



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT - 33
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

PROPOSIÇÃO DE DISPOSITIVO HIDROcinÉTICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GERADOR A IMÃS PERMANENTES E SUA METODOLOGIA DE PROJETO BÁSICO

Tadeu Rezende de Azevedo*

Ivan Eduardo Chabu

Escola Politécnica da USP

Escola Politécnica da USP

RESUMO

O impacto do alto custo do diesel nas comunidades ribeirinhas da Amazônia leva a busca de alternativas de geração de energia elétrica. Entre as opções solar, biomassa, eólica e hidráulica, entre outras, escolheu-se o estudo da alternativa hidrocinética. Propõe-se um equipamento com uma turbina hélice que, associada a um tubo de sucção, aciona um gerador a imãs permanentes de baixa rotação dispensando o uso de caixas de ampliação de velocidade e sistemas de excitação. Apresenta-se uma metodologia de dimensionamento básico do equipamento e cálculo da máquina elétrica, com base na qual, simulou-se o comportamento da curva de regulação de uma máquina. Da comparação com os dados obtidos experimentalmente. Verifica-se que o modelo proposto reflete a realidade e que, portanto, pode ser utilizado para o projeto de máquinas deste tipo.

PALAVRAS-CHAVE

Energia Cinética, Gerador, Imãs Permanentes, Hidrocinética, Turbina.

1.0 - INTRODUÇÃO

Boa Vista do Ramos (BVR) está a 16 horas de barco de Manaus na direção de Parintins. Este município possui cerca de 12 mil habitantes, 6 mil no núcleo Central e 6 mil divididos em 44 comunidades. O município está localizado em uma planície sedimentar, onde um dia foi o leito do Rio Amazonas. Ainda hoje algumas áreas são inundadas na época da cheia. O maior desnível nas regiões onde há água é de 1,5m em uma extensão de 60km. Do ponto de vista político, a administração do município é feita com elementos participativos. Todo mês, os presidentes de comunidades reúnem-se com o prefeito em uma das comunidades e decidem quais serão os rumos e ações do município. Entre uma reunião e outra, o prefeito executa as decisões e busca novas opções para solucionar os problemas levantados nos encontros anteriores.

Por ter estas características, BVR foi escolhida para realização de um projeto de busca de um modelo de desenvolvimento sustentável. Com apoio da loteria inglesa, surgiu o projeto "Planejamento Participativo do Uso da Terra e Desenvolvimento Sustentável do Município de Boa Vista do Ramos-AM".

Em sua primeira fase, de agosto de 1998 a março de 2000, o projeto promoveu o mapeamento do município. Os mapas foram feitos pelos próprios habitantes (selecionados entre os professores e líderes de comunidades), que aprenderam a ler mapas e imagens de satélite. O trabalho teve muito sucesso pela qualidade dos desenhos e do conteúdo dos mapas.

A segunda parte do projeto, iniciada no primeiro semestre de 2000, buscou o desenvolvimento de atividades de geração de renda para as famílias do município, estimulando projetos como a produção de mel e o manejo florestal comunitário com agregação de valor, como a produção de móveis e lutheria.

Desde o início do projeto, foram identificados alguns problemas entre os quais destacam-se: o escoamento da produção, a comunicação entre as comunidades e o fornecimento de energia elétrica. A questão da energia

*Av. Darcy Reis 1700 – Parque dos Príncipes – São Paulo – SP – CEP:05396-450 – São Paulo – SP – BRASIL
Tel.: (011) 3761-1348 – Fax: (011) 3814-4013 – e-mail: tadeur@uol.com.br

elétrica, além dos usos imediatos como iluminação e comunicação, interfere na garantia de água potável nos períodos de seca. Quando os lagos secam, a única fonte de água saudável são os poços semi-artesianos que necessitam de bombeamento. O Governo do Estado fornece bombas d'água, caixas d'água e fura os poços mas, muitas vezes estes não funcionam por falta de energia elétrica. A água torna-se uma questão de saneamento.

Da observação desta realidade nasceu a preocupação em desenvolver uma alternativa energética para colaborar com o desenvolvimento da região. Ela poderia facilitar o suprimento de água, melhorar a comunicação e iluminação, com a conseqüente "ampliar o dia" nas comunidades.

Toda a energia elétrica de Boa Vista do Ramos vem de geradores a diesel. A sede possui uma estrutura apreciável fornecida pela CEAM (Companhia Energética do Amazonas), com 3 geradores que totalizam cerca de 1 MVA, com ponta de carga de 450 kVA. Todas as comunidades possuem pelo menos um gerador a diesel adquirido pela prefeitura. Na sede, o diesel é fornecido pela CEAM. Os moradores pagam pela energia de duas formas: algumas casas possuem relógios de luz e são tarifadas pelo seu consumo; a maioria, entretanto, paga uma taxa única com uso livre, pois não possui medidores. Nas comunidades o diesel é fornecido pelos próprios moradores, que contribuem com uma lata de 20L por família por mês. Esta contribuição lhes garante cerca de 4h de energia elétrica por dia. Os 20L custam (em preços da região no ano 2000) entre R\$13,00 e R\$15,00 por mês. As comunidades em condições mais críticas acabam sendo subsidiadas pela prefeitura, na medida do possível.

Uma família comunitária em BVR tem renda mensal em espécie (ano 2000) de cerca de R\$50,00, utilizada para compra de alimentos, roupas, remédios e diesel, tendo este último um grande impacto no orçamento familiar.

Com base nesta realidade, buscam-se alternativas energéticas viáveis para diminuir o peso do combustível na vida do município. Dentre as varias fontes potenciais encontramos: solar, eólica, biomassa e hidráulica.

As alternativas solar, eólica e biomassa podem ser foco te estudos específicos. Neste trabalho escolheu-se o estudo tecnológico da alternativa hidráulica como criação de uma fonte complementar de energia. A região não possui quedas d'água, porém há grande quantidade de água em movimento nos rios, paranás e furos da região. Se há água em movimento, há energia cinética que pode ser convertida em energia elétrica.

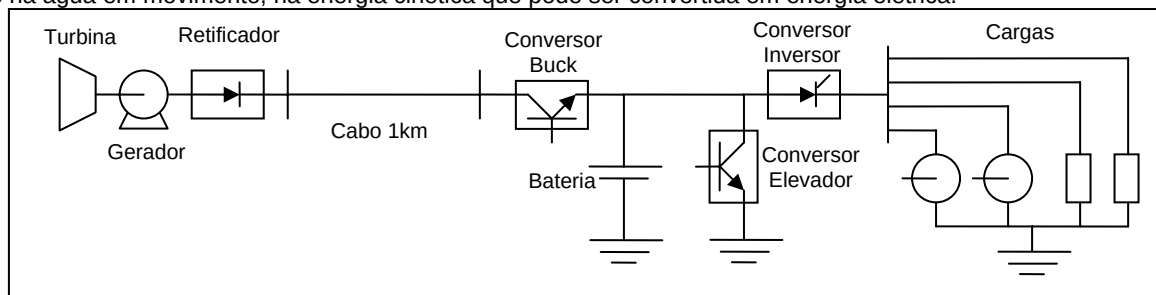


FIGURA 1: Esquema do Sistema Hidrocinético para fornecimento de energia elétrica.

2.0 - O SISTEMA

A água nos rios, paranás (braços de rios) e furos (canais de ligação entre rios e lagos) da região amazônica tem velocidade com variação diária e sazonal. Assim, o sistema deve estar preparado para operar em rotação variável. Para resolver a questão da frequência variável devido a variações da velocidade da água, a saída do gerador deve ser retificada e re-invertida para disponibilizar uma fonte de tensão alternada confiável para o usuário. Para diminuir o tamanho da turbina e do gerador, pode-se instalar um banco de baterias no elo de corrente contínua do conversor. Ele armazena energia para compensar a curva de carga diária do sistema em uma modalidade semelhante ao aplicado em sistemas solares.

A Figura 1 um esquema do sistema com seus principais componentes.

A transmissão até 1km é necessária pois, a turbina deve estar o mais perto possível do centro do rio (onde as correntezas são mais fortes) e, em diversas localidades, o consumidor está localizado há algumas centenas de metros da margem do rio. Cabos longos para transmissão de energia podem ter altas capacitâncias. Neste caso, a capacitância pode ser utilizada como uma aliada na estabilização do elo de corrente contínua, reduzindo o tamanho do capacitor que deve ser instalado junto ao retificador.

Optou-se por um conversor abaixador (Buck) por dois motivos: a tensão para transmissão deve ser alta o suficiente para encontrar um compromisso entre custo de um cabo longo (1km) e perdas ao longo do mesmo; por outro lado, o banco de baterias deve operar em 12V ou 24V.

Escolheu-se um banco de 12V ou 24 V pois é uma tensão disponível em baterias largamente comercializadas. Escolheu-se ligá-las em paralelo pela conveniência de se fazer a manutenção sem a parada do sistema. Se as baterias fossem ligadas em série, a detecção de um eventual defeito seria mais complexa. Adicionalmente, caso haja a necessidade do aumento da capacidade de armazenagem, a conexão será mais fácil. Idealmente, o banco deve ter uma capacidade de armazenamento equivalente a 7 vezes a demanda de energia diária (ver NIEUWENHOUT et al.(2000)).

As cargas são aquelas típicas para consumo isolado como iluminação, bombeamento de água, televisão e geladeira. Optou-se pela tensão em 127 ou 220 VAC por ter custo mais competitivo e maior disponibilidade.

Do ponto de vista dimensional, o ideal é a composição de um sistema modular. Neste caso, quando houver necessidade de mais energia, a proposta é o uso de um conjunto gerador turbina e baterias adicional na mesma

eletrônica de potência e instalações já feitas. Ou seja, face ao crescimento da carga ou mesmo a necessidade de instalação do sistema em uma comunidade onde a carga seja maior, basta compor o sistema a partir de módulos pré-definidos de forma a simplificar ao máximo processo de instalação. Por outro lado, a modularização gera a vantagem imediata de transformar o conjunto turbina-gerador de um equipamento especial em um equipamento padronizado. Neste caso, a fabricação seguiria um projeto e processos sempre iguais, reduzindo tanto o custo como o tempo de produção. Estas reduções refletem-se diretamente na diminuição do investimento para implementação do sistema, tornando-o acessível para um número maior de pessoas.

Uma vantagem indireta da definição de um sistema composto por módulos pequenos é a portabilidade do sistema. Fazendo-o pequeno o suficiente, ele pode ser facilmente levado até o ponto de instalação sem a necessidade de transporte especial. A necessidade de logística especial poderia facilmente inviabilizar economicamente o uso do equipamento em regiões remotas.

3.0 - ARRANJO DA UNIDADE GERADORA

Para poder proceder à sistematização da obtenção das características fundamentais da turbina assim como do cálculo elétrico do gerador, é necessário escolher os tipos de turbina e gerador que serão utilizados assim como o arranjo em conjunto dos dois. Esta escolha foi feita com base nos juízos do autor tendo como base uma pesquisa do estado da arte destes tipos de sistema não apresentada neste trabalho.

3.1 Escolha da turbina

A turbina escolhida tem eixo horizontal com um hélice combinado a um tubo de sucção. Além de ter uma construção simples, permite um melhor aproveitamento da energia cinética do fluxo de água. Pode-se ainda incorporar aletas diretrizes para reduzir o torque resultante na estrutura em comparação com a turbina aberta.

A turbina Gorlov (ver GORBAN et al., 2001) também seria atraente, porém tem o inconveniente de estar patenteada e ter seu uso reservado à empresa detentora da patente. Neste sentido, o seu uso para geração de energia em comunidades isoladas ficaria comprometido.

Outros dois fatores que levam a decisão pela turbina hélice são: facilidade de construção e compreensão do seu funcionamento. Ambas as características são importantes quando se pensa que o dispositivo deve ser utilizado em locais isolados. Segundo NIEUWENHOUT et al. (2000), uma das maiores fontes de problemas técnicos em sistemas isolados vem da tentativa dos usuários de “reparar” o equipamento. Estas tentativas produzem modificações que, na tentativa de melhorar o equipamento acabam por prejudicar o seu desempenho. CRUZ (2000) também destaca a importância da compreensão do funcionamento do equipamento por parte dos usuários.

3.2 Conjunto turbina e gerador

Tipicamente as turbinas hidrocínéticas fazem uso de geradores comerciais de alta rotação associados a um conjunto de transmissão mecânico que amplia a rotação. Por exemplo: a turbina feita por um grupo de pesquisa da UnB possui um sistema que amplia a rotação mesma de modo a levar os 120 rpm do eixo para 1800 rpm e possibilitar o uso de um gerador comercial de baixo custo.

O uso de um sistema de transmissão tem duas conseqüências intrínsecas. Primeiro, um maior número de mancais e partes móveis diminui a confiabilidade do conjunto e demanda manutenção preventiva específica. Segundo, a ampliação da rotação implica em perdas no sistema.

Uma alternativa às engrenagens e mancais, é a instalação de um gerador imerso na água conectado diretamente à turbina. A Aquair UW (produzida por uma empresa norte-americana para uso em veleiros) utiliza este princípio, porém requer alta rotação e apresenta baixa eficiência devido ao fato do receptáculo do gerador fazer “sombra” sobre o hélice. No presente trabalho, buscou-se uma solução que atendesse às duas características: um arranjo tal que o gerador não faça “sombra” sobre o hélice e; um gerador dimensionado para funcionar em baixa rotação com eficiência maior do que os 65% a 70% das máquinas comerciais de baixa potência.

A eficiência é verificada através do cálculo elétrico da máquina. Já o arranjo pode ser solucionado escolhendo-se um gerador que possa ser alojado diretamente dentro da ogiva do hélice da turbina. Fazendo-se este arranjo, tem-se uma melhoria da eficiência que permite fazer uma turbina com área ativa sensivelmente menor. Como se estima um terço do diâmetro para instalação do gerador, o ganho de área da eficiência é compensado pelo aumento para acomodação do gerador. Ou seja, o tamanho final da turbina não seria alterado.

Em regiões de calor intenso como a Amazônica, uma preocupação importante é quanto ao aquecimento dos enrolamentos da máquina, que aumenta suas perdas ôhmicas. Quando imersa em água, a troca de calor entre a máquina e o meio externo é mais eficiente, melhorando o funcionamento do enrolamento.

Do ponto de vista da produção, em uma primeira análise, o ganho com a eliminação das engrenagens seria compensado pelo custo de uma máquina elétrica especial. Porém ao se pensar em um equipamento modular com a perspectiva de produção de diversas unidades idênticas, o gerador deixa de ser especial e passa a ser semi-seriado (ou mesmo seriado) o que reduziria o seu custo de produção.

Considerando a produção semi-seriada e a meta de minimizar a manutenção assim como as perdas globais do sistema, selecionou-se a solução com gerador imerso na água acoplado diretamente à turbina. Como potencial de melhoria adicional, há ainda a possibilidade de se projetar uma máquina com eficiência melhor do que os 65% a 70% obtidos nos geradores comerciais de pequena potência.

3.3 Escolha do gerador

Entre as opções de máquina elétrica mais comuns para este tipo de aplicação (máquina síncrona e assíncrona) optou-se pelo uso de um gerador síncrono com ímãs permanentes, com estator interno e rotor externo devido aos seguintes aspectos:

- A. Pode-se utilizar o gerador em qualquer rotação.
- B. Não há necessidade de sistema de excitação.
- C. Baixa manutenção.
- D. Dispensa o uso de caixas de engrenagem para ampliar a rotação do eixo da turbina.
- E. A corrente CA pode ser convertida em CC através de diodos (custo acessível e dispensam controle).
- F. No caso de existir uma bateria, basta apenas um dispositivo de comutação controlado para carregá-la.
- G. Ponto ótimo de operação facilmente controlável.
- H. No caso de haver necessidade, mais geradores podem ser facilmente postos em paralelo ao elo CC ou mesmo um painel solar pode ser conectado ao sistema como fonte complementar.

O arranjo de rotor externo com estator interno permite que o gerador seja a ogiva da turbina, com o acoplamento direto das pás na carcaça do gerador, eliminando assim o efeito de “sombra” que diminui a eficiência do hélice.

A opção de estator interno reduz a área disponível para as ranhuras, diminuindo a quantidade de cobre possível no enrolamento e a eficiência da máquina. Esta perda de eficiência será aceita como contrapartida de um arranjo mecânico mais robusto para fixação direta das pás da turbina. Mesmo nesta condição, é possível obter uma máquina com 80% de eficiência, valor maior que o usualmente disponível para máquinas comerciais de baixa potência. Nas referências há um trabalho desenvolvido por nós em 2005 mostrando que esta eficiência é possível mantendo uma boa proporção entre os tamanhos da turbina e do gerador.

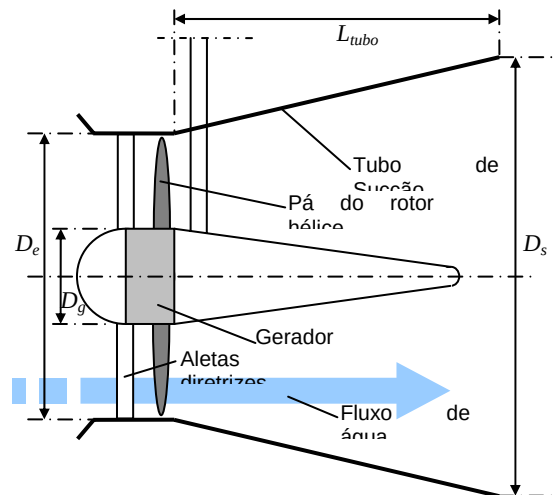


FIGURA 2: Esquema geométrico da turbina.

4.0 - DIMENSIONAMENTO BÁSICO DA TURBINA

Neste trabalho apresenta-se apenas a metodologia para obtenção das características geométricas básicas (conforme a Figura 2) e rotação da turbina. A rotação, a potência e o espaço disponível são as condições de contorno mais importantes para o cálculo elétrico do gerador.

Os dados de entrada para o cálculo são a velocidade do fluido em escoamento livre (V), a potência desejada no eixo do gerador (P_{eixo}) e o rendimento da turbina (η_t). A velocidade do fluido deve ser medida no local onde o equipamento será instalado, levando-se em consideração as variações devido à profundidade assim como as sazonais (cheia e seca). É importante ter dois valores pois, a turbina é dimensionada para gerar a potência nominal em uma condição de velocidade mínima porém, deve suportar os esforços mecânicos nas condições de velocidade elevada.

A potência no eixo do gerador é uma função das cargas consumidoras, cuja curva pode ou não ser nivelada através do uso de baterias. Com o nivelamento, é obtida a potência teórica. A ela devem-se somar as perdas dos sistemas eletrônicos de conversão, da transmissão e do próprio gerador.

Já o rendimento é um valor experimental. Varia de acordo com a solução técnica adotada. Neste trabalho, foram considerados os dados de RUPRECHT e REINHARDT (2003). A partir deles, pode-se calcular a eficiência da turbina em 66% em relação à área de saída do tubo de sucção.

A sequência de cálculo pode ser vista na Figura 3. A partir da potência a ser fornecida ao gerador, do rendimento da turbina e da velocidade da água no escoamento livre, calcula-se o diâmetro de saída da turbina. Depois, com base da inclinação máxima nas paredes do tubo de sucção e na relação de áreas entre entrada e saída, calcula-se o comprimento e o diâmetro de entrada do tubo de sucção. O diâmetro de entrada será o mesmo do hélice. Com base neste número, numa curva experimental e análise adimensional, calcula-se a rotação do hélice. Com base na rotação e na potência a ser convertida pelo gerador, estima-se o tamanho do seu estator (D e L). Tendo o

diâmetro do gerador, pode-se ajustar o diâmetro do hélice assim como o comprimento e o diâmetro de saída do tubo de sucção. Deve-se verificar novamente a rotação da turbina para estar certo de que o conjunto irá funcionar. Caso seja necessário, um pequeno ajuste no comprimento do gerador compensará a pequena queda de rotação do conjunto. Como se pode observar, o cálculo dos dados da turbina é iterativo sendo conveniente a sua implementação em uma planilha eletrônica. Na primeira iteração, D_g pode ser considerado 0.

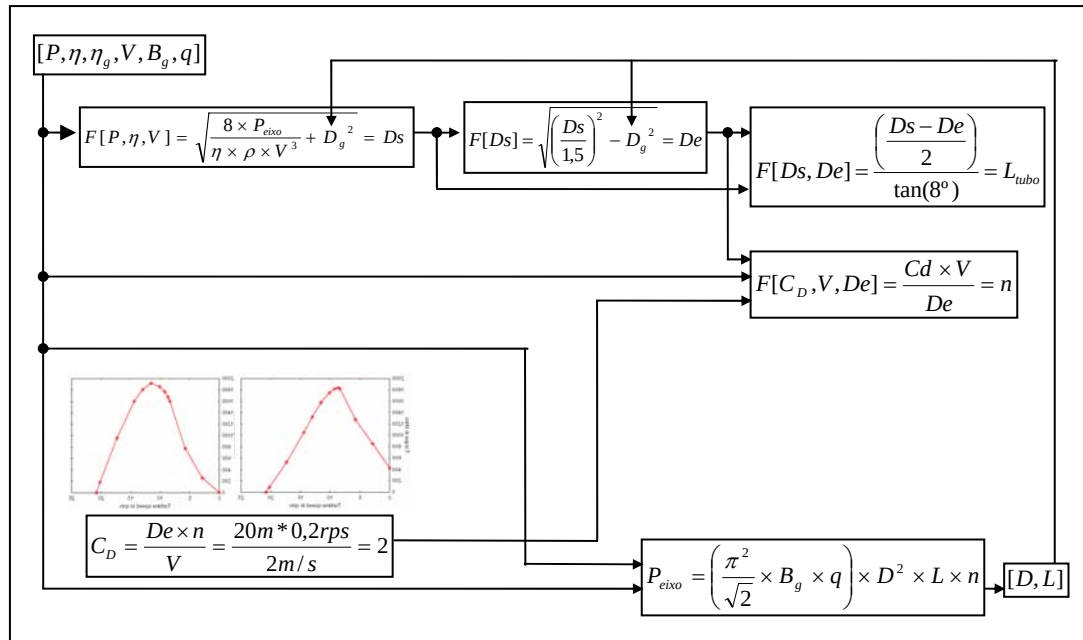


FIGURA 3: Fluxograma de cálculo das características básicas da turbina.

Segundo RUPRECHT e REINHARDT (2003) o diâmetro de saída do tubo de sucção deve ser 1,5 vezes o de entrada, e o ângulo de abertura deve ser limitado em 8° para que não haja descolamento do fluido da parede.

A rotação da turbina é obtida com o adimensional de semelhança dinâmica baseado nos dados experimentais de RUPRECHT e REINHARDT (2003): ponto ótimo de rotação de 12 rpm (fluxo de 2m/s, rotor de 20 m de diâmetro).

Para este tipo de aplicação, busca-se uma relação de até metade do diâmetro do estator para o comprimento.

A indução magnética remanente do entreferro varia de 0,3 a 1 T dependendo do ímã permanente selecionado. Conforme demonstrado em nosso trabalho em 2005 (ver referências), a opção de melhor custo-benefício é o uso do ímã de ferrite ($B_g = 0,3$ T). Um valor típico para a densidade linear de corrente do estator é de 20000 a 30000 A/m porém, neste caso, devido às restrições de espaço, pode-se adotar $q=8000$ A/m.

Os cálculos acima expostos trazem um erro intrínseco que é a suposição de que a turbina calculada terá o comportamento exatamente equivalente ao da turbina ensaiada por RUPRECHT e REINHARDT (2003). Embora o hélice escolhido tenha o mesmo formato, como a proporção entre seu comprimento e a largura da ogiva é diferente, o comportamento terá uma pequena variação. Esta variação não será abordada neste trabalho pois seria necessário um novo ensaio de modelo considerando uma ogiva.

A fim de simplificar os cálculos, podem-se ajustar alguns valores sem prejuízo do funcionamento do dispositivo. Isso facilita os cálculos. Durante a operação, a demanda de potência fará com que a turbina opere no seu ponto ótimo. Possivelmente ele será acima da rotação nominal, porém é certo que o gerador estará atendendo aos requisitos mínimos de tensão e frequência.

Da mesma forma, deve-se supor um círculo com diâmetro D_g maior do que D para alojamento do rotor. Para máquinas com centenas de Watts, 25mm de cada lado (50 mm no diâmetro) é suficiente.

5.0 - CÁLCULO DO GERADOR

Para se calcular um gerador, parte-se da definição de condições de contorno geométricas (diâmetro, comprimento, tipo de ligação do enrolamento), eletromagnéticas (tensão e fluxo magnético no entreferro) e dinâmica (rotação) para se calcular o enrolamento (número de espiras e diâmetro dos condutores) e a corrente. Com base nestes resultados, calcula-se a regulação da máquina e pode-se verificar se as dimensões definidas na primeira parte estão adequadas, com folga ou falta de material para atingir a eficiência desejada.

Para o cálculo elétrico, utiliza-se o método gráfico de cálculo do fluxo magnético por pólo, a mesma estratégia utilizada por CHEN e NAYAR (1998). Faz-se duas curvas: a de desmagnetização do ímã permanente e a de magnetização do circuito magnético do gerador (partindo-se de um fluxo magnético arbitrário no entreferro, faz-se a circuitação para calcular a força magneto-motriz equivalente). Supondo que não aconteça saturação, o ponto de cruzamento das curvas é o ponto de operação da máquina, que fornece o fluxo por pólo da mesma.

Conforme descrito por CHEN e NAYAR (1998), o cálculo permite encontrar a tensão em vazio da unidade, porém necessita de correção a fim de contemplar os efeitos da regulação da máquina (principalmente devido à reação de armadura e às perdas ôhmicas). No caso da máquina a imãs permanentes a reação de armadura não poder ser compensada com a excitação. Com a correção, o cálculo deve ser realimentado devido a influência do número de espiras e da corrente de fase na reação de armadura. Assim, é interessante a implementação em uma planilha eletrônica para executar centenas de iterações rapidamente e poder modificar os parâmetros geométricos e recalculá-la várias vezes até a obtenção do rendimento e da tensão desejada.

5.1 Dados da máquina

O dados básicos da máquina estão descritos na Tabela 1. É importante lembrar que a tensão do link de corrente contínua deve ser convertida para obter-se o valor de linha trifásico antes do retificador.

TABELA 1: Dados da máquina elétrica.

Grandeza	Descrição	Unidade
P_{el}	Potência elétrica	W
P_{eixo}	Potência mecânica no eixo	W
V_{linha}	Tensão de linha	V
η_g	Rendimento do gerador	%
I_f	Corrente de fase	A
n	Rotação	rpm

5.2 Geometria da Máquina

Estimativa de tamanho do Estator

A formulação para a estimativa do tamanho do estator é:

$$S = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \times B_g \times q \times D^2 \times L \times n$$

Conforme descrito no item 4, pode-se adotar $B_g=0,3$ T e $q = 8.000$ A/m.

Deve-se partir do par diâmetro (D) comprimento (L) obtido no cálculo da Turbina. A recomendação de L menor ou igual à metade de D é feita para facilitar a construção da unidade ou seja, não há impedimento para L ser um pouco maior para fazer com que a unidade atinja os requisitos de tensão e rendimento. Caso esta relação se deforme muito (L=D por exemplo), é conveniente o recálculo da turbina para alocar um gerador com D maior.

Número de Pólos

Por hipótese, a frequência elétrica mínima deve ser de 20 Hz. Esta condição é imposta para permitir o funcionamento adequado de um retificador sem “ripple”, com um filtro capacitivo de tamanho razoável.

Número de ranhuras

Caso não seja possível um enrolamento trifásico comum com 3 ranhuras por pólo, pode-se partir para a solução de pólos consecuentes com 1,5 ranhuras por pólo. O critério para escolha é o passo de ranhura. Valores maiores do que 0,025 m são mais convenientes, possibilitando dentes com boa resistência mecânica e espaço suficiente para a montagem dos enrolamentos.

Detalhamento geométrico do estator

Para determinação do enrolamento, primeiro deve-se fazer o cálculo do fluxo magnético por pólo no entreferro. Para tanto, é necessária uma hipótese sobre a geometria detalhada da máquina (coroas, dentes, ranhuras e pólos). O cálculo elétrico mostrará se a hipótese é suficiente ou se há necessidade de modificações. Largura e altura do dente poderão ser alteradas para permitir a colocação e mais cobre nas ranhuras e diminuir perdas ôhmicas. O comprimento da máquina ou a espessura dos imãs poderão ser alterados para compensar os efeitos da reação de armadura na regulação e fazer a unidade atingir a tensão de projeto. O cálculo pode ser feito com algumas dimensões parametrizadas em função de outras, assim a alteração dos valores a fim de obter os requisitos desejados é facilitada.

5.3 Cálculo elétrico

Passo 1: Induções

Parte-se de uma indução arbitrária, calcula-se o fluxo por pólo e, em seguida as induções, dos dentes e coroa do estator, coroa no rotor e no imã.

Passo 2: Força magneto-motriz

A partir da curva de magnetização do aço carbono, calcula-se a força magneto motriz de cada uma das partes e a total do circuito e o campo magnético no imã. Neste ponto deve ser incorporada a reação de armadura. Ocorre que, na primeira iteração, a reação de armadura ainda não pode ser calculada pois não se dispõe do número de espiras. A solução é estimar um número de espiras e posteriormente realimentar o cálculo iterativamente.

Passo 3: Indução de operação no entreferro

Calcula-se o coeficiente angular na reta de carga do circuito magnético, a partir do qual obtém-se o A indução de operação do imã, no entreferro e no dente assim como o fluxo por pólo. Neste ponto verifica-se se a indução máxima no dente. Se o valor for menor do que 1,8 Wb/m², pode-se alterar o desenho da ranhura a fim de obter mais espaço para o enrolamento. Da mesma forma, se desejar reduzir a massa do estator, pode-se reduzir a espessura da coroa estatórica até o limite de 1,5 Wb/m². A otimização desta massa, assim como da coroa rotórica

deve atentar para os critérios mecânicos. A parte central do estator colabora para sua fixação mecânica e todo o torque nas pás será aplicado na coroa rotórica. Do ponto de vista prático, na maioria dos casos a coroa rotórica estará dimensionada para atender ao critério mecânico, e com “folga” do ponto de vista magnético.

Antes de calcular o número de espiras, deve-se calcular o fator de redução da tensão em função da inclinação de ranhura para redução do torque de relutância da máquina.

Passo 4: Número de Espiras

Arbitra-se então uma tensão de operação da máquina. Ocorre que em operação, a tensão nos terminais será menor, devido às perdas ôhmicas dos enrolamentos. A tensão de operação é um dos resultados finais do cálculo que será comparado ao valor desejado.

Passo 5: Perdas no enrolamento

Com base na área da ranhura (corrigida devido à inclinação), no fator de enrolamento e número de espiras, obtém-se a área disponível para o condutor e escolhe-se o fio a ser utilizado com o auxílio de uma tabela AWG. A partir da mesma tabela, obtém-se a resistência por metro. Com base nela, no número de espiras e no caminho médio, pode-se calcular a resistência por fase dos enrolamentos.

Passo 6: Verificação

Por fim, faz-se o cálculo dos dados da máquina para comparar-se à Tabela 1 e proceder aos ajustes geométricos necessários. Neste ponto verifica-se se a tensão de fase nos terminais da máquina atinge o valor desejado. Caso não atinja, aumenta-se a tensão de fase de projeto, o que aumenta o número de espiras, diminuindo a área de cobre do condutor e aumentando a densidade de corrente. A densidade de corrente no condutor pode aumentar até o limite de 6 A/mm² para haver dissipação térmica sem sobre-aquecimento. Ocorre que, ao aumentar a densidade de corrente, usualmente a eficiência cai. Caso ela caia abaixo do valor desejado, e o dente do estator já esteja com a menor dimensão possível, deve-se partir para modificações no tamanho da máquina: aumento do diâmetro ou do comprimento do estator. No caso específico desta aplicação, é mais conveniente a mudança do comprimento. Assim, evita-se modificar o projeto básico da turbina e os dados de rotação, o que poderia alterar número de pólos e outras partes da máquina.

6.0 - VALIDAÇÃO

Neste trabalho, não será feita a verificação do modelo de cálculo da turbina, uma vez que o modelo de cálculo básico é feito a partir de dados experimentais e do uso da teoria de adimensionais. Com relação ao gerador, cabe a verificação se o modelo de cálculo elétrico proposto corresponde ao comportamento físico de máquinas deste tipo. Assim, calculou-se uma máquina feita em 2000 com estator interno e rotor externo segundo o modelo deste trabalho e comparou-se a curva de regulação obtida com os dados experimentais.

Ao invés de se utilizar a resistência de projeto dos enrolamentos, fez-se a medição em laboratório, obtendo-se o valor médio de 0,84 ohm por fase.

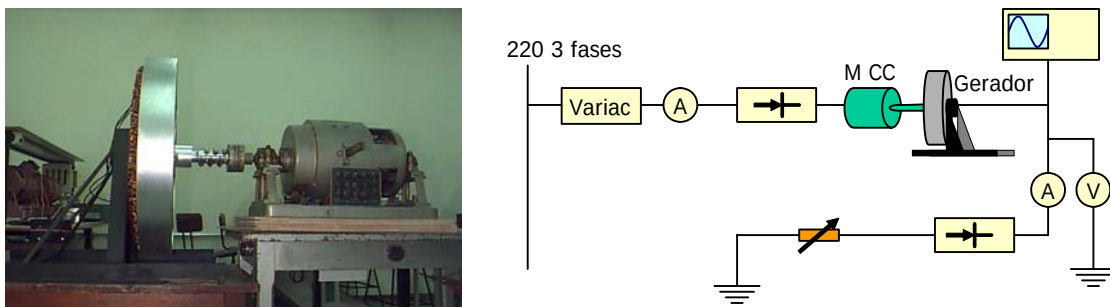


FIGURA 4: a) Máquina feita em 2000 na bancada de testes e; b) arranjo experimental utilizado para ensaio.

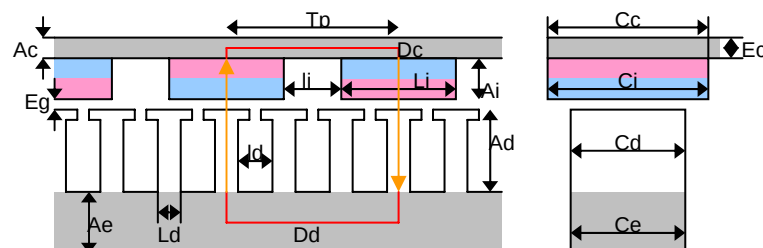


FIGURA 5: Esquema do circuito magnético da máquina ensaiada.

TABELA 2: Dados da máquina feita em 2000 com estator interno e rotor externo.

Cc	Comprimento da coroa do rotor	40,00 mm	Ae	Altura da coroa estatórica	15,00 mm
Ac	Altura da coroa do rotor	5,000 mm	Eg	Entreferro	3,000 mm
Ci	Comprimento do imã	40,00 mm	TP	Passo Polar	41,04 mm
Ai	Altura do imã	15,00 mm	D	Diâmetro do estator	625,6 mm
Li	Largura do imã	28,00 mm	Dme	Diâmetro médio do estator	627,1 mm
Li	Espaço entre imãs	13,98 mm	P	Pares de polos	24
Cd	Comprimento do dente do estator	30,00 mm	N	Número de ranhuras	144
Ad	Altura do dente do estator	22,20 mm	fe	Fator de empilhamento	0,95
Ld	Largura do dente do estator	5,960 mm	Kd	Coeficiente de dispersão	1,2
Ld	Espaço entre dentes do estator	7,000 mm	Kc	Fator de carter	1,03
Ce	Comprimento da coroa estatórica	30,00 mm			

Conforme pode ser visto na Figura 6, a curva calculada de regulação é compatível com os dados obtidos experimentalmente. É oportuno observar que a variação do entreferro desloca toda a curva verticalmente, alternando a tensão de operação em vazio, e que a resistência dos enrolamentos altera a sua inclinação. Na simulação feita para obter a curva da Figura 6, utilizou-se o entreferro real da máquina que era de 2,8 mm e não 3 mm conforme o projeto. A resistência de projeto dos enrolamentos era de 0,55 ohm porém, devido a motivos construtivos (cabeça de bobina maior do que o esperado), sua resistência atingiu o valor médio de 0,84 ohm.

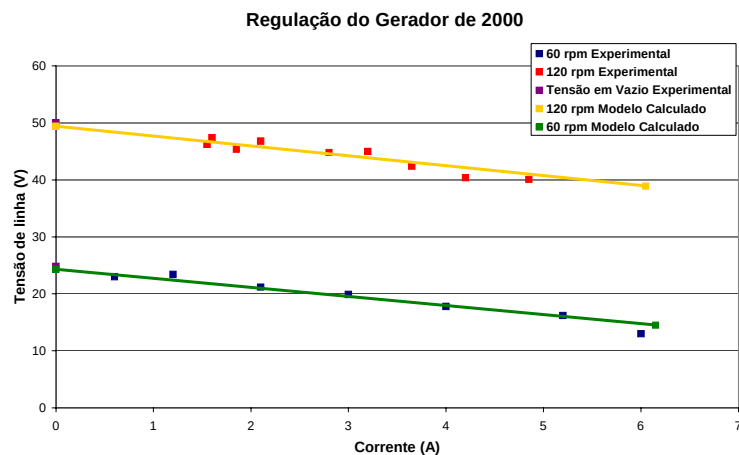


FIGURA 6: Regulação do gerador de 2000 com estator interno e rotor externo.

7.0 - CONCLUSÃO

Com a realização deste estudo, concluiu-se que é possível fazer um dispositivo para geração de energia elétrica a partir da energia cinética disponível em rios ou qualquer outro local onde haja correnteza.

Verificou-se que é possível a instalação do gerador dentro da turbina, cuja configuração mais conveniente é axial com tubo de sucção e aletas diretrizes.

Concluiu-se também que o modelo sistematizado para o dimensionamento de um gerador de ímãs permanentes é suficiente, refletindo o comportamento da regulação da máquina em teste real.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AZEVEDO, Tadeu Rezende de. Hidrogerador para rios sem queda d'água. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- (2) AZEVEDO, Tadeu Rezende de. Proposição de equipamento hidrocínético para geração de energia elétrica com máquina a ímãs permanentes. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2005.
- (3) GORBAN, Alexander N.; GORLOV, Alexander, M.; SILANTYEV, Valentin M. Limits of the turbine efficiency for free fluid flow. Journal of Energy Resources Technology. December 2001, vol 123 pág. 317.
- (4) NIEUWENHOUT, F.D.J.; DIJK, A. van; DIJK, V.A.P. van; HIRSCH, D.; LASSCHUIT, P.E.; ROEKEL, G. van; ARRIAZA, H.; HANKINS, M.; SHARMA, B.D.; Wade, H. Monitoring and Evaluation of Solar Home Systems, experiences with applications of solar PV for households in developing countries, Report ECN-C--00-89, Netherlands, ECE, September, 2000.
- (5) RUPRECHT, A.; REINHARDT, H. Development of a Marine Current Turbine. 4th ASME/JSME Fluid Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, U.S.A, July 6-10, 2003.