A Tabela 4 mostra o custo para a aquisição de microcentrais composta de turbina roda Pelton de 01 jato, estrutura de aço, mancais e gerador de imã permanente. Os valores apresentados referem-se a capacidade de potência gerada. Estes custos foram disponibilizados pelo fabricante NH Geradores.

Tabela 4 – Custo para aquisição de microcentral hidrelétrica

Microusina Hidrelétrica de 01 Jato (W)	Valor (R\$)
350	3.360,00
800	3.980,00
1200	4.080,00
2200	4.560,00
4000	6.400,00
6000	6.740,00
8000	7.170,00
10000	7.500,00
15000	8.560,00
20000	9.140,00
25000	15.070,00
30000	15.540,00

Fonte: Geradores NH - 2006

A estimativa de custos para a implantação mostrada na Tabela 5 considerou as formulações, mencionadas no item anterior, para a discriminação dos materiais, mão-de-obra e equipamentos utilizados para a construção simplificada de uma microcentral hidrelétrica. Os valores foram pesquisados no site www.piniweb.com.br e acessados em janeiro de 2007.

A Tabela 5 mostra uma estimativa dos custos por unidade dos equipamentos aplicados para a montagem de microcentrais hidrelétricas.

Tabela 5 – Estimativa dos custos para a implantação de um microusina

Discriminação	Valor (R\$)	Unidade
Construção civil da casa de máquinas	204,00	m ²
Escavação manual do solo	8,00	m ³
Concreto dosado em central convencional brita 1 e 2 (resistência de 15MPa)	166,89	m ³
Fôrmas de madeira de chapa compensada plastificada	25,00	m ²
Telhas de amianto	8,00	m ²
Tela de aço soldada CA-60 (diâmetro 5,60mm)	3,97	kg
Revestimento com blocos de concreto	12,50	m ²
Grades metálicas (peso da estrutura de 40 a 50 kg/m ²)	7,47	kg
Comporta de madeira (maçaranduba)	1.516,67	m ³
Linhas de transmissão, composta de duas fases de 220V, nas potências:		
1kVA	1,50	m
3kVA	2,28	m
5kVA	3,58	m
10kVA	9,14	m
20kVA	22,30	m
40kVA	62,20	m
60kVA	104,58	m
100kVA	203,34	m
Tubo de PVC, para os seguintes diâmetros (mm)		
75	6,54	m
100	10,72	m
150	22,23	m
200	23,81	m
250	37,00	m
300	47,16	m

Fonte: www.piniweb.com.br – jan/2007

O levantamento do custo das modificações, realizadas na microusina do Centro de Energias Renováveis, é representado e discriminado na Tabela 6. Tem-se o injetor como equipamento de custo variável, pois depende do diâmetro da tubulação de entrada. Os demais equipamentos possuem custos fixos para qualquer faixa de potência instalada.

Tabela 6 – Custo das modificações

Equipamentos	Tacômetro digital	Sensor Indutivo	Injetor tipo Agulha	Motor	Acoplamentos Diversos	Mão-de-Obra	Total
Custo (R\$)	500	110	300	120	50	120	1200

O uso do gerador de imã permanente pode ser justificado pelo seu baixo custo e pela tecnologia nacional, no entanto, o equipamento possui características desfavoráveis como baixo fluxo magnético e conseqüentemente aumento de sua carcaça. A razão específica da utilização de Ferrite como material magnético para a confecção do rotor advém de suas características técnicas. Em geral as características técnicas do Ferrite, encontrados no mercado, são: temperatura máxima de trabalho 230°C, intensidade magnética média 1500 Gauss e resistente a umidade. Outras ligas magnéticas como Neodímio (Terras Raras) ou Samário-Cobalto apresentam intensidade magnética de 5 a 10 vezes maior que o Ferrite, no entanto, os custos para a aquisição destes materiais aumentam de forma significativa. Em microcentrais hidrelétricas o aumento da carcaça não compromete o desempenho e a instalação da central porque este tipo de central tem potências de até 100kW.

O estudo de BALARIM *et al* (1996) demonstrou que seis itens (barragem, adução, tubulação forçada, equipamento eletromecânico, casa de máquinas e linha aérea de distribuição) foram responsável pela quase totalidade dos custos (chegando a 97% em alguns casos), cabendo aos demais elementos uma participação mínima nos custos do aproveitamento. A barragem cujo custo é, no projeto-padrão, representado de 9 a 25% do custo total que é tanto mais alto quanto menor for à potência do aproveitamento. O canal, totalmente revestido em alvenaria, representou de 2 a 23% do custo, crescente com a distância e pouco variando com a vazão e, portanto, com a potência. Esta é uma característica das microusinas: as dimensões do canal de adução se aproximam dos mínimos construtivos, acarretando assim um custo unitário quase constante por unidade de comprimento. O conduto forçado, representando de 8 a 16% do custo total, foi considerado de ferro dúctil, material existente no mercado capaz de satisfazer à necessidade de diâmetros e pressões de serviço exigidas pelas diversas variantes do projeto-padrão. A casa de máquinas chega a representar 17% dos custos nos aproveitamentos de menor potência, reduzindo sua participação a 10% na faixa próxima a 100 kW. A área de construção, totalmente dependente das dimensões do equipamento eletromecânico, tem pequena variação com o aumento da potência. O equipamento eletro-mecânico, representou 38% dos custos. Este valor se assemelha aos 40% citados na literatura técnica que trata de aproveitamentos com potência de até

10.000 kW. A rede aérea de distribuição, cujo custo manteve uma relação clara com a potência a ser transmitida, ficou com a faixa de 9 a 15% do total, apresentado por BALARIM *et al* (1996).

A microcentral hidrelétrica do centro de energia renovável representou um percentual dos custos totais em torno de 61% para os equipamentos eletro-mecânico, 9,5% pela casa de máquinas e pela caixa de admissão d'água, 7,5% para a tubulação e conexões em PVC e o regulador de velocidade 22%, composto do injetor e acionamento motorizado. A microcentral do centro não possui barragem, portanto, o custo foi desprezado.

3.2 A OPERAÇÃO E A MANUTENÇÃO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

3.2.1 A operação

O funcionamento baseia-se na abertura e no fechamento da válvula para aumentar ou diminuir a vazão de água. Assim, ocorre o controle da água, acionando e controlando a velocidade de rotação da turbina que, por sua vez, está acoplado ao gerador de energia elétrica. Os comandos são de partida, regime, parada e manobra emergencial.

A microcentral, utilizada no estudo, possui sua operação simplificada por apresentar-se automatizada e os comandos controlados via botoeiras, localizadas no painel de controle. O painel é constituído de chave manopla de duas posições, sendo a posição à esquerda referente ao fechamento da agulha do injetor para o enchimento da tubulação, *start-up* e parada da usina. Quando a chave encontrar-se à direita, automaticamente o painel envia um sinal designando a abertura da válvula injetora. O controle é automático e a velocidade da ponta do eixo do gerador é programável via tacômetro digital microprocessado.

3.2.2 A manutenção

A Tabela 7 apresenta o Plano de Manutenção para a microcentral do Centro de Energias Renováveis com base no Manual de Microcentrais da Eletrobrás (ELETROBRÁS, 1985) dividido pela periodicidade de manutenção nos equipamentos. A Tabela apresenta a periodicidade mensal, trimestral, semestral, anual e quinquenal para a realização da manutenção. A Tabela é auto-explicativa determinando e descrevendo o tipo e a maneira para a inspeção e a forma para a execução do serviço a ser realizado por equipamento.

Tabela 7 – Manutenção nas Microcentrais Hidrelétricas

Eletrobrás, 1985

MANUTENÇÃO NAS MICROCENTRAIS HIDRELETRICAS	
PERIODICIDADE	MENSAL
EQUIPAMENTO OU ESTRUTURA	INSPEÇÃO E SERVIÇOS A REALIZAR
Válvula borboleta	Limpeza e lubrificação dos componentes de acionamento.
Gerador e excitatriz	Limpeza no estator e rotor.
Painel de controle	Limpeza e verificação dos contatos elétricos.
Transformadores de força	Inspeção visual.
Serviços Auxiliares	Inspeção visual de todos os elementos.
Barragem	Verificação de surgência de água, da situação física do extravasor, trincas, solapamentos.
Reservatório	Verificação do assoreamento e do desenvolvimento de plantas aquáticas.
Grades	Limpeza de resíduos (se necessário, diminuir o período entre uma e outra limpeza).
MANUTENÇÃO NAS MICROCENTRAIS HIDRELETRICAS	
PERIODICIDADE	TRIMESTRAL E SEMESTRAL
EQUIPAMENTO	INSPEÇÃO E SERVIÇOS A REALIZAR
INSPEÇÃO TRIMESTRAL	
Válvula borboleta	Limpeza externa e lubrificação da derivação ("BY PASS").
Turbina e Gerador	Lubrificação dos rolamentos do mancal do eixo turbina, rolamentos do gerador, eixo roscado da regulação da agulha no injetor.
Prédio da central	Exame geral no edifício, cercas, muros, valas e muros de arrimo. Telhas (Goterias), Pisos.

MANUTENÇÃO NAS MICROCENTRAIS HIDRELETRICAS	
INSPEÇÃO TRIMESTRAL	
Barragem	Limpeza do sistema de drenagem superficial, verificação do aparecimento de trincas de erosões superficiais e da ocorrência de recalques.
Turbina-gerador	Verificar estado e conservação das correias das polias (conferir ajuste de tensão).
Baterias	Medir e conferir a tensão da bateria, que alimenta os instrumentos do painel de controle.
PERIODICIDADE	ANUAL
EQUIPAMENTO	INSPEÇÃO E SERVIÇOS A REALIZAR
Barragem	Inspeção do estado geral do reservatório e respectiva limpeza; reparos e lubrificação da tomada d água, das comportas; inspeção geral de estabilidade do extravasor e serviços gerais de capinagem.
Canal adutor	Limpeza e reparos nos bueiros para drenagem e nas paredes laterais.
Tubulação forçada	Capina, retificação das canaletas e drenagem e rampas do leito, limpeza, reparos e ajustes dos flanges das juntas de dilatação e limpeza e lubrificação dos berços.
Válvula borboleta	Limpeza interna, externa e reparos nas conexões da tubulação de equilíbrio de pressão.
Rotor da turbina	Verificação de desgaste.
Tubo de sucção	Inspeção geral no canal de fuga.
Grupo gerador	Limpeza geral, medição de folgas dos mancais e inspeção geral dos anéis de vedação.
Gerador	Inspeção, limpeza; resistência de isolamento, estator, rotor, muflas e cabos. Medições da resistência de neutro do aterramento.
Painel	Verificação do alinhamento, ponto de corrosão e acúmulo de pó das estruturas; limpeza dos contatos de comando.
Transformadores de força	Inspeção geral externa com verificação da pintura, limpeza da carcaça, radiadores, buchas e indicadores de nível do óleo, resistência de isolamento dos enrolamentos, buchas e óleo, reaperto de conexões.
Aterramento	Limpeza e inspeção geral, verificando sinais de trincas e conexões de linha e terra dos pára-raios, inspeção em todas as conexões de terra, tanto nos eletrodos como nos equipamentos e nas estruturas, verificando limpeza e oxidação.
Talha	Inspeccionar e verificar a necessidade de lubrificação das correntes; verificar engrenagens, dentes, chaves, pinos e contrapinos; colocar graxa nova.
Prédio da central	Exame detalhado das chaminés e dos ventiladores; retocar pintura das paredes e das esquadrias.

MANUTENÇÃO NAS MICROCENTRAIS HIDRELETRICAS	
PERIODICIDADE	QUINQUENAL (5 EM 5 ANOS)
EQUIPAMENTO	INSPEÇÃO E SERVIÇOS A REALIZAR
Tomada d água	Pinturas das comportas.
Canal adutor	Inspeção geral do vertedouro e grade. Grade: pintura.
Tubulação forçada	Inspeção geral e retoques na pintura da superfície externa.
Filtro de água de refrigeração	Pintura geral da superfície interna e externa.
Turbina e Gerador	Substituição dos rolamentos.
Válvula borboleta	Verificação das condições de funcionamento, possibilidade de substituição do anel de vedação.
Grupo gerador	Desmontagem, reparos gerais, internos, externos e pintura de turbina.

Fonte: ELETROBRÁS - 1985

4. O ESTUDO DE CASO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA DO CENTRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

4.1 DADOS TÉCNICOS DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA

A microcentral hidrelétrica do estudo de caso proposto possui os seguintes dados técnicos e eles são turbina do tipo roda Pelton com 0,40 m de diâmetro, sistema de controle no injetor tipo agulha motorizado, regulador de velocidade por um tacômetro digital microprocessado fabricado por S & E, com sinal através de sensor indutivo fabricado por SENSE, gerador com rotor de ímãs permanentes de 4 pólos, tensão nos terminais do gerador entre 110V e 220V, dispondo de 2 (dois) tipos de ligação elétrica, altura da queda de água 10,42 m, vazão entre 0,5 a 2,7 litros por segundo, diâmetro da tubulação 0,1 m e comprimento da tubulação 18 m.

4.2 A HIPÓTESE E O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A geração de energia elétrica geralmente é feita utilizando geradores de corrente alternada com o campo girante no rotor. Para a obtenção do campo girante é necessária uma fonte externa de corrente contínua ou a retificação da corrente alternada em contínua. Ainda são necessários os dispositivos como retificadores, anéis e escovas para condução da corrente até o rotor. Estes dispositivos consomem parte da energia produzida pelo gerador, além da necessidade de mão-de-obra técnica especializada para a manutenção.

Com a utilização do gerador com rotor de ímãs permanentes não são necessários os dispositivos auxiliares de produção de corrente contínua para o rotor.

Assim busca-se apresentar uma produção de energia elétrica em lugares remotos onde existe pequenas quedas d'água, utilizando equipamento com pouca manutenção, visando o desenvolvimento, fixação e melhores condições de vida da população local.

A geração de energia elétrica através de uma microcentral hidrelétrica apresenta grande faixa de frequência da tensão alternada. Para o controle da frequência acoplou-se um controle da rotação, de baixo custo, capaz de apresentar uma regulação de frequência tolerável, possibilitando o uso de cargas sensíveis a variações de frequência, como equipamentos eletroeletrônicos e pequenos motores.

O sistema de controle de velocidade do gerador procura manter a frequência da tensão e corrente alternada próxima de 60 Hz. De acordo com a variação da carga conectada ao gerador, o sistema efetua a correção automática da velocidade do eixo do gerador, comandando a abertura ou o fechamento de uma válvula injetora do jato d'água nas conchas da turbina Pelton.

4.2.1 DETALHES DO PROJETO DE CONTROLE

As etapas da substituição da seta pelo injetor motorizado foram realizadas na oficina da Fábrica de Máquinas Bemfica LTDA. Os detalhes são descritas numa abordagem sobre o antes e o depois, relatados e elucidados pelas figuras.



Figura – 3 Microusina antes das modificações

As Figuras 3 e 4 retratam a microssina antes e após a modificação para a instalação do injetor tipo agulha, que possui entrada de 125mm e saída de 15mm, e o acoplamento do motor.



Figura – 4 Microssina depois das modificações

O sistema do injetor é composto de motor para acionamento do copo metálico e limitação da abertura e do fechamento da agulha é realizado por intermédio de dois fins de curso instalado conforme Figura 5. Os fins de curso estão ligados no painel de controle onde está o tacômetro digital microprocessado.



Figura – 5 Sistema de controle de duas posições



Figura – 6 Localização do bico da setia

A Figura 6 mostra o interior da estrutura metálica, antes das modificações, que agrupa a roda Pelton e a terminação da setia denominada de bico. Estes bicos podem ser substituídos manualmente pelo usuário, os bicos são rosqueados no final da setia sendo assim facilmente extraídos, o acesso é realizado pela entrada lateral da estrutura metálica.



Figura – 7 Injetor adaptado na microusina

O detalhe do injetor motorizado acoplado na estrutura metálica após a retirada da setia é mostrado na Figura 7. A Figura 7 é constituída do injetor que possui no seu interior uma agulha na qual a aproximação ou afastamento de sua ponta com as paredes laterais do orifício de saída do injetor faz com que varie a vazão. Externamente a atuação da agulha é realizada pela rotação do copo metálico. Este copo metálico possui dois rasgos nas suas laterais deslocados 180°, acoplando os pinos fixados na ponta roscada da agulha. São nestes pinos onde foi fixado o disco de

plástico de engenharia preto, mostrado e evidenciado pela Figura 7. O disco desloca-se entre os fins de curso e é por intermédio deste que os sensores são atuados.

4.3 O PROCEDIMENTO E OS MATERIAIS USADOS PARA AVALIAÇÃO TÉCNICA DA MICROCENTRAL DO CENTRO DE ENERGIA RENOVÁVEL

4.3.1 Os materiais

A microusina hidrelétrica localizada no *campus* da UNESP - Guaratinguetá é composta de gerador de ímãs permanentes e turbina Pelton, tubulação de 100 mm, reservatórios de água, válvula injetora com regulador de vazão tipo agulha, tacômetro digital com duas saídas a relé, sensor indutivo, pequeno motor para controle da válvula, polias e correias, bombas, painel elétrico de controle, painel elétrico para simulação de cargas na saída do gerador, alicate amperimétrico, multímetro e analisador de energia elétrica portátil, modelo AE-100, marca INSTRUTHERM.

4.3.2 Os procedimentos para análise da microusina hidrelétrica

A análise do desempenho eletromecânico da microusina hidrelétrica foi feita utilizando um sistema de controle da velocidade do eixo do gerador a vazio, com 20, 40, 60, 80 e 100% da carga, acoplando cargas aos terminais elétricos do gerador. Adquiriu-se e analisou-se via instrumentos a corrente, tensão, frequência, potência ativa, fator de potência e espectro de harmônicos.

4.4 AS DELIMITAÇÕES INICIAIS PARA A AVALIAÇÃO TÉCNICA

Para cargas não-lineares que utilizarem dispositivos eletrônicos; como conversores de frequência, estabilizadores, entre outros, capazes de controlar a tensão, a limites razoáveis, o uso do gerador de ímãs permanentes torna-se vantajoso. Podem ser acopladas três tipos de cargas: motores de indução, cargas resistivas e cargas sensíveis como os computadores.

No meio rural, nas fazendas, cooperativas, plantações, o uso de bombas é imprescindível. As bombas usam geralmente os motores de indução, e, para estas aplicações, indicam-se os conversores de frequência. As vantagens do conversor são: corrente de partida reduzida, redução da potência do gerador para suprir a partida dos motores, aumento da velocidade da bomba, economia de energia, proteção do motor. A única desvantagem é o alto custo, mas pode ser depreciado.

As cargas resistivas como lâmpadas incandescentes, resistências elétricas usadas para o aquecimento, chuveiros, ferro de passar roupa, entre outras, são cargas que podem ser alimentadas diretamente do gerador, porque estas cargas toleram uma variação razoável de tensão.

Os computadores, televisores, instrumentos de telecomunicação, eletrônicas sensíveis, entre outros, não admitem ruídos, distorções, flutuação de tensão, porque pode ocorrer um mau funcionamento. Para estas cargas devem-se usar os estabilizadores de tensão que desempenham este papel a custo reduzido, dependendo da faixa de potência.

Com base nestas definições apresentadas, o estudo de caso pretende utilizar um gerador com ímã permanente de 1 kVA. Delimita-se as análises para verificar a influência de cargas puramente resistivas no desempenho do gerador, compostas de 10 lâmpadas incandescentes, variando a ligação de duas em duas até alcançar a potência total, conforme mostrado na Figura 8.

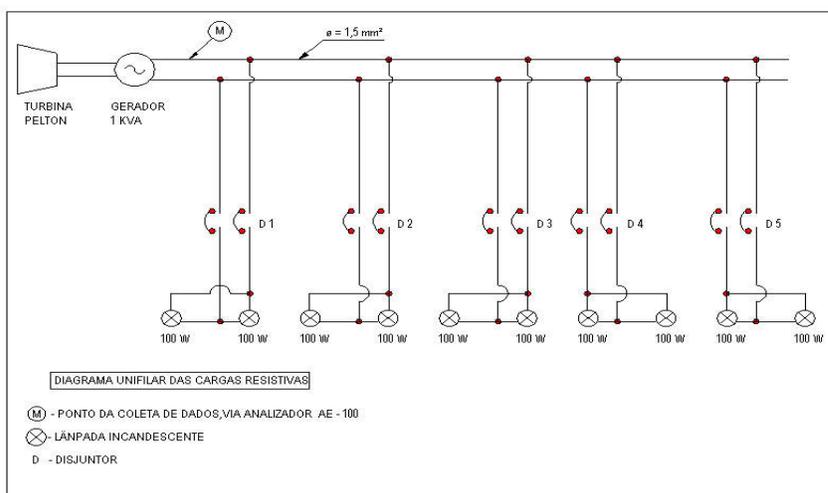


Figura – 8 Diagrama unifilar das cargas resistivas

A outra hipótese será o uso de cargas não-lineares e, para tal, usam-se um conversor de frequência acionando um motor de indução de 400W, um estabilizador de tensão de 300VA com lâmpadas fluorescentes compactas integradas na sua saída e a outra carga é composta de resistores totalizando 300VA como apresentado na Figura 9.

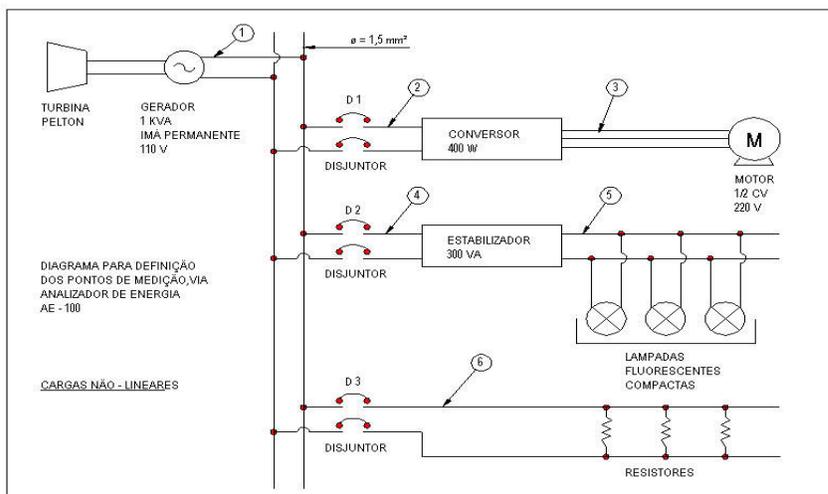


Figura – 9 Cargas não-lineares

As figuras apresentaram o esquema de distribuição das cargas e os pontos nos quais serão colhidos os parâmetros elétricos via analisador de energia (AE-100 Instrutherm).

4.5 O LEVANTAMENTO E AS ANÁLISES DOS DADOS

Os dados experimentais foram divididos em três partes, ou seja, a análise do gerador na bancada, acoplado-se um motor de indução trifásico na ponta de seu eixo tendo sua velocidade variável por intermédio de um conversor estático de frequência, mostrado na Figura 10; a análise do gerador instalado na microhidrelétrica, antes das modificações, utilizando bocais com diversos diâmetros; e análise do gerador instalado na microhidrelétrica, após as modificações, utilizando válvula injetora de acionamento motorizado.



Figura – 10 Motor acoplado na ponta do eixo do

Foram considerados para as análises do gerador os dois fechamentos disponíveis no gerador, de acordo com o fabricante: a ligação elétrica na baixa rotação 600/1200rpm (127/220V) e a ligação na alta rotação 1800rpm (110V), conforme descrito em sua placa, exceto o experimento na microusinina antes das modificações usou-se a ligação em baixa. A dificuldade em traduzir o que o fornecedor pretendia dizer com a nomenclatura da plaqueta de identificação forçou a realização de um estudo do gerador no laboratório para determinar o seu comportamento.

4.5.1 A Análise do Gerador na Bancada

4.5.1.1 A análise com ligação do gerador na baixa rotação

Foi realizado o levantamento das curvas do gerador: sem carga, variando a rotação e medindo a tensão, mostrado na Figura 11; curva do gerador impondo velocidade constante no seu eixo a 1200rpm, variando-se a carga e medindo a tensão, mostrado na Figura 12; curva do gerador, impondo velocidade constante no seu eixo a

1800rpm, variando-se a carga e medindo a tensão, mostrado na Figura 13; e uma simulação com um pequeno motor de 1/5CV.

A carga aplicada foi composta de lâmpadas incandescentes.

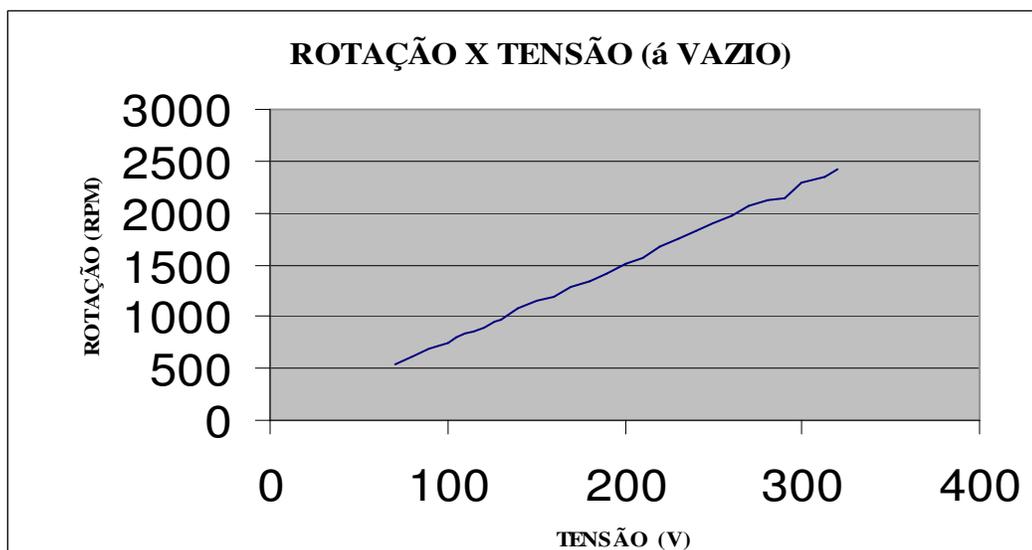


Figura – 11 Rotação X Tensão Sem Carga

O gráfico da Figura 11 mostra que à medida que a rotação aumenta a tensão aumenta linearmente.

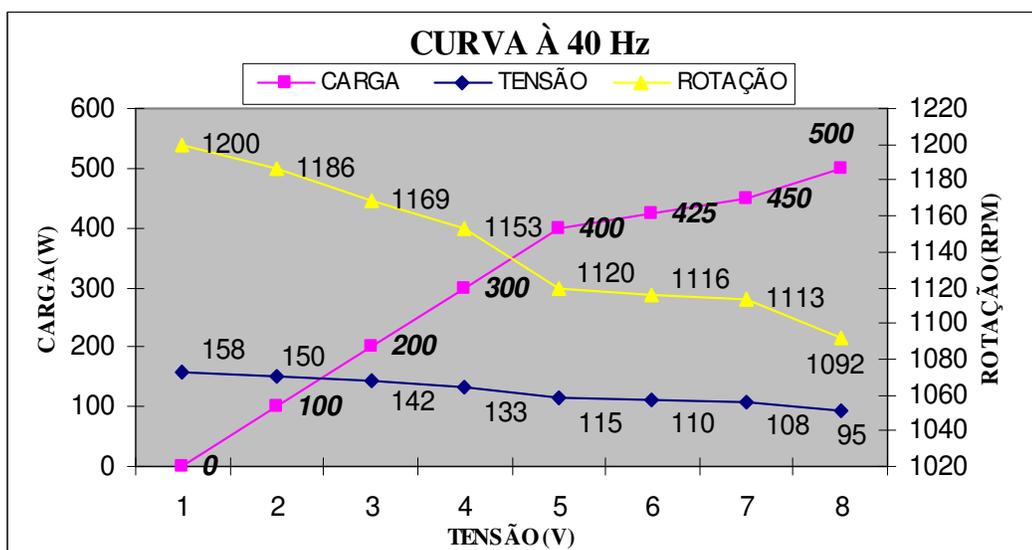


Figura – 12 Curva a 1200 rpm

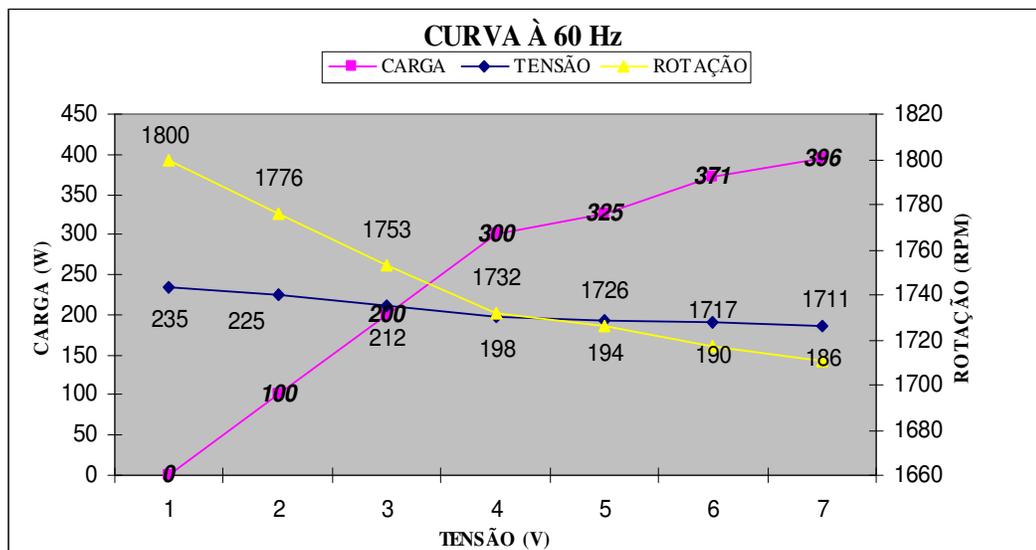


Figura – 13 Curva a 1800 rpm

Analisando os gráficos, tem-se definido a frequência e a potência nominal do gerador. Os gráficos das Figuras 12 e 13 foram para determinar qual é a tensão nominal de regime de operação. Na rotação de 1200 rpm é 110V e de 1800 rpm, é 220V. A inserção de cargas com potência conhecida evidencia que o gerador tem capacidade de geração em torno de 400W. Complementando esta análise, a simulação via analisador de energia revela o índice de distorção harmônica 10 (dez) vezes maior em 1200rpm do que em 1800rpm, de acordo com as Figuras 14 a e b. O registro de harmônicos a 1800 rpm, com DHT de 2,72% e tensão 233,2V a 60 Hz é mostrada na Figura 14 a. Conclui-se que o fechamento é para geração de tensão nominal de 220V.



Figura 14 – a) DHT a 1800rpm

b) 1200rpm

A obtenção da tensão de “110V” foi possível com rotação em torno de 1200rpm, mostrada na Figura 14 b, mas a frequência foi reduzida para 40Hz. De acordo com os testes realizados em bancada, ocorreu instabilidade da frequência para rotação abaixo de 1000rpm, mostrado na Figura 15. Ela apresenta gráficos em condições irregulares na frequência da tensão, nas rotações abaixo de 1000rpm. Os gráficos têm o eixo horizontal para indicar tempo (s) e o eixo vertical frequência (Hz).

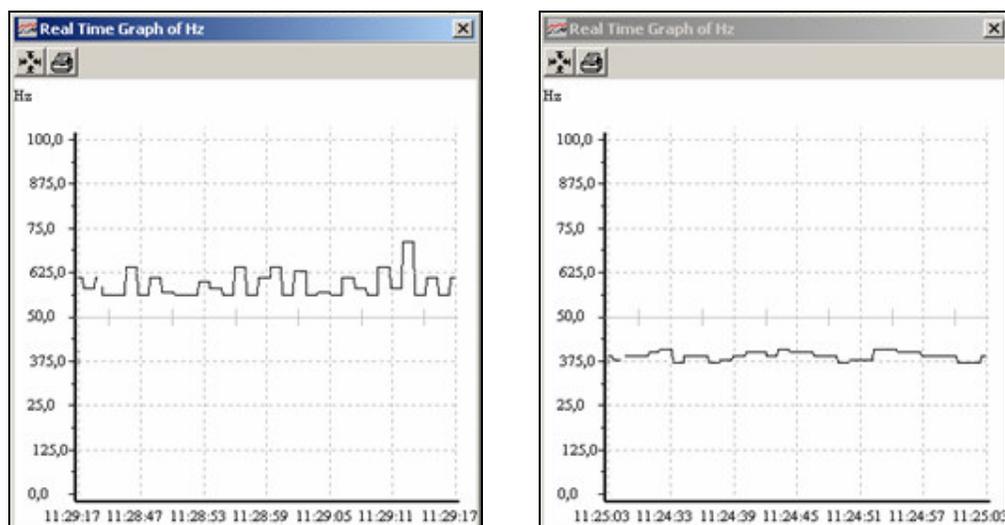


Figura 15 – Instabilidade de frequência à rotações abaixo de 1000rpm

A simulação com um motor de 1/5CV, 3,80 A, 1150 rpm, 115V, 60Hz e $I_p/I_n=2,9$, usado em máquinas de lavar roupas, chamada comercialmente de tanquinho, tem por objetivo analisar o comportamento do gerador impondo uma carga não-linear. O teste consistiu na partida do motor de 1/5CV, acompanhando e medindo a tensão e a rotação no seu eixo. Os dados analisados na partida mostraram uma acentuada queda de tensão, passando de 160V, a 1200rpm, para uma tensão de 70V. Nesta condição, o motor apresentou rotação bem abaixo da nominal.

Foi realizada a retroalimentação da rotação do eixo do gerador até 1800rpm, condição à qual encontrou-se uma tensão de 108V e uma rotação de 1083rpm na ponta do eixo do motor de 1/5CV.

Observaram-se ruídos advindos do interior do gerador, provavelmente de natureza de esforço eletromagnético, ou seja, sobrecarga, e o motor de 1/5CV apresentou um relativo aquecimento em sua carcaça.

4.5.1.2 A análise com ligação do gerador na alta rotação

A Tabela 8 mostra dados do comportamento do gerador sem carga. Pode-se dizer que este tipo de ligação elétrica é para aplicação de cargas com tensão nominal de 115V, pois é nesta tensão onde encontra-se a referência para a frequência de 60Hz, admitida como o valor nominal.

Tabela – 8 Comportamento na alta rotação

TENSÃO (V)	ROTAÇÃO (RPM)	FREQUÊNCIA (Hz)
78,1	1200	40
101,6	1568	52,2
105,7	1636	54,5
110,8	1721	57,3
115	1800	60
127,3	1996	66,6
156,7	2503	83,5

A Tabela 9 apresenta o levantamento da tensão e da frequência da tensão com velocidade constante de 1800rpm no seu eixo, variando-se a carga. Tem-se uma diferença de 6% na frequência, entre a aplicação de 0 a 100% da carga.

Tabela – 9 Situação da geração na alta rotação

CARGA (W)	TENSÃO (V)	ROTAÇÃO (RPM)	FREQUÊNCIA (Hz)
0	115,6	1800	60
100	113,2	1783	59,4
200	110,6	1763	58,7
300	108	1742	58
350	106,4	1730	57,6
400	105,4	1722	57,3
500	102,7	1700	56,6
525	101,8	1693	56,5
550	100,9	1687	56,2

Analisando o experimento com o analisador de energia, tem-se para 1200 rpm uma situação crítica onde se encontra 78,2 V a 40 Hz e DHT 21,14% sendo assim não

foi possível a aplicação de cargas nesta rotação e para este tipo de fechamento. Já em 1800rpm a DHT é 2,2%.

No teste com o motor de 1/5CV, usado em máquinas de lavar, realizado da mesma forma descrita para a ligação do gerador na baixa rotação, a partida do motor foi feita com o gerador à 1800rpm – 60 Hz obteve-se a corrente de 2,5 A, 57,6 Hz e 96,3 V. Assim o desempenho do conjunto gerador motor foi satisfatório.

4.5.1.3 O comportamento do gerador

De acordo com as análises realizadas pode-se definir que a ligação dos terminais na baixa rotação é para o uso do gerador em 220V, DHT igual a 2,7%, 60Hz a 1800rpm e a ligação dos terminais na alta rotação é para o uso do gerador em 110V, DHT igual a 2,2 %, 60Hz a 1800rpm.

Não é aconselhável rotação abaixo de 1000rpm. Poderá ser usado o fechamento dos terminais do gerador na baixa rotação quando se desejar trabalhar entre 1000 a 1800rpm. É indicado o uso do gerador entre 1500 a 1800 rpm estando seus terminais fechado para alta rotação.

4.5.2 Análise do gerador instalado na microhidrelétrica utilizando bocais com diversos diâmetros.

O objetivo deste experimento foi determinar o desempenho da microhidrelétrica variando-se o diâmetro do bocal da setia. Foram utilizados os diâmetros conforme Tabela 10 e encontradas as referidas vazões.

Tabela – 10 Vazão dos bocais

Diâmetro dos bocais em mm	Vazões médias em l/s
11	1,3
15	2,75
21	3,5
28	5

De acordo com os dados experimentais, à medida que aumenta o diâmetro do bico a vazão aumenta, tendo a potência e a rotação do gerador aumenta. Conclui-se que para a implantação deste tipo de microusina, a vazão não só determina a potência elétrica, como indicado na equação 1, mas determina o diâmetro do bico injetor (ou setia) a ser usado, aproveitando da melhor forma a capacidade hidráulica.

Determinação da potência elétrica do gerador segundo o formulário (Eletrobrás, 1985):

$$P = \eta_t * \eta_g * \eta_a * H * Q, \quad \text{equação (1)}$$

Sendo:

P = potência em W

η_t = rendimento da turbina, com valores entre 0,6 e 0,9

η_g = rendimento do gerador, com valores entre 0,5 a 0,9

η_a = rendimento do acoplamento (polias e correias), com valores entre 0,69 a 0,99

H = altura manométrica em relação à usina e a captação d'água (m)

Q = vazão d'água para abastecimento da microusina (litros/s)

4.5.3 Análise do gerador acoplado a microhidrelétrica utilizando a válvula injetora de acionamento motorizado.

O experimento realizado, no Centro de Energia Renováveis, consistiu no levantamento da curva tensão *versus* rotação variando a carga. A modificação, mencionada no item 4.2 permitiu um controle da rotação mesmo variando a carga. A carga foi composta de lâmpadas fluorescentes compactas de baixa potência com tensão nominal de 110V. Os testes realizados na MCH subdividiram-se em dois tópicos utilizando as duas ligações do gerador.

4.5.3.1 Análise com a conexão dos terminais do gerador para baixa rotação instalado na MCH

O fechamento dos terminais do gerador na alta rotação, conforme análise em bancada, indica a possibilidade de seu uso tanto para cargas de 220V quanto cargas de

110V. Em cargas 110V a rotação deve ser mantida em torno de 1200rpm. A Figura 16 apresenta o comportamento do sistema em modo automático.

Foi ajustado no tacômetro digital microprocessado as saídas de máxima e mínima rotação, respectivamente 1250rpm e 1150rpm. Isto resultou numa faixa de controle da tensão na faixa de 160V, sem carga, e 127V, com carga nominal.

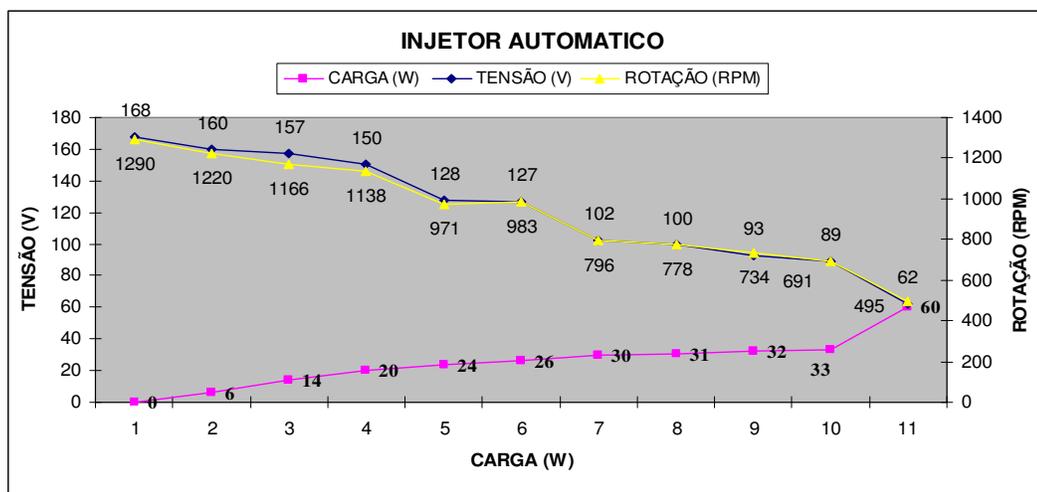


Figura – 16 Utilização do controle automático da vazão do bico injetor.

A Tabela 11 possui as medições de vazões para determinadas faixas de rotação e cargas durante o experimento.

Tabela – 11 Potência gerada de acordo com a abertura do injetor automatizado

INJETOR AUTOMATIZADO			
CARGA (W)	TENSÃO (V)	ROTAÇÃO (RPM)	VAZÃO (l/s)
0	168	1290	1,66
6	160	1220	1,66
14	157	1166	1,66
20	150	1138	2,2
24	128	971	2,3
26	127	983	2,3
30	102	796	2,2
31	100	778	2,2
32	93	734	2,3
33	89	691	2,3
60	62	495	2,3

Analisando a Tabela 11, constatou-se que a válvula fechava quando a rotação no gerador aproximava-se de valores acima da rotação programada, reduzindo a vazão e limitando a tensão. Verificou-se que, a partir de 20W de carga sua rotação tornava-se abaixo da rotação programada, atuando na agulha do injetor e aumentando a vazão.

Durante o experimento, realizou-se um teste com a agulha do bico injetor totalmente recuado e o painel de controle da velocidade do eixo desligado. Foram encontrados os dados, mostrados na Tabela 12. Este experimento teve por objetivo comparar os dados da Tabela 11, veja que a rotação dispara, a vazão é a máxima e a tensão maior que o limite permitido pela carga.

Tabela – 12 Vazão com o injetor totalmente aberto

INJETOR TOTALMENTE ABERTO			
CARGA (W)	TENSÃO (V)	ROTAÇÃO (RPM)	VAZÃO (l/s)
0	245	1850	2,27
6	192	1445	2,3

As cargas utilizadas no experimento apresentado na Tabela 11 foram as lâmpadas fluorescentes compactas eletrônicas até o total de 33W de carga, realizou apenas um teste com uma única lâmpada incandescente de 60W. O procedimento realizado foi para verificar o comportamento da usina, já que, durante o experimento, percebeu-se a possibilidade da aplicação de carga com o dobro da carga nominal aplicada pelas lâmpadas fluorescentes compactas de baixo fator de potência 0,5 em comparação com as cargas puramente resistiva representada neste caso pela lâmpada incandescente. O resultado, porém não foi favorável e a explicação para tal fato poderia se resumir em que as lâmpadas fluorescentes compactas foram aplicadas sobre a influência das harmônicas. As múltiplas da fundamental influenciaram diretamente o fator de potência das lâmpadas fluorescentes compactas tornando-se valores diferentes ao indicado pelo fabricante, uma análise sob o ponto de vista do triângulo de potências verificaria o novo fator de potência.

4.5.3.2 Análise com a conexão dos terminais do gerador para alta rotação instalado na MCH

Foram realizados dois experimentos utilizando duas programações diferentes de controle de velocidade no eixo do gerador. Foram ajustados no tacômetro digital microprocessado as saídas de máxima e mínima rotação respectivamente 1510rpm e 1500rpm, para o primeiro experimento e 1750rpm e 1650rpm, para o segundo experimento. A faixa de regulagem aplicada no primeiro experimento visa à geração da energia em torno de 50Hz. Isto decide uma faixa de controle da tensão, de 110V, sem carga e até 90V, com carga. O segundo experimento determina a velocidade máxima que o gerador alcança e o seu comportamento com a inserção de cargas. As cargas e a metodologia são as mesmas da análise do item 4.5.3.1.

A Tabela 13 apresenta o levantamento de dados para o primeiro experimento. Incluiu-se na tabela a posição em que se encontra a agulha totalmente aberta, semi-fechada e oscilante. A posição oscilante foi a situação crítica em que a velocidade do eixo torna-se muito próxima da programada no tacômetro. A oscilação foi proveniente da resposta aos transitórios de instabilidade da máquina.

Tabela 13 – Injetor automatizado – Ligação em alta à 50Hz

REGULAGEM - 1500 A 1510			
CARGA (W)	TENSÃO (V)	ROTAÇÃO (RPM)	SITUAÇÃO
0	110	1600	Semi-Fechada
6	96 a 107	1450 a 1600	Oscilante
13	92 a 100	1400 a 1560	Oscilante
20	95 a 100	1450 a 1530	Oscilante
24	94 a 100	1514 ± 30	Oscilante
25	90 a 100	1390 a 1530	Oscilante
27	96 a 99	1500 ± 30	Oscilante
29	95	1450	Aberta
34	90 a 102	1420 a 1545	Oscilante
35	90	1380	Aberta
36	93	1420	Aberta
37	90 a 95	1460 a 1500	Oscilante
38	87	1330	Aberta
39	89	1379	Aberta
40	93	1450	Aberta
43	90	1410	Aberta
46	89	1370	Aberta
49	87	1340	Aberta

Os resultados obtidos na Tabela 13 evidenciam a capacidade de geração em torno de 40W, a variação de frequência $\pm 3\text{Hz}$ e a limitação de tensão compreendida entre 90V a 110V.

Tabela 14– Injetor automatizado – Ligação para alta rotação a 60 Hz

REGULAGEM - 1750 A 1850		
CARGA (W)	TENSÃO (V)	ROTAÇÃO (RPM)
0	116	1737
3	118	1770
6	112	1675
10	111	1700
13	110	1661
20	101	1508
24	97	1467
31	94	1458
38	86	1322

Pode-se verificar pela Tabela 14 que a rotação máxima atingiu 1747rpm e que, para todas as cargas aplicadas, a válvula ficou estabilizada na posição aberta.

4.5.4 A relação entre os dados experimentais e a teoria

A Tabela 15 apresenta a comparação dos dados experimentais com os valores calculados segundo a teoria.

Tabela – 15 A relação entre os dados experimentais e os dados teóricos

COMPARATIVO ENTRE O TEORICO E O EXPERIMENTAL		
GRANDEZAS	TEORICO	EXPERIMENTAL
VELOCIDADE DO JATO (m/s)	14,3	13
RENDIMENTO DO JATO	1	0,909
POTÊNCIA (W) - Ligação Baixa Rotação	109	30
POTÊNCIA (W) - Ligação Alta Rotação	109	40
RENDIMENTO GLOBAL - Ligação Baixa Rotação	4,58	1,26
RENDIMENTO GLOBAL - Ligação Alta Rotação	4,58	1,67
DIAMETRO DO INJETOR NA ENTRADA (mm)	75	100
TEMPO DE ABERTURA DO INJETOR (s)	20 A 40	7 A 15
DIAMETRO DA RODA (mm) - Ligação Baixa Rotação	500	380
DIAMETRO DA RODA (mm) - Ligação Alta Rotação	360	380
NÚMERO DAS PÁS	26	14

O fundamento teórico tido como referência advém do Manual de Microcentrais Hidrelétricas (ELETRÓBRAS, 1985) e o livro Máquinas Motrizes Hidráulicas (MACYNTIRE, 1983).

A potência e o rendimento teóricos foram calculados segundo a equação 1. Para a potência calculada é levada em consideração a vazão máxima encontrada de 2,3 l/s. Comparando-se os rendimentos temos que a percentagem dos equipamentos eletromecânicos são 22% e 29% respectivamente para a ligação dos terminais na baixa e na alta rotação. É admitido o valor de 0,8 para o rendimento do acoplamento pela correia e polias.

4.5.5 As Considerações Finais

Comparando a hipótese relatada nas delimitações iniciais que ressalta a utilização das cargas resistivas e não-lineares apresentadas pelas Figuras 8 e 9, com o desenvolvimento durante os experimentos realizados na microcentral, houve diferenças significativas, entre as quais citam-se:

- 1) Potência nominal do gerador obtida em bancada de testes: $1/2CV$.
- 2) A capacidade máxima de geração da microusinina foi de 30W com a conexão dos terminais para baixa rotação e de 40W para a de alta rotação.
- 3) A substituição das lâmpadas do painel da Figura 8 por lâmpadas fluorescentes compactas de menor potência, conforme Figura 17. Estas lâmpadas fluorescentes possuem fator de potência em torno de 0,50.
- 4) Não houve condições para a aplicação do inversor-motor acionado pela microusinina hidrelétrica testada, ou seja, experimento *in loco*.



Figura 17 – Painel das lâmpadas

5. CONCLUSÕES

A economia de água, a busca da qualidade na geração de energia e do baixo custo dos equipamentos de controle desenvolvidos e aplicados neste experimento são os principais atrativos para a geração deste tipo de energia renovável, utilizando o gerador de ímã permanente.

Comparando-se as Tabelas 11 e 12 do item 4.5.3.1, respectiva a ligação do gerador na baixa rotação, conclui-se que a economia de água é de 37% entre a microusina com o controle da rotação do eixo e sem o controle, mas a economia é possível com a aplicação de pequenas cargas. Em relação a tensão gerada, verifica-se que ocorre uma limitação da tensão gerada em torno de $\pm 25\%$ da tensão nominal de 127V.

Os resultados com a ligação do gerador em alta rotação comprovam a geração de energia de qualidade com uma pequena variação da frequência nominal de 50Hz, em torno de $\pm 3\%$, e uma faixa de tensão compreendida entre 90V e 110V.

O tempo ótimo para a abertura e o fechamento da válvula, constatado no experimento, gira em torno de 7 a 10 segundos. Isto é suficiente para que a resposta de rotação seja corrigida sem afetar as cargas conectadas ao gerador e que a tubulação não sofra com o golpe de aríete.

No meio rural, em função da natureza da atividade e disponibilidade de recursos hídricos energéticos, uma perspectiva interessante é o processo de eletrificação que associado ao beneficiamento do produto agrega valor e aumenta a renda das comunidades isoladas, mas suportável e recompensador para um conjunto de agricultores que poderiam estar organizados em cooperativa. Dessa forma, empreendimentos energéticos de maior capacidade poderiam ser viabilizados, reduzindo o custo unitário por kW gerado e melhorando a viabilidade econômica.

O meio rural e as áreas isoladas são um nicho de mercado para as fontes renováveis de energia visto que, em relação aos custos de extensão da rede elétrica, a geração local pode ser vantajosa, mesmo que os custos externos, como os associados à geração local de empregos e aos menores impactos ambientais, não sejam considerados.

A geração distribuída apresentada neste trabalho tem a facilidade de não requerer mão-de-obra técnica especializada para operação e manutenção das microcentrais. A operação é bem simples já que o controle é automático. A manutenção das microcentrais resume-se na lubrificação e limpeza periódica com intervalo de tempo longo entre elas. O gerador de ímã permanente facilita em muito a redução da manutenção neste tipo de equipamento, e com o benefício de baixo custo para sua aquisição, por seu rotor ser confeccionado de ferrite. Material este encontrado facilmente no Brasil, tecnologia nacional, características magnéticas favoráveis, resistente à corrosão e capacidade de suportar temperatura de até 230 °C.

Como conclusão, do ponto de vista do controle da rotação do eixo do gerador as ações propostas e aplicadas sinalizam na direção correta. A aprovação do sistema é satisfatória, comprovada pelo experimento na microusina. Salienta-se o fato da baixa capacidade de geração, em torno de 30W, estando o gerador com a ligação elétrica de seus terminais em baixa rotação, e de 40W, na ligação de alta, já que os cálculos teóricos indicam uma capacidade próxima de 2,7 a 3,7 vezes maior do que o valor encontrado. A justificativa para o fato é o baixo rendimento da turbina e do gerador. A turbina é composta de roda Pelton confeccionada de ferro fundido, material este muito pesado. O gerador disponível no Centro de Energias Renováveis está sobredimensionado para a capacidade de geração. O acoplamento entre a turbina e o gerador também tem sua parcela de contribuição, visto que este acoplamento é realizado por intermédio de polias de ferro fundido utilizando relação de transmissão por correia. Outro fator preponderante para a baixa capacidade de geração encontrada é a utilização de carga não-linear composta pelas lâmpadas fluorescentes compactas eletrônicas que possuem fator de potência próximo a 0,50, sob a influência das múltiplas da fundamental.

6. PESQUISAS FUTURAS

Como proposta para temas a serem verificados é sugerido a elaboração um inventário para se determinar a quantidade em kW de potência instalada de microcentrais hidrelétricas em toda a extensão do território nacional. Soma-se a esta pesquisa a realização de uma estimativa sobre o potencial hídrico disponível para futuras instalações deste tipo de geração.

A biblioteca da ANEEL possui um grande acervo sobre o assunto relatando em sua maioria o potencial em operação de várias bacias hidrográficas, contudo, o estudo da estimativa depende de avaliações em grande escala, verificando topografia, hidrologia e geologia de todas as bacias hidrográficas, para detectar sua vocação à hidroeletricidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALARIM, C. R., TARGA, L. A., SANT'ANA, R. F. Estimativa de custo para implantação de microcentrais hidrelétricas com potências de 20, 30, 50, 75 e 100kw, 10p, Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor intitulada: Avaliação expedita do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas, 1996, 158p, Faculdade de Ciências Agrônomas, Universidade Estadual Paulista.

BONA, F. S., RUPPERT, E. F. As Microturbinas e a Geração Distribuída, UNICAMP – FEEC, 10p. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/>>. Acesso em: 28/08/06.

BRASIL. MINISTERIO DE MINAS ENERGIA. Manual de Microcentrais Hidrelétricas, 1985.

BRASIL. AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. Lei nº 10.848, de 15 de Março de 2004.

_____. Decreto 5.081/2004.

_____. Resolução 334 de 09 de Julho de 2003.

_____. Decreto nº 4.541, publicado em 24 de dezembro de 2002.

_____. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002.

BRASIL. MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. Lei nº 9.074, de 07 de Julho de 1995.

_____. Lei nº 5.662, de 21 de junho de 1971.

_____. Lei nº 5.655, de 20 de maio de 1971.

_____. Lei nº 1.628, de 20 de junho de 1952.

BREANZA, D. N., BELPIEDE, D. Uso descentralizado de pequenos recursos hídricos para a energização rural, 82p, Monografia, 2002, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

WEG, Características e Especificações de geradores, 66p. Disponível em: <<http://www.weg.com.br/>>. Acesso em: 28/08/06.

CENTRAIS ELETRICAS BRASILEIRAS S/A – ELETROBRAS.
DEPARTAMENTO DE GESTÃO DO PROGRAMA DE UNIVERSALIZAÇÃO.

Construção civil e Arquitetura. Apresenta pesquisas de preços para construção civil. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br>>. Acesso em: 07 dez. 2006.

Empregando a energia elétrica para fins produtivos e promovendo o desenvolvimento sustentável no meio rural brasileiro, 2005, 45p. Disponível em: <http://www.elektrobras.com.br/EM_Biblioteca/publicacoes.asp>. Acesso em: 28/08/06.

ELGERD, O. L. Introdução á Teoria de Sistemas de Energia Elétrica, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo, 1976.

FITZGERALD, A. E., KUSKO, A., KINGSLEY, C. Jr. Maquinas Elétricas, Editora Mcgraw-Hill do Brasil Ltda, Pernanbuco, 1975.

KOSOV, IRVING L.. Máquinas Elétricas e Transformados, Editora Globo, 12^a edição, São Paulo, 1996

MACYNTIRE, A. J. Maquinas Motrizes Hidráulicas; Editora Guanabara II, Rio de Janeiro, 1983.

MAGALHÃES SOBRINHO, P. Gestão Energética e Meio Ambiente, Apostila de notas de aula, 103p, 2006, UNESP – Guaratinguetá.

MULLER, ARNALDO CARLOS. Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento, Editora Makron Books, São Paulo, 1995.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELETRICO, Requisitos mínimos para a conexão à Rede elétrica. 27p, 2000. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 28/08/06.

RASHID, MUHAMMAD H. Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e aplicações, Editora Makron Books, São Paulo, 1999.

SCHREIBER, GERHARD PAUL. Usinas hidrelétricas, Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

SILVA, C. H. F. Modelagem e aplicações de técnicas de controle moderno a sistemas reguladores de velocidade e tensão de maquinas síncronas de pequenas centrais hidrelétricas. 230p. Uberlândia, 2002 – Dissertação (mestrado) do programa de pós-graduação em engenharia química. Disponível em: <http://www.elektrobras.com.br/EM_Biblioteca/publicacoes.asp>. Acesso em: 28/08/06.

SOUZA, T. M., BIANCHI I. Software para dimensionamento de microcentrais hidrelétricas, 6p. Departamento de engenharia elétrica, UNESP – Guaratinguetá.

SOUZA, ZULCY DE. Centrais Hidrelétricas – Dimensionamento de Componentes, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1992.

STEVENSON, WILLIAM D. Elementos de análise de Sistemas de Potência. Editora McGraw-Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1974.

VÁRIOS AUTORES, Equipe Técnica de CSPE - Comissão de Serviços Públicos de Energia. Pequenas Centrais Hidrelétricas no Estado de São Paulo, Editora Paginas & Letras Editora e Gráfica, 2ª Edição Revista e ampliada, São Paulo, 2004.

WALTER, ARNALDO. Fomento à geração elétrica com fontes renováveis de energia no meio rural brasileiro: barreiras, ações e perspectivas. 10p, Setembro 2000. Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100028&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 28/08/06.