

FELIPE CAMARATTA SILVEIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-DIESEL E DE EXTENSÃO DE REDE ELÉTRICA EM REGIÕES REMOTAS PRODUTORAS DE ARROZ POR SISTEMA DE INUNDAÇÃO

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.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Adriane Prisco Petry

Porto Alegre
2010



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

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-DIESEL E DE EXTENSÃO DE REDE ELÉTRICA EM REGIÕES REMOTAS PRODUTORAS DE ARROZ POR SISTEMA DE INUNDAÇÃO

FELIPE CAMARATTA SILVEIRA

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

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. BARDO ERNST JOSEF BODMANN
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. PEDRO BARBOSA MELLO
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. SERGIO LUIZ FREY
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

Dedico esse trabalho em especial aos meus pais Afonso e Ieda,
à minha vó Elma e à minha tia Leda.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos vão primeiramente àqueles que, seja através do exemplo, seja através da paciência e do amor, trabalharam para a minha educação, me dando a oportunidade de chegar aonde cheguei: Meus pais, minha vó, meus tios, dindos e familiares.

Ao longo desta caminhada, que considero iniciada a partir do momento que ingressei no colégio, muitas pessoas deixaram a sua contribuição e ajudaram à sua maneira a dar rumo à marcha. Colegas de Judô, colegas do colégio, amigos de Banda, de clube, da UFRGS e da École Centrale de Lyon. Agradeço fortemente a todos por estarem ou terem estado ao meu lado.

Não poderia deixar de mencionar, no entanto, aqueles que participaram ativamente do período universitário e que talvez sem eles não tivesse chegado até o fim. Amigos que por muitas vezes estudaram, fizeram trabalhos, almoçaram ou ficaram perdendo tempo no bar comigo, tanto no período anterior quanto no período posterior à minha ida para a França: Antonio, Pedro, Paulo, Nino, Gallo, Ronan, Rafael e Pedro Amaral.

Pessoas que merecem um obrigado especial são aqueles que demonstraram a amizade em momentos de necessidade. A mensagem vai para Thomas e Gustavo.

Mas como a vida não é feita somente de trabalho, preciso agradecer aos amigos que tornaram meus anos de universidade mais felizes, me atrapalhando, talvez, nos estudos, mas por bons motivos: Matheus (homenagem especial), Tuca, Pedro, Gnomu, Yuri, Tetinha, Felipe Pereira e certamente outros que agora estou esquecendo por estar escrevendo de última hora esta mensagem, mas que não são menos importantes.

Para concluir, gostaria de agradecer às pessoas que conviveram diretamente comigo durante a execução deste trabalho: Primeiramente à minha orientadora Prof. Dra. Adriane Petry, pela paciência, dicas e colaboração junto a este trabalho, ao meu amigo Rafael Rabello, pela força e suporte prestados à distância e à minha namorada Bruna pela compreensão e simplesmente por existir.

Uma caminhada de mil quilômetros
começa com um primeiro passo.

Provérbio Chinês

CAMARATTA SILVEIRA, F. **Estudo Comparativo entre a Viabilidade de Implantação de Sistema Híbrido Eólico-Diesel e de Extensão de Rede Elétrica em Regiões Remotas Produtoras de Arroz por Sistema de Inundação**. 2010. 22f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

O presente estudo compara a viabilidade de implantação de um sistema híbrido eólico-diesel nos arredores de Santa Vitória do Palmar, para uma família de pequenos produtores de arroz, com a viabilidade de extensão de rede elétrica até o local. A demanda e consumo energético da família estão estimados em 42696W e 54404kWh/ano. Compara-se, através do Software de otimização HOMER, o melhor arranjo entre baterias de 12V, conjunto retificador-inversor e três aerogeradores (eW15, da Entegrity, FL30, da Fuhrländer e a YZ-006, da SWG, com potências nominais de 50kW, 30kW e 10kW respectivamente), junto com um gerador Diesel de 36kW, para a aplicação. Conclui-se que a melhor arranjo para o Sistema Híbrido é constituído por 2 pequenos aerogeradores YZ-006 com potência nominal de 10kW, 32 baterias de 12V, agrupadas séries de 4 baterias, um retificador de 16kW e um inversor de 16kW, além do gerador Diesel de 36kW, estando o investimento inicial estimado em R\$92.824,00 e o tempo de retorno deste investimento previsto para 2,53 anos. O quilômetro de extensão da rede elétrica é estimado em R\$12.972,30. Com isso, verifica-se que tanto a extensão da rede elétrica em distâncias de até 19km quanto a instalação de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel são viáveis quando comparadas a um sistema autônomo a Diesel. O sistema híbrido apresentou-se uma melhor alternativa de investimento do que a extensão da rede elétrica, considerando um período de 20 anos.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Híbrido Eólico-Diesel, Energias Renováveis, Extensão de Rede Elétrica, Regiões Remotas, Produção de Arroz, HOMER, Estudo de Viabilidade.

CAMARATTA SILVEIRA, F. **Estudo Comparativo entre a Viabilidade de Implantação de Sistema Híbrido Eólico-Diesel e de Extensão de Rede Elétrica em Regiões Remotas Produtoras de Arroz por Sistema de Inundação**. 2010. 22f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

This study compares the viability of deploying a hybrid wind-diesel system in the vicinity of Santa Vitória do Palmar, for a family of rice farmers, with the viability of extending a grid to the site. The demand and energy consumption are estimated at the family and 54404kWh/year 42696W. The best arrangement between a 12V battery, a rectifier, an inverter and three wind turbines (eW15 of entegrity, FL30, Fuhrländer and YZ-006, the SWG, with power ratings from 50kW, 30kW and 10kW respectively), along with a Diesel generator of 36kW for the application is compared, through the optimization of software HOMER. It is concluded that the best arrangement for the hybrid system consists of two small wind YZ-006 rated at 10kW, 32 12V batteries, grouped in sets of 4 batteries, a rectifier of 16kW, an inverter of 16kW and Diesel generator of 36kW, while the initial investment estimated at R\$ 92,824.00 and time to return of investment for 2.53 years. The kilometer extension of the power grid is estimated at R\$ 12,972.30. Thus, it appears that both the extent of the power grid at distances up to 19km as the installation of a hybrid system Wind-Diesel are viable when compared to an autonomous system with Diesel generator. The hybrid system presented a better investment option than extending the electric-electric network considering a period of 20 years

KEYWORDS: Wind-Diesel Hybrid System, Renewable Energy, Grid Extension, Remote Regions, Rice Production, HOMER, Feasibility Study.

SUMÁRIO

ABSTRACT.....	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1. Energia Eólica	1
2.2. Sistemas Híbridos	2
2.3. Sistema Híbrido Eólico-Diesel	2
2.4. Viabilidade em Sistemas Híbridos Eólico-Diesel	2
3. METODOLOGIA	2
3.1. Demanda e Consumo energético	3
3.2. Potencial Eólico.....	3
Potência do Vento.....	3
Velocidade do Vento – Lei Logarítmica	3
Distribuição de Frequência do Vento	4
3.3. Extensão da Rede Elétrica	4
3.4. Seleção dos Equipamentos para o Sistema Híbrido	5
3.4.1. Aerogeradores.....	5
Coeficiente de Potência	5
Curva de Potência.....	5
Energia Gerada	5
Fator de Capacidade	6
3.4.2. Gerador a Diesel	6
3.4.3. Banco de Baterias	6
3.4.4. Retificador e Inversor	6
3.5. Otimização do Sistema Híbrido.....	7
Programa HOMER	7
3.6. Determinação da Viabilidade	7
3.6.1. Valor Presente Líquido (VPL).....	7
3.6.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)	8
3.6.3. Tempo de Retorno Simples (Payback)	8
4. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO	8
4.1. Cálculo da demanda e Estimativa do Consumo Energético.....	8

4.2. Potencial Eólico da Região.....	9
5. PROJETO E ANÁLISE DE CUSTO PARA EXTENSÃO DA REDE ELÉTRICA..	10
6. PROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO	11
6.1. Seleção dos equipamentos para o sistema híbrido.....	11
6.1.1. Aerogeradores.....	11
6.1.2. Geradores à Diesel.....	12
6.1.3. Banco de Baterias, Retificador e Inversor.....	12
6.2. Otimização do sistema híbrido com uso do software homer	13
7. COMPARATIVO DA VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE A EXTENSÃO DA REDE ELÉTRICA E A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO	14
8. CONCLUSÕES.....	15
9. REFERÊNCIAS.....	16
10. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	18
APÊNDICES	18
Apêndice 1: Cálculo da demanda energética	18
Apêndice 2: Perfil de consumo da família	18
ANEXOS	20
ANEXO 1: Cálculo da demanda de energia elétrica (CEMIG ND-5.1)	20
ANEXO 2: Velocidade média anual e fator de forma k da distribuição de weibull	21
ANEXO 3: Curvas de potência dos aerogeradores	22

1. INTRODUÇÃO

Apesar da boa fase de estabilidade e de crescimento vivida pelo Brasil no cenário econômico atual, constata-se que uma considerável parcela da população ainda não é atendida pela rede de distribuição de energia elétrica. Constituem essa parcela, principalmente, os habitantes de zonas rurais remotas de baixo poder econômico. Nessas regiões, o suprimento energético está frequentemente baseado na geração de energia através de geradores à diesel, combustível que torna-se caro devido à necessidade de transporte até a localidade.

Sabe-se que o desenvolvimento do setor agrícola está diretamente ligado à disponibilidade de energia, desta forma, existem programas de eletrificação rural propostos pelo governo federal, entre eles o Luz para Todos, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, cujo objetivo é trazer energia elétrica para todas as comunidades do Brasil, sem contrapartida das famílias beneficiadas.

Como a extensão da rede elétrica até regiões remotas nem sempre é viável, deve-se manter o caráter descentralizado da geração de energia nestas localidades. Desta forma, uma alternativa que pode ser viável para esse tipo de região é a geração de energia através de sistemas híbridos, em função das características climáticas do local.

Além dos programas de eletrificação oferecidos pelo governo, existem cooperativas de agricultores, como por exemplo a COPREL (Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural), que tem por objetivo a distribuição de energia no meio rural.

O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, possuindo uma participação nacional que vem aumentando ano-a-ano e que correspondeu a 60% da safra nacional em 2008/09 (EMBRAPA), sendo a produção toda de arroz irrigado. Os principais municípios produtores de arroz são Uruguaiana e Santa Vitória do Palmar (SEPLAG – RS). Em 2004, o custo da irrigação da lavoura de arroz no Rio Grande do Sul correspondeu a 9,80% do custo total (IRGA – Dados Safra 2003/2004). Estima-se que em 1997 um desperdício superior a 50% do consumo energético tenha ocorrido na irrigação das lavouras de arroz devido ao mal dimensionamento dos sistemas e à utilização de bombas à diesel (MARCOLIN; ROBAINA, 2002).

O presente trabalho tem por objetivo examinar um caso fictício de uma família produtora de arroz, assentada nos arredores de Santa Vitória do Palmar, privada de energia elétrica. O estudo feito visa comparar a viabilidade de extensão da rede elétrica até o local com a viabilidade de implantação de um sistema híbrido eólico-diesel de geração de energia.

Para otimização do sistema híbrido foi utilizado o programa *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENERGIA EÓLICA

A Energia Eólica é a energia contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água (ANEEL).

Os ventos são gerados pela incidência desigual da radiação solar na superfície terrestre ocasionando uma diferença de temperatura entre as regiões equatorial e polar e conseqüentemente o movimento do ar (CUSTÓDIO, 2002) e também é causado pelo movimento de rotação da terra. (ATLAS EÓLICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2002) (BORGES, 2009).

2.2. SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas híbridos são sistemas compostos por duas ou mais fontes de geração de energia trabalhando em conjunto, de forma complementar. Este tipo de sistema está geralmente desconectado da rede de distribuição elétrica. Diferentes fontes de geração de energia podem ser citadas para esses sistemas, entre outros as turbinas eólicas, os geradores diesel e os módulos fotovoltaicos.

A utilização de várias fontes de geração de energia elétrica em um mesmo sistema implica no aumento da complexidade do mesmo, exigindo assim uma otimização do uso de cada uma das fontes. Dessa forma, se faz necessário um controle de todas as fontes a fim de se obter a máxima eficiência possível do sistema.

Na Figura 1, um exemplo de configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.



Figura 1 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel (Fonte: CRESESB)

2.3. SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-DIESEL

Um sistema híbrido eólico-diesel é um sistema de geração de energia composto de um gerador diesel e de um ou mais aerogeradores. Este sistema pode contar ainda uma unidade suplementar de armazenamento de energia. O sistema a diesel garante a estabilidade e a regularidade de fornecimento de energia do sistema, dispensando, dessa forma, o uso de baterias para o armazenamento da energia gerada, já o sistema eólico representa um fator de economia de combustível e de redução na emissão de gases poluentes. O uso de banco de baterias no sistema híbrido eólico-diesel, apesar de ser opcional, é muito comum para armazenar o excedente de energia quando a oferta da parte renovável supera a demanda, o que reduz ainda mais a parcela de geração a diesel.

2.4. VIABILIDADE EM SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO-DIESEL

Para a determinação da viabilidade de sistemas híbridos, calcula-se o custo de capital do sistema, a receita e os gastos do mesmo, além dos parâmetros de avaliação de projetos: Custo de geração de energia, valor presente líquido para os custos do sistema, período de retorno simples e taxa interna de retorno do investimento (CON08-1393, 2008).

3. METODOLOGIA

Para que a comparação entre a viabilidade de implantação do sistema híbrido e da extensão da rede elétrica seja feita, é necessário caracterizar-se a demanda e o consumo da família atendida, projetar-se cada um dos sistemas e, por fim, compará-los.

3.1. DEMANDA E CONSUMO ENERGÉTICO

Para dimensionar-se um sistema elétrico, seja ele híbrido ou não, é necessário o conhecimento da demanda energética do local.

Para o cálculo da demanda energética, deve-se inicialmente calcular a carga instalada da população beneficiada pelo sistema. A carga instalada é definida como a soma das potências nominais dos equipamentos elétricos instalados na unidade consumidora, em condição de funcionamento, expressa em kW (AES Sul). Conhecida a carga instalada, utiliza-se o fator de demanda, diferente para cada classe de equipamentos e definido como a razão entre a demanda máxima num intervalo de tempo especificado e a carga instalada (AES Sul), para estimar-se a demanda energética máxima. O ANEXO 1 demonstra a fórmula de cálculo utilizada pela CEMIG para determinar a demanda de energia elétrica.

Outra informação importante para o dimensionamento de um sistema híbrido é o consumo energético por faixa de horário do dia, no entanto essa informação não é muito exata. Dados sobre consumo energético podem ser medidos no local ou estimados, levando-se em conta, se necessário, as variações sazonais, entre outros.

3.2. POTENCIAL EÓLICO

O potencial eólico dita a disponibilidade energética do local onde se pretende instalar o sistema híbrido e é importante para o dimensionamento do aerogerador e para o estudo da viabilidade de implantação do mesmo.

Para a análise do potencial eólico, dados sobre a velocidade dos ventos na região se fazem necessários. Esses dados são coletados com anemômetros e tratados estatisticamente, de forma a se gerar uma curva de distribuição de frequência do vento ao longo do período, o que possibilita os cálculos de potencial eólico.

Potência do Vento

A potência disponível do vento pode ser definida em função de uma área A e da velocidade v do vento (PETRY, 2007):

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.1)$$

onde:

- P – potência do vento;
- ρ – massa específica do ar;
- A – área da seção transversal do rotor da turbina eólica;
- v – velocidade do vento.

Velocidade do Vento – Lei Logarítmica

A velocidade do vento é perturbada devido à rugosidade do terreno e varia com a altura como consequência da viscosidade do ar, dando origem assim à uma Camada Limite Atmosférica C.L.A. Essa camada limite possui espessura variável, chegando a 1000m de altura (CUSTÓDIO, 2002) em média, dependendo do terreno e das condições atmosféricas. Nas

proximidades da superfície, dentro da C.L.A., o escoamento tem maior intensidade de turbulência.

Como o vento é medido com anemômetros posicionados em alturas fixas, correções devem ser feitas para se determinar a velocidade do vento na altura desejada. Estas correções podem ser feitas através da Lei Logarítmica (bom ajuste na camada próxima ao solo) (PETRY, 2007).

A Lei Logarítmica descreve a velocidade $u(z)$ de acordo com a função abaixo:

$$v(z) = \frac{U_*}{k} \cdot \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] \quad (3.2)$$

onde,

$v(z)$ – Velocidade na altura z ;
 z – Altura desejada;
 z_0 – Comprimento desejado;
 k – Constante de Von Kármán, aproximadamente igual à 0,4;
 U_* – Velocidade de Fricção.

Distribuição de Frequência do Vento

A função que melhor representa essa distribuição de frequências do vento é a função de Weibull (SEMC), explicitada pela expressão abaixo.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (3.3)$$

onde,

v – Velocidade do vento;
 c – Fator de Escala;
 k – Fator de Forma.

O Fator de Escala representa a escala da distribuição e está relacionado com a velocidade média através da seguinte expressão:

$$V_{med} \cong (0,90 \pm 0,01) \cdot c \quad (3.4)$$

Já o Fator de Forma é relacionado ao desvio padrão da distribuição, tendo como casos especiais, para $k=1$ a distribuição exponencial, para $k=2$ a distribuição de Rayleigh.

Na falta de dados para k , utiliza-se Rayleigh, que representa de forma satisfatória a distribuição do vento (BORGES, 2009).

3.3. EXTENSÃO DA REDE ELÉTRICA

O conhecimento da demanda energética do local é essencial para o dimensionamento da rede de distribuição de energia. Este valor é calculado pela concessionária de energia a partir do valor da Carga de Instalação, que é fornecido no momento em que se efetua um pedido de ligação de rede através do preenchimento de uma lista contendo todos os equipamentos que podem ser utilizados na unidade fornecedora (Site CEEE).

De posse da demanda energética, a concessionária determina a tensão da linha que será ligada, sendo a mesma monofásica para instalações rurais.

3.4. SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA O SISTEMA HÍBRIDO

A correta caracterização do clima de uma região é importante para o projeto do sistema eólico e análise de sua viabilidade, pois em função do regime dos ventos é possível determinar-se os locais mais apropriados para implantação dos aerogeradores e outros parâmetros importantes como sua altura e direção, seu tipo em função da potência que deseja-se obter, entre outros.

3.4.1. Aerogeradores

Para a escolha de um aerogerador, diversos parâmetros são levados em conta, entre eles a tecnologia empregada, o modelo e os tamanhos disponíveis, a infraestrutura para transporte e montagem, o fator de capacidade no local e os custos de instalação e operação (BORGES, 2009).

Coefficiente de Potência

No processo de conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação pelos aerogeradores não é possível extrair a totalidade da energia do vento, o percentual máximo possível, segundo Betz, é de 59,3%. Dessa forma, o Coeficiente de Potência (razão entre potencia extraída e potencia disponível no vento) indica com que eficiência o aerogerador converte a energia do vento em energia elétrica (Fonte: Portal Energia) e pode ser definido pela Equação 5:

$$C_p = \frac{P_{extraída}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (3.5)$$

onde:

- C_p – coeficiente de potência;
- ρ – massa específica do ar;
- v – velocidade do vento a qual incide na turbina eólica;
- $P_{extraída}$ – quantidade de energia passível de ser obtida;

Curva de Potência

Cada aerogerador possui uma curva de potência própria. A curva de potência representa graficamente a potência elétrica disponível no aerogerador em função da velocidade do vento.

Energia Gerada

Conhecendo-se a curva de potência da turbina e a distribuição de Weibull do local, é possível estimar-se a energia que será gerada pela turbina. Esta energia é definida como:

$$E_{gerada} = \int P(v(t)) \cdot dt \quad (3.6)$$

onde,

$P(v(t))$ – Potência em função da velocidade do vento

Fator de Capacidade

O fator de capacidade é a relação entre a energia estimada de geração da turbina e a sua capacidade de produção. É um ótimo parâmetro de comparação entre turbinas, pois indica se a capacidade da mesma será bem aproveitada em função do perfil de ventos do local:

$$F.C. = \frac{E_{gerada}}{E_{nominal}} \quad (3.7)$$

onde,

E_{gerada} – Energia gerada pela turbina

$E_{nominal}$ – Energia nominal da turbina – potencia nominal durante todo o período de tempo de integração

3.4.2. Gerador a Diesel

O Gerador à Diesel deve ser dimensionado para suprir toda a demanda energética, prevendo-se que o aerogerador pode não funcionar, no caso de falta de ventos, e que o banco de baterias pode estar descarregado (FERNANDES, 2005).

3.4.3. Banco de Baterias

Para que não haja desperdício de energia, o excedente da energia gerada pelo sistema eólico pode ser convertido e armazenado em um banco de baterias.

A configuração de um banco de baterias é variável, podendo ocorrer associações em série e em paralelo, a fim de se obter a tensão e a corrente desejada. Os fatores que devem ser considerados incluem o tempo de vida, métodos de monitoração do estado de carga, eficiência de entrada-saída, carga de equalização e máxima taxa de carga (FERNANDES, 2005).

As baterias mais utilizadas em sistemas híbridos são baterias de chumbo-ácido (MACHADO, 1999) (FERNANDES, 2005), que embora complexas são bem dominadas. A sua maior limitação é a operacional, pois seu uso deve ser bem controlado, evitando-se sobrecargas, subcargas e longos períodos em baixos estados de carga.

Os custos das baterias são pequenos em comparação com o custo inicial do sistema híbrido, no entanto podem se tornar significados a médio prazo e elevados a longo prazo no caso de má operação. Se as condições de operação forem favoráveis, o funcionamento das baterias pode se estender por até 15 anos (SEELING-HOCHMUTH, 1998).

A Capacidade de Armazenamento de uma bateria é dada em Ah (Ampères-Hora).

Um sistema de controle e regulação é necessário para um bom aproveitamento das baterias, o que torna o sistema híbrido muito mais complexo.

3.4.4. Retificador e Inversor

O retificador transforma a corrente contínua CC em corrente alternada CA e é usado para carregar a bateria a partir de uma fonte CA. Já o inversor converte potência CC para CA e é usado para alimentar uma carga CA a partir de uma fonte CC.

Neste caso o retificador é utilizado para o armazenamento do excedente de energia proveniente dos aerogeradores nas baterias e o inversor para posterior utilização desta energia armazenada, quando a carga supera a energia que o aerogerador dispõe.

3.5. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO

Por ser composto por diferentes sistemas, dimensionar individualmente os equipamentos que compõem o sistema híbrido pode reduzir a performance do conjunto. Dessa forma, escolher a melhor configuração dos sistemas descentralizados torna-se importante e complexo.

Programa HOMER

O Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) é um modelo de otimização de sistemas híbridos de geração de energia, desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL), que compara diferentes configurações de sistemas descentralizados, na busca da solução mais viável. O programa permite também a comparação das alternativas propostas com a extensão de rede elétrica até a região, para o caso de uma localidade remota.

O Programa HOMER simula o sistema em operação, calculando o balanço energético a cada hora e comparando a demanda de energia e a capacidade do sistema fornecer a energia necessária. O programa prevê, para cada momento, qual seria o sistema de geração utilizado para o suprimento energético ou a porcentagem de atuação de cada sistema de geração (eólico, diesel, rede elétrica, baterias, etc).

O módulo possui também um sistema de cálculo de custos que engloba custos de investimento inicial, de reposição dos equipamentos em caso de falha, do combustível, se for o caso, e custos de operação e manutenção.

Após a simulação das possíveis configurações, o HOMER fornece uma lista de configurações classificadas de acordo com o custo total em valor presente e do custo específico de energia (\$/kWh) de cada conjunto (DE ALMEIDA, FREIRE, 2008).

3.6. DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE

Existem diversos métodos determinísticos de avaliação de investimentos, entre eles o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno e o Tempo de Retorno.

3.6.1. Valor Presente Líquido (VPL)

O método consiste em trazer a valor presente, descontado à Taxa Mínima de Atratividade, o fluxo de caixa incremental a ser gerado pela alternativa analisada, conforme demonstrado na Figura 2. Se o VPL for positivo, o projeto é viável. Quanto mais positivo, mais atrativo se torna a alternativa de investimento (DE SOARES). O VPL é definido pela equação 3.8:

$$VPL = \sum_{i=0}^n F_i(1 + TMA)^{-i} \quad (3.8)$$

onde,

F_i – Gasto ou Receita no período i

TMA – Taxa Mínima de Atratividade no período de referência

i – Período de referência

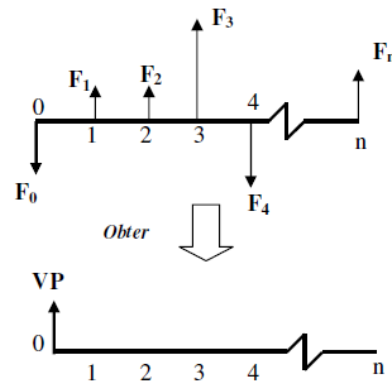


Figura 2: Valor Presente

3.6.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

Por definição, Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto para qual o VPL do fluxo de caixa da alternativa em questão é nulo. A TIR de um projeto pode ser entendida como a remuneração do capital investido (DE SOARES). A TIR é calculada pela equação abaixo:

$$VPL = \sum_{i=0}^n F_i(1 + TIR)^{-i} = 0 \quad (3.9)$$

onde,

F_i – Gasto no período i
 i – Período de referência

3.6.3. Tempo de Retorno Simples (Payback)

É o tempo necessário para que os benefícios gerados pelo projeto se igualem ao investimento realizado.

4. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

4.1. CÁLCULO DA DEMANDA E ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO

Neste trabalho, é considerada uma família de pequenos produtores de arroz, assentada nos arredores de Santa Vitória do Palmar. Como a família em consideração ainda não possui acesso direto à rede de distribuição elétrica, supõe-se que seu consumo irá mudar a partir do momento que tiver acesso à energia, por causa de sua ascensão econômica, conforme mostrado em estudo de campo realizado na região de Arroio Grande/RS (SOUZA, C. R. G.; DOS ANJOS, F. S., 2007).

Para o cálculo da carga instalada, considerou-se os seguintes itens para a família em questão: uma batedeira (200W), um chuveiro comum (5400W), um ferro de passar à vapor (1000W), um forno microondas (1200W), seis lâmpadas (80W) e quatro tomadas (80W), um liquidificador (350W), um microcomputador (250W), uma máquina de lavar roupa (500W), um refrigerador comum (200W), um freezer (300W), um secador de cabelos (1000W), um televisor (200W) e dois ventiladores (200W), totalizando uma carga de **11800W**.

Para o cálculo da demanda domiciliar, utilizou-se a Equação A1.1 (ANEXO 1), com o auxílio das Tabelas 1, 2, 3 e 4. Como resultado, obteve-se uma demanda de **11573,5VA**. Uma tabela com os cálculos é apresentada no APENDICE 1.

Considera-se pequena produção, aquela realizada por estabelecimentos de até 50ha de área. Para os cálculos de consumo de energia com a irrigação, foi considerada uma área média de produção de arroz irrigado de **50ha**. O valor energético gasto com a irrigação pode variar muito de acordo com as instalações utilizadas. Frequentemente as mesmas são mal dimensionadas, ocasionando grandes perdas de energia. Nota-se que o custo energético com o bombeamento de água para irrigação tem diminuído com o passar dos anos. Para as estimativas de gasto energético, o valor utilizado para bombeamento acionado por motor elétrico é de $0,91CV/ha=622,45W/ha$ (MARCOLIN, E.; ROBAINA, A. D. 2002). Desta forma, o gasto energético da família com a irrigação é de $(622,45W/ha*50ha=)$ **31.122,5W**.

Para cálculo da demanda energética total da família, o valor da demanda para a irrigação é considerado igual ao do gasto energético. Por fim, a demanda energética total, considerando-se o Fator de Potência das instalações igual a 1 ($1VA=1W$), é de $(11.573,5+31.122,5=)$ **42.696W**.

O consumo utilizado nos cálculos é separado entre o consumo doméstico e o consumo para a irrigação do arroz, conforme pode ser visto em detalhes no APENDICE 2. Com isso, o consumo familiar é de **15.315kWh** para os meses de Outubro, Novembro e Dezembro e de **5.363kWh** para Janeiro, meses onde ocorre a irrigação, e de **387kWh** para os meses restantes.

A Tabela 1 faz um recapitulativo da demanda e do consumo anual energético da família em questão.

Tabela 1: Demanda e Consumo anual energético da família analisada

	Demanda [W]	Consumo Anual [kWh]
Domiciliar	11573,5	4644
Irrigação	31122,5	49796
Total	42696	54440

A título de comparação, para bombeamentos acionados por motores a diesel, o gasto energético chega a $6,30CV/ha=4309,3W/ha$. Neste caso, o gasto energético da família com irrigação chegaria a $(4309,3/ha*50ha=)$ **215.463,2W**, superior a 6 vezes o gasto com bombeamentos acionados por motor elétrico.

Neste estudo, é considerado que a família possui acionamento a motor elétrico, alimentado com gerador diesel.

4.2. POTENCIAL EÓLICO DA REGIÃO

A região de análise fica nos arredores de Santa Vitória do Palmar, localizada no extremo sul do Rio Grande do Sul. Conforme pode ser constatado na Figura A2.1 do ANEXO 2 (Fonte: SEMC), a velocidade média anual dos ventos na altura de 50m no entorno de Santa Vitória do Palmar varia conforme nos afastamentos da zona litorânea de 7 a 8,5m/s. Como o caso analisado neste trabalho é fictício, não havendo de fato um local exato para a instalação do sistema híbrido, a velocidade média anual considerada é de 7,5m/s.

Na Figura A2.2 do ANEXO 2, verifica-se que o Fator de Forma k da Distribuição de Weibull é igual a 2,4 para a região. Com essas informações, é possível gerar um gráfico de

distribuição de frequência de velocidades do vento na região, como pode ser visto na curva da Figura 3.

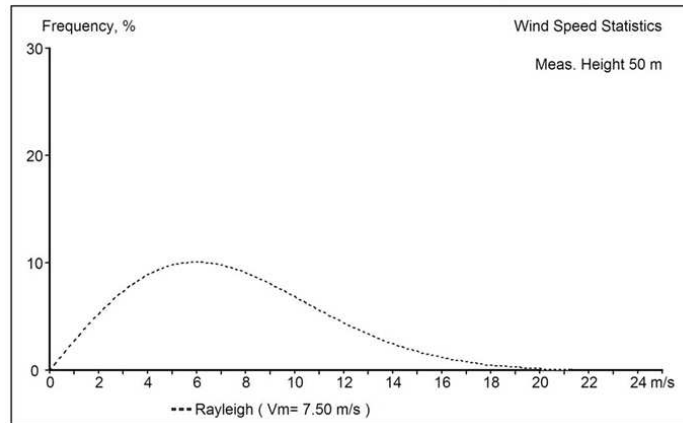


Figura 3: Distribuição de frequência das Velocidades do Vento na Região

5. PROJETO E ANÁLISE DE CUSTO PARA EXTENSÃO DA REDE ELÉTRICA

Em extensões de rede elétrica para pequenas comunidades rurais, a fim de minimizar-se custos em instalações rurais, frequentemente utiliza-se redes monofásicas. Neste estudo, a rede utilizada para os cálculos é uma rede monofásia, classe 15kV, menor classe de tensão disponível para distribuição de energia elétrica primária (CEMIG N.D. 5.1).

O custo avaliado por quilômetro de extensão deste tipo de rede está avaliado em **R\$12.972,30** (NOGUEIRA, 2009).

A concessionária que atende a região de Santa Vitória do Palmar é a CEEE. De acordo com suas regras tarifárias, o custo da energia para o consumidor da zona rural é de **0,217340R\$/kWh**. Considerando a alíquota média de PIS/COFINS de 6% e a de ICMS para consumidor rural de 25%, o custo final da energia será de:

$$Preço\ Final = \frac{Tarifa\ Homologada}{1-(aliq.ICMS+aliq.PIS+aliq.COFINS)} = \frac{0,217340}{1-(0,25+0,06)} = \mathbf{0,314985R\$/kWh}$$

Dessa forma, para uma análise de custos, é feita uma comparação entre o sistema a Diesel e a extensão da rede elétrica. Para isso, é calculado o Valor Presente Líquido e o Tempo de Retorno, levando-se em conta a economia que ocorrerá com a substituição do sistema a Diesel pela rede elétrica, em função da quilometragem da linha. É considerado, como Taxa Mínima de Atratividade, o valor de 12% ao ano e, como período, o tempo de 20 anos. Não se leva em consideração a inflação e nem a taxa de juros proveniente de um eventual empréstimo.

O custo da geração de energia a Diesel é calculado no HOMER e está estimado em **0,924R\$/kWh** (o gerador à Diesel é especificado na sub-sessão 6.1.2 e a simulação na sessão 6.3).

Sabendo-se que o consumo energético anual é de **54.404kWh**, o gasto anual com a rede elétrica será de **R\$17.136,44** e com o sistema a Diesel de **R\$50.269,30**, o que trará uma economia anual de **R\$33.132,86** no caso de utilização da rede elétrica.

A Tabela 2 demonstra as variações do Valor Presente Líquido e do Payback em função da quilometragem de extensão da linha.

Tabela 2: VPL e Payback em função da quilometragem de extensão da rede elétrica: Comparação entre a utilização da rede elétrica com o sistema a Diesel

Extensão [km]	Investimento Inicial [R\$]	VPL [R\$]	Payback [anos]
1	12.972,30	234.511,67	0,39
2	25.944,60	221.539,37	0,78
5	64.861,50	182.622,47	1,96
10	129.723,00	117.760,97	3,92
15	194.584,50	52.899,47	5,87
20	259.446,00	- 11.962,03	7,83

Percebe-se, através da Tabela 2, que o tempo de retorno para os investimentos em extensão da rede elétrica é relativamente baixo, no entanto, a partir de aproximadamente 19km de linha não se torna mais interessante como investimento, lembrando-se que a Taxa Mínima de Atratividade estabelecida é de 12% ao ano.

6. PROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO

6.1. SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA O SISTEMA HÍBRIDO

6.1.1. Aerogeradores

Para a seleção de turbinas, inúmeros fatores devem ser levados em conta, porém os mais importantes são o tamanho e a capacidade de geração de energia.

Para uma demanda de 42.696W, uma ampla gama de pequenos aerogeradores poderia ser selecionada, levando-se em conta a possibilidade de aquisição de um ou mais turbinas. Neste estudo, são analisados 3 arranjos distintos de aerogeradores de tamanhos e capacidades de geração de energia diferentes: eW15, da Entegriy, FL30, da Fuhrländer e a YZ-006, da SWG.

Determinar o custo exato do conjunto aerogerador, torre, transporte e montagem não é simples. Para os cálculos, é considerado o custo médio do sistema em função da potência do aerogerador o valor de 1.400€/kW (IEA, 2006). Custos médios com manutenção estão orçados em 0,0145€/kWh. A depreciação é de 10% e o tempo de vida de 20 anos.

O valor de conversão do Euro nos cálculos é de 2,35 (1€=R\$2,35).

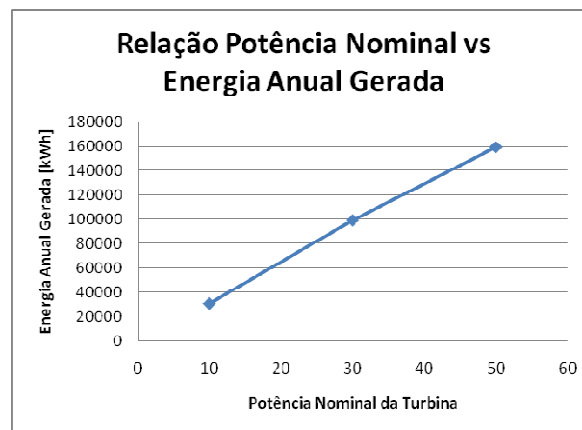
O ANEXO 3 traz as Curvas de Potência de cada um dos aerogeradores. Através das curvas de potência dos aerogeradores e da distribuição de frequência de velocidades do vento na região, levando-se em conta ainda a altura em que o rotor da turbina será instalado (Tabela 3), o Fator de Potência de cada aerogerador pode ser estimado. O gráfico de distribuição de frequência de velocidades do vento, as Curvas de Potência e as respectivas alturas dos aerogeradores são inseridos no HOMER para o cálculo do Fator de Capacidade. A obtenção do fator de capacidade emprega as equações da energia gerada (3.6) e do fator de capacidade (3.7).

A Tabela 3 traz as dimensões de cada aerogerador e evidencia seus custos, junto com os seus respectivos Fatores de Capacidade obtidos.

Tabela 3: Comparativo dos aerogeradores

Fabricante	Modelo	Potência [kW]	Diâmetro Rotor [m]	Altura Cubo [m]	Fator de Capacidade (%)	Energia Anual Gerada [kWh]	Custo [R\$]	Manutenção [R\$]
Entergrity	eW15	50	15	25	36,4	159345	164500	5429,681
Fuhrländer	FL30	30	13	27	37,8	99430	98700	3388,077
SWG	YZ-006	10	8	12	35,5	31089	32900	1059,358

Verifica-se que os três aerogeradores possuem um fator de capacidade semelhante, ou seja, o seu aproveitamento da capacidade de produção de energia para as condições climáticas da região é aproximadamente mesmo. Com isso, a sua produção anual de energia acaba sendo diretamente proporcional e linear à Potência Nominal do aerogerador, como pode ser comprovado pelo Gráfico 1:

**Gráfico 1: Relação entre a Potência Nominal do aerogerador com a sua energia anual gerada**

6.1.2. Geradores à Diesel

Como gerador de energia à Diesel, foi escolhido o gerador GEP44-7 da Caterpillar, com potência de geração de até 36,0kW (45,0kVA). A escolha do gerador ideal para o sistema em questão não faz parte do escopo deste trabalho, pois nesta etapa parte-se do princípio que a família produtora de arroz já possui o mesmo para realizar sua produção e portanto não será necessária uma nova aquisição. Também leva-se em conta que o gerador havia sido dimensionado somente para atender à demanda com irrigação.

Dados técnicos sobre o consumo de combustível em função da carga do gerador foram retirados de seu manual para utilização nos cálculos e inseridos no software HOMER.

Para preço do Diesel, o valor considerado por litro comercializado na cidade de Santa Vitória do Palmar é de R\$1,75 (ANP).

6.1.3. Banco de Baterias, Retificador e Inversor

Para o banco de baterias, retificador e inversor, o Software HOMER oferece a possibilidade de simular o número exato de baterias que o sistema deve ter e a dimensão conjunto inversor-retificador, a fim de se obter a combinação mais viável.

Para simulação do banco de baterias, o custo considerado é de US\$150,00 a unidade, para baterias estacionárias de 12V e 185Ah (PEREIRA; PINHO; DO VALE) e tempo de vida de 15 anos. Para o conjunto Inversor-Retificador, o custo considerado é de 1000,00US\$/kW e manutenção de US\$100,00 ao ano (PEREIRA; PINHO; DO VALE).

O fator de conversão utilizado para o dolar é 1,715 (1US\$=R\$1,715).

6.2. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO COM USO DO SOFTWARE HOMER

Em um primeiro momento é feito um comparativo entre os três aerogeradores selecionados, com o auxílio do Software HOMER, com o objetivo de definir o arranjo mais econômico, baseado no VPL, na TIR e no Payback, comparando o Sistema Híbrido com o Sistema de Geração à Diesel trabalhando sozinho. Para cada aerogerador, o Software determina também o número de baterias que devem ser utilizadas e a potência do conjunto inversor-retificador. Assim como nos cálculos efetuados na avaliação da extensão da rede elétrica, a Taxa Mínima de Atratividade considerada é de 12% ao ano e o tempo de vida estimado de utilização do sistema é de 20 anos Além disso, desconsidera-se a inflação e as taxas de juros para o caso de um empréstimo. A Tabela 4 resume os dados da simulação.

Tabela 4: Resumo Técnico e Econômico da Simulação com os Aerogeradores

Aerogerador	Potência [kW]	Número de Aerogeradores	Número de Baterias	Contribuição Energética [%]	Custo Energia [R\$/kWh]	VPL [R\$]	TIR [%]	Payback [anos]
eW30	50	1	32	67	0,551	130527	22,8	4,33
FL30	30	1	32	58	0,517	211467	35,9	3,57
YZ-006	10	2	32	46	0,52	247675	49	2,53

Através dos resultados obtidos, é possível notar que o custo da energia para o sistema contendo o aerogerador FL30 e para o sistema contendo dois aerogeradores YZ-006 é muito próximo e relativamente inferior ao do eW30, embora suas respectivas contribuições energéticas sejam menores. Percebe-se que o VPL e a TIR do sistema com o YZ-006 é relativamente superior ao dos demais sistemas, além de seu Payback ser inferior.

Conforme visto anteriormente, os fatores de capacidade dos aerogeradores analisados são muito semelhantes, o que faz com que a energia gerada pelos mesmos seja uma função linear da potência nominal do aerogerador. Ainda, para as estimativas de custo do conjunto aerogerador, torre, transporte e montagem, considerou-se que o custo é função linear da potência nominal do aerogerador. Com isso, conclui-se que para o modelo utilizado e para o caso de fatores de capacidade semelhantes, existe uma relação direta e linear entre os custos dos aerogeradores e energia gerada. No entanto, com a simulação realizada percebe-se que a contribuição energética dos aerogeradores, embora direta, não é linear com sua potência nominal, apresentando um variação de crescimento decrescente com o aumento da mesma. Logo, existe uma quantidade significativa de energia gerada que não está sendo consumida nem armazenada.

Dessa forma tanto pelo aspecto econômico quanto pelo aspecto técnico, conclui-se que o arranjo mais viável dentre os propostos é composto por 2 aerogeradores YZ-006 de potência nominal de 10kW, 32 baterias de 12V, sendo agrupadas séries de 4 baterias, totalizando 48V, um retificador de 16kW e um inversor de 16kW, além do gerador a Diesel de 36kW.

O investimento inicial para este sistema está estimado em **R\$92.824,00** e os custos com manutenção e operação em **R\$11.474,00**.

Com o auxílio do Software HOMER estimou-se também o gasto anual com cada equipamento, incluindo combustível e os gastos com manutenção e operação. Verifica-se, na Figura 4, que o principal gasto anual é com o Gerador a Diesel, devido ao elevado gasto com o combustível.

Na Figura 5 verifica-se o domínio da geração por energia eólica nos meses onde não ocorre irrigação, em detrimento do uso do Gerador Diesel. No entanto, verifica-se a predominância da geração à Diesel nos meses onde ocorre a irrigação.



Figura 4: Gastos Anuais com o Sistema Híbrido

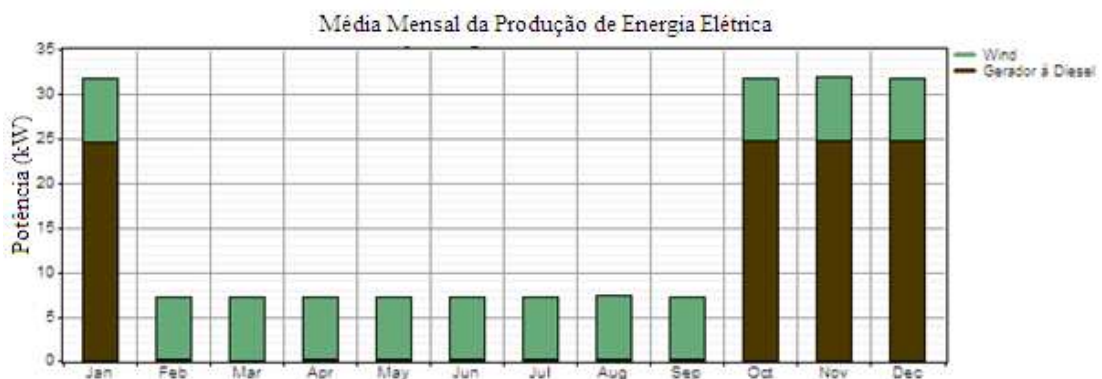


Figura 5: Proveniência da Produção Energética Mensal

7. COMPARATIVO DA VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE A EXTENSÃO DA REDE ELÉTRICA E A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO

Nesta etapa, é possível comparar-se a viabilidade de implantação do sistema híbrido com a da extensão da rede elétrica. A Tabela 5 explicita os dados que foram obtidos com as análises.

Tabela 5: Comparativo Sistema Híbrido com Extensão da Rede Elétrica

	Extensão [km]	Investimento Inicial [R\$]	Manutenção [R\$]	Custo Energia [R\$/kWh]	VPL [R\$]	Payback
Rede Elétrica	1	12.972,30	0	0,3149	234.511,67	0,391524
	2	25.944,60			221.539,37	0,783048
	5	64.861,50			182.622,47	1,957619
	10	129.723,00			117.760,97	3,915238
Sistema Híbrido	-	92.824,00	11474,00	0,52	247.675,00	2,53

Através dessa tabela, diversas conclusões podem ser tiradas.

Primeiramente, como investimento, nota-se que o Sistema Híbrido contendo os 2 aerogeradores YZ-009 traz maior retorno financeiro do que a extensão da rede elétrica, quando comparado com o sistema autônomo a Diesel existente inicialmente, visto que mesmo para pequenas extensões de linhas o Valor Presente Líquido do Sistema Híbrido é superior ao da Rede Elétrica. Salienta-se que para fins de comparação de VPL, considerou-se o período de 20 anos, período correspondente, em geral, ao tempo estimado de vida de um Sistema Eólico, mas inferior ao tempo de vida de uma extensão de rede elétrica.

Nota-se que o custo da energia proveniente da rede elétrica é inferior ao custo da energia produzida pelo Sistema Híbrido, fornecido pelo HOMER. Salienta-se que o valor fornecido pelo HOMER leva em conta o investimento inicial com os equipamentos do Sistema Híbrido, além dos custos com manutenção, não sendo, portanto, um bom ponto de comparação para esta análise que desconsidera os gastos com manutenção na rede e considera o investimento inicial para extensão da rede como sendo pago pelo consumidor. A comparação do custo de energia de cada sistema seria interessante para o caso da análise ser feita pelo ponto de vista da concessionária estudando a possibilidade de expansão da linha ou de geração de energia independente.

Por fim, percebe-se que o tempo de retorno para o investimento com o sistema híbrido é superior ao tempo de retorno para investimentos em pequenas extensões de rede.

8. CONCLUSÕES

O estudo comparativo da viabilidade demonstrou que tanto a extensão da rede elétrica em distâncias de até 19km quanto a instalação de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel são viáveis técnica e economicamente, quando comparadas a um sistema autônomo a Diesel. O sistema híbrido apresentou-se como uma melhor alternativa de investimento do que a extensão da rede elétrica para um período de 20 anos. Além disso, o sistema híbrido torna o usuário independente do suprimento externo de energia, o que pode ser interessante no meio rural, onde a ocorrência de apagões pode ser mais freqüente do que no meio urbano e o tratamento de eventuais problemas na rede pode não ser tão imediato.

Dentre os Sistemas Híbridos analisados, todos se demonstraram técnica e economicamente viáveis, no entanto o Sistema que apresentou a melhor relação custo-benefício é composto por 2 pequenos aerogeradores YZ-006 de potência nominal de 10kW, 32 baterias de 12V, sendo agrupadas séries de 4 baterias, totalizando 48V, um retificador de 16kW e um inversor de 16kW, além do gerador Diesel de 36kW, estando o investimento inicial estimado em R\$92.824,00 e o tempo de retorno deste investimento previsto para 2,53 anos.

Este estudo poderia ser aprimorado com uma análise realizada pelo ponto de vista da concessionária de energia, estudando a hipótese de geração de energia descentralizada ou de extensão da rede, considerando, neste caso, sistemas maiores e investimentos iniciais superiores, incluindo, por exemplo, geradores Diesel, que foram desconsiderados neste estudo que possui o ponto de vista do consumidor.

Por fim conclui-se que Sistemas Híbridos podem ser uma ótima alternativa técnica e econômica de geração de energia em regiões remotas, possuindo ou não atividade econômica ativa.

9. REFERÊNCIAS

AES SUL, **Regulamento de Instalações Consumidoras. Fornecimento em Média Tensão. Rede de Distribuição Aérea** – Disponível em:

http://www.aessul.com.br/site/uploads/ric/mt/RIC_MT.pdf - Acesso em 11/2010.

ANP, **Sistema de Levantamento de Preços** – Disponível em: <http://www.anp.gov.br/preco/> - Acesso em 11/2010.

ANEEL, **Energia Eólica**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) – Acesso em 11/2010.

BORGES, L. C. “**Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Geração de Energia Elétrica Distribuída, Usando Pequenos Aerogeradores. Análise dos Principais Aspectos para Ampliar a Viabilidade**” – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/> – Acesso em 11/2010.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. Tabela de Tarifas. Rede Convencional. Disponível em:

http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/Tabela_Convencional_2009.pdf - Acesso em 11/2010

CEMIG, **Manual de Distribuição** – Disponível em:

http://www.cemig.com.br/normas_tecnicas/nd51.pdf - Acesso em 11/2010.

CRESESB, **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/principal.php> - Acesso em 11/2010

CON08-1393, **Análise Econômica de Sistemas Híbridos Eólico-Solar-Diesel**.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. “**Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul**” – Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DE ALMEIDA, S. C. A., FREIRE, R. L., “**Geração de Energia Elétrica Através de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel para um Hospital**” – UFRJ, 2008.

DE SOUZA, C. R. G.; DOS ANJOS, F. S., “**Impacto dos Programas de Eletrificação Rural nas Comunidades Rurais de Arroio Grande, RS**” – UFSM, Santa Maria, 2007.

EMBRAPA. Disponível em:

http://www.cpact.embrapa.br/eventos/2009/lagoa_mirim/pdf/prog_nac_reg_arroz_irrig.pdf - Acesso em 11/2010.

ENERCON, **Catálogo de Característica das Turbinas** – Disponível em:

[http://www.enercon.de/www/en/broschueren.nsf/vwwebAnzeige/15686F537B20CA13C125719400261D37/\\$FILE/ENE_Produktuebersicht_eng_0309.pdf](http://www.enercon.de/www/en/broschueren.nsf/vwwebAnzeige/15686F537B20CA13C125719400261D37/$FILE/ENE_Produktuebersicht_eng_0309.pdf) - Acesso em 11/2010.

FERNANDES, R. T., “**Supervisão de um Sistema Híbrido Eólico/Diesel usando Lógica Fuzzy**” – Dissertação de Mestrado – UFMS, Campo Grande, 2005.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz, **Custo de Produção do Arroz Irrigado** – Safra 2003/2004. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20060626133844.pdf> - Acesso em 11/2004.

MACHADO, R. N. M., “**Modelagem e Análise Dinâmica de Sistemas Híbridos Eólico-Diesel Autônomos**” – Tese de Mestrado – UFPA, 1999.

MARCOLIN, E.; ROBAINA, A. D., “**Consumo de Energia e Eficiência das Estações de Bombeamento de Lavouras de Arroz Irrigado**” – UFSM, Santa Maria, 2002.

MATTUELLA, J. M. L., “**Fontes Energéticas Sustentáveis: Um Estudo sobre a Viabilidade do Aproveitamento da Energia Eólica em Três Localidades no RS**” – Dissertação de Mestrado – UFRGS, Porto Alegre, 2005.

NOGUEIRA, C. U., “**Utilização de Sistemas Solar e Eólico no Bombeamento de Água para Uso na Irrigação**” – Dissertação de Mestrado – UFSM, Santa Maria, 2009.

NREL – National Renewable Energy Laboratory, **Optimization Model for Electric Renewables (HOMER)**. Disponível em: <https://analysis.nrel.gov/homer/> - Acesso em 11/2010.

PEREIRA, E. J. S.; PINHO, J. M. L., DO VALE, S. B., “**Estudo da Integração de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico a uma Edificação Urbana Interligada à Rede**” – UFPA, Belém.

PEREIRA, E. J. S.; PINHO, J. M. L., DO VALE, S. B., “**Revitalização do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico-Diesel de Tamaruteua, Município de Marapanim, Pará**” – UFPA, Belém, 2007.

PETRY, A. P.; MATTUELLA, J. M. L., “**Análise do Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia Empregando o “Software” Livre Alwin**”, 2007.

Portal Energia – Disponível em:

<http://www.portal-energia.com/category/eolica/documentacao-energia-eolica/> - Acesso em 11/2010.

SEELING-HOCHMUTH, G., “**Optimisation of a Hybrid Energy Systems. Sizing and Operation Control**”, - Dissertation – University of Kassel, 1998.

SEMC - Secretária de Infra-Estrutura e Logística do estado do Rio Grande do Sul. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. Disponível em:

http://www.semc.rs.gov.br/atlas/INDEX_metod.htm - Acesso em 11/2010.

SEPLAG – RS. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Disponível em:

<http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/default.asp> - Acesso em 11/2010.

IEA – International Energy Agency

<http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-3-economics-of-wind-power/chapter-1-cost-of-on-land-wind-power/the-cost-of-energy-generated-by-wind-power.html> (CUSTOS AEROGERADORES)

10. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

DE SOARES, F. S., **Análise Econômica do Gás Natural** – Curso de Especialização em Utilizações do Gás Natural, UFRGS.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: CÁLCULO DA DEMANDA ENERGÉTICA

Tabela AP1.1: Fatores de Demanda, Demanda Aparente e Cálculo de Demanda Total

TIPO	Sub-Tipo	Item	Qde	Potência Unitária [W]	Potência Total [W]	Potência Aparente [VA]	Fator de Demanda	Demanda Aparente [VA]
TIPO A		Lâmpada	6	80	480			
		Tomadas	4	600	2400			
		<i>Sub-Total A</i>			2880	2880	0,76	2188,8
TIPO B	B1	Chuveiro comum	1	5400	5400			
		<i>Sub-Total B1</i>			5400	5400	1	5400
	B4	Ferro de passar à vapor	1	1000	1000			
	B4	Máquina de lavar roupa	1	500	500			
		<i>Sub-total B4</i>			1500	1500	0,92	1380
	B5	Batedeira	1	200	200			
	B5	Forno microondas	1	1200	1200			
	B5	Liquidificador	1	350	350			
	B5	Microcomputador	1	250	250			
	B5	Refrigerador comum	1	200	200			
	B5	Freezer	1	300	300			
	B5	Secador de cabelos	1	1000	1000			
	B5	Televisor	1	200	200			
	B5	Ventiladores	2	200	400			
	<i>Sub-Total B5</i>			4100	4823,52941	0,54	2604,70588	
	TOTAL							11573,5059

APÊNDICE 2: PERFIL DE CONSUMO DA FAMÍLIA

O perfil de consumo da família é simplificado e não leva em consideração as variações sazonais. Para a irrigação, é considerado que há uma safra anual e que o tempo de irrigação é de 16h diárias, durante 100 dias (IRGA), a partir do mês de outubro. A Tabela AP2.1 expõe detalhadamente o Consumo Doméstico e o Consumo com a Irrigação em função da faixa de horário. Para consumo total, entende-se os meses onde há irrigação, além do consumo doméstico.

Tabela AP2.2: Previsão do Consumo Energético Diário da Família

Horário	Consumo Doméstico [kW]	Consumo Irrigação [kW]	Consumo Total [kW]
00:00-01:00	0,4	31,1	31,5
01:00-02:00	0,4	31,1	31,5
02:00-03:00	0,4	31,1	31,5
03:00-04:00	0,4	31,1	31,5
04:00-05:00	0,4	31,1	31,5
05:00-06:00	0,4	31,1	31,5
06:00-07:00	1,5	31,1	32,6
07:00-08:00	0,4	31,1	31,5
08:00-09:00	0,4	31,1	31,5
09:00-10:00	0,4	31,1	31,5
10:00-11:00	0,4	0	0,4
11:00-12:00	1,5	0	1,5
12:00-13:00	0,4	0	0,4
13:00-14:00	0,4	0	0,4
14:00-15:00	0,4	0	0,4
15:00-16:00	0,4	0	0,4
16:00-17:00	0,4	0	0,4
17:00-18:00	0,4	0	0,4
18:00-19:00	1,5	31,1	32,6
19:00-20:00	0,4	31,1	31,5
20:00-21:00	0,4	31,1	31,5
21:00-22:00	0,4	31,1	31,5
22:00-23:00	0,4	31,1	31,5
23:00-00:00	0,4	31,1	31,5
Energia Diária[kWh]	12,9	497,6	510,5
Energia Mensal [kWh]	387	14928	15315

Tabela AP2.3: Previsão do Consumo Energético Mensal da Família

Mês	Consumo [kWh]
Janeiro	5363
Fevereiro	387
Março	387
Abril	387
Maio	387
Junho	387
Julho	387
Agosto	387
Setembro	387
Outubro	15315
Novembro	15315
Dezembro	15315

ANEXOS

ANEXO 1: CÁLCULO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA (CEMIG ND-5.1)

Expressão para o cálculo da demanda:

$$D = a + b + c + d + e + f \text{ (kVA)} \quad \backslash \quad (A1.1)$$

Onde,

a = demanda referente a iluminação e tomadas, dada pelas Tabelas A1.1 e A1.2.

b = demanda relativa aos aparelhos eletrodomésticos e de aquecimento. Os fatores de demanda, dados pelas Tabelas A1.4 e A1.5, devem ser aplicados, separadamente, à carga instalada dos seguintes grupos de aparelhos:

b1: chuveiros, torneiras e cafeteiras elétricas;

b2: aquecedores de água por acumulação e por passagem;

b3: fornos, fogões e aparelhos tipo "Grill";

b4: máquinas de lavar e secar roupas, máquinas de lavar louças e ferro elétrico;

b5: demais aparelhos (TV, conjunto de som, ventilador, geladeira, freezer, torradeira, liquidificador, batedeira, exaustor, ebulidor, etc.).

c = demanda dos aparelhos condicionadores de ar, determinada por:

100%, para os primeiros 5 aparelhos;

86 %, para os demais.

No caso de condicionador central de ar, utilizar fator de demanda igual a 100%.

d = demanda de motores elétricos, dada pelas Tabelas A.16 e A1.7.

e = demanda de máquinas de solda e transformador, determinada por:

100% da potência do maior aparelho;

70% da potência do segundo maior aparelho;

40% da potência do terceiro maior aparelho;

30% da potência dos demais aparelhos.

No caso de máquina de solda a transformador com ligação V-v invertida, a potência deve ser considerada em dobro.

f = demanda dos aparelhos de Raios-X, determinada por:

100% da potência do maior aparelho;

10% da potência dos demais aparelhos.

As tabelas com os fatores de demanda para cada equipamento podem ser encontrados nos anexos da ND-5.1. da CEMIG.

ANEXO 2: VELOCIDADE MÉDIA ANUAL E FATOR DE FORMA K DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

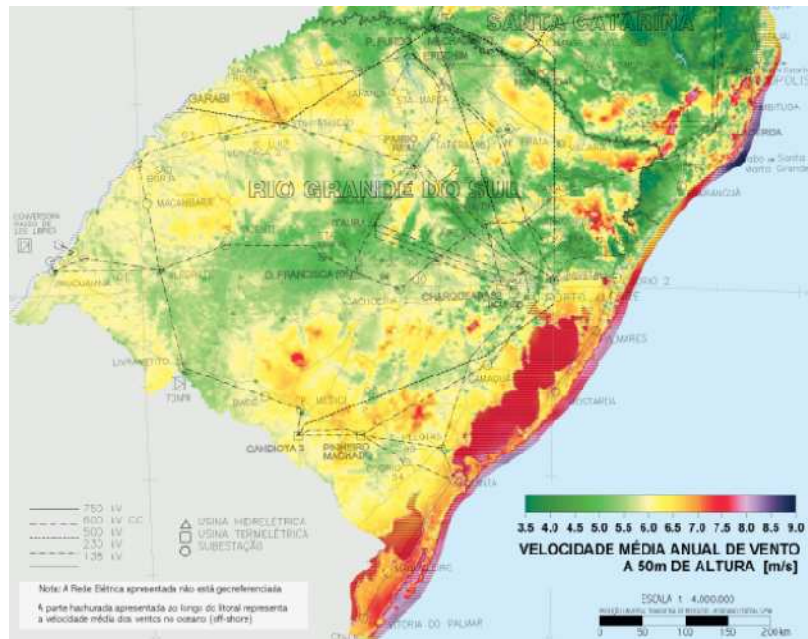


Figura A2.1: Velocidade Média Anual de Vento a 50m de Altura [m/s] (Fonte: SEMC)

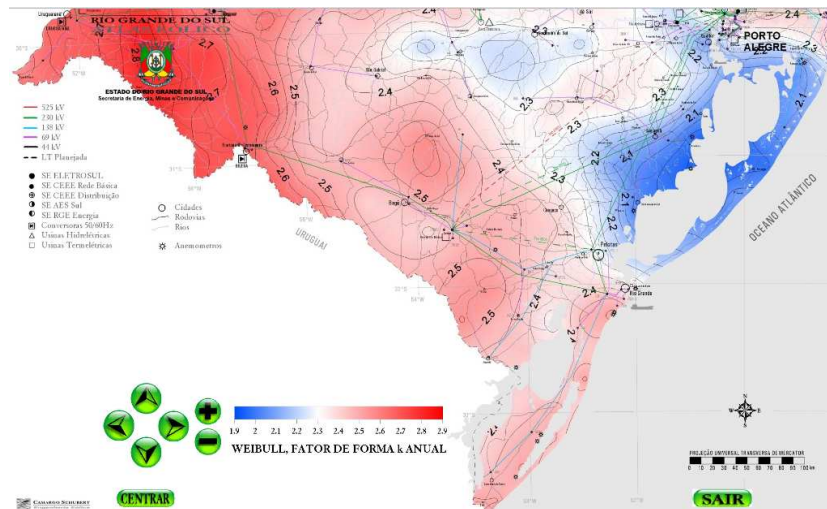


Figura A2.2: Fator de Forma k da Distribuição de Weibull (Fonte: SEMC)

ANEXO 3: CURVAS DE POTÊNCIA DOS AEROGERADORES

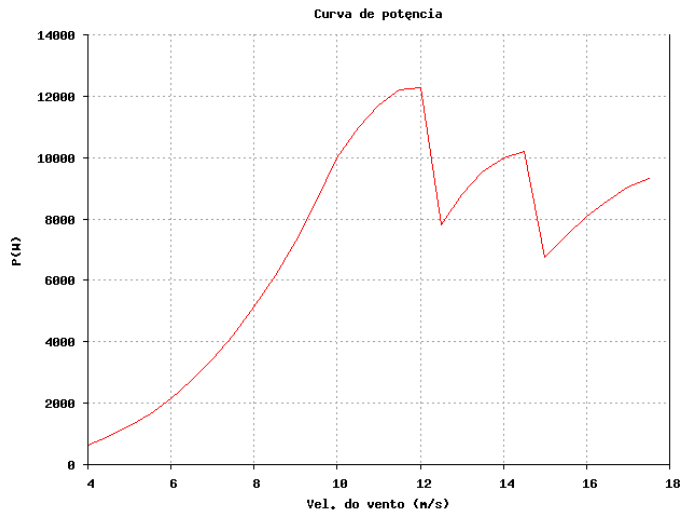


Figura A3.1: Curva de Potência YZ-006 – 10kW

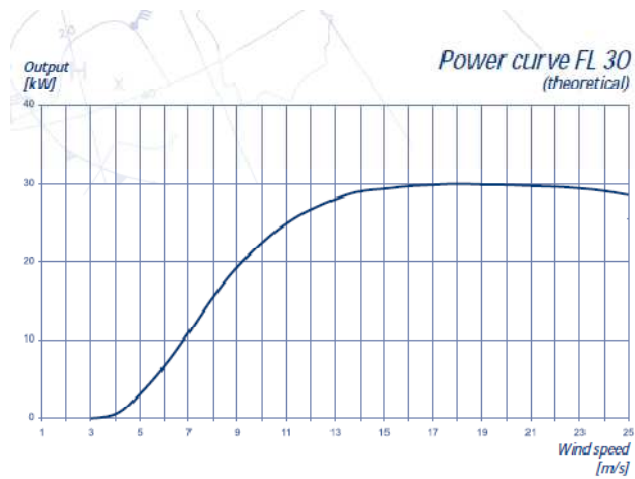


Figura A3.2: Curva de Potência FL30 – 30kW

EW15 Power Curves

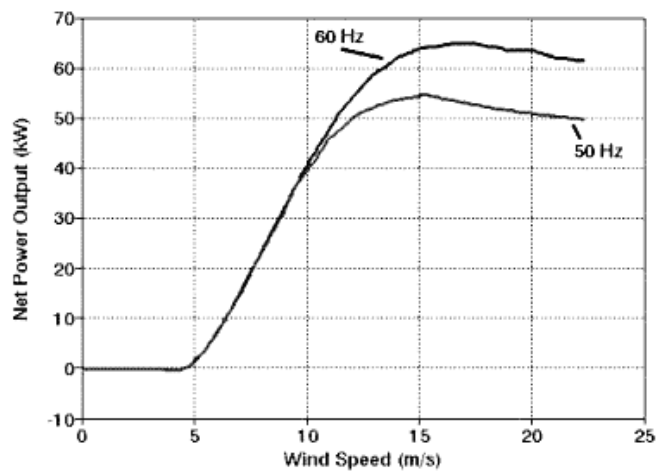


Figura A3.3: Curva de Potência eW15 – 50kW