

LAIRTON ROLETO BITENCOURT

ESTUDO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA BASEADO EM RECURSOS EÓLICOS E HIDRELÉTRICOS

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Orientadora: Prof^a. Dra. Adriane Prisco Petry
Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre Beluco

Porto Alegre
2005



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**ESTUDO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
BASEADO EM RECURSOS EÓLICOS E HIDRELÉTRICOS**

LAIRTON ROLETO BITENCOURT

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Rogério Markzack
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

**Porto Alegre
2005**

de modo especial, a meus pais José e Lodovina que sempre me apoiaram e à minha companheira Mariane, sempre me incentivando e me lembrando do meu caminho.

AGRADECIMENTOS

à minha orientadora, *Prof^a. Dra. Adriane Prisco Petry* por toda a atenção prestada a este estudo e por ter me aceito como orientando.

ao *Prof. Dr. Alexandre Beluco*, co-orientador, que com seu conhecimento na área muito me auxiliou.

ao meu irmão Luciano que deu auxílio fundamental para a realização deste trabalho.

a todos os mestres que encontrei dentro da UFRGS professores ou não, e que me mostraram não apenas o caminho da ciência mas o da vida.

BITENCOURT, L. R. **Estudo de um sistema híbrido de geração de energia elétrica baseado em recursos eólicos e hidrelétricos**. 2005. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de sistemas híbridos de geração de energia baseados em recursos eólicos e hídricos, fazendo uma comparação econômica entre reservatórios de energia por acumulação potencial da água e por meio de baterias. Para implementar esta análise foi gerado um software que modela os componentes do sistema e faz um balanço energético entre as fontes e os padrões de consumo. Ao final pôde-se caracterizar energeticamente e economicamente algumas configurações de aproveitamentos eólicos em conjunto com hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Geração de Energia, Sistemas híbridos de geração, Energias renováveis, Energias limpas, Sistema de acumulação de energia, Energia eólica, Energia Hidroelétrica, Pequenas centrais hidroelétricas.

BITENCOURT, L. R.. **Study of a Hybrid Electric Energy Generation System Based on Wind and Hydroelectric Resources**. 2005. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ABSTRACT

This work presents an analysis of a hybrid electric energy generation systems based on wind and hydro resources. An economical comparison was made between the water energy storage system and battery energy storage system to study the system viability, to make it possible a software was built to modeling the system components and to do an energetic balance between the tow energy sources and the energy consumption. In the end of this work was possible to characterized energetic and economically some hybrid configuration of hydro-wind systems.

KEYWORDS: Energy generation, Hybrid generation system, Renewable energy, Clean energy, Storage energy system, Wind energy, Hydroelectric energy, Small Hydroelectric plants.

SUMÁRIO

ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO HIDRELÉTRICO.....	8
2.1. SISTEMAS HÍBRIDOS.....	8
2.2. ACUMULAÇÃO DE ENRGIA.....	8
2.3-O SISTEMA ESTUDADO.....	9
2.3.1 Padrão de precipitação pluviométrico.....	10
2.3.2 Padrões de velocidade média do vento.....	10
2.3.3 Reservatório superior e inferior.....	10
2.3.4 Padrão de consumo.....	11
2.3.5 Turbina hidráulica.....	11
2.3.6 Turbina eólica	11
2.3.7 Bomba.....	12
2.4 DISCUSÃO SOBE O RENDIMENTO DO SISTEMA.....	12
3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	13
3.1 FLUXOGRAMA DO SOFTWARE.....	14
3.2 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE.....	14
4. ESCOLHA DA LOCALIDADE.....	15
5. RESULTADOS.....	16
6. ANÁLISE ECONOMICA.....	19
7. CONCLUSÕES	22
8. REFERÊNCIAS	23

1. INTRODUÇÃO

As formas de aproveitamento de energias renováveis vêm tomando um papel cada vez mais importante à medida que o controle dos níveis de emissões de gases poluentes têm sido o alvo de preocupações internacionais, marcadas pelo Protocolo de Kyoto, que prevê metas para redução das emissões a nível mundial. Com isso torna-se importante o estudo de métodos para o aproveitamento de recursos naturais que causem o mínimo impacto, como é o caso da energia dos ventos e das águas.

Nos últimos anos estes métodos de geração vêm crescendo, sendo que em alguns países a energia eólica é responsável por 10% da geração de energia. No Brasil a parcela de energia gerada por este método ainda é muito baixa, mas programas de incentivo como o PROINFA, que estimula a produção de energia por meios alternativos, tendem a mudar o panorama. Um grande exemplo da perspectiva de aumento da produção por métodos renováveis é a instalação de um dos maiores parques eólicos do mundo no município de Osório, com capacidade para gerar 150MW de potência. Além da energia eólica o programa também dá apoio à instalação de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) dentre outros. Isto se torna importante, pois os grandes aproveitamentos hidrelétricos já vem sendo utilizados, tornando-se cada vez mais escassa a possibilidade de expansão por estes meios CTEnergy (2003).

Pequenos projetos de geração de energia vem sendo utilizados no meio rural, principalmente onde as linhas de distribuição não estão presentes, como por exemplo no bombeamento de água para irrigação e suprimento de pequenas comunidades isoladas. Geralmente na implantação de pequenos sistemas de geração por energia eólica faz-se uso de um sistema de acumulação de energia para adaptar a disponibilidade energética com a demanda, haja vista a característica aleatória da incidência dos ventos. Na grande maioria das vezes utilizam-se baterias de chumbo ácido o que contrapõe à idéia de geração de energia limpa uma vez que estas são constituídas de elementos extremamente poluentes.

O intuito deste trabalho é estudar um sistema híbrido de geração de energia através de métodos totalmente renováveis a partir de recursos hídricos e eólicos para suprir demandas desconectadas da rede de distribuição. Para tanto é estudado um sistema de acumulação por energia potencial da água através da implementação de um software em *MATLAB* (2002) que faz um balanço energético das disponibilidades hídrica e eólica. Além disso é feita uma breve análise econômica dos arranjos estudados.

2. SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO HIDRELÉTRICO

2.1- SISTEMAS HÍBRIDOS

Um sistema usando a combinação de diferentes fontes de energia tem a vantagem de ter estabilidade, por exemplo, o vento é usualmente relativamente fraco no outono e o período de maior estiagem encontra-se no verão. Um sistema balanceado pode prover as diferenças de características sazonais das disponibilidades energéticas, além disso este tipo de sistema otimiza a utilização de recursos renováveis J.J.Ding et al.(2000).

2.2-ACUMULAÇÃO DE ENRGIA

Geralmente pequenos sistemas eólicos isolados da rede de distribuição utilizam sistemas de armazenamento de energia por baterias J. J. Ding et al.(2000) para vincular um padrão de consumo bem definido à geração de energia proveniente do vento, que além de ter uma característica aleatória pode ter sua intensidade máxima do dia deslocada do consumo

máximo SEMC (2002). Assim os sistemas eólicos necessitam absorver esta defasagem entre consumo e produção. Hoje existem diversos tipos de sistemas de armazenamento, dentre os quais podem ser citados os sistemas de armazenamento por ar comprimido, que utiliza a energia do vento para comprimir o ar em reservatórios à alta pressão Ben et al. (2003) ou métodos ainda mais modernos como é o caso de acumulação por células de hidrogênio, que tem grande capacidade de armazenamento em pequenos espaços NREL(2004).

Não são somente os sistemas eólicos que utilizam reservatórios de energia, sistemas de acumulação hidrelétrica vem sendo utilizados há décadas em países da Europa McIntyre (1983), para adequar a produção de usinas termoelétricas a um perfil de demanda que apresenta picos de consumo em determinados horários que não poderiam ser supridos somente pelas termoelétricas. Desta forma a energia é produzida continuamente no sistema termoelétrico e é aproveitada para bombear água para reservatórios com maior altitude, e turbinada nas horas de maior demanda.

Baterias são amplamente empregadas para pequenos aproveitamentos energéticos em sistemas solares e eólicos, mas apresentam a desvantagem de seu alto custo quando os sistemas aumentam de dimensão. Outra desvantagem do uso de baterias é a sua composição, pois estas são feitas de materiais tóxicos, o que configura uma incoerência quando se pretende construir um sistema de geração a partir de fontes limpas e renováveis.

2.3-O SISTEMA ESTUDADO

O sistema estudado é composto por duas fontes de energia: a eólica e a hidráulica, seus respectivos geradores, um reservatório de baixa altitude e outro com maior altitude, uma bomba e um padrão de consumo, todos ligados por um controle que gerencia o sistema. A figura 1 mostra um diagrama do sistema. Na seqüência serão descritos os blocos.

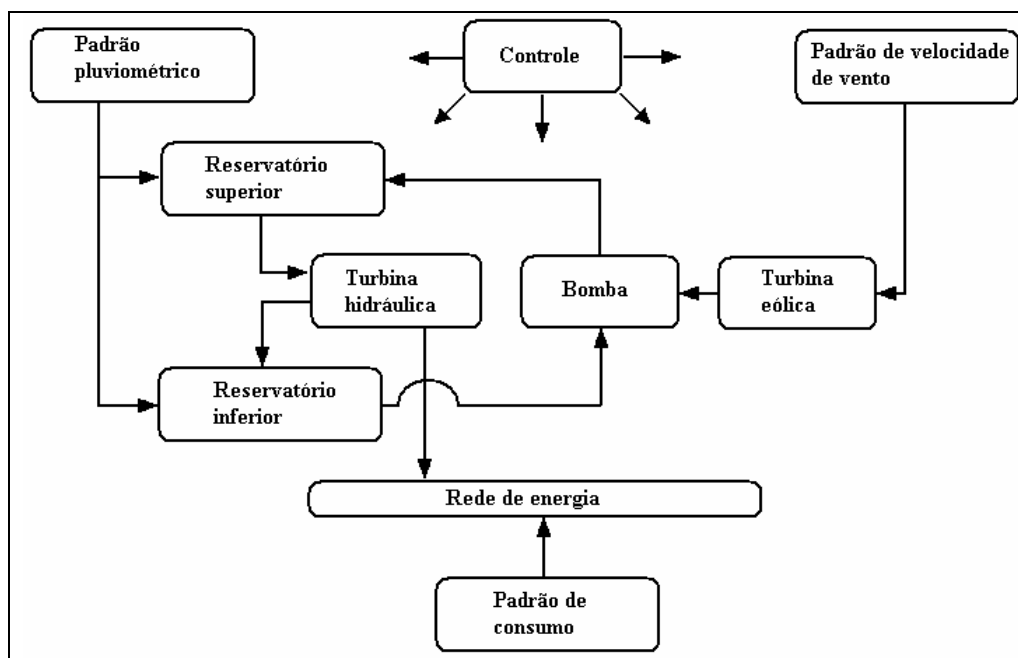


Figura 1. Diagrama do sistema em estudo.

2.3.1 Padrão de precipitação pluviométrico

O padrão de precipitação pluviométrica está diretamente relacionado com a disponibilidade de energia ao gerador hidrelétrico, este padrão varia ao longo do ano de forma

aproxima a uma senoide, como mostra figura 2. Este dado de entrada será aplicado ao software através de uma senoide, que tenha as informações de máximo e mínimo e localização destes no tempo Beluco (2001).

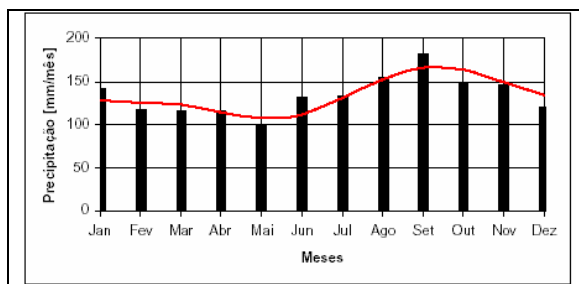


Figura 2 – Precipitação mensal na estação FEPAGRO (1989) em Rio Grande, RS.

2.3.2 Padrões de velocidade média do vento

A velocidade média do vento também sofre variações durante o ano SEMC (2002), assim a energia disponível ao longo do ano varia de forma semelhante ao padrão pluviométrico, ou seja, de forma senoidal, no entanto a característica aleatória do vento acompanha a função estatística de densidade de probabilidade de Weibull, Hennessey (1977). Sendo assim a entrada do software será uma distribuição randômica com as características do vento, como mostra a figura 3.

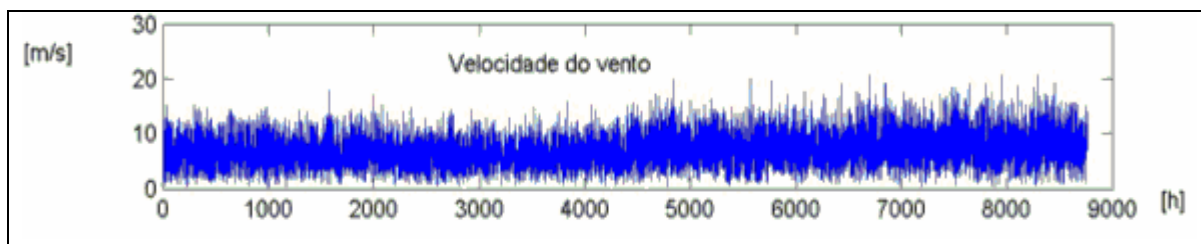


Figura 3.- Característica randômica do vento, segundo a distribuição de Weibull.

2.3.3 Reservatório superior e inferior

Os reservatórios, superior e inferior devem ter aproximadamente as mesmas dimensões sendo sempre que possível ter um rio ou riacho que cheguem a eles, de modo a fazer o primeiro enchimento e repor as perdas por evaporação e infiltração McIntyre, (1983). A capacidade do reservatório deve ser suficiente para suprir a demanda por um tempo a ser estabelecido sem reabastecimento e depende da vazão turbinada, da vazão bombeada, das vazões dos rios ou riachos se houverem e das perdas por infiltração e evaporação. A energia reservada em Joule é dada pela equação (1).

$$E = V\gamma_{\text{água}}gh \quad \text{equação (1)}$$

2.3.4 Padrão de consumo

O padrão de consumo de uma residência não é constante, este apresenta um horário de pico onde a demanda cresce muito, o que exige a máxima capacidade dos equipamentos de geração Vianna (2000). A figura 3 mostra a variação de demanda durante o dia de uma residência típica. Este perfil será utilizado como entrada no software de simulação.

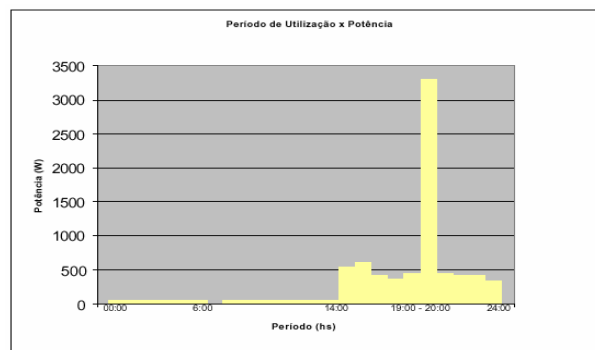


Figura 3 - Variação de demanda requerida durante o dia.

2.3.5 Turbina hidráulica

A unidade geradora é o equipamento eletro-mecânico mais importante de uma micro central hidrelétrica. É composta, basicamente pelo conjunto turbina hidráulica / gerador e equipamentos complementares ANEEL (2000).

Como a faixa de potência unitária e vazão, adotadas para as micro centrais são, respectivamente de até 100 kW e 2 m³/s Eletrobrás & DNAEE (1985), e as quedas que se pode obter no local de implantação do projeto-padrão de até 60 m, selecionou-se para os estudos as turbinas tipo Francis. A escolha da turbina do tipo Francis caixa espiral deu-se principalmente em decorrência da generalidade de sua aplicação no território nacional, e por este tipo de turbina possibilitar uma gama de aplicações muito grande no campo dos micro- aproveitamentos. O campo de aplicação das turbinas Francis estudadas, atende quedas acima de 5 m, e toda a faixa de potência dos micro- aproveitamentos Balarim (1998).

Deste modo o modelamento para turbina segue a equação (2), onde P_{et} é a potência efetiva da turbina e η_t o rendimento da turbina hidráulica em conjunto com o gerador elétrico.

$$P_{et} = qh\eta_t \quad \text{equação (2).}$$

2.3.6 Turbina eólica

A turbina eólica será considerada como de passo variável, esta funciona em uma faixa de velocidades de vento como mostram as equações (3a), (3b) e (3c), sendo que a mínima velocidade é denominada velocidade de partida V_p , esta é a velocidade com que o gerador começa a produzir energia. A máxima velocidade é a velocidade de saída V_s , nesta velocidade torna-se perigoso continuar operando, pois as tensões mecânicas sobre o equipamento podem danificá-lo, assim neste ponto o gerador sai de operação. E ainda temos a velocidade nominal de operação V_n na qual o gerador produz sua potência nominal segundo a equação (4). O modelamento do gerador eólico com passo variável ainda é descrito pelas constantes das equações (5) e (6) Garcia (2004):

$$P_{ag} = 0 \quad V < V_p \quad (3a)$$

$$P_{ag} = P_n \quad V_n \leq V \leq V_s \quad (3b)$$

$$P_{ag} = 0 \quad V > V_s \quad (3c)$$

$$P_{ag} = a + bV^k \quad V_p < V < V_n \quad (4)$$

$$a = \frac{P_n V_p^k}{V_p^k - V_n^k} \quad (5)$$

$$b = \frac{P_n}{V_n^k - V_p^k} \quad (6)$$

Onde k é uma constante que deve ser ajustada de acordo com a curva do gerador eólico, P_{ag} a potencia extraída do aerogerador.

2.3.7 Bomba

A potencia fornecida pela bomba é modelada como sendo: a potência do aéro gerador multiplicada por um rendimento que leva em consideração o rendimento da máquina hidráulica e da máquina elétrica, segundo a equação (7).

$$P_b = P_{ag} \eta_b \quad \text{equação (7).}$$

2.4 DISCUSSÃO SOBRE O RENDIMENTO DO SISTEMA

O sistema estudado utiliza um arranjo que coloca em série os equipamento, o que configura uma situação onde as perdas dos equipamentos se somam, ou seja, a energia gerada no gerador eólico sofre perdas na bomba (conversão elétrica e mecânica), e em seguida na turbina hidráulica (conversão mecânica e elétrica), estes rendimentos são da ordem de 70% para a bomba e 54% para a turbina hidráulica McIntyre, (1983). Se considerarmos o sistema como um todo, teremos 39% da energia gerada no gerador eólico efetivamente aproveitada para o consumo, o que nos mostra a um rendimento baixo se ainda considerarmos que a eficiência do gerador eólico também é pequena em relação à energia disponibilizada pelo vento. Se compararmos com um sistema que utilize reservatório por baterias, temos rendimentos maiores, da ordem de 80% se considerarmos as perdas do inversor e das baterias. Contudo mesmo se considerarmos esta diferença grande nos rendimentos dos sistemas com reservatório de água e de baterias, ainda assim o alto custo das baterias, considerando sua reposição a cada 3 anos, justifica o estudo presente. E se considerarmos que baterias constituem componentes com substancias altamente poluentes o uso de reservatório de acumulação de água torna-se uma alternativa limpa e durável.

3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

O software criado para este trabalho foi construído utilizando-se o *MATLAB 6 R13* como linguagem de programação. O software foi implementado com o intuito de realizar um balanço das energias provenientes das fontes eólica e hídrica, da energia reservada e da energia consumida pelo sistema. Para tanto são utilizadas sub-rotinas que geram as disponibilidades hídrica e eólica de acordo com padrões aleatórios, segundo a distribuição de Weibull, Hennessey (1977), obedecendo aos parâmetros de entrada que caracterizam as disponibilidades de acordo com o local estudado. O perfil de demanda é o mostrado na figura 3 e é repetido dia a dia até o final da rodada. Os dados de potencia da turbina são gerados utilizando-se o perfil criado para a disponibilidade eólica e as curvas de potência dos geradores. Para utilizar o modelo de potencia de geradores eólicos sugerido por Garcia (2004) é necessário descobrir o fator k de ajuste das curvas dos fabricantes à curva utilizada pelo

software. Assim utilizou-se o *Microsoft Excel* para realizar os ajustes, as figuras de 4 a 6 mostram o ajuste feito para os geradores utilizados neste trabalho.

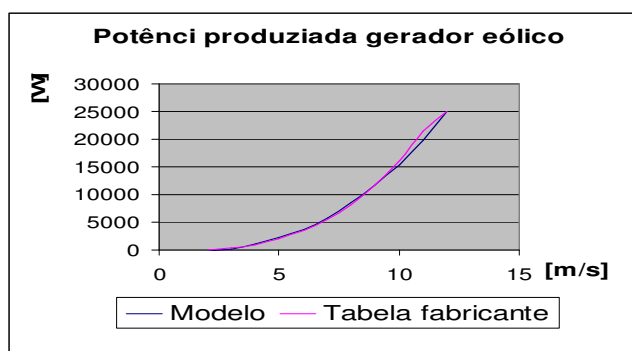


Figura 4. Gerador Eoltec Wind Runner 10-25. Ajuste $k=2,6$.

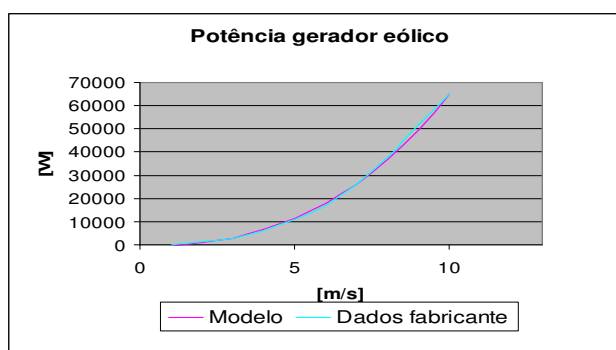


Figura 5. Gerador Eoltec Chinook 17-65. Ajuste $k=2,8$.

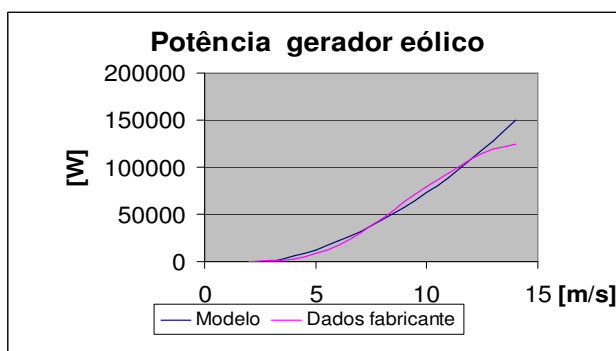


Figura 6. Gerador Fuhrländer FL100. Ajuste $k=2$.

Então com os dados de entrada carregados pode ser dado o início da rodada, que leva em consideração um ano de tempo com passos de uma hora, ou seja 8760 ciclos de cálculo por rodada. Os gráficos de saída mostram em primeiro lugar a situação de volume em que se encontra o reservatório, ou seja a quantidade de água em $[m^3]$ que se encontra reservada. O segundo gráfico mostra a variação instantânea da energia no sistema, e o terceiro gráfico mostra a energia produzida pelos diferentes processos, a energia total produzida e a energia total consumida.

3.1 FLUXOGRAMA DO SOFTWARE

Na figura 7 é mostrado o fluxograma do software, onde:

P_{he} = potência disponibilizada pelo gerador hidrelétrico;
 E_{res} = energia no reservatório;
 V_{res} = volume de água no reservatório;
 Q = vazão de água no gerador hidrelétrico;
 P_{pLu} = potência disponibilizada pela vazão de entrada do rio;
 dt = passo de tempo;
 h_x = altura de queda no gerador hidrelétrico;
 nt = rendimento tubina hidráulica;
 nb = rendimento do gerador hidrelétrico;
 P_b = potência disponibilizada pela bomba;
 ΔE_{res} = variação da energia no reservatório.

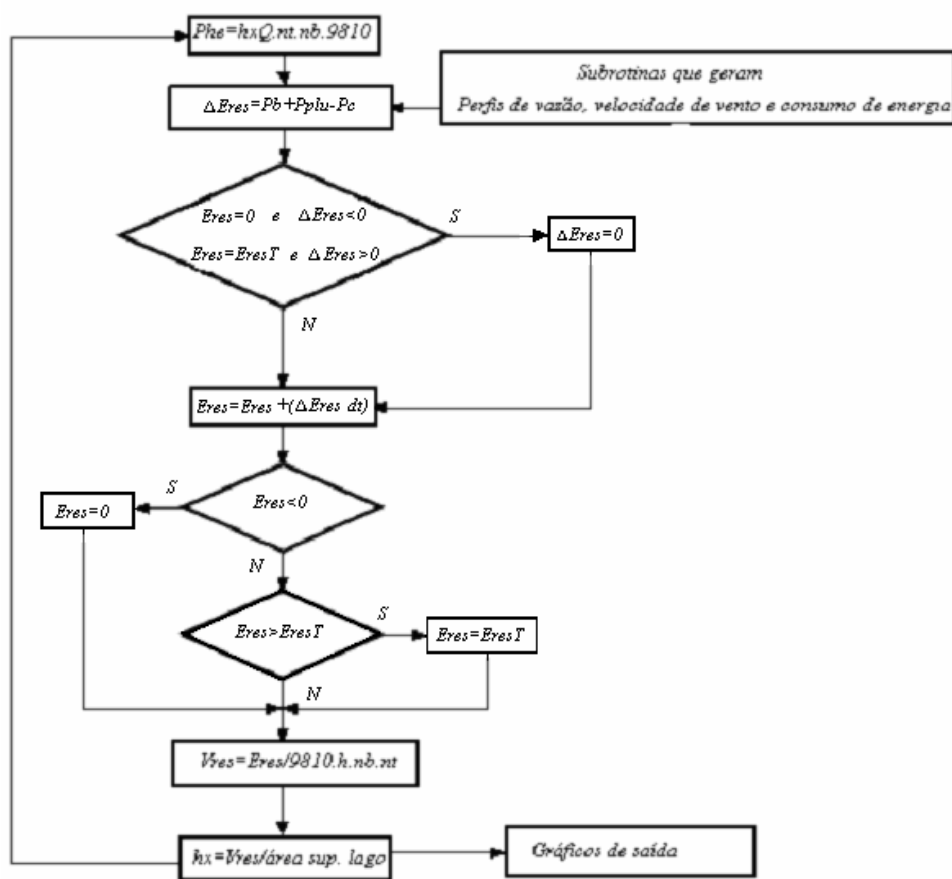


Figura 7. Fluxograma do software.

3.2 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Para validar os resultados do software foi feita uma simulação utilizando-se o software Alwin, que calcula os padrões de vento segundo a distribuição de weibull e possibilita a entrada de dados para qualquer tipo de gerador eólico. Assim foram utilizados os mesmos dados de vento e equipamentos de geração de energia para o software criado para este trabalho e para o Alwin, desta maneira comparamos os resultados de energia gerada ao longo

de um ano. Os resultados foram de 287,2MWh para o Alwin convertendo-se para Joule temos $1,034E12J$ e para o software desenvolvido $9,573E11J$, configurando-se uma diferença nos resultados de aproximadamente 8%. Este erro pode ser justificado pela diferença entre os padrões aleatórios de distribuição de vento utilizados e a diferença na curva de potencia gerada pelo software desenvolvido e as curvas fornecidas pelos fabricantes dos geradores eólicos. As figuras 8 e 9 mostram as saídas dos softwares Alwin e do software criado para este trabalho.

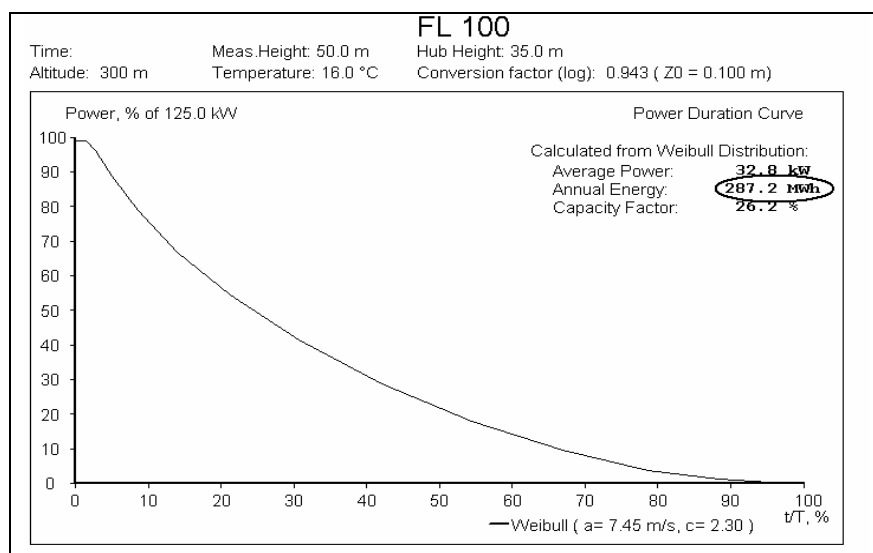


Figura 4 – Saída de dados do software Alwin, energia produzida de $1,034E12J$.

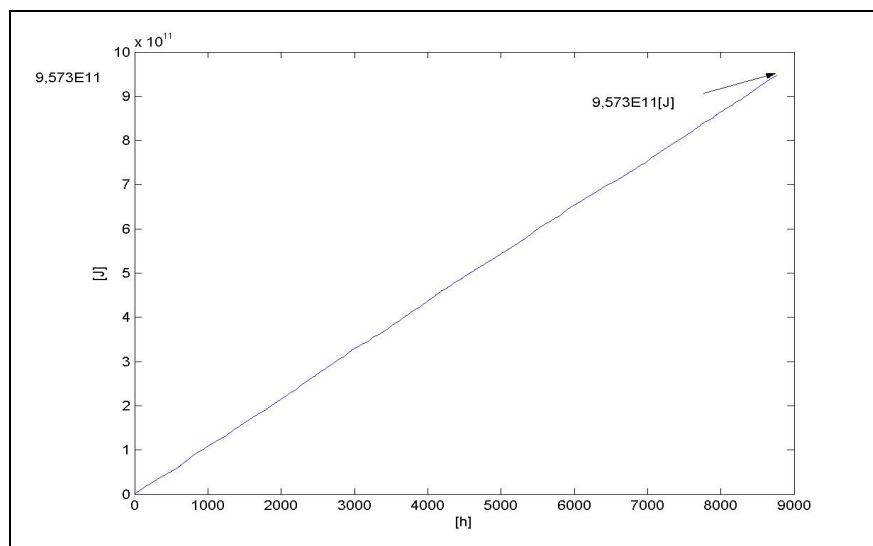


Figura 4 – Saída de dados do software deste trabalho, energia produzida de $9,573E11J$.

4-ESCOLHA DA LOCALIDADE

Uma localidade hipotética foi sugerida para obter os parâmetros de entrada para o software. Esta localidade deve apresentar algumas características para que o sistema possa ser implementado, a primeira é ter uma boa disponibilidade de ventos médios durante o ano, de maneira a garantir suprimento energético ao sistema, outra característica importante é a existência de desníveis suficientemente grandes para que haja bons aproveitamentos hidrelétricos. E contando que se deseja estudar um sistema desconectado da rede de distribuição de energia a localidade deve ser afastada da rede elétrica.

Desta forma podemos encontrar alguns locais de interesse no estado, sendo a localidade escolhida a que fica entre os municípios de Presidente Médice e Herval, no sul do estado, próximo à fronteira com o Uruguai.

5-RESULTADOS

Foram estudados alguns casos cruzando a possibilidade de utilizar vazões de entrada no reservatório superior ou não, dois grupos consumidores diferentes de 12 residências e 30 residências e três potências diferentes dos geradores eólicos sendo estes de 25kW, 65kW e 100kW.

O primeiro estudo considerou um gerador eólico de 25kW, uma demanda correspondente a 30 residências, uma vazão de entrada no reservatório superior que varia ao longo do ano entre 15l/s e 80l/s e um reservatório com capacidade para 2 dias de consumo, os resultados desta simulação estão mostrados na figura 10.

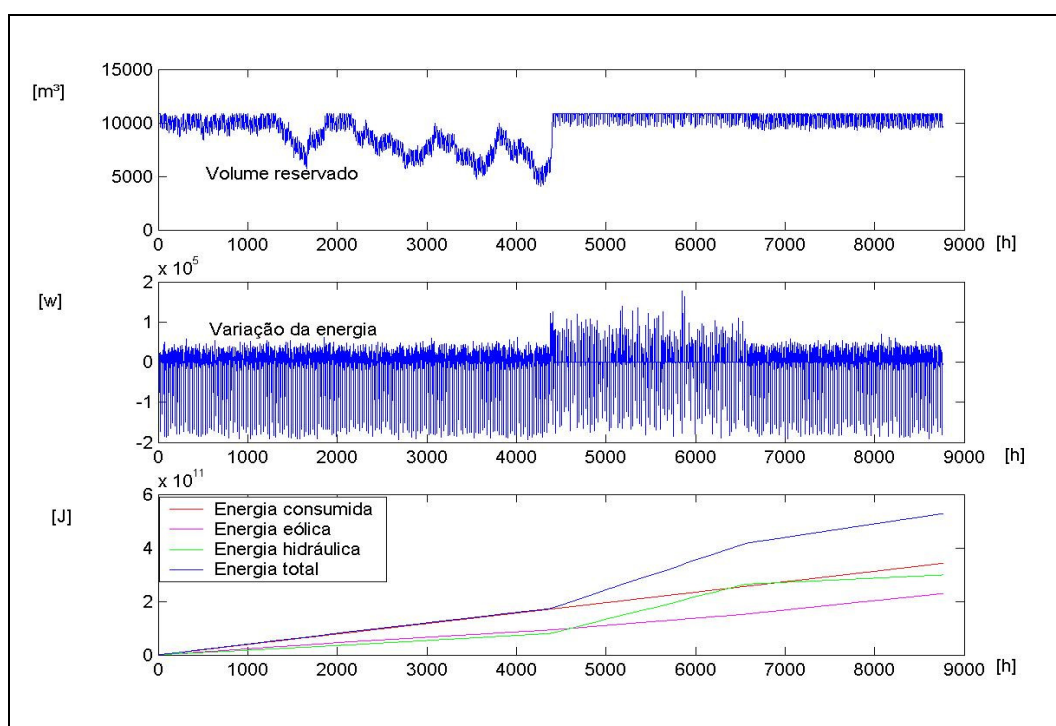


Figura 10. Saída de dados do **caso 1**: 1-volume do reservatório, 2-variação instantânea da energia do sistema, 3- Energias disponibilizadas e consumidas.

Podemos notar que a energia total que pode ser disponibilizada se afasta da energia total da energia consumida como mostra o terceiro gráfico da figura 10, isso mostra o início do ponto onde a energia torna-se excedente, este ponto coincide com a entrada do inverno, onde a disponibilidade tanto hídrica como eólica aumentam. Este aumento na disponibilidade também pode ser observado na variação positiva da energia instantânea entre as horas 4500 e 6500.

O Segundo estudo considerou um gerador eólico de 25kW, uma demanda correspondente a 12 residências, uma vazão de entrada no reservatório superior que varia ao longo do ano entre 8l/s e 18l/s e um reservatório com capacidade para 2 dias de consumo, os resultados desta simulação estão mostrados na figura 11.

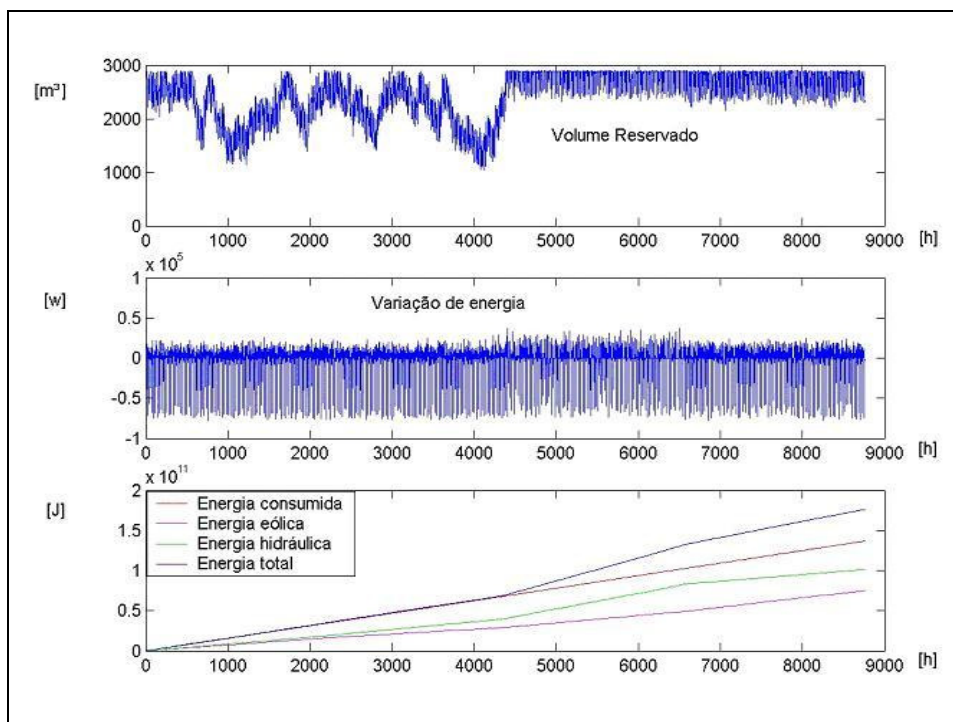


Figura 11. Saída de dados do **caso 2**: 1-volume do reservatório, 2-variação instantânea da energia do sistema, 3- Energias disponibilizadas e consumidas.

Da mesma forma que no primeiro caso podemos notar que há um afastamento da energia total da energia consumida como mostra terceiro gráfico da figura 11, isso mostra o início do ponto onde a energia torna-se excedente, este ponto coincide com a entrada do inverno, onde a disponibilidade tanto hídrica como eólica aumentam. O que pode ser observado na variação positiva da energia instantânea entre as horas 4500 e 6500. Pode-se notar também que o início do excedente é por volta da hora 4500, neste ponto também se torna visível a saturação do reservatório.

O terceiro estudo considerou um gerador eólico de 50kW, uma demanda correspondente a 12 residências, sem vazão de entrada no reservatório superior e um reservatório com capacidade para 2 dias de consumo, os resultados desta simulação estão mostrados na figura 12.

Nesta configuração não há vazão de entrada no reservatório superior, assim toda a energia que supre o sistema é de origem eólica. No primeiro gráfico da figura 12 podemos notar o rápido esvaziamento do reservatório, isto pode ser atribuído ao sub-dimensionamento do sistema, que em períodos de ventos com baixa velocidade média não consegue manter o reservatório em níveis seguros.

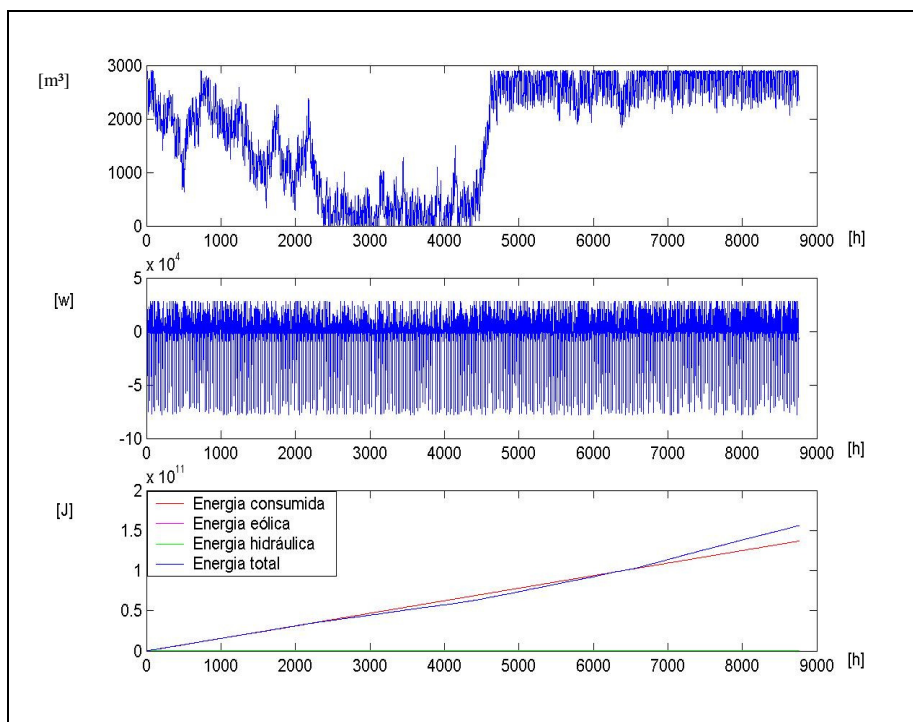


Figura 12. Saída de dados do **caso 3**: 1-volume do reservatório, 2-variação instantânea da energia do sistema, 3- Energias disponibilizadas e consumidas.

O quarto estudo considerou um gerador eólico de 50kW, uma demanda correspondente a 12 residências, sem vazão de entrada no reservatório superior e um reservatório com capacidade para 11 dias de consumo, os resultados podem ser vistos nos gráficos da figura 13.

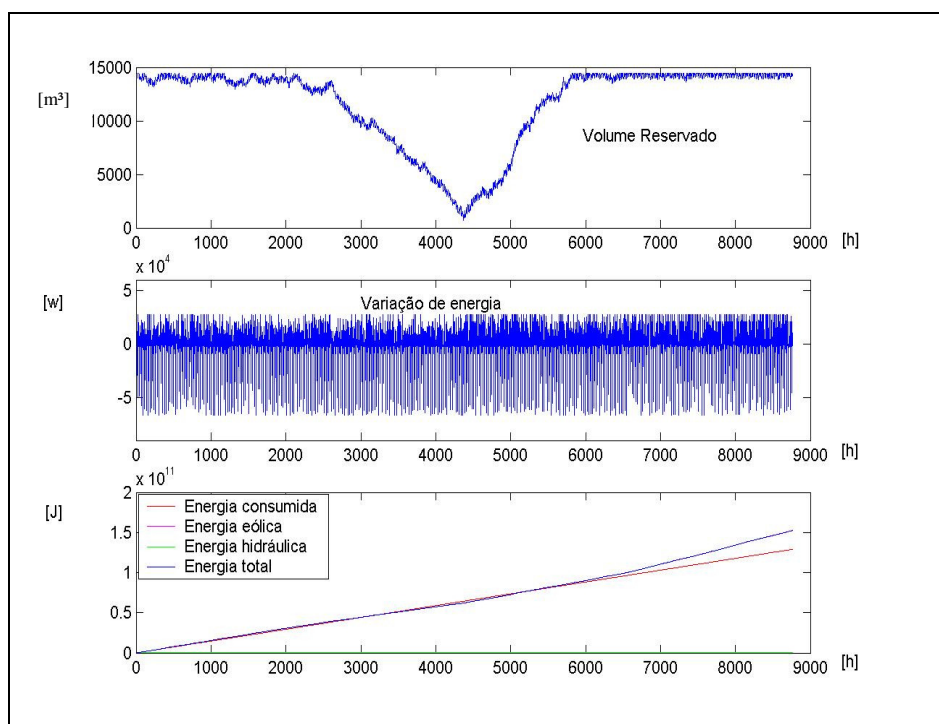


Figura 13. Saída de dados do **caso 5**: 1-volume do reservatório, 2-variação instantânea da energia do sistema, 3- Energias disponibilizadas e consumidas.

Esta configuração difere-se da do caso 3 apenas no tamanho do reservatório, este foi aumentado até que o nível não caísse até zero, desta forma pode-se observar o tamanho da reserva necessária para manter o sistema estável ao longo do ano. A figura 13 mostra que o nível mínimo é atingido quando as disponibilidades também são mínimas.

O quinto caso considerou um gerador eólico de 100kW, uma demanda correspondente a 30 residências, sem vazão de entrada no reservatório superior e um reservatório com capacidade para 13 dias de consumo, os resultados desta configuração podem ser vistos nos gráficos da figura 14.

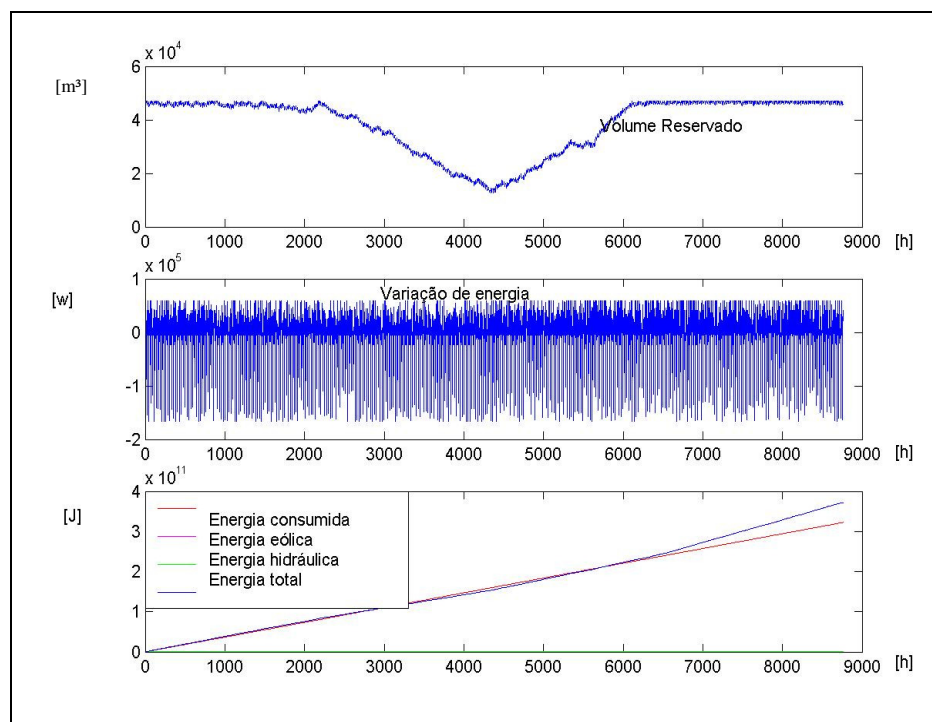


Figura 14. Saída de dados do **caso 6**: 1-volume do reservatório, 2-variação instantânea da energia do sistema, 3- Energias disponibilizadas e consumidas.

Para a configuração estudada no caso 6 foi utilizada a mesma lógica do caso 5, ou seja, foi aumentado o reservatório até que o nível não caísse até zero, desta forma pode-se observar o tamanho da reserva necessária para manter o sistema estável ao longo do ano. A figura 14 mostra que o nível mínimo é atingido quando as disponibilidades também são mínimas.

6. ANÁLISE ECONOMICA

Para o calculo do sistema utilizando reservatório por bateria, utilizou-se os mesmos parâmetros de tempo de reserva dos sistemas com acumulação por energia potencial da água, ou seja, os mesmos geradores trocando apenas o tipo de reservatório. Assim podemos comparar as diferenças de custo dos dois tipos de sistemas tendo como principal enfoque a diferença nos custos das baterias e dos reservatórios por acumulação de água e a diferença nas quantidades de energia produzida pelos diferentes sistemas.

Os custos foram estimados de forma bem simplificada, sendo estes avaliados como custo por kW instalado, no que diz respeito à parte do sistema de geração eólica, DEWI (2005) e no que diz respeito à parte do sistema de geração hidroelétrica foi adotado um modelo encontrado em Balarim (1998). As figuras de 15 a 22 mostram os gráficos das análises econômicas das configurações estudadas anteriormente, e além disso também são mostradas as análises comparativas aos sistemas utilizando reservatório por baterias. Assim os

gráficos de custo são dispostos de maneira a mostrar em seqüência sistemas com mesma dimensão mas com reservatórios por acumulação de água e em seguida por reservatório por baterias. Os gráficos mostram a remuneração dos custos e da energia gerada, dos custos de instalação, dos custos de manutenção e da soma dos custos com manutenção e instalação ao longo de 30 anos sendo esta a vida útil do sistema. A análise contempla os custos de troca de baterias a cada 3 anos.

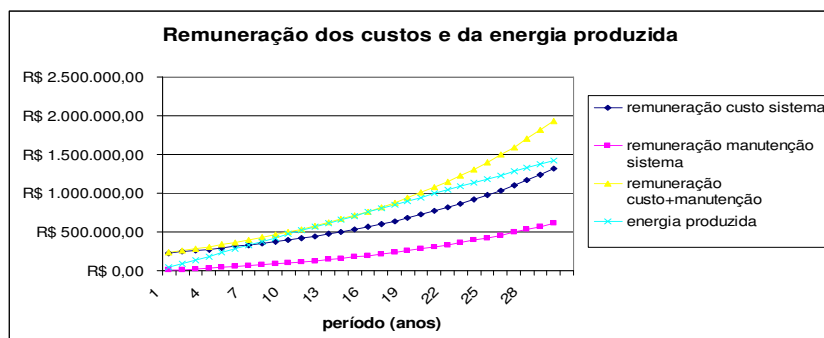


Figura 15. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 1.

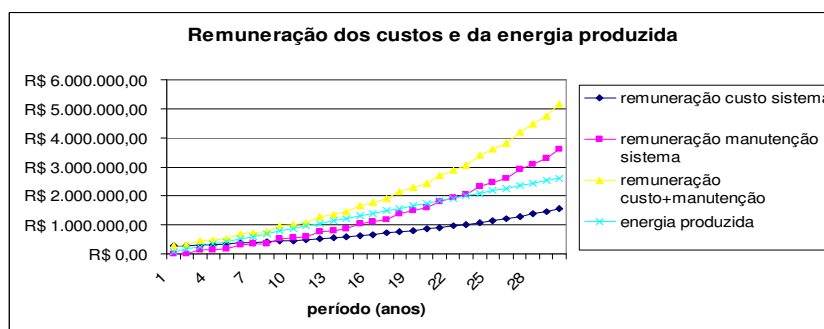


Figura 16. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 1 com baterias.

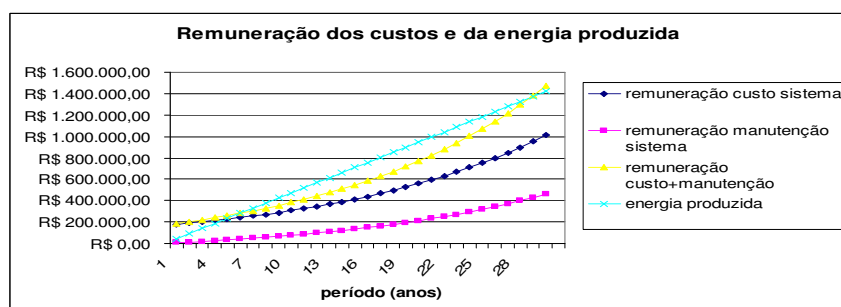


Figura 17. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 2.

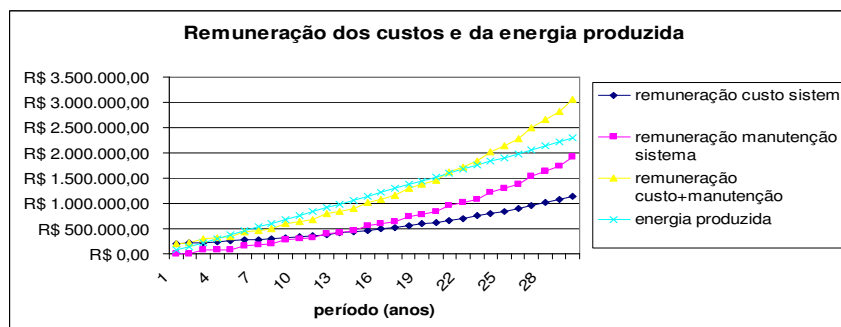


Figura 18. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 2 com baterias.

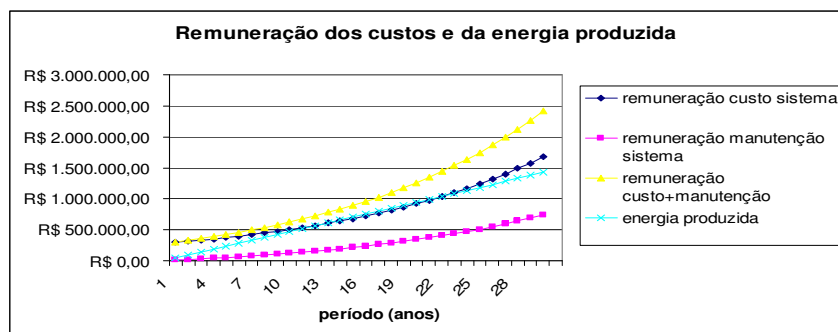


Figura 19. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 4.

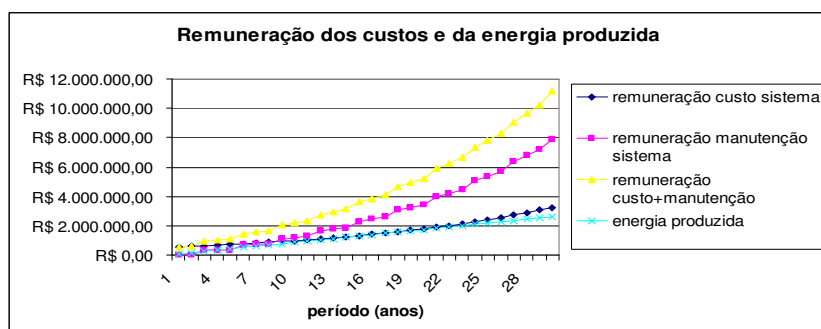


Figura 20. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 4 com baterias.

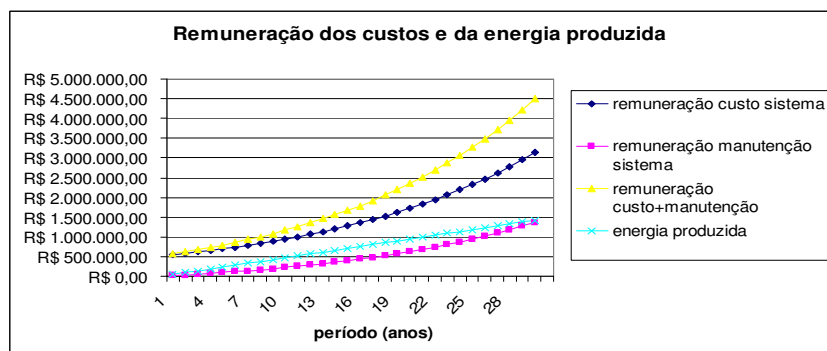


Figura 21. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 5.

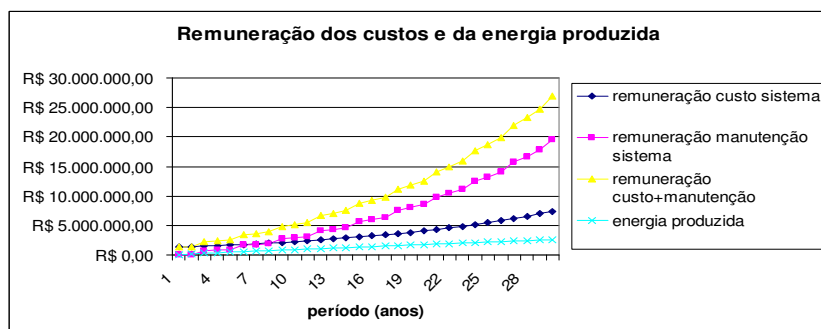


Figura 22. Remuneração dos custos e energia produzida do caso 5 com baterias.

7. CONCLUSÕES

De um modo geral podemos observar que todas as simulações mostraram um custo maior quando operando com sistema de reservatório por baterias, apenas no caso dois o sistema funcionando com baterias consegue recuperar os custos com manutenção, mas mesmo assim não conseguiu superar os custos acumulados de manutenção e instalação. Já quando é utilizado o sistema de acumulação por reservatório de água os dois primeiros casos conseguem alcançar os custos com manutenção e instalação, sendo que o primeiro em uma janela de tempo que inicia no ano 10 e termina no ano 20. Estes aproveitamentos mostram-se viáveis pelo incremento de uma pequena vazão ao reservatório superior. Outra característica que pode ser observada, é que o sistema torna-se viável quando os custos com a instalação hidráulica tornam-se mais baixos, o que acontece no segundo caso estudado.

Os sistemas estudados sem afluentes no reservatório superior mostraram-se mais eficientes economicamente quando tem menores dimensões, visto que o custo de instalação é menor e o tamanho necessário para barragem também.

Para melhorar os resultados encontrados será necessária um modelamento mais detalhado do sistema levando-se em consideração modelos mais acurados de bombas e turbinas, assim como os modelos de baterias e inversores, para termos melhores parâmetros de comparação entre os sistemas de acumulação de energia. Além disso, também é necessário melhorar a análise econômica, implementando modelos e fontes de custos mais acurados.

A sugestão para a continuidade do trabalho é a utilização do software criado para o estudo do comportamento de sistemas de forma a abranger uma gama maior de combinações de disponibilidades energéticas e padrões de consumo, podendo assim caracterizar com mais segurança os sistemas implementados.

Neste trabalho foi criado um software para a análise de sistemas híbridos eólicos e hidroelétricos que possibilita avaliar o comportamento de reservatórios de acumulação de água, além das características da produção de energia, podendo-se avaliar separadamente as produções das diferentes fontes de energia. Além disso foi possível caracterizar alguns sistemas quanto a viabilidade econômica e energética.

8. REFERÊNCIAS

- ANEEL, **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília: Eletrobás, 2000.
- BALARIM C. R.; **Uma Contribuição ao Estudo de Custo de Micro Centrais Hidrelétricas Brasileiras**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG (1998).
- BELUCO, A., **Bases para uma metodologia de dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica**. Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 202p.
- BELUCO, A., **Viabilidade de Microcentrais Hidrelétricas baseadas no Emprego de Equipamentos de Mercado**, dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994. 170p.
- Ben M. Enis **Operation of hybrid wind-turbine compressed-air system for connectin to electric grid networks and cogeneration**. Wind Engineering. 2003.
- CTEnerg- **Estado da arte e tendências das tecnologias para energia**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Ciência, Tecnologia e Inovação*. Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia. 2003
- DEWI – Intituto Alemão de Enrgia Eólica (tradução ELETROBRÁS). **Energia Eólica**. Wilhemshaven, Germany, 1998.
- DEWI– Intituto Alemão de Enrgia Eólica. **Energia eólica: técnicas básicas, planejamento, financiamento e verificação**. 2005
- ELETROBRÁS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE AGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de microcentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro: [sn],1985. 584p.
- Garcia, F, **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. 185p.
- FEPAGRO, (Fuhndação Estadual de Pesquisas Agropecuárias), Seção de Ecologia Agrícola, 1989. **Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre. 3v.
- Henessey JR, J.P. **Some Aspects of Wind Power Statistics**. *J. Appl. Meteorology*. P. 119- J 128.1977.
- J. J. Ding- **Design considerations for a sustainable hybrid energy system**. *Australasian EnvironmentaEngineering Conference*, 2000.
- Matlab , **Manuais do Software Matlab e Simulink da versão 6.5 r13**. 2002

Mcintyre, A.J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 654p.

NREL. National Renewable Energy Laboratory, **Wind power Today and tomorrow**
DOE National laboratory DOE/GO-102004-1894 March 2004.

SEMC, Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Estado do Rio Grande do Sul. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 2002.

Vianna, Reis Vieira, Nascimento. **Manual de Aplicação de Sistemas Descentralizados de Geração de Energia Elétrica para projetos de Eletrificação Rural – Energia Eólica – versão 1-Relatório Técnico Adg-A / Per – 785/00**. FPLF, CEPEL-11/2000;