

Universidade Federal do Rio de Janeiro

ENERGIA FOTOVOLTAICA EM
ESTRUTURAS HÍBRIDAS

Ostend Batista Cardim

2012



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ENERGIA FOTOVOLTAICA EM ESTRUTURAS HÍBRIDAS

Ostend Batista Cardim

Projeto de graduação submetido ao corpo docente do departamento de engenharia elétrica da escola politécnica da universidade federal do rio de janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenheiro eletricista.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012

ENERGIA FOTOVOLTAICA EM ESTRUTURAS HÍBRIDAS

Ostend Batista Cardim

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinada por:

Prof.: Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

Prof.: Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr. Eng.

Prof.: Sérgio Sami Hazan, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO de 2012

Cardim, Ostend Batista

Energia Fotovoltaica em Estruturas Híbridas/ Ostend
Batista Cardim. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola
Politécnica, 2012.

IX, 57p: il.;29,7 cm.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia
Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 60 - 62.

1.Sistemas Híbridos 2. Energia Fotovoltaica

I. Nascimento, Jorge Luiz. II. Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia
Elétrica. III. Energia Fotovoltaica em Estruturas Híbridas

Dedicatória

Este Projeto de Graduação é dedicado à minha querida avó e madrinha Carmita, que me acolheu por todos esses anos e não mediu esforços para que eu tivesse um verdadeiro lar, além do apoio incondicional em todos os projetos da minha vida.
Sem ela, nada disso seria possível!

Agradecimentos

A Deus, pelas preces ouvidas e desejos realizados.

Aos meus pais, que estiveram ao meu lado, me apoiando e dando conselhos nas horas mais difíceis. Pelo esforço de uma vida para prover uma educação de qualidade. Pelas orações direcionadas a mim.

À Julyana, minha noiva, que esteve ao meu lado do primeiro ao último dia da graduação, seu companheirismo me puxou para cima nas horas mais difíceis. Seu amor me deu força de vontade de continuar. À sua ajuda preciosa na correção deste projeto. Sem você, não sei se seria capaz!

À minha irmã, pelo companheirismo e amizade de toda a nossa vida.

Aos meus amigos, grandes incentivadores e companheiros.

Aos amigos que fiz na UFRJ, que tornaram a graduação mais alegre e prazerosa.

Ao Prof. Dr. Eng. Luis Guilherme Rolim, pelo incentivo, disponibilidade, compreensão e pelos conselhos tão essenciais.

Ao Prof. Dr. Eng. Sergio Sami Hazan pela disponibilidade de sempre e por todas as orientações dadas durante a graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eng. Jorge Luiz do Nascimento, pela valiosa orientação, conselhos e atenção dispensados durante o preparo deste projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Energia Fotovoltaica em Estruturas Híbridas

Ostend Batista Cardim

Fevereiro/2012

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Curso: Engenharia Elétrica

Sistemas híbridos são alternativas promissoras para a redução da emissão de poluentes e gases de efeito estufa no ar. No processo de geração de energia as fontes renováveis não emitem qualquer poluente na atmosfera. No caso de sistemas híbridos, a participação reduzida ou nula da fonte diesel-elétrica, faz com que estes sistemas sejam considerados ambientalmente corretos. Neste projeto final, os sistemas híbridos são apresentados como alternativa à escassez dos combustíveis fósseis e ainda uma alternativa ambientalmente correta. São apresentados dimensionamento, topologia e os tipos de sistemas híbridos com energia fotovoltaica. Os benefícios deste tipo de produção de energia elétrica são apresentados, embora alguns problemas também sejam enfatizados, tais como o alto custo e a necessidade de alta tecnologia para a produção de suas peças.

Palavras-chave: Sistemas Híbridos, fotovoltaico, eólico, diesel, biomassa, célula combustível, estado da arte.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

PHOTOVOLTAIC ENERGY IN HYBRID SYSTEMS

Ostend Batista Cardim

February/2012

Advisor: Jorge Luiz do Nascimento

Course: Electric Engineering

Hybrid systems are promising alternatives to reduce pollutants emissions in order to stop global warming. During the process of energy generation, renewable sources do not emit any pollution at the atmosphere. In hybrid systems case, the participation of diesel-electric source is extremely reduced or null, what turns this system eco-friendly. In this project, hybrid systems are presented as an alternative to fossil fuel shortage; but it is especially important due to its environmental respect. It will be presented sizing, topology and different types of hybrid systems with photovoltaic energy. The benefits of this method of electricity production are presented, although some problems are also emphasized, such as high cost and high technology to produce its parts.

Keywords: hybrid system, photovoltaic, wind, diesel, biomass fuel cell, state of art.

Sumário

1. Objetivo	9
2. Estruturação do Trabalho	9
3. Introdução e Revisão Bibliográfica	9
3.1. Energia Solar Fotovoltaica	11
3.2. Sistemas Híbridos	17
4. Sistemas Híbridos Fotovoltaicos	20
4.1. Dimensionamento	20
4.2. Levantamento dos Recursos Locais	21
4.3. Topologias	26
4.3.1. Sistemas Interligados	26
4.3.2. Sistemas Isolados	27
4.4. Estratégias de Operação	28
4.4.1. Estratégia 1 – Estado de carga	28
4.4.2. Estratégia 2 – Potência Demandada	29
4.4.3. Estratégia 3 – Ligados à rede de distribuição	29
5. Tipos de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos	30
5.1. Fotovoltaico-eólico e fotovoltaico-eólico-diesel	30
5.1.1. Fotovoltaico-eólico	30
5.1.2. Fotovoltaico-eólico-diesel	32
5.2. Fotovoltaico-Biomassa	35
5.3. Fotovoltaico-Célula Combustível	37
6. Aspectos Econômicos Associados a Sistemas Híbridos	39
6.1. Custos de um Sistema Fotovoltaico	40
6.2. Custos de um Sistema Eólico	41
6.3. Custos de um gerador a combustão	43
6.4. Custos de um Sistema Híbrido	43
6.5. Tempo de retorno de investimentos	45
7. Exemplo de Aplicação	46
7.1. Apresentação do estudo de Caso	46
7.2. Descrição do sistema	46
7.3. Determinação da radiação solar	47

7.4.	Determinação do Potencial Eólico	48
7.5.	Logística do Fornecimento de Óleo Diesel	49
7.6.	Dimensionamento	50
7.7.	Análise Econômica	50
7.8.	Análise de Contingências	53
7.8.1.	Contingências de curto prazo e médio prazo	53
7.8.2.	Contingências de longo prazo ou permanentes	55
8.	Conclusões	58
9.	Bibliografia	60

Lista de Figuras

Figura 1 - Geração de Energia Elétrica de 1971 a 2009 (em TWh)	10
Figura 2 - Distribuição da Geração de Energia Elétrica	10
Figura 3 – Exemplo de dopagem dos semicondutores.....	13
Figura 4 - Célula Fotovoltaica	13
Figura 5 – Estrutura da célula de silício monocristalino	14
Figura 6–Estrutura de célula de silício policristalino	15
Figura 7 - Estrutura de célula de silício amorfo	16
Figura 8 – Configurações de sistemas híbridos: isolado e conectado a rede.	18
Figura 9 – Piranômetro fotovoltaico	22
Figura 10 – Mapa da radiação solar no plano inclinado	23
Figura 11 - Anemômetro de concha e direção.....	24
Figura 12 – Os principais encargos inseridos nas tarifas	25
Figura 13 – Configuração de um sistema híbrido interligado	26
Figura 14 – Tipos de sistemas isolados: SIGFI e μ Grid, respectivamente	27
Figura 15– Configurações: gerador acoplado no barramento CC (a) ou CA (b)	28
Figura 16 – Curva de carga e descarga do banco de baterias.....	29
Figura 17 – Exemplo de complementaridade dos sistemas fotovoltaico e eólico.	30
Figura 18 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico	31
Figura 19 – Sistema híbrido de Joanes, PA.....	32
Figura 20 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel	33
Figura 21 – Foto do sistema híbrido na Vila São Tomé	34
Figura 22 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-biomassa	35
Figura 23 – Foto do Sistema Híbrido em Portugal	36
Figura 24 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-célula a combustível	38
Figura 25 – Foto do sistema híbrido fotovoltaico-célula a combustível em Centro Canguçu.....	38
Figura 26 - Variação do preço do módulo fotovoltaico	41
Figura 27 – Diagrama de Blocos de São Tomé	47
Figura 28 – Velocidade média sazonal	48
Figura 29 – Recursos solar e eólico	49
Figura 30 – Complementaridade diária dos recursos solar e eólico	49
Figura 31 – Curva de consumo do gerador	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da energia solar fotovoltaica	17
Tabela 2 – Etapas para o levantamento dos recursos locais.....	21
Tabela 3 – Custos iniciais de projetos para implementação de um sistema eólico	42
Tabela 4 - Dados da Radiação diária média	47
Tabela 5 - Dados do vento Sazonal a 50m de altura.....	48
Tabela 6 – Custos dos sistemas	50
Tabela 7 – Balanço energético e financeiro sem a CCC	51
Tabela 8 – Balanço energético e financeiro com a CCC	52
Tabela 9 - Contingências.....	53

1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo de Sistemas Híbridos para geração de energia elétrica a partir de associações entre sistema fotovoltaico e outras formas de geração sustentável como, por exemplo, eólica, biomassa, e célula combustível, assim como a combinação de sistemas convencionais, como diesel e a rede básica. Este projeto final tem ainda como objetivo servir como fonte de consulta para projetos posteriores auxiliando profissionais e alunos de engenharia elétrica na escolha de processos mais eficientes e ecológicos de geração de energia.

2. Estruturação do Trabalho

O trabalho apresentará a conceituação de Energia Fotovoltaica mostrando suas principais características: componentes, vantagens e desvantagens. E subsequentemente a caracterização de sistemas híbridos.

Será apresentado um estudo, caso a caso, que consiste na análise qualitativa, quantitativa e funcional do aproveitamento fotovoltaico dos sistemas híbridos para a geração de energia de forma sustentável. A Análise Qualitativa será baseada nas características da instalação como: localização, sazonalidade, equipamentos utilizados, implantação e operação do sistema, enquanto que a Análise Quantitativa se baseará em custos de implantação, geração de energia e no tempo de retorno de investimentos.

3. Introdução e Revisão Bibliográfica

Segundo o Jornal O Globo [1], no ano de 2011 a população mundial chegou aos sete bilhões de pessoas, fazendo com que o consumo de energia elétrica cresça em um ritmo ainda mais acelerado. Combinando este aumento do consumo de energia elétrica com a escassez dos combustíveis fósseis, um déficit de energia parece inevitável.

O modelo atual de geração de energia elétrica mundial é baseado na utilização de combustíveis fósseis, energia nuclear e hidroelétrica, sendo esta última responsável por apenas uma pequena porcentagem da geração de energia elétrica comparada ao combustível fóssil, conforme pode ser observados nas Figuras 1 e 2.

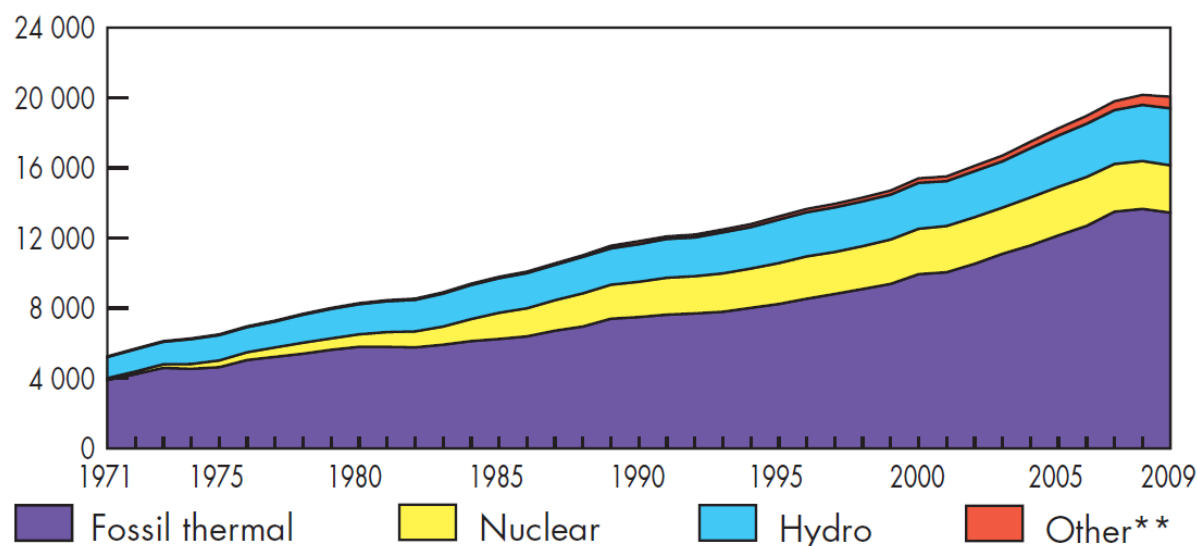


Figura 1 - Geração de Energia Elétrica de 1971 a 2009 (em TWh) [2]

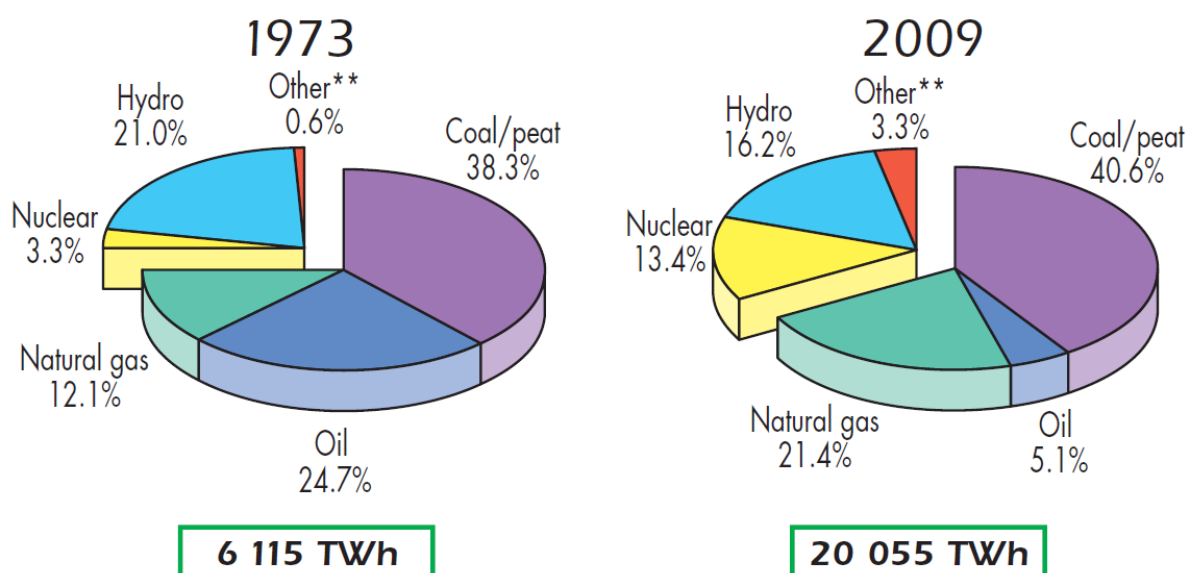


Figura 2 - Distribuição da Geração de Energia Elétrica [2]

A partir das figuras 1 e 2, é possível observar que em um horizonte de 36 anos, a produção de energia elétrica mais que triplicou e a participação do carvão ainda se mantém majoritária. Esse aumento expressivo é associado ao crescimento da população e a subsequente necessidade de maior produção de energia. Porém, o uso do carvão mineral para a produção de energia elétrica tem como principal restrição o forte impacto socioambiental provocado em todas as etapas do processo de produção e no seu consumo, além de ser responsável por grande parte dos gases que provocam o efeito

estufa. A parcela “Outras¹” inclui fontes que têm em comum o fato de serem renováveis permitindo a diversificação e a “limpeza” da matriz energética local ao reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Além disso, as fontes renováveis também podem operar como fontes complementares às grandes usinas hidrelétricas, cujos principais potenciais já foram quase integralmente aproveitados nos países desenvolvidos.

O termo “Fontes Alternativas” pode estar caindo em desuso já que a participação destas aumentou em mais de 930% de 1973 a 2011 segundo a Key World Energy Statistic da International Energy Agency (IEA) [2], edição de 2011, variação que foi superada somente pelo parque nuclear que registrou uma expansão de 1187% no mesmo período. Este fato é devido aos incentivos governamentais a formas de geração de energia mais limpas.

Neste cenário atual em que as fontes primárias de geração são baseadas em insumos não renováveis, o surgimento das fontes alternativas é favorecido devido às suas características de fontes limpas e renováveis. Entretanto a simples substituição da matriz energética por fontes alternativas é inviável e não garante qualidades como tecnologia, simplicidade, sustentabilidade, segurança e baixo custo das fontes convencionais. As fontes alternativas se encaixam no contexto da Geração Distribuída, onde podem ser utilizadas como backup ou complementação do fornecimento, e em Sistemas Isolados onde a rede de distribuição não atende ou a logística de fornecimento de combustíveis é problemática.

Como as fontes renováveis possuem uma característica aleatória e intermitente deixam muito a desejar em aspectos de confiabilidade e capacidade de suprimento, sendo assim, torna-se interessante à utilização de sistemas híbridos de geração que utilizem duas ou mais fontes complementares a fim de melhorar o suprimento, confiabilidade e qualidade da energia fornecida.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o estado da arte destes sistemas e as principais estruturas híbridas envolvendo a forma de aproveitamento alternativo de energia.

3.1. Energia Solar Fotovoltaica

O Efeito Fotovoltaico é definido pela conversão direta de luz em eletricidade [3]. Foi descoberto pelo cientista francês Edmond Becquerel em 1839, o qual observou

^{1**} Estão abrigados o vento (eólica), solar, mar, geotérmica, esgoto, lixo, dejetos animais, entre outros.

através de experimentos que a radiação luminosa poderia ser convertida em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado numa solução eletrolítica.

Em meados de 1954 as primeiras células fotovoltaicas começaram a ser desenvolvidas em escala comercial, no Bell Laboratories, onde eram produzidas com silício e possuíam uma baixíssima eficiência, por volta de 6% [4].

3.1.1. A Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é composta por materiais semicondutores, como por exemplo, o Silício (Si). O Silício é o segundo material mais abundante na crosta terrestre e tem como principal característica a capacidade de ter a sua condutividade facilmente modificada através da introdução de impurezas em sua rede cristalina. Os átomos de Silício se caracterizam por possuírem quatro elétrons livres que se ligam aos vizinhos formando esta rede cristalina.

Quando átomos com cinco elétrons na camada de valência são adicionados a esta rede, como por exemplo, o Fósforo (P), haverá um elétron em excesso. Logo, para deslocá-lo à faixa de condução é necessária pouca energia.

Paralelamente, ao adicionar à rede cristalina, átomos com 3 elétrons na camada de valência, como é o caso do Boro (B), faltará um elétron para realizar as ligações com os átomos de Silício. Esta falta de elétron é denominada lacuna a qual pode ser preenchida por um elétron vizinho, fazendo com que a lacuna se desloque mesmo com pouca energia.

Este processo de adição de elementos que contenham três ou cinco elétrons na camada de valência é chamado de *Dopagem* (Figura 3). O Fósforo é denominado *Dopante N* (doador de elétrons), enquanto o Boro é chamado de *Dopante P* (receptor de elétrons) [3].

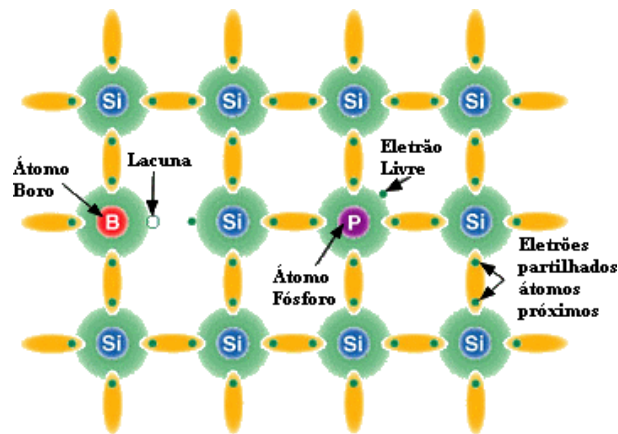


Figura 3 – Exemplo de dopagem dos semicondutores [5]

Partindo de um Silício puro e introduzindo-se em uma face átomos de Boro e, na outra, átomos de Fósforo, forma-se uma *junção PN*. Nesta junção os elétrons livres no lado N atravessam o “*gap*” para o lado P encontrando as lacunas que os capturam. Isto gera um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e o lado N eletricamente positivo. Este acúmulo gera um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P, entrando em equilíbrio quando o campo bloqueia totalmente esta passagem.

Ao expor a junção PN à fótons (luz), ocorre um deslocamento de cargas dando-se origem a uma diferença de potencial (efeito fotoelétrico) [6]. Ao conectar as extremidades do silício através de um fio condutor haverá uma circulação de elétrons, conforme é demonstrado na Figura 4.

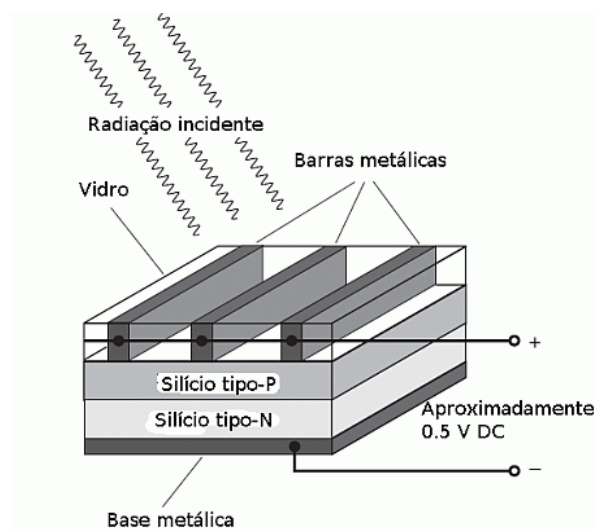


Figura 4 - Célula Fotovoltaica [7]

3.1.2. Tipos de Células e Tecnologias de Fabricação

Os materiais empregados na produção da célula fotovoltaica são, em sua maioria, caracterizados pela rede cristalina, pois possuem uma estrutura de átomos que se repete. Atualmente, o material mais utilizado é o silício que pode ser encontrado nas formas monocristalina, policristalina ou amorfa.

Existem novos materiais que se baseiam na combinação de semicondutores das famílias 3A e 5A da tabela periódica, como o Arseneto de Gálio (GaAs), e entre a combinação das famílias 2A e 6A, como o Disseleneto de Cobre-Índio (CuInSe₂), e o Telureto de Cádmio (CdTe). Alguns destes estão em estágio de comercialização. Estas tecnologias combinadas ao Silício Amorfo são denominadas tecnologias de filmes finos.

3.1.2.1. Células de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino (Figura 5) são historicamente as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído que consiste na extração dos cristais de dióxido de silício seguida de uma criteriosa purificação. Após a purificação, barras cilíndricas de silício puro são cortadas em forma de pastilhas quadradas finas da ordem de 0,4 mm a 0,5 mm de espessura, sendo posteriormente dopadas com boro e fósforo [8].

Comercialmente, a eficiência deste tipo de célula varia de 15% a 18%. Em comparação com outras células que utilizam silício como base esta é a que possui maior eficiência. As desvantagens estão relacionadas ao alto custo de produção e ao alto consumo de energia nos processos de fabricação.



Figura 5 – Estrutura da célula de silício monocristalino [3]

3.1.2.2. Células de Silício Policristalino

As células de silício policristalino (Figura 6) são constituídas de diversos cristais em contato entre si, dispostos de maneira não alinhada. Produzidos a partir do arrefecimento lento e solidificação de blocos de silício puro, pré-dispostos em um molde especial [8]. Estas células podem ser preparadas pelo corte de um lingote, corte de fitas ou deposição num substrato.

Cada técnica produz cristais com características específicas como morfologia, tamanho e concentração de impurezas. O processo de fabricação é menos criterioso e por sua vez mais barato, mas torna as células menos eficientes em comparação às de silício monocristalino (menor que 15%).

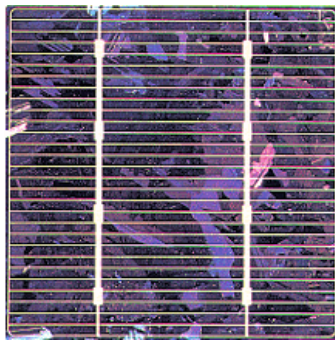


Figura 6–Estrutura de célula de silício policristalino [3]

3.1.2.3. Células de Silício Amorfo

As células de silício amorfo (Figura 7) não apresentam qualquer ordenação na estrutura atômica, tornando o seu processo de fabricação mais simples e barato em relação às outras células. O processo de fabricação é baseado na deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal [8].

Possui a vantagem de absorver a radiação solar na faixa visível e pode ser fabricada mediante a deposição de diversos tipos de substratos. As desvantagens são: a baixa eficiência (em torno de 10%) e a degradação precoce que ocorre nos primeiros meses de operação reduzindo a vida útil do equipamento.



Figura 7 - Estrutura de célula de silício amorfo [9]

3.1.2.4. Células de Arseneto de Gálio (GaAs)

As células de Arseneto de Gálio (GaAs) têm estrutura similar às células de silício, em contrapartida possuem uma eficiência de 28%. São indicadas para sistemas com concentração, como por exemplo, satélites artificiais, e se tornam inviáveis para uso em larga escala devido ao alto custo de fabricação.

3.1.2.5. Células de Disseleneto de Cobre-Índio (CuInSe₂ e CIS)

As células de Disseleneto de Cobre-Índio são compostas por um material policristalino que pode captar largas faixas do espectro solar. Sua eficiência é alta – de 14% (comercial) a 19,2% (laboratório) - mas o custo de fabricação em larga escala ainda é muito elevado devido ao preço do índio e à falta de abundância deste na crosta terrestre. A principal desvantagem deste tipo de célula são os sérios problemas ambientais que podem causar devido à combinação dos seus elementos com outros encontrados livres na natureza.

3.1.2.6. Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

Células compostas por material policristalino. Possuem um baixo custo de produção em larga escala e uma alta eficiência na conversão (16,5% em laboratório e 11% comerciais), por outro lado a disponibilidade da matéria-prima é bem inferior quando comparada ao silício. Outro problema relacionado a esta tecnologia é a toxicidade do cádmio que pode se acumular na cadeia alimentar.

3.1.3. Vantagens e Desvantagens

A energia solar fotovoltaica tem como principal vantagem ser uma energia limpa, ou seja, não gera nenhum tipo de poluição; porém o seu custo de fabricação é elevado. As principais vantagens e desvantagens deste tipo de energia são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens da energia solar fotovoltaica

Vantagens	Desvantagens
• Não utiliza combustível; • Não há poluição ou contaminação ambiental; • Há geração de energia inclusive em dias nublados; • Permite aumento da potência instalada através de incorporação de módulos adicionais; • Resistente a condições climáticas extremas; • Exige pouca manutenção; • Vida útil superior a 25 anos; • Silenciosa.	• O custo de investimento é elevado; • Necessitam de tecnologia sofisticada para a sua fabricação; • O rendimento real de conversão de um módulo é reduzido, devido ao custo de investimento; • Seu rendimento está atrelado ao índice de radiação, temperatura, quantidade de nuvens, dentre outros.

3.2. Sistemas Híbridos

Sistemas Híbridos de geração de energia podem ser definidos como sistemas formados por duas ou mais fontes de produção de energia, escolhidas em função da disponibilidade local, operando em conjunto para atender a demanda de um consumidor comum. Outra característica deste tipo de sistema é a existência de um bloco inteligente responsável pelo despacho de potência.

A principal vantagem dos sistemas híbridos é a possibilidade do aproveitamento conjugado e otimizado dos recursos disponíveis, podendo garantir os níveis de qualidade e confiabilidade necessários com redução de custos de investimento e operacionais.

Os sistemas híbridos são compostos, geralmente, por fontes renováveis cujos recursos são intermitentes e, quando necessário, necessitam de uma complementação de grupos geradores a combustão. Os combustíveis utilizados usualmente são diesel, gasolina, gás e biocombustíveis. A configuração ótima de sistemas híbridos está

condicionada à escolha correta dos recursos energéticos no local da instalação do sistema.

Além de fontes primárias de geração, os sistemas híbridos são compostos por outros subsistemas, os quais possuem finalidades específicas para o fornecimento, adequação, armazenamento e qualidade da energia fornecida, como apresentado na Figura 8.

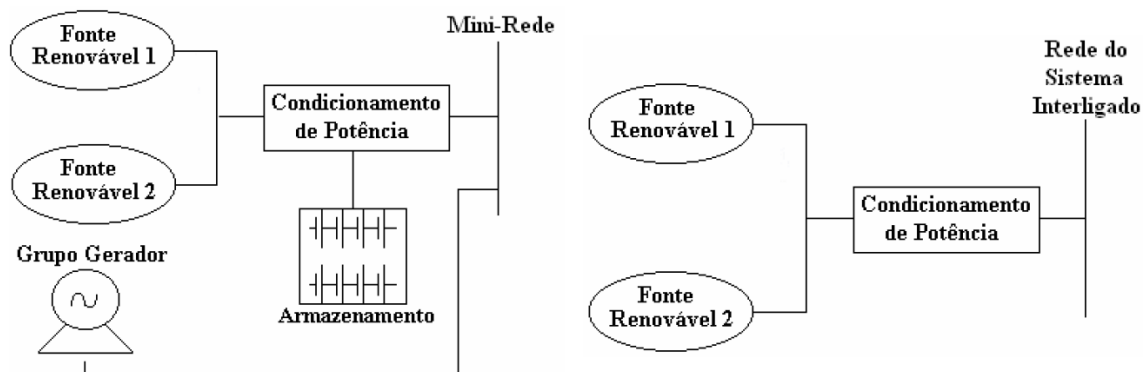


Figura 8 – Configurações de sistemas híbridos: isolado e conectado a rede, respectivamente [10].

O Sistema de Condicionamento de Potência, presente na Figura 8, possui funções amplas e depende de cada sistema. Em aplicações isoladas, atua de forma a coordenar a operação do sistema e fornecer eletricidade adequada ao uso. Já em aplicações interligadas à rede garante uma interconexão ótima, minimizando os impactos causados pelas fontes renováveis, como o surto de corrente (*current surges*) que afeta a rede de distribuição e o circuito das turbinas eólicas, além do desbalanço entre fases, falta de sincronismo e diferença nas frequências.

O Sistema de Armazenamento é utilizado tipicamente em sistemas isolados e tem a função de acumular energia gerada pelas fontes renováveis para utilização em períodos onde essa não é suficiente para atender a carga.

Existem diversos tipos de sistemas híbridos em utilização no mundo. Dentre esses, os que podem ser destacados como principais são:

- Sistema eólico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-eólico-diesel;
- Sistema fotovoltaico-eólico;
- Sistema fotovoltaico-rede básica (sistema interligado)

Complementando esta lista, existem outros sistemas menos difundidos e com tecnologia ainda em estágio embrionário como:

- Sistema fotovoltaico-biomassa;
- Sistema fotovoltaico-célula combustível.

No presente trabalho, o enfoque será dado para sistemas híbridos fotovoltaicos, que conjugam esta tecnologia com uma ou mais formas de geração, complementadas, se necessário, com grupos geradores e em sistemas isolados ou conectados à rede básica.

4. Sistemas Híbridos Fotovoltaicos

4.1. Dimensionamento

Para o funcionamento ótimo de um sistema híbrido é necessário um dimensionamento adequado da demanda energética. Se o sistema for subdimensionado, seu funcionamento será inadequado, diminuindo a confiabilidade, a qualidade da energia fornecida e aumentando o número de interrupções. Por outro lado, o superdimensionamento implica em maiores custos de investimento que muitas vezes inviabiliza economicamente o projeto. Sendo assim, o principal compromisso de um projeto de sistemas híbridos é o fornecimento de energia de forma confiável e pelo menor custo possível com o objetivo de aumentar a confiabilidade e a segurança, dando complementariedade ao suprimento original.

No caso de sistemas autônomos, sem variação brusca na carga como uma torre de telecomunicação, o cálculo da demanda é simplificado, sendo uma curva constante ao longo do tempo. Em contrapartida, ao projetar um sistema para uma comunidade isolada é necessário, antes de qualquer avaliação técnica, uma conversa com seus membros a fim de determinar se há o interesse pelo projeto, grau de organização da comunidade, distância e perspectivas de conexão com a rede pública, acessibilidade, entre outros. O modo de consumo e o comportamento futuro da expansão da demanda são fortemente influenciados por aspectos econômicos, geográficos e culturais. Alguns desses aspectos poderão influenciar na realização, ou não, de um projeto.

Outro fator que precisa ser levado em conta é a Demanda Reprimida, que ocorre em comunidades que não têm acesso à energia elétrica. No primeiro momento, as necessidades básicas são atendidas, como a iluminação, mas com o passar do tempo e a maior familiarização com a nova tecnologia, começa a surgir um aumento no consumo e uma demanda por outros tipos de serviços, como comunicação, refrigeração, etc. Além disso, mais um fator que deve ser levado em conta é a probabilidade de novos moradores provenientes de comunidades vizinhas sem fornecimento de energia elétrica e mudem para a localidade, que terá pela primeira vez o fornecimento de energia elétrica através dos sistemas híbridos. Esta migração influenciada pela busca de uma qualidade de vida melhor é um fato comum em qualquer localidade e que ocorre também com outras formas de geração de energia, mas que pode alterar consideravelmente a demanda.

4.2. Levantamento dos Recursos Locais

Como um sistema híbrido conjuga uma ou mais formas de geração de energia, é necessário um levantamento detalhado dos recursos naturais disponíveis na região a fim de otimizar a geração e, em alguns casos, reduzir o consumo de combustível. Podem ser feitas medições no próprio local, que seria estratégia ideal, porém mais cara, devido à necessidade da compra dos equipamentos de medição e também ao deslocamento da equipe técnica até o local para a instalação dos medidores, testes e monitoramento dos dados obtidos. Na impossibilidade de se realizarem estas medições, uma segunda opção é a utilização de dados disponíveis em estações meteorológicas próximas ao local, tabelas, programas computacionais especializados e mapas de potenciais solar e eólico.

O levantamento dos recursos naturais da região deve ser feito de forma criteriosa e seguindo um planejamento detalhado, como é sugerido na Tabela 2, a fim de evitar gastos desnecessários com o projeto.

Tabela 2 – Etapas para o levantamento dos recursos locais

Avaliação	Características	Vantagens	Desvantagens
Preliminar	• Consultas a atlas eólicos e solarimétricos; • Obtenção de dados de estações próximas; • Experiência do projetista.	• Rápida; • Baixo Custo.	• Pouco precisa.
Visita ao local	• Verificação de indicadores naturais; • Medições instantâneas com equipamentos portáteis; • Informações obtidas em conversas com moradores locais; • Avaliação da acessibilidade ao local; • Disponibilidade de áreas para a instalação.	• Relativamente rápida; • Custo moderado; • Indicativos mais precisos.	• Necessidade de deslocamento ao local; • Caráter subjetivo de algumas análises; • Pouco conclusiva.
Medição	• Instalação de estação meteorológica em local de instalação do sistema; • Tratamento e análise dos dados medidos.	• Totalmente conclusiva.	• Relativamente cara; • Período de tempo longo para obtenção de amostra de dados confiável.

4.2.1. Análise do Potencial Solar

Segundo Pereira [11], o levantamento preliminar consiste, por exemplo, na sondagem inicial do potencial da região desejada através de atlas solarimétricos e a obtenção de dados de estações meteorológicas próximas ao local com intuito de interpolar os dados obtidos e estimar a radiação solar da área.

Nas etapas de visita e medição são necessários instrumentos específicos para medição da irradiância (potência por unidade de área, W/m^2). A medição pode ser realizada a partir de plano horizontal ou plano inclinado e os instrumentos que permitem a medição são: heliógrafo, actinógrafo, piranômetro fotovoltaico e piranômetro termoeletrico; a medição ocorre duração da insolação; radiação solar global ou sua componente difusa, em banda de sombreamento; radiação solar global sobre o plano horizontal e por fim, radiação solar global, através de uma pilha termoeletrica, respectivamente [12]. Dentre estes o mais utilizado pela indústria é o piranômetro fotovoltaico devido ao seu baixo custo e boa precisão nas medidas, ilustrada na Figura 9.



Figura 9 – Piranômetro fotovoltaico [10]

As medidas podem ser obtidas de modo mensal, diária ou horária, dependendo do tipo de aplicação. De posse dos dados, é necessário tratá-los para então realizar as análises necessárias. Normalmente é obtida uma média da irradiância (W/m^2) ou da irradiação (Wh/m^2) num determinado tempo e são plotados gráficos que expressam o perfil do potencial fotovoltaico do local.

Existem dois tipos de medições para o levantamento do recurso solar: 1) registra apenas a componente global da radiação, 2) registra a radiação global e sua componente difusa para, a partir desses valores, obter a radiação direta incidente. Para o segundo

tipo de medida utiliza-se o piranômetro, o qual possui sensor localizado no plano horizontal, recebendo radiação de todas as direções.

A irradiância solar através do piranômetro fotovoltaico, apesar de medida no plano horizontal possui painéis instalados com uma determinada inclinação, logo a radiação que efetivamente incide no painel deve ser calculada a partir dos dados previamente coletados. O método para o cálculo da radiação incidente no plano inclinado a partir de dados no plano horizontal foge do escopo deste trabalho e foi demonstrado em Blasques [10] e Hauschild [13].

A distribuição do recurso solar (irradiância) e as características de conversão dos painéis fotovoltaicos (eficiência) determinam a quantidade de energia disponível para o atendimento da carga e são determinantes na viabilidade econômica de um sistema híbrido, configurando o custo da energia.

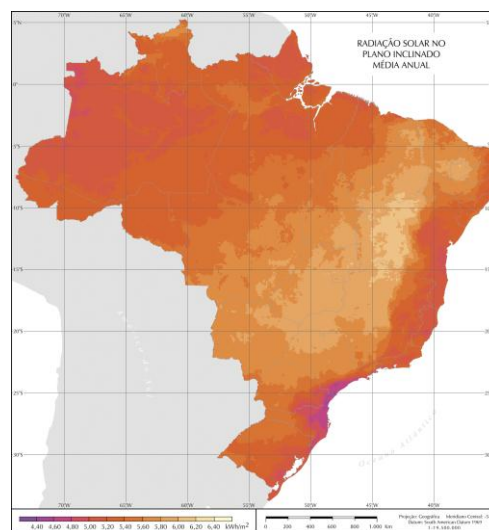


Figura 10 – Mapa da radiação solar no plano inclinado [11]

4.2.2. Análise do Potencial Eólico

O recurso eólico é influenciado por diversos parâmetros, como: relevo, temperatura, pressão, vegetação, velocidade do vento, entre outros. Como a potência da massa de ar é proporcional ao cubo da velocidade, conforme mostrado na Equação 1;

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

É essencial ter conhecimento do vento e suas características para que os aerogeradores sejam dimensionados com precisão.

Da mesma forma que a energia solar, o levantamento preliminar do potencial eólico consiste na análise de atlas, como por exemplo, o “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” [14], e da análise de dados obtidos de estações meteorológicas próximas. A medição no local da instalação é parte imprescindível do projeto e vai prover a maior e mais precisa quantidade de dados do potencial eólico da região. Os instrumentos utilizados são o anemômetro de conchas (velocidade) e sensor de direção, mostrados na Figura 11.



Figura 11 - Anemômetro de concha e direção [15]

4.2.3. Fornecimento de Combustível

Em algumas instalações de sistemas híbridos, faz-se necessária a introdução de um sistema de geração a combustão (diesel, gasolina, gás natural), para atuar como *backup* e consequentemente aumentando a confiabilidade da planta na ausência ou escassez da energia renovável.

A geração de energia elétrica com motores à combustão é largamente utilizada em sistemas isolados de pequeno e médio porte na região amazônica, principalmente os movidos a diesel, devido a grande facilidade de manutenção, reposição de peças e mão-de-obra especializada na região. A Figura 12 mostra a participação da CCC - Conta de Consumo de Combustíveis na tarifa mensal ao consumidor final e evidencia o peso da geração distribuída na conta de energia.

Encargo	Finalidade	2007 - valores em milhões de R\$
CCC Conta de Consumo de Combustíveis	Subsidiar a geração térmica na região Norte do país (Sistemas Isolados).	2.871
CDE Conta de Desenvolvimento energético	Propiciar o desenvolvimento energético a partir das fontes alternativas; promover a universalização do serviço de energia, e subsidiar as tarifas da subclasse residencial Baixa Renda.	2.470
RGR Reserva Global de Reversão	Indenizar ativos vinculados à concessão e fomentar a expansão do setor elétrico.	1.317
CFURH Compensação financeira pela utilização de recursos hídricos	Compensar financeiramente o uso da água e terras produtivas para fins de geração de energia elétrica.	1.244
P&D Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética	Promover pesquisas científicas e tecnológicas relacionadas à eletrificação e ao uso sustentável dos recursos naturais.	667
PROINFA	Subsidiar as fontes alternativas de energia.	635
TFSEE Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica	Prover recursos para o funcionamento da ANEEL	327
ESS Encargos de Serviços do Sistema	Subsidiar a manutenção da confiabilidade e estabilidade do Sistema Elétrico Interligado Nacional	86
Total		9.617

Figura 12 – Os principais encargos inseridos nas tarifas [16]

Em algumas localidades, principalmente na região norte, o acesso é feito somente por rios e pequenos afluentes tornando a logística de abastecimento de combustível extremamente complicada e cara, tornando-se indispensável a estocagem do combustível nestas áreas.

Para tornar o projeto de um sistema híbrido viável nestas condições é necessário levantar os seguintes aspectos logísticos:

- Disponibilidade de pontos de venda ou redes de distribuidores de óleo diesel mais próximo possível do sistema de geração, para redução do custo de transporte;
- Minimização dos custos de transporte, fluvial ou rodoviário, sempre levando em conta as estações do ano, pois há áreas onde o transporte fluvial é afetado pela estação seca e outras onde o transporte rodoviário é afetado pela estação chuvosa;
- O armazenamento de combustíveis inflamáveis devem sempre seguir as normas técnicas (NBR 7505-1 – Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis) a fim de manter a segurança e não afetar o meio ambiente.

De posse dos dados obtidos, após as três etapas do levantamento, o passo seguinte é o tratamento e a análise dos dados para a determinação do potencial da localidade com o intuito de nortear os empreendimentos que serão construídos na região.

Após a confirmação do potencial de cada fonte pode-se otimizar o projeto com a participação de cada fonte no sistema híbrido, levando em conta uma série de fatores

como: custo da energia gerada, confiabilidade técnica, facilidade de manutenção e logística de transporte de combustíveis.

4.3. Topologias

Sistemas híbridos podem ser classificados como isolados ou interligados, sendo a diferença básica a conexão, ou não, à rede de distribuição.

4.3.1. Sistemas Interligados

Sistemas Interligados são sistemas híbridos conectados à rede de distribuição com a finalidade de complementar a geração local. Essa forma de geração é conhecida como geração distribuída (GD).

Existem duas configurações típicas para os sistemas interligados: sistemas que somente injetam energia na rede e sistemas que realizam intercâmbio de energia com a rede, este último geralmente possui cargas associadas. Em ambas as configurações devem ser dada atenção especial à qualidade da energia no ponto de entrega a fim de evitar qualquer prejuízo à rede elétrica existente. A Figura 13 apresenta em detalhes uma configuração típica de sistemas híbridos interligados.

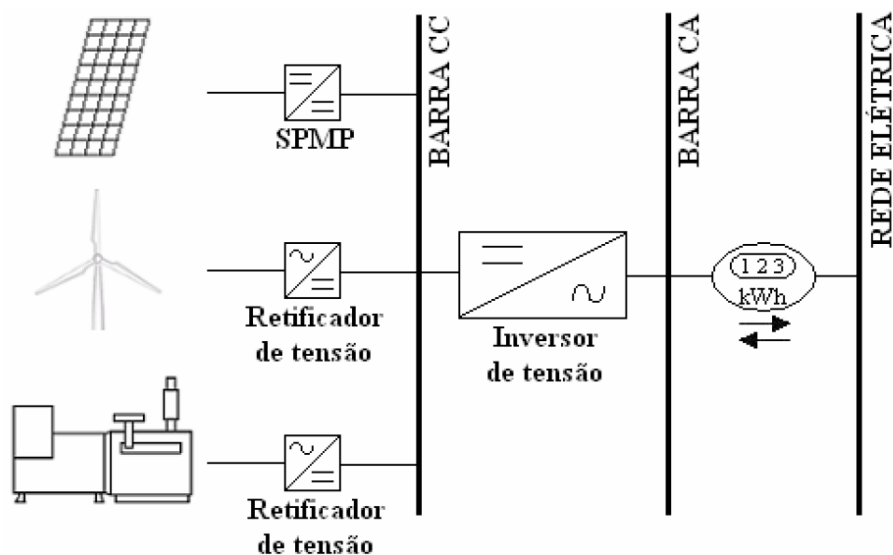


Figura 13 – Configuração de um sistema híbrido interligado [10]

4.3.2. Sistemas Isolados

Os Sistemas Isolados são caracterizados pela entrega direta da potência gerada a uma carga específica ou a uma rede elétrica não conectada à rede de distribuição. Na maioria das instalações isoladas a opção que vinha sendo utilizada era a de grupos geradores que apresentavam diversos problemas de logística de combustível, operação e manutenção. Os sistemas híbridos já se mostram fontes confiáveis e técnica e economicamente viáveis.

A principal característica de sistemas híbridos isolados é a necessidade do sistema de armazenamento que pode aumentar de tamanho quando não há um grupo gerador associado à planta. Existem dois tipos de distribuição no âmbito de sistemas isolados, os Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) e a as Mini-Redes (μ Grid – Micro Grid).

A Figura 14 mostra exemplos dos tipos de Sistemas Isolados.

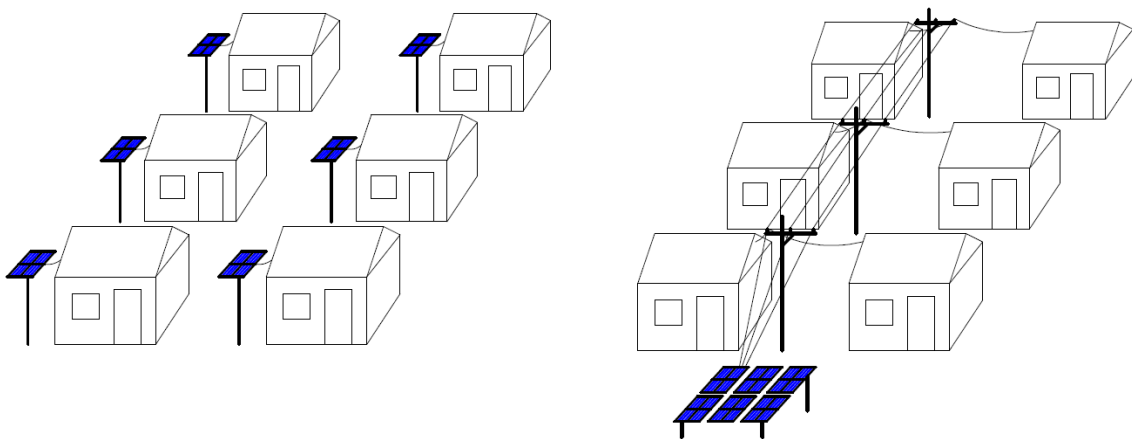


Figura 14 – Tipos de sistemas isolados: SIGFI e μ Grid, respectivamente [13].

O SIGFI se caracteriza pela ausência de rede de distribuição e apresentam-se como melhor opção para localidades muito afastadas, onde o fornecimento de óleo diesel é problemático e onde a distribuição de consumidores é esparsa.

Já o μ Grid oferece diversas vantagens em relação aos SIGFI, como a utilização otimizada do banco de baterias e uma maior disponibilidade de energia para consumo, devido aos diferentes níveis de consumo das unidades. O μ Grid é a melhor opção para localidades com área delimitada e mais próximas à distribuição de óleo diesel.

4.4. Estratégias de Operação

Após a fase de dimensionamento e configuração da topologia é necessário projetar as estratégias de operação do sistema, isto é, a otimização da geração de eletricidade. De acordo com Hauschild [13]:

“A estratégia de operação de um sistema híbrido visa otimizar a sua operação. Dentro do escopo de otimização da operação do sistema encontram-se diversos fatores: a minimização do consumo de óleo diesel, o melhor aproveitamento possível da energia proveniente das fontes renováveis, a maximização da vida útil do banco de baterias, o atendimento das cargas, entre outros.”

As questões principais da operação do sistema são: “como” e “quando” conectar a geração ao sistema? O como conectar as diferentes fontes de geração depende da topologia, que podem ser conectadas ao barramento, Figura 15 (a), ou diretamente no barramento CA, conforme a Figura 15 (b).

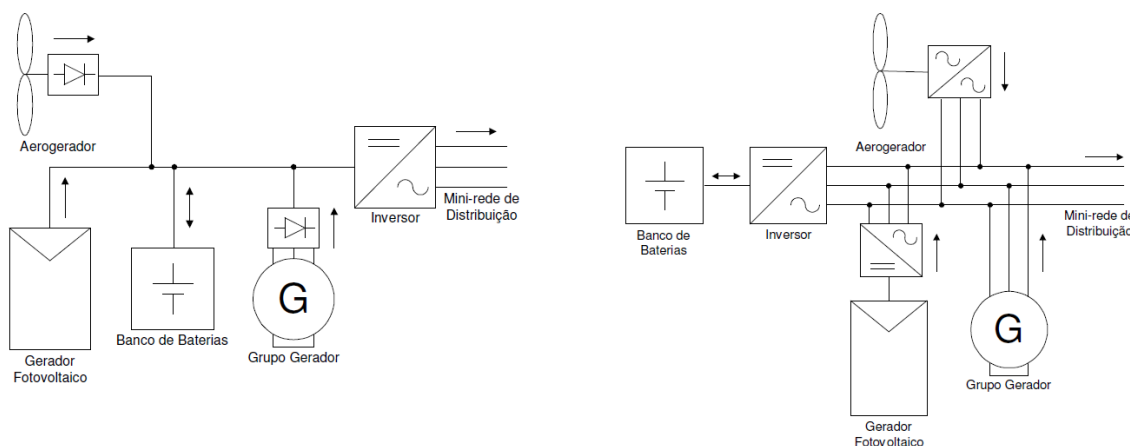


Figura 15– Configurações: gerador acoplado no barramento CC (a) ou CA (b) [13]

E a segunda questão sobre o “quando” conectar cada fonte de geração ao sistema, está relacionado à dependência da estratégia de despacho adotada, que pode ser subdividido em 3 estratégias:

4.4.1. Estratégia 1 – Estado de carga

Esta estratégia é utilizada, normalmente, em sistemas que possuem um gerador a combustão associada à planta. Esta é a estratégia mais simples, na qual o gerador é

acionado automaticamente quando a bateria atinge um nível mínimo de tensão. O gerador permanece conectado até que o estado da carga do banco de baterias atinja um determinado valor, medido pelo nível de tensão do banco. A Figura 16 ilustra esta estratégia.

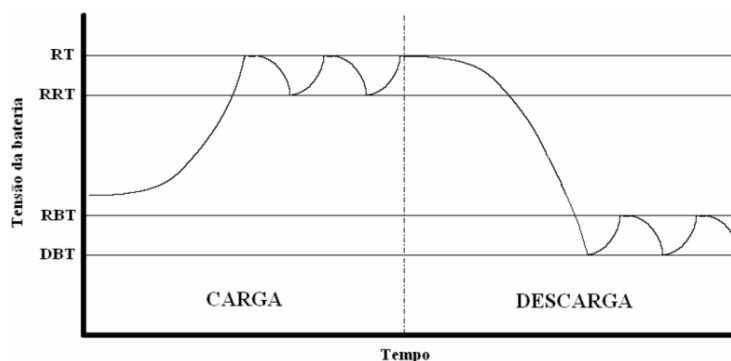


Figura 16 – Curva de carga e descarga do banco de baterias [10]

A partir da Figura 16 é possível notar que há completa injeção de corrente gerada na bateria até que esta atinja um nível máximo, chamada de regulação de tensão (RT), a geração se mantém até que a bateria atinge o nível máximo de reconexão por regulação de tensão (RRT). Quanto á desconexão da carga, o controle pode atuar por desconexão por baixa tensão (DBT) e reconexão por baixa tensão (RBT).

4.4.2. Estratégia 2 – Potência Demandada

Similar à estratégia de estado de carga, porém leva em conta a potência demandada na hora do acionamento do gerador. Sendo assim, quando o nível da bateria está muito baixo ou quando a potência demandada pela carga é muito grande o gerador é acionado.

4.4.3. Estratégia 3 – Ligados à rede de distribuição

Esta estratégia é a mais comum em sistemas que possuem geração fotovoltaica conectada à rede de distribuição. Quando a potência gerada pelo painel fotovoltaico supera a requerida pela carga, o excedente é fornecido para a rede, invertendo o fluxo de potência. Por outro lado, quando a potência demandada pela carga é maior que a geração dos painéis, a energia da rede é utilizada para compensar o déficit.

5. Tipos de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos

5.1. Fotovoltaico-eólico e fotovoltaico-eólico-diesel

Atualmente existem em funcionamento duas tecnologias de sistemas híbridos que conjugam geração fotovoltaica e eólica. A primeira conjuga somente as energias renováveis, ideal para sistemas isolados. Já a segunda utiliza também a geração diesel para complementar e aumentar a confiabilidade do sistema.

5.1.1. Fotovoltaico-eólico

A principal vantagem dos sistemas híbridos fotovoltaico-eólico é a complementaridade entre as fontes primárias. O comportamento da radiação solar ao longo do dia segue um padrão aproximadamente constante, atingindo o seu pico ao meio dia e decrescendo até o pôr-do-sol. Já, o comportamento do vento é complementar e possui elevadas velocidades no período de radiação solar baixa ou inexistente. Esta característica confere ao sistema maior confiabilidade e continuidade no serviço. A Figura 17 é um exemplo da complementaridade do potencial eólico e fotovoltaico, de um dia, para uma localidade isolada da Amazônia [17].

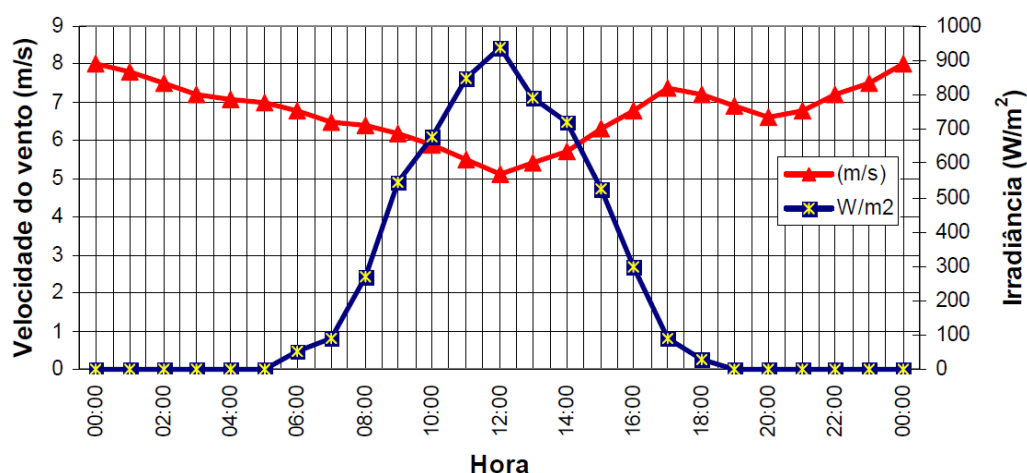


Figura 17 – Exemplo de complementaridade dos sistemas fotovoltaico e eólico.

Uma grande vantagem deste tipo de sistema híbrido é o emprego exclusivo de recursos renováveis. Todavia, devido às características intermitentes das fontes, faz-se necessário o uso de um sistema de armazenamento maior.

Este tipo de sistema híbrido seria uma ótima opção para países como o Brasil, com extenso litoral que proporciona grandes potenciais eólicos e clima tropical que possui grande incidência solar. Mapas eólicos indicam que os ventos no Brasil são fortes, constantes e sem rajadas, uma grande vantagem. Além disso, dados da ABEEÓLICA mostram que a energia proveniente dos ventos em 2012 é de 1,3% da matriz energética brasileira; deve alcançar 5,6% até 2014; podendo chegar à cerca de aproximadamente 42 a 45%, cerca de 10% a mais que a média europeia [18].

A configuração fotovoltaico-eólico é bastante utilizada em sistemas isolados, como em estações de telecomunicação que precisam gerir grandes quantidades de informação num curto tempo e precisam de um sistema de ar condicionado.

A Figura 18 apresenta o diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico onde a potência gerada pelas fontes renováveis é supervisionada por sinais de controle (linhas tracejadas) que alimentam a Unidade de Controle e por sua vez coordena o despacho da energia realizado pela Unidade de Condicionamento de Potência que a direciona para a carga ou para o Sistema de Armazenamento.

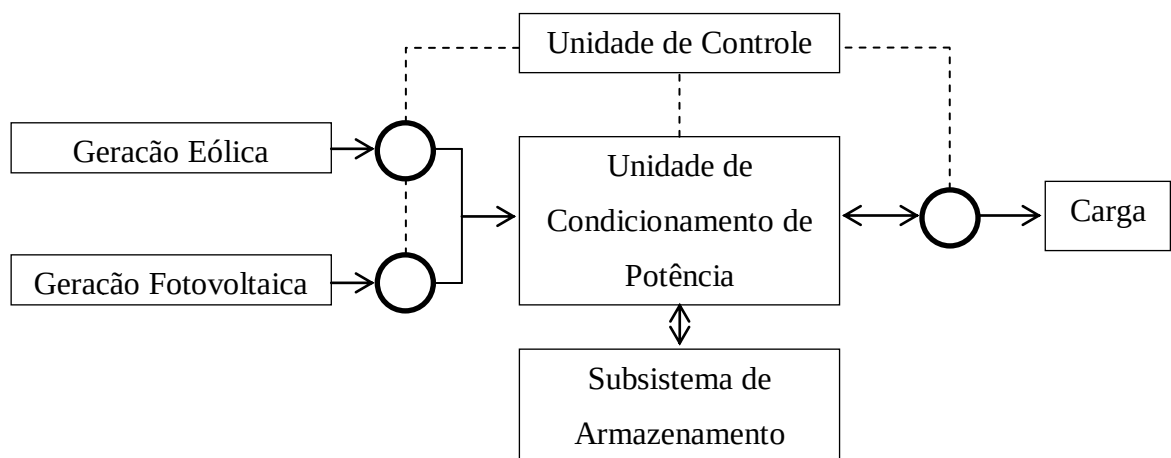


Figura 18 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico

5.1.1.1. Exemplo de Projetos

- Sistema Híbrido para alimentação de uma central de telecomunicações na costa do Mar Negro na Bulgária [19]:

Este exemplo de sistema consiste em uma turbina eólica de 1500W com diâmetro de 5 metros e com uma velocidade de rotação de 50 – 200 rpm. E um

sistema fotovoltaico de 900Wp, composto por 12 módulos de 75Wp cada. O controle de carga é formado por dois controladores independentes, um para cada fonte, carregando um banco de baterias composto por 24 baterias de chumbo-ácido com capacidade total de 450Ah, além de um inversor de 1500W (PWM).

- Sistema fotovoltaico-eólico de Joanes PA, Brasil [20]:

Sistema fotovoltaico-eólico concebido em 1997 pelo CEPEL, NREL e Grupo REDE/CELPA. Entrou em funcionamento de junho de 1997 para atender a 170 unidades consumidoras. É composto por um arranjo fotovoltaico de 10,2kWp com módulos de 55Wp e quatro aerogeradores de 10kW cada um e um banco de baterias de 200 unidades totalizando 1000 Ah além de um inversor rotativo de 52,5 kW. A Figura 19 é uma foto do empreendimento citado:



Figura 19 – Sistema híbrido de Joanes, PA.

5.1.2. Fotovoltaico-eólico-diesel

Este tipo de sistema opera de maneira similar ao sistema fotovoltaico-eólico, porém com a vantagem de incorporar mais uma fonte renovável permitindo a redução do consumo de óleo diesel, que por sua vez aumenta significativamente a confiabilidade do sistema atuando como *backup* para garantir o funcionamento durante possíveis períodos de indisponibilidade das fontes renováveis. Lembrando que este período de escassez é bastante reduzido ao conjugar as fontes fotovoltaica e eólica corretamente.

Devido à dependência do óleo diesel os sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel necessitam de um levantamento logístico do fornecimento de combustível, conforme foi descrito no capítulo 4, seção 4.2.3, a fim de provar a viabilidade do projeto e o custo da geração de energia.

Outra característica muito importante é o custo de manutenção deste sistema. Como as fontes possuem partes mecânicas (móveis), existe sempre um desgaste e a necessidade de reposição de peças, principalmente do grupo gerador diesel cuja mão-de-obra para este serviço é abundante, enquanto que o gerador eólico precisa de mão-de-obra especializada que nem sempre é encontrada nas regiões mais afastadas. A Figura 20 ilustra o diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel, similar à figura 18, porém neste tipo de sistema híbrido há a adição da Geração Diesel:

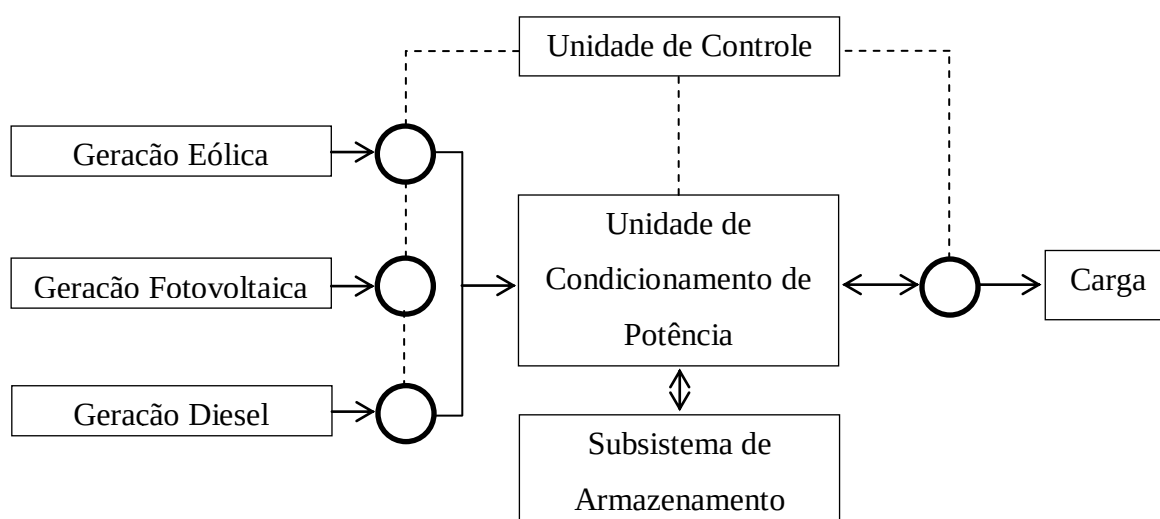


Figura 20 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel

5.1.2.1. Exemplos de Projetos

- Sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel na Vila São Tomé, PA [21]:

Sistema autônomo implantado em setembro de 2003 com financiamento da Petrobrás e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) com a finalidade de alimentar 67 residências que abrigam aproximadamente 230 pessoas. É composto por um gerador fotovoltaico de 3,2kWp com módulos de 80Wp, um aerogerador de 10kW instalado a 30m de altura e um grupo gerador diesel de 20kVA (16kW). Conta também com um sistema de armazenamento composto por um banco de baterias de 72kWh (40 unidades) além de um inversor estático de 15kW.

A carga da vila é suprida totalmente pelos subsistemas de geração fotovoltaico e eólico e o excedente da energia carrega o banco de baterias. Caso os subsistemas e o banco de baterias não sejam suficientes para atender a demanda solicitada, os subsistemas são desconectados e o gerador assume a carga da comunidade. Ressalta-se que o acionamento do grupo gerador não é feito de forma automática. A Figura 21 ilustra o aerogerador, os módulos fotovoltaicos e a construção que abriga o grupo gerador diesel.



Figura 21 – Foto do sistema híbrido na Vila São Tomé [21]

- Sistema fotovoltaico-eólico-diesel Sucuriju, AP [21]:

Sistema implantado na Vila Sucuriju, município de Amapá, estado do Amapá, financiado pelo Ministério de Minas e Energia e CNPQ. Foi concluído em 2008 e conta com uma capacidade de geração de aproximadamente 105,5kW distribuída em 20kWp de geração fotovoltaica, 37,5kW de geração eólica e 48kW de geração diesel. Além de nove inversores/retificadores de 5kW cada, seis inversores de 3,8kW e três transformadores de 20kW. A operação do sistema é completamente automatizada.

5.2. Fotovoltaico-Biomassa

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo).

A necessidade de obtenção de maior eficiência global dos sistemas híbridos motiva ainda mais o uso da biomassa como fonte geradora. No Brasil, esta pode ser considerada uma das mais promissoras devido à facilidade de obtenção da matéria prima, por exemplo, a indústria sucro-alcooleira produz grande parte da sua energia através da queima do bagaço da cana. As indústrias de celulose (papel) são os maiores produtores nacionais de energia elétrica através da biomassa com plantas com potência de 440kW até 210000kW [16].

No âmbito dos sistemas híbridos isolados, a pecuária é a que mais contribui na geração, através dos biodigestores que utilizam o gás metano produzido pela urina e fezes do gado e aciona um gerador a combustão adaptada para o gás metano. A energia gerada alimenta a fazenda e o excedente pode ser vendido às concessionárias de distribuição. A Figura 22 ilustra o diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-biomassa, similar às figuras 18 e 20, mas com a inserção de um gaseificador que é o responsável pela conversão da biomassa em gás, normalmente metano.

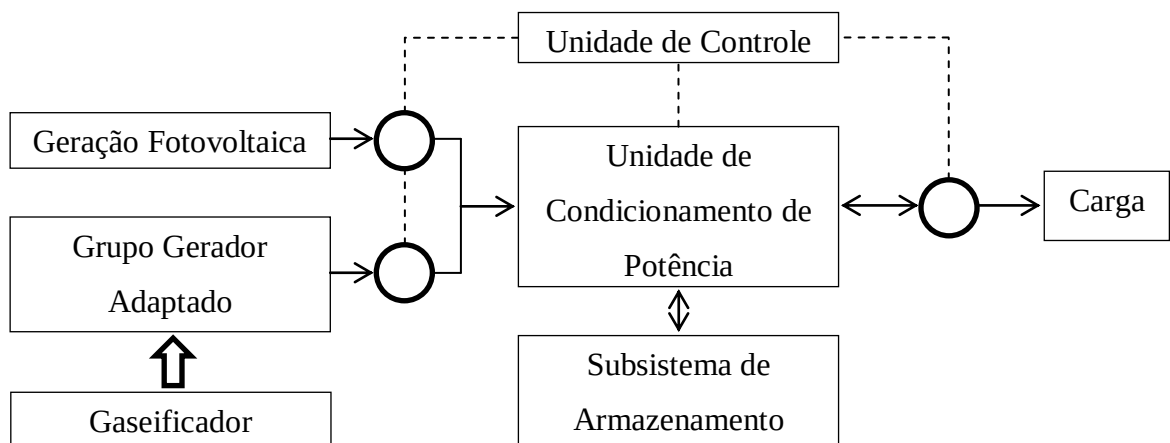


Figura 22 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-biomassa

5.2.1. Exemplos de Projetos

- Sistema híbrido fotovoltaico – biomassa (Torrão, Portugal) [22]:

Sistema híbrido instalado em uma piscina pública que utiliza energia solar térmica para aquecer a piscina através uma caldeira a biomassa, onde escamas de pinho são utilizadas. Esta utilização é facilitada devido à região ser uma das maiores produtoras de pinho e as escamas são o descarte da produção. A necessidade energética total (calor) é de 517.860 kWh/ano. Para uma área do plano de água de 312,5 m², são cerca de 60 coletores para suprir a área de 120 m². Há contribuição solar de 124.540 kWh/ano, sendo necessárias 100 toneladas de pinho/ano. O investimento inicial do sistema foi de 184.000 €, sendo o custo anual de pinho 2.500 €. O tempo de retorno é de aproximadamente 5,8 anos.



Figura 23 – Foto do Sistema Híbrido em Portugal [23]

Apesar da promessa de ser o sistema híbrido de maior utilização no Brasil, mesmo após a pesquisa deste projeto não foi possível encontrar exemplos de projetos que utilizem este sistema como fonte geradora de energia. Possíveis justificativas para este fato podem ser:

- Os grandes produtores de energia elétrica através da biomassa (indústria de celulose e suco-alcooleira) utilizam o rejeito da produção para gerar a própria energia, já possuem uma planta de geração bastante sólida e não têm motivos ou incentivos para investirem em sistemas híbridos. Além do custo da geração fotovoltaica ser muito elevado para grandes potências;

- Para os pecuaristas o custo de implantação do biodigestor é alto e ao conjugá-lo com outra forma de geração, aumenta significativamente o custo do projeto e portanto o sistema híbrido é desconsiderado.

5.3. Fotovoltaico-Célula Combustível

A tecnologia da célula combustível ainda está em estágio embrionário no Brasil e no mundo. Os custos de implantação ainda são muito elevados (principalmente devido ao eletrolizador). As células de combustível são uma opção atraente por causa da alta eficiência, modularidade e flexibilidade de combustível, no entanto o principal ponto fraco é a sua dinâmica lenta, isto é, um rápido aumento da carga resultaria numa queda significativa na tensão de saída da célula.

Ao associar a célula combustível a baterias de alta densidade de corrente e a módulos fotovoltaicos ou aerogeradores pode-se obter energia elétrica de qualidade e confiável.

Células a combustível podem ser integradas de duas formas a sistemas fotovoltaicos: como uma fonte independente de energia ou como parte de um sistema de armazenamento de energia conectado a um eletrolizador dedicado. O armazenamento de energia sob a forma de hidrogênio vem sendo estudado como uma forma limpa de aproveitamento energético. O uso de Célula a Combustível, convertendo o H_2 em energia elétrica, vem sendo estudada como forma de substituir os geradores a diesel no futuro.

A Figura 24 apresenta o “layout” de um sistema híbrido fotovoltaico com célula a combustível. O diagrama é similar aos anteriores, porém com a inserção de um Eletrolizador, responsável pela produção de hidrogênio através da água ou metano e do Tanque de armazenamento de hidrogênio que por sua vez alimenta a célula para a geração de energia elétrica.

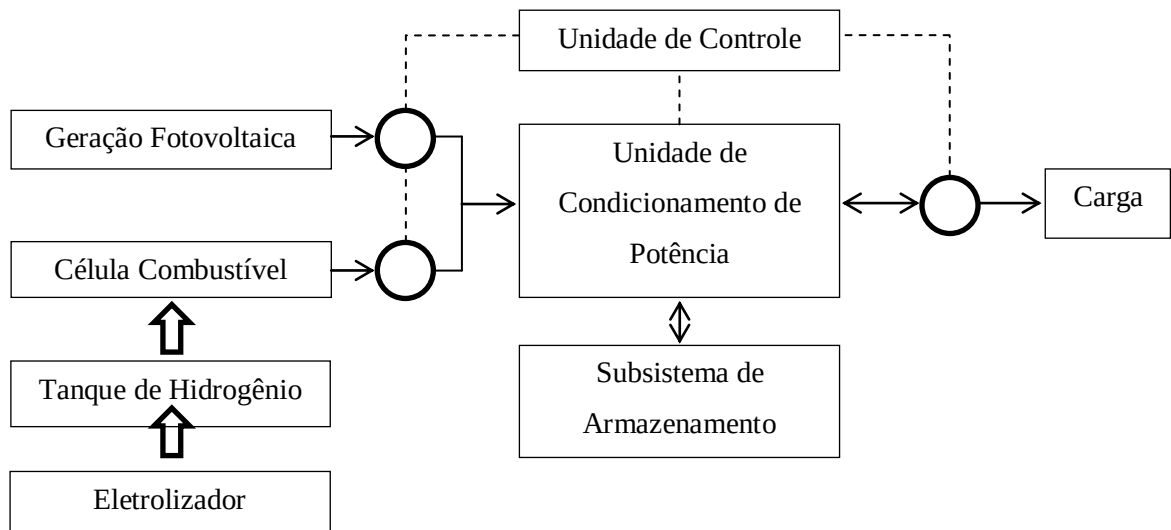


Figura 24 – Diagrama de um sistema híbrido fotovoltaico-célula a combustível

5.3.1. Exemplos de Projetos

- Sistema híbrido fotovoltaico-célula a combustível em Centro Canguçu, TO [25]:

Sistema híbrido instalado em uma área de proteção ambiental de difícil acesso, utilizado como base para pesquisadores e estudos da influência das mudanças climáticas nessa região da Amazônia. O sistema fotovoltaico é composto por 154 módulos de 124Wp em filmes finos flexível, o eletrolizador possui tecnologia *Proton Exchange Membrane* (PEM), capacidade máxima para produzir 1Nm³/h de hidrogênio a 99,95% de pureza, 6kW, 230V, 60Hz, a célula a combustível tem como características 5kW, 48Vcc. O sistema conta ainda com quatro inversores CC/CA de 6kW cada, 230V, 60Hz e quatro inversores/controladores CC/CA de 4,2 kW cada.



Figura 25 – Foto do sistema híbrido fotovoltaico-célula a combustível em Centro Canguçu

6. Aspectos Econômicos Associados a Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos estão associados a dois grupos: custos de despesa e de receita. O primeiro grupo está associado aos custos de investimento inicial, custos de operação e manutenção (O&M) e custos de reposição de equipamentos, enquanto o último grupo está relacionado ao lucro obtido com a venda da energia gerada, ou a uma eventual economia resultante da redução no consumo de combustível ou de outras taxas. Os custos de despesas são explicados abaixo:

- Custo de investimento inicial: engloba custos de projeto, aquisição, transporte de materiais e equipamentos e de instalação.
- Custos de O&M: englobam custos fixos anuais, relacionados ao pagamento de operadores, gastos com combustível, leituras, envio de faturas, procedimentos periódicos de manutenção preventiva e corretiva e outros;
- Custos de reposição de equipamentos (CR_p): está relacionado com as substituições dos componentes principais do sistema, causado pelo fim de suas vidas úteis. Como as vidas úteis possuem caráter aleatório intrínseco, na prática, determina-se para cada equipamento um tempo de vida útil contábil a partir de médias previamente conhecidas e do risco que o investidor opta por assumir, pois o equipamento pode durar por mais ou menos tempo da vida contabilizada.

A análise econômica neste presente trabalho é adaptada do módulo econômico do Hybrid2, com a utilização do Simulador Econômico de Sistemas Híbridos de Energia (SESHE), fundamentado na análise de ANDRADE [25].

O custo de implementação de um sistema híbrido é dado pelo custo dos equipamentos somado com os custos de instalação e transporte, como mostrado na Equação 2 abaixo:

$$S_{SH} = C_E + C_I + C_{Trans} \quad (2)$$

6.1. Custos de um Sistema Fotovoltaico

O investimento inicial de um sistema fotovoltaico é dependente de fatores como disponibilidade local de distribuidores, instaladores, demanda energética dos usuários, tamanho do sistema e preços internacionais. Além destes, são considerados fatores de extrema importância, à distância e facilidade de acesso entre o local em que o equipamento será adquirido e a instalação deste equipamento, com características peculiares de cada equipamento necessário para que a demanda energética seja atendida com qualidade, capacidade e quantidade correta e com a margem de lucro.

O maior percentual de custo para a implementação de um sistema fotovoltaico, aproximadamente 70%, está relacionado aos *custos de instalação e equipamentos*. Os custos de instalações e equipamentos englobam a compra, transporte e instalação dos sistemas fotovoltaicos.

Para que se mantenha uma boa conservação do sistema de operação fotovoltaico durante sua vida útil são necessários os *custos de operação e manutenção*. Em geral, para sistemas fotovoltaicos, a manutenção dos equipamentos é dada por limpeza adequada e manutenção do nível de água das baterias, no caso dessas não serem seladas. Logo, o custo de manutenção é baixo e representa apenas de 3 a 5% do custo total do sistema [26]. Os baixos *custos O&M* são a principal vantagem do sistema fotovoltaico.

Quando as baterias chegam ao fim de suas vidas úteis, elas precisam ser repostas. Este custo é chamado de *custo de reposição* e representa cerca de 20 a 27% do custo total do sistema. A vida útil média das baterias, apesar de serem dependentes da corrente de carga e descarga e da profundidade da recarga, seria de aproximadamente 4 anos [26], já a reposição dos modelos fotovoltaicos, em geral, não é contabilizada neste custo pois grande parte dos fabricantes de tecnologias de silício mono e policristalino oferecem 25 anos de garantia para a peça [12].

Segundo Pinto [12] grande parte dos *custos de instalação e equipamentos* para um sistema fotovoltaico está concentrada no modelo fotovoltaico, representando cerca de 50 a 65%. Este custo está relacionado a potência de pico e é representado por \$/Wp. No Brasil, ainda não há produção em larga escala desses módulos fotovoltaicos e para os cálculos de custo é necessário seguir a tendência internacional [27]. Segundo dados do site “Solarbuzz” [28] o preço no mercado americano vem sofrendo queda e o valor para janeiro de 2012 estão em \$ 2,42/Wp, conforme mostrado na Figura 26.

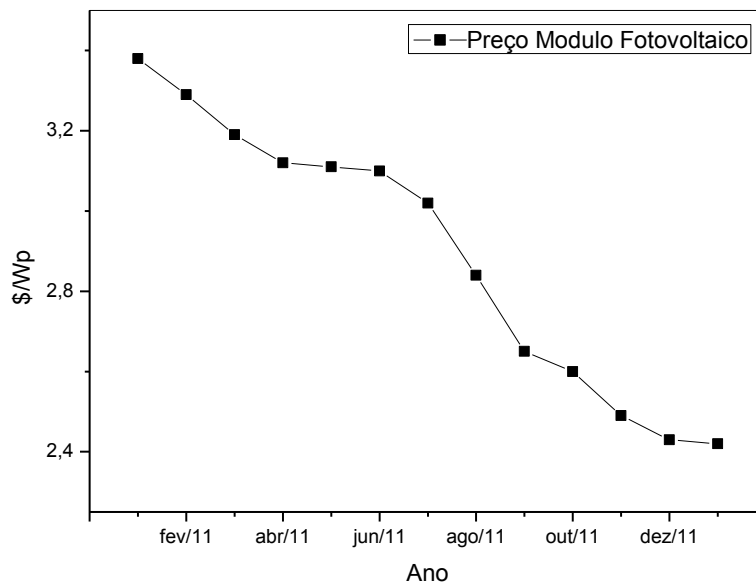


Figura 26 - Variação do preço do módulo fotovoltaico

6.2. Custos de um Sistema Eólico

Os custos para a implementação de um Sistema Eólico são dependentes de variáveis como: estudo de viabilidade técnica, negociações e desenvolvimento, projetos de engenharia, custos de equipamentos, recurso eólico disponível no local de instalação, custo da turbina eólica e o tamanho do empreendimento, fazendo com que o cada projeto se torne um estudo de caso.

Os *custos de operação e manutenção* incluem despesas com equipamentos, despesas como arrendamento do uso do terreno e seguros, manutenção preventiva nos equipamentos e nas linhas de transmissão, contingências, dentre outros. Comumente, o *O&M* das turbinas é fornecido pelo próprio fabricante. Os *custos de O&M* são superiores aos dos sistemas fotovoltaicos devido às estruturas de sustentação e do próprio aerogerador que, devido à presença de partes móveis, deve ser submetido a uma rotina de manutenção preventiva.

O maior custo de um projeto eólico é o custo do aerogerador, já que há variação de centenas de watts a alguns megawatts se este fato é responsável pela considerável variação de preço. Para sistemas de pequeno porte o custo da energia gerada é maior do que para sistemas de grande porte. A Tabela 3 mostra a porcentagem de custo de cada etapa do projeto para a instalação de um sistema eólico.

Tabela 3 – Custos iniciais de projetos para implementação de um sistema eólico [29]

Categoria de custos iniciais do projeto	Fazenda eólica de médio/grande porte (%)	Fazenda Eólica de pequeno porte (%)
Estudo de viabilidade	menos de 2	1 – 7
Negociações de desenvolvimento	1 – 8	4 – 10
Projeto de engenharia	1 – 8	1 – 5
Custo de equipamentos	67 – 80	47 – 71
Instalações e infraestrutura	17 – 26	13 – 22
Diversos	1 – 4	2 – 15

Os custos de investimento inicial da geração eólica associados a sistemas híbridos são dados através do custo da torre, suas fundações, cabeamento e acessórios, como conectores e chaves. As torres tubulares autoportantes são mais onerosas que torres treliçadas sustentadas por cabos de aço, com os custos variando proporcionalmente à altura da torre. Torres treliçadas de ferro de 30 m de altura são muito utilizadas na instalação de aerogeradores de pequeno porte e em 2008 custavam cerca de R\$20.000,00 a 30.000,00 [12].

Torres de aço galvanizado são recomendadas para regiões com altos níveis de umidade e salinidade e conseqüentemente é necessária manutenção periódica. Em condições climáticas adversas ou rotinas de manutenção inadequadas a substituição da torre é necessária em períodos curtos.

O levantamento das características de turbinas pode ser analisado a partir de fontes de dados que são catálogos enviados pelos fabricantes e a publicação anual da Bundesverband Wind Energie e. V. BWE, com preços e detalhes técnicos das principais turbinas eólicas disponíveis no mercado [29].

Segundo dados de 2012 da ABEEÓLICA, no Brasil a energia eólica é a segunda mais barata, perdendo apenas para a hidráulica (entre R\$ 80,00 e R\$ 90,00 por KW/h); já no cenário mundial a energia eólica brasileira é a mais barata do mundo custando cerca de R\$ 105,00/MWh, enquanto a europeia sai por R\$ 300,00/MWh.

Existe um Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), descrito no Decreto nº 5.025, de 2004 [30], no qual a compra de energia produzida por fontes eólicas e biomassa é garantida por 20 anos. Este programa de incentivo é considerado responsável pelo crescimento da produção de energia elétrica a partir de fontes eólicas, porém não engloba todas as fontes renováveis, como por exemplo, a fotovoltaica.

6.3. Custos de um gerador a combustão

O investimento inicial de sistemas de geração com combustíveis fósseis tem como maior custo a aquisição do grupo gerador e de seus acessórios. Esses tipos de sistemas de geração possuem o custo inicial baixo, porém ao longo da vida útil seus custos são elevados.

A vida útil do sistema depende do tempo no qual ele ficará em uso e pode ser prolongada se operado de forma isolada e contínua [12]. Se utilizado em sistemas híbridos baseados no recurso não renovável a vida útil do sistema se reduz drasticamente.

Possui maior *custo O&M* dentre os sistemas citados. Este alto custo está relacionado aos custos de combustível, troca de peças, óleos lubrificantes e custos de manutenção. O combustível é o maior destes custos, podendo ser ainda maior se o sistema estiver instalado em localidades remotas.

6.4. Custos de um Sistema Híbrido

Os custos de implantação de um projeto de sistemas híbridos são caracterizados pela soma dos custos de todas as fontes primárias de geração. Por este motivo a análise dos recursos naturais do local e da logística de transporte de combustíveis é de suma importância no projeto. E com base nesses dados é possível dimensionar o sistema de geração e diminuir o custo da energia gerada.

Para que a análise de custos de um sistema híbrido seja a mais eficiente possível, deve-se utilizar a Equação (2) descrita na seção 6, que é complementada na Equação 3:

$$C_E = C_{TE} + C_{PV} + C_{PVR} + C_{MPPT} + C_D + \Delta_{Bat} \cdot C_{Bat} + C_{CP} + C_{Opc} + C_{Dump} \quad (3)$$

Onde:

C_{TE} – custo total das turbinas eólica;

C_{PV} – custo total dos painéis fotovoltaicos;

C_{PVR} – custo do racker e/ou tracker dos painéis fotovoltaicos;

C_{MPPT} – custo do mppt (maximum power point tracker);

C_D – custo total dos geradores diesel;

Δ_{Bat} – fator de escala para baterias;

C_{Bat} – custo total das baterias;

C_{CP} – custo total dos conversores de potência;

C_{OpC} – custo total do equipamento da carga opcional;

C_{Dump} – custo total do “dumpload”.

Para calcular o custo total das turbinas eólicas, os equipamentos são separados de acordo com os barramentos que serão conectados, CA ou CC conforme Equação 4:

$$C_{TE} = \Delta_{TE,CA} (C_{TE,CA} + C_{T,CA}) + \Delta_{TE,CC} (C_{TE,CC} + C_{T,CC}) \quad (4)$$

Onde:

$\Delta_{TE,CA}$ – fator de escala para turbinas eólicas do barramento CA;

$C_{TE,CA}$ – custo das turbinas eólicas do barramento CA;

$C_{T,CA}$ – custo das torres do barramento;

$\Delta_{TE,CC}$ – fator de escala para turbinas eólicas do barramento CC;

$C_{TE,CC}$ – custo das turbinas eólicas do barramento CC;

$C_{T,CC}$ – custo das torres do barramento CC.

Além destes, o custo de instalação dos equipamentos é necessário para uma correta análise financeira do projeto, conforme mostrado na Equação 5:

$$C_I = \Delta_{I,TE,CA} C_{I,TE,CA} + \Delta_{I,TE,CC} C_{I,TE,CC} + C_{I,PV} + C_{I,D} + \Delta_{Bat} C_{I,Bat} + C_{I,CP} + C_{I,Dump} \quad (5)$$

Onde:

$C_{I,TE,CA}$ – custo de instalação das turbinas eólicas do barramento CA;

$C_{I,TE,CC}$ – custo de instalação das turbinas eólicas do barramento CC;

$C_{I,PV}$ – custo de instalação dos painéis fotovoltaicos;

$C_{I,D}$ – custo de instalação dos geradores diesel;

$C_{I,Bat}$ – custo de instalação do banco de bateria;

$C_{I,CP}$ – custo de instalação dos conversores de potência;

$C_{I,Dump}$ – custo de instalação do “dumpload”.

Os dados de Δ_{Bat} , $\Delta_{\text{I,TE,CC}}$ e $\Delta_{\text{I,TE,CA}}$ são usados para linearizar os custos associados, respectivamente, ao banco de baterias turbinas eólicas.

6.5. Tempo de retorno de investimentos

O tempo de retorno de investimentos, ou *Payback*, é uma análise financeira que estima o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor do investimento. No contexto dos sistemas híbridos, o lucro obtido pode ser caracterizado pela economia na conta de energia em sistemas interligados à rede ou pela economia de combustível em sistemas isolados.

Quando a finalidade do sistema interligado é apenas a injeção de energia há relação apenas da venda de energia que é entregue à rede. Contabiliza-se a energia produzida pelo sistema híbrido que é injetada na rede através de um medidor de energia unidirecional. A análise da viabilidade econômica destes projetos é relacionada ao valor da venda da energia. Já a finalidade do sistema interligado quando há intercâmbio de energia com a rede é atender a necessidade do usuário e apenas o excedente de energia é injetado na rede elétrica.

O tempo de retorno dos investimentos é dado por ANDRADE [25] através das equações a seguir. A Equação (6) fornece o Período de Retorno Simples (PSR):

$$PSR = \frac{C_S}{L_L} \quad (6)$$

Onde:

C_S – custo do capital instalado;

L_L – lucro líquido do sistema.

A equação (7) mostra a Taxa Interna de Retorno (TIR):

$$TIR = \sum_{n=1}^N \frac{L_L(n)}{(1+r)^n} \quad (7)$$

7. Exemplo de Aplicação

Neste capítulo será apresentado um estudo baseado no projeto do Sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel da Vila São Tomé com a finalidade de exemplificar, apresentar valores e melhorar o entendimento das abordagens sobre dimensionamento e custos de sistemas híbridos de geração por fontes renováveis apresentadas neste trabalho, além de uma análise das possíveis contingências presentes em um sistema fotovoltaico-eólico-diesel, para caracterizar a importância dos sistemas híbridos.

7.1. Apresentação do estudo de Caso

O estudo de caso será baseado no Sistema fotovoltaico-eólico-diesel instalado na Vila São Tomé, município de Maracanã - Pará. Este sistema foi implantado em 2003 com o intuito de abastecer 67 unidades consumidoras (incluindo residências, escola, comércio e igreja), a população residente é de aproximadamente 226 habitantes distribuídos em 40 famílias em uma área de cerca de 25 hectares. Suas principais atividades são o extrativismo e pesca do caranguejo para subsistência.

7.2. Descrição do sistema

O sistema possui as seguintes características:

Sistema eólico

- 1 Aerogerador de 10 kW.
- 1 Controlador de carga VCS –10 (retificador).
- 1 Torre treliçada estaiada (30 m de altura).

Sistema solar fotovoltaico

- 1 arranjo fotovoltaico de 3,2 kWp (módulos de 80 Wp).

Comuns às fontes de energia

- 1 Banco de baterias - 40 unidades chumbo-ácido 12 VCC/150 Ah (série/paralelo 120 VCC).
- 1 Inversor estático de 15 kW.

Sistema diesel-elétrico

- 1 Grupo gerador a diesel de 20 kVA.

De acordo com as condições do banco de baterias, o sistema renovável (fotovoltaico + eólico) supre a carga totalmente. Se a geração renovável não for suficiente para atender a demanda solicitada este sistema é desconectado e o grupo gerador diesel é acionado para suprir as necessidades da comunidade.

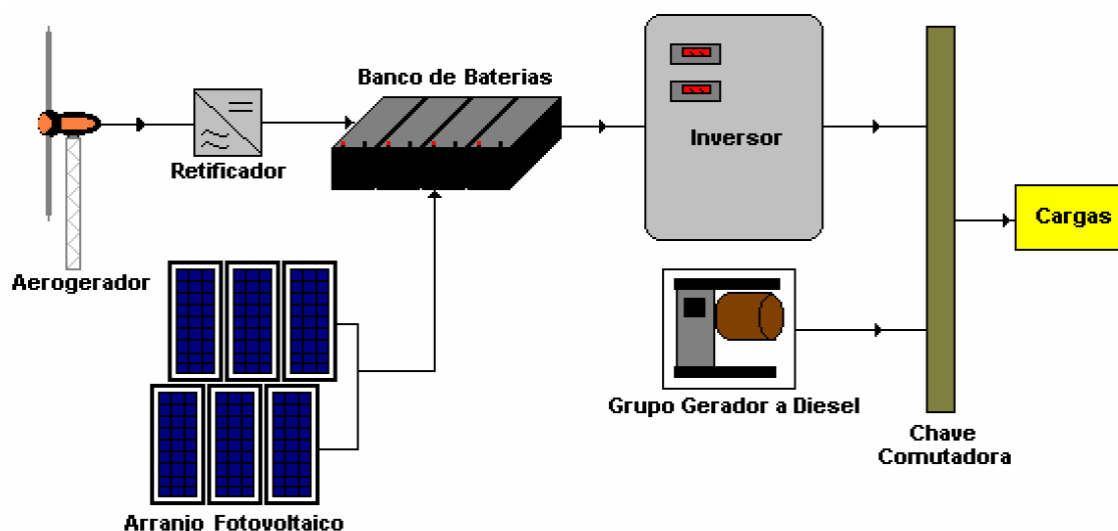


Figura 27 – Diagrama de Blocos de São Tomé

7.3. Determinação da radiação solar

A determinação deste recurso é de suma importância para o projeto e pode viabilizar, ou não, a utilização da energia fotovoltaica. Os dados foram obtidos do programa SunData diretamente no site do CRESESB [3]. Este programa destina-se ao cálculo da radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional.

Dados obtidos:

Tabela 4 - Dados da Radiação diária média

Ângulo	Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Plano Horizontal	0° N	4,33	4,17	4,06	3,92	4,42	4,56
Ângulo igual à latitude	6° N	4,3	4,16	4,06	3,93	4,44	4,59
Maior média anual	3° N	4,33	4,17	4,06	3,92	4,42	4,56
Maior mínimo mensal	19° N	4,04	4	4	3,98	4,62	4,85
		Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
		5,19	5,83	5,78	6,19	6	5,17
		5,23	5,86	5,78	6,17	5,96	5,13
		5,19	5,83	5,78	6,19	6	5,17
		5,51	6,04	5,77	5,93	5,56	4,75

7.4. Determinação do Potencial Eólico

O Potencial Eólico também foi obtido pelo site do CRESESB, e os dados obtidos foram os seguintes:

Tabela 5 - Dados do vento Sazonal a 50m de altura

Dados de Vento Sazonal a 50 m de Altura				
Grandeza	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov
velocidade	5,3792	3,8066	5,3353	7,6971
fator k	2,1193	1,8244	2,1859	3,3517
fator c	6,852	4,8439	3,4914	4,8517

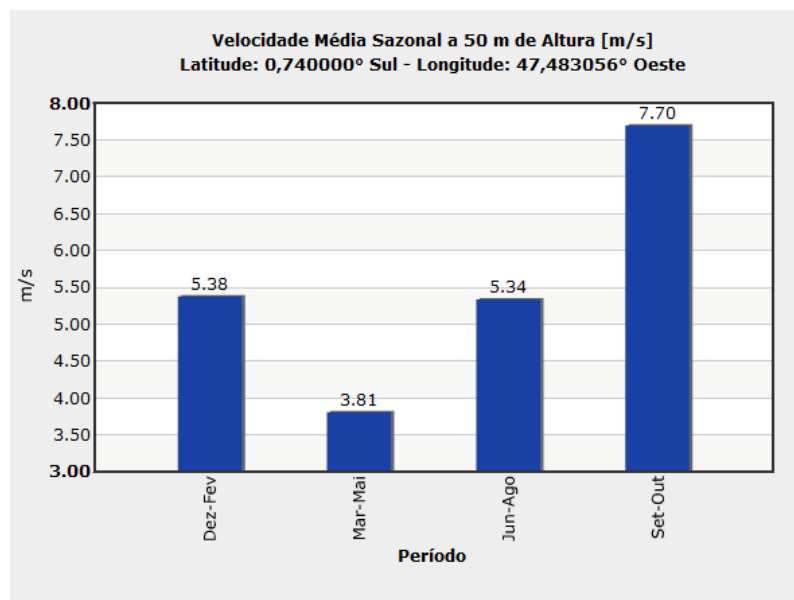


Figura 28 – Velocidade média sazonal

Após a determinação dos potenciais eólico e fotovoltaico é possível perceber na Figura 29 um paralelismo entre os recursos naturais. Nos meses de pior radiação solar, a velocidade do vento também chega ao seu pior momento. Para otimizar o sistema, o dimensionamento pode ser feito para gerar a energia suficiente nestes piores meses do ano, garantindo assim um fornecimento ótimo de energia durante o restante do ano.

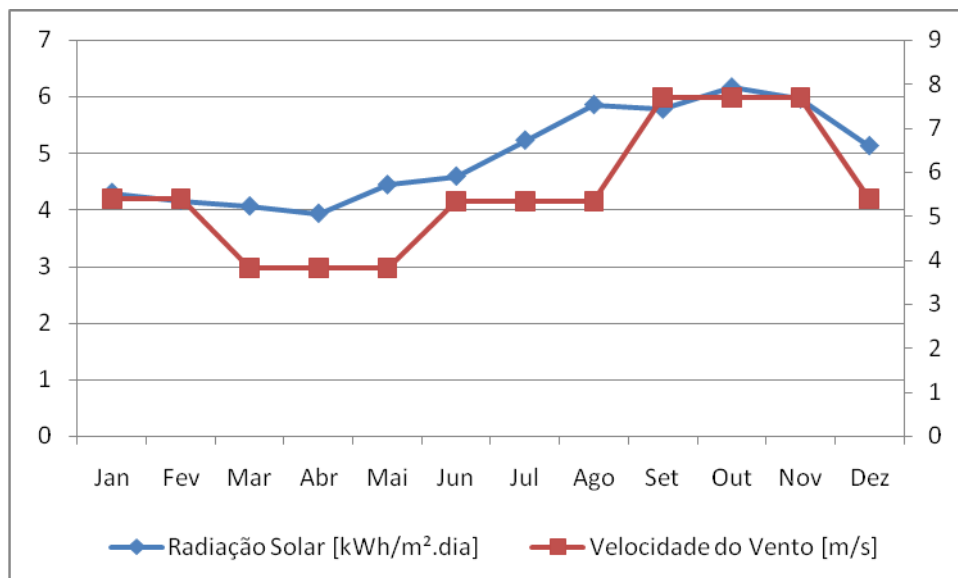


Figura 29 – Recursos solar e eólico

A Figura 30 ilustra a complementaridade dos recursos solar e eólico durante o dia. O perfil da radiação solar possui seu pico ao meio dia (marcador quadrado) e a velocidade do vento atinge seu ápice à noite (marcador triângulo).

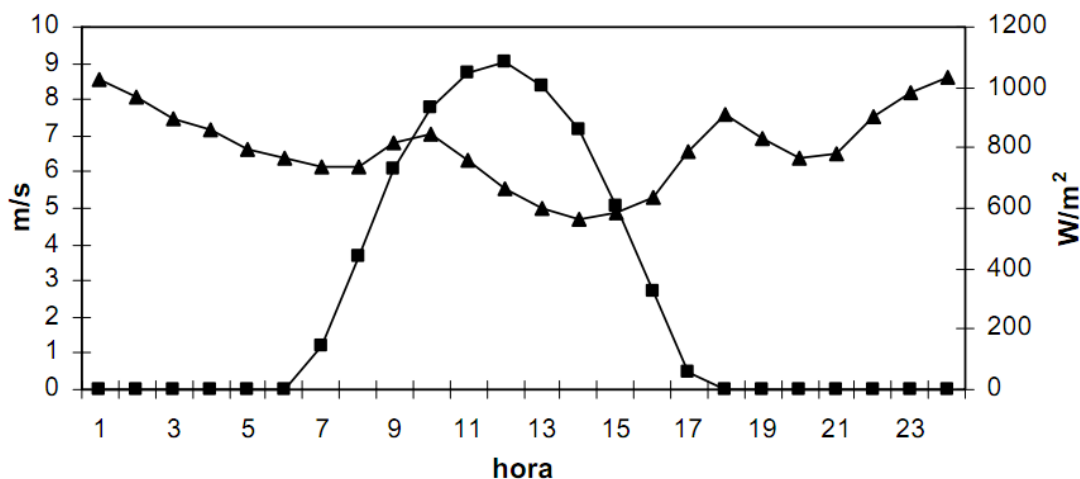


Figura 30 – Complementaridade diária dos recursos solar e eólico [10]

7.5. Logística do Fornecimento de Óleo Diesel

O acesso à vila de São Tomé pode ser feito pela malha rodoviária, alternando rodovias federais e estaduais, em um tempo médio de 3 horas, ou pela malha rodoviária, até o município de Maracanã, e deste local por via fluvial utilizando-se barcos de

pequeno porte. Este aspecto pode elevar o preço do combustível na região e de acordo com [31], este preço pode chegar a R\$2,00/litro.

7.6. Dimensionamento

O dimensionamento deste sistema híbrido prioriza a geração através das fontes fotovoltaica e eólica. O sistema diesel entra em ação somente durante alguma falha (emergência, manutenção, etc.), escassez das fontes renováveis (menos provável) ou aumento da demanda. Para atender à demanda durante o ano inteiro, o sistema renovável foi dimensionado para gerar toda energia demandada pela vila durante os piores meses de radiação e velocidade do vento que são: Março, Abril e Maio.

Apesar de aparentemente o gerador diesel não apresentar importância significativa na geração de energia, ele é de suma importância para elevar os níveis de confiabilidade e segurança do sistema. Como as fontes renováveis são aleatórias e intermitentes a geração diesel é a melhor forma de complementar a geração em sistemas isolados, e quando associado com energias renováveis em um sistema híbrido pode-se obter grande economia no consumo de combustível.

7.7. Análise Econômica

Nesta análise econômica será levado em conta que a geração renovável consegue fornecer uma potência de 10kW nos melhores meses do ano (sendo 7 kW da geração eólica e 3 kW da geração fotovoltaica), para carga acima deste valor, o gerador diesel de 20 kVA é acionado.

Os custos iniciais do sistema híbrido de São Tomé são explicitados a seguir [31]:

Tabela 6 – Custos dos sistemas

Descrição	R\$	%
Geração Renovável	R\$ 134.132,57	49,50%
Geração Diesel	R\$ 11.940,00	4,41%
Materiais elétricos e construção	R\$ 17.352,50	6,40%
Serviços	R\$ 88.011,63	32,48%
Acessórios	R\$ 19.533,50	7,21%
TOTAL	R\$ 270.970,20	100,00%

Pode-se perceber que a maior parcela de custo é relacionada à aquisição dos equipamentos da geração renovável (49,5%). Ao comparar com a geração diesel este valor chega a ser 11 vezes menor do que a geração renovável.

A curva de consumo do gerador segue abaixo:

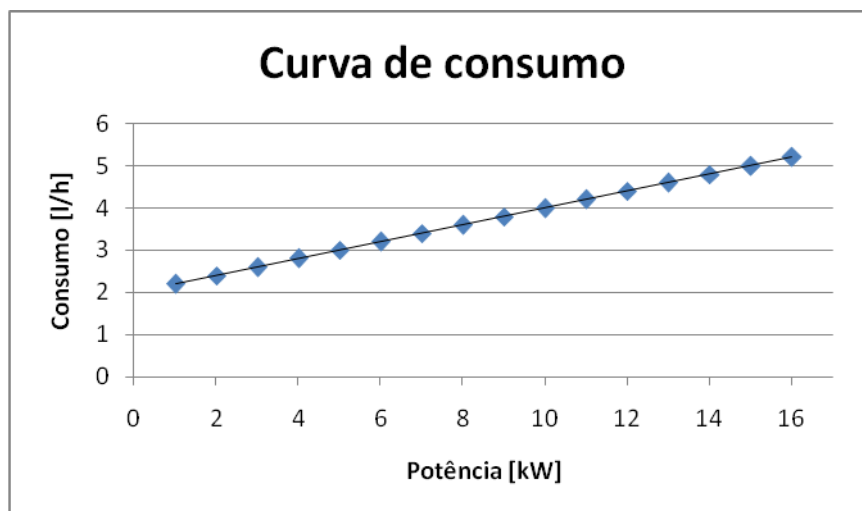


Figura 31 – Curva de consumo do gerador

A análise levará em conta o custo com óleo diesel a R\$2,00/litro e com o subsídio do CCC este valor reduz-se para 26% do valor integral (R\$0,52).

Tabela 7 – Balanço energético e financeiro sem a CCC

			Sem CCC		
	kW	litros/hora	Despesa com óleo Diesel	Economia gerada [R\$/litros/hora]	Custo mensal
Somente Renovável	1	2,2	R\$ 0,00	R\$ 4,40	R\$ 3.168,00
	2	2,4	R\$ 0,00	R\$ 4,80	R\$ 3.456,00
	3	2,6	R\$ 0,00	R\$ 5,20	R\$ 3.744,00
	4	2,8	R\$ 0,00	R\$ 5,60	R\$ 4.032,00
	5	3	R\$ 0,00	R\$ 6,00	R\$ 4.320,00
	6	3,2	R\$ 0,00	R\$ 6,40	R\$ 4.608,00
	7	3,4	R\$ 0,00	R\$ 6,80	R\$ 4.896,00
	8	3,6	R\$ 0,00	R\$ 7,20	R\$ 5.184,00
	9	3,8	R\$ 0,00	R\$ 7,60	R\$ 5.472,00
	10	4	R\$ 0,00	R\$ 8,00	R\$ 5.760,00
Somente Diesel	11	4,2	-R\$ 8,40	-	-R\$ 6.048,00
	12	4,4	-R\$ 8,80	-	-R\$ 6.336,00
	13	4,6	-R\$ 9,20	-	-R\$ 6.624,00
	14	4,8	-R\$ 9,60	-	-R\$ 6.912,00
	15	5	-R\$ 10,00	-	-R\$ 7.200,00
	16	5,2	-R\$ 10,40	-	-R\$ 7.488,00

Tabela 8 – Balaço energético e financeiro com a CCC

			Com CCC		
	kW	litros/hora	Despesa com óleo Diesel	Economia gerada [R\$/litros/hora]	Custo Mensal
Somente Renovável	1	2,2	R\$ 0,00	R\$ 1,14	R\$ 823,68
	2	2,4	R\$ 0,00	R\$ 1,25	R\$ 898,56
	3	2,6	R\$ 0,00	R\$ 1,35	R\$ 973,44
	4	2,8	R\$ 0,00	R\$ 1,46	R\$ 1.048,32
	5	3	R\$ 0,00	R\$ 1,56	R\$ 1.123,20
	6	3,2	R\$ 0,00	R\$ 1,66	R\$ 1.198,08
	7	3,4	R\$ 0,00	R\$ 1,77	R\$ 1.272,96
	8	3,6	R\$ 0,00	R\$ 1,87	R\$ 1.347,84
	9	3,8	R\$ 0,00	R\$ 1,98	R\$ 1.422,72
	10	4	R\$ 0,00	R\$ 2,08	R\$ 1.497,60
Somente Diesel	11	4,2	-R\$ 2,18	-	-R\$ 1.572,48
	12	4,4	-R\$ 2,29	-	-R\$ 1.647,36
	13	4,6	-R\$ 2,39	-	-R\$ 1.722,24
	14	4,8	-R\$ 2,50	-	-R\$ 1.797,12
	15	5	-R\$ 2,60	-	-R\$ 1.872,00
	16	5,2	-R\$ 2,70	-	-R\$ 1.946,88

As despesas são apresentadas com sinal negativo e o lucro com sinal positivo.

Para uma demanda de até 10kW, na qual o sistema renovável tem capacidade de suprir totalmente, não há consumo de óleo diesel, apontando que o sistema híbrido associado à geração diesel pode gerar grandes economias na operação do sistema ao consumir menos óleo diesel. Neste exemplo, a economia pode chegar à R\$ 5.760,00 por mês (sem o subsídio da Conta de Consumo de Combustível - CCC) e R\$1.497,50 (com o subsídio da CCC).

Outro aspecto relevante a ser levado em conta é o tempo de retorno do investimento, citada na seção 6.5, que foi feito na instalação do sistema híbrido renovável que possui o custo dado pela tabela 6.

$$PSR_{COM\ CCC} = \frac{C_S}{L_L} = \frac{R\$ 134.132,57}{R\$ 1.497,50/mês} = 89 \text{ meses}$$

$$PSR_{SEM\ CCC} = \frac{C_S}{L_L} = \frac{R\$ 134.132,57}{R\$ 5.769,00/mês} = 23 \text{ meses}$$

7.8. Análise de Contingências

Esta análise se baseia no estudo das possíveis contingências (falhas) que podem acontecer no sistema e as consequências seguidas pela mesma. Esta seção será dividida em duas partes, a primeira analisa as contingências de curto e médio prazo enquanto que a segunda considera que a contingência seja permanente ou longo prazo.

7.8.1. Contingências de curto prazo e médio prazo

Inicialmente, faz-se a lista das contingências possíveis seguida pelas causas.

Tabela 9 - Contingências

Nº	Contingência	Causa
1	Desligamento do sistema fotovoltaico	Manutenção/falha/noite
2	Desligamento do sistema eólico	Manutenção/falha
3	Desligamento do gerador diesel	Manutenção/falha
4	Desligamento do fotovoltaico e eólico	Manutenção/falha

Para melhor demonstração, segue-se uma análise caso a caso.

7.8.1.1. Desligamento do sistema fotovoltaico

O desligamento do sistema fotovoltaico acontece todos os dias à noite, mas não afeta o fornecimento, pois as baterias fornecem a potência necessária e no caso da demanda se elevar demais o gerador a diesel pode ser utilizado.

Caso ocorra desligamento durante o dia, o sistema eólico também supre boa parte da demanda em conjunto com o banco de baterias, e caso a demanda supere a potência fornecida por ambos o sistema diesel pode assumir sem problemas toda carga do sistema.

Esta falta pode ser compensada de três formas: com atuação do gerador diesel, conforme citado anteriormente, com o aumento da capacidade de geração do sistema eólico ou com o aumento do banco de baterias. Qual destas formas seria a mais viável? A opção imediata é gerar energia pelo grupo gerador, mas dependendo do tempo de persistência da falta o custo da geração diesel ficaria muito elevado. Utilizando como

base o caso deste trabalho, se a geração fotovoltaica permanecer desconectada por um mês, o custo de geração diesel seria de R\$7.488,00 conforme mostrado na Tabela 7. Considerando que o custo de um aerogerador de pequeno porte (3kW – suprimindo a mesma potência do painel fotovoltaico) na faixa de R\$30.000,00 [32] para justificar o seu uso, o sistema fotovoltaico deveria ficar, no mínimo, 4 meses desconectado do sistema.

Analisando o aumento do banco de baterias, para suprir a queda do sistema fotovoltaico, pode-se aumentar o banco em 50% para melhorar o desempenho. Com o custo de R\$750 a unidade da bateria Moura Clean 150 Ah [32] o custo total seria de R\$15.000,00 e para justificar o seu uso o sistema teria que ficar 2 meses sendo somente alimentado pelo gerador diesel. Logo, a geração diesel continua sendo uma boa forma de *backup* dos sistemas híbridos, desde que o tempo de parada não seja muito elevado.

7.8.1.2. Desligamento do sistema eólico

Se o gerador eólico for desconectado durante o dia, sistema fotovoltaico supre parte da energia necessitada pela vila e pode ser complementada pela carga remanescente nas baterias e pelo gerador diesel, sempre mantendo a continuidade e a qualidade no fornecimento de energia elétrica.

No caso da desconexão noturna, as baterias suprem a potência solicitada em conjunto com o gerador diesel, que só entra em ação após a descarga completa das baterias.

Da mesma forma que a contingência do sistema fotovoltaico, esta falha pode ser compensada de três formas: acionar o grupo gerador, expansão da geração fotovoltaica ou aumento do banco de baterias. Supondo que a geração eólica fique desconectada por 1 mês, o custo da geração diesel ficaria igual ao item anterior, R\$7.488,00. O aumento da geração fotovoltaica deverá suprir a perda da geração eólica, para isto seria necessária a aquisição de um sistema solar de 7,2kWp ao preço de R\$97.310,00 [32]. Para justificar o seu uso, o sistema eólico deveria ficar, pelo menos, 13 meses desconectado da rede.

Já para suprir a demanda com o aumento do banco de baterias, seria necessário dobrar o seu tamanho atual, tendo um custo total de R\$ 30.000,00 o tempo de desligamento seria de 4 meses, se comparado ao custo da geração diesel durante um mês.

Similarmente a contingência dos sistemas fotovoltaicos, o gerador diesel continua sendo a melhor forma de *backup* dos sistemas híbridos.

7.8.1.3. Desligamento do gerador diesel

Durante o dia, se a potência demandada pela carga estiver dentro dos 10kW fornecidos pelas fontes renováveis nos melhores meses do ano, a continuidade no serviço é mantida com o auxílio das baterias, caso contrário o sistema é desligado. Da mesma forma acontece durante a noite, só que a potência gerada é limitada pelo aerogerador.

Para contornar a falta de um sistema de *backup* deve-se aumentar o sistema de armazenamento que irá suprir a demanda nas horas de escassez de qualquer fonte renovável. Para este sistema em questão o banco de baterias poderia ser aumentado em 150%, com um custo total de R\$ 45.000,00. Mesmo com a geração diesel desconectada, para manter o padrão das contas o sistema deveria ficar desligado por 6 meses.

7.8.1.4. Desligamento do fotovoltaico e eólico

Esta contingência é simplesmente contornada colocando o gerador diesel para alimentar a carga da vila e mantendo a continuidade do serviço com o custo, na pior condição, de R\$7.488,00 por mês.

7.8.2. Contingências de longo prazo ou permanentes

Conforme visto anteriormente, a geração diesel é a melhor forma de *backup* para os sistemas isolados, pois aumenta a confiabilidade, segurança e qualidade da energia gerada por um custo relativamente baixo. Entretanto como seria o comportamento do sistema e como superar esta dificuldade para o caso de contingências permanentes ou de longo prazo? Esta segunda análise se baseia em uma reavaliação das energias renováveis presentes no sistema a fim de contornar a contingência permanente e manter o sistema alimentado somente com a energia renovável remanescente. A análise continuará sendo baseada no sistema híbrido da Vila São Tomé explicitado na Seção 7.1.

7.8.2.1. Desligamento permanente do sistema fotovoltaico

A contingência do desligamento permanente do sistema fotovoltaico afeta o sistema com um déficit de geração de até 3,2 kWp implicando em uma elevada exigência do sistema eólico que por sua vez, não possui capacidade suficiente para suprir o déficit, por consequência há uma sobrecarga no aerogerador e a atuação do sistema de proteção, ocorrendo, por fim, o desligamento do sistema de geração renovável. Além disso, o banco de baterias também é sensivelmente afetado pelo déficit de potência acarretando o aumento do ciclo de carga e descarga das baterias e diminuindo a sua vida útil.

A fim de evitar estes transtornos, o sistema necessita ser reavaliado com a adição de mais baterias ou novos aerogeradores. De acordo com pesquisas realizadas o preço praticado por um sistema eólico Skystream de aproximadamente 3 kW está em torno de R\$30.000,00 e possui a capacidade de fornecer a potência perdida pela falta do sistema fotovoltaico [32].

A adição de novas baterias para aumentar a capacidade do sistema de armazenamento em 50% geraria um custo total de R\$15.000,00 [32], porém esta alternativa não aumenta a capacidade de geração total do sistema que pode continuar sofrendo com as interrupções devido à sobrecarga do sistema eólico remanescente que precisa alimentar as cargas e recarregar o novo banco de baterias.

Após a revitalização, o sistema contará apenas com uma fonte de energia renovável (excluindo o *backup* diesel) para alimentação das cargas. A principal desvantagem desta nova configuração é a perda da complementariedade diária e mensal entre as fontes, o que torna o sistema menos confiável, aumentando o número de paradas e o consumo de óleo diesel.

7.8.2.2. Desligamento permanente do sistema eólico

Para o sistema estudado, o desligamento permanente do sistema eólico é a pior contingência possível, pois o aerogerador fornece a maior parte da potência demandada pela vila e causando sobrecarga dos sistemas fotovoltaico e o banco de baterias. Nas horas de maior insolação as células fotovoltaicas não conseguem suprir a potência demandada e à noite este quadro se torna ainda pior, pois o banco de baterias não foi carregado totalmente e não terá energia suficiente para alimentar a carga da vila. O

desligamento permanente deste sistema acarretaria um alto investimento para revitalizá-lo através de células fotovoltaicas, conforme apresentado a seguir.

Um sistema fotovoltaico com potência de 8 kW composto por 36 painéis fotovoltaicos, 1 inversor de 15 kW possui um custo total de R\$97.700,00 [32]. Como o sistema passa operar somente com uma fonte renovável é recomendável o aumento do banco de baterias, pois este precisa suprir a potência demandada pela carga durante a noite e nos dias de pouca insolação e este custo para 12 baterias está na faixa de R\$11.400,00 elevando para R\$109.100,00 o custo de revitalização do sistema.

Novamente, o novo sistema contará somente com uma fonte renovável para geração de energia, o que pode ser um problema em dias de pouca insolação, pois aumenta no número de interrupções e os ciclos de carga e descarga das baterias.

8. Conclusões

Embora os sistemas híbridos não sejam muito disseminados no Brasil vários estudos já foram realizados a fim de evidenciar suas vantagens e incentivar a sua utilização. Este trabalho apresentou uma varredura sobre as alternativas e as experiências nacionais dos sistemas híbridos e uma orientação para o dimensionamento e o levantamento de custos de um projeto de produção de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas em sistemas híbridos.

Foram apresentadas as características, topologias, particularidades, vantagens, desvantagens de cada tecnologia empregada e os principais arranjos utilizados no Brasil e no mundo na atualidade.

O Brasil possui um grande potencial eólico, devido ao longo litoral, e grande potencial fotovoltaico devido à irradiação solar intensa em todo território nacional, favorecendo fortemente a utilização de sistemas fotovoltaicos e eólicos. E ao conjugar duas formas de geração de energia aumenta-se a confiabilidade, segurança e consequentemente a qualidade da energia gerada, além da economia de energia que pode ser obtida na inserção deste tipo de sistema em instalações conectadas à rede de distribuição e à geradores diesel. Este fato foi corroborado pelo estudo de caso realizado no Capítulo 7 demonstrando que a geração diesel é a melhor forma de *backup* para sistemas de geração isolados em contingências de curto e médio prazo, pois são capazes de aumentar sensivelmente a continuidade, segurança e qualidade da energia fornecida por um preço competitivo. E, através do estudo das contingências permanentes, foi observado que os sistemas híbridos possuem a grande vantagem da complementariedade entre as fontes renováveis e com um estudo detalhado dos recursos naturais da região pode-se otimizar o dimensionamento das fontes balanceando disponibilidade e menor custo de implantação.

Foi possível observar que o Brasil ainda não produz módulos fotovoltaicos em escala industrial. Este fato encarece a execução de projetos baseados neste tipo de sistema. Contudo, foi apresentada uma expressiva queda nos preços destes módulos ao longo do ano de 2011, mostrando que esta forma de produção de energia pode ser, futura e brevemente, de fácil acesso.

Este Projeto de Graduação atingiu seus objetivos principais que foram o estudo dos sistemas híbridos fotovoltaicos, o levantamento dos aspectos primordiais para a

implementação de um projeto de sistemas híbridos e o levantamento dos custos globais deste tipo de instalação.

A fim de aprimorar este projeto serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo de caso específico de cada sistema híbrido apresentado neste trabalho;
- Utilização de Créditos de Carbono na análise financeira;
- Utilização de sistemas híbridos em residências unifamiliares com intuito de reduzir o custo da conta de energia.

9. Bibliografia

- [1] Jornal O Globo. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/ciencia/populacao-global-passa-de-7-bilhoes-pressiona-recursos-do-planeta-3081364>. Acessado em 01/01/12.
- [2] *Key World Energy Statistics*. Paris, França. International Energy Agency – IEA. p. 24.2011.
- [3] CRESESB – Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_solar. Acessado em: 01/01/2012.
- [4] BRAGA, R.P. *Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações*; Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [5] ELECTRÓNICA. Disponível em: <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/173/>. Acessado em 21/02/2012.
- [6] *Photovoltaic Solar Energy- Development and current research*. Luxemburgo. European Commission. Publications Office. 2009.
- [7] Profelectro. Disponível em: <http://www.profelectro.info/?p=1368>. Acessado em 15/02/2012.
- [8] ROSA, C. A.; FILHO, G.L.T.; *Série Energias Renováveis: SOLAR*. 1ª Edição. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas, SAPEPE. Itajubá, Brasil. 2007.
- [9] Domus Solaris. Disponível em: <http://www.domus-solaris.com/index.php?pg=16>. Acessado em 27/01/2012.
- [10] BLASQUES, L.C.M.; *Estudo da viabilidade técnico - econômica de sistemas híbridos para geração de energia elétrica*; Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação/UFPA, Belém, Brasil, 2005.
- [11] PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R; ABREU, S.L.; RUTHER, R. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 1ª edição. INPE. São José dos Campos, Brasil. 2006.
- [12] PINHO, J.T.; BARBOSA, C.F.O.; PEREIRA, E.J.S.; SOUZA, H.M.S.; BLASQUES, L.C.M.; GALHARDO, M.A.B.; MACEDO, W.N. *Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia*. 1ª edição. Ministério de Minas e Energia. Brasília, Brasil. Novembro, 2008.

[13] HAUSCHILD, L. *Avaliação de estratégias de operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel*. Dissertação de mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), São Paulo, Brasil, 2006.

[14] AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A.N. *Atlas do Potencial Eólico*. Governo Federal. Brasília. 2001.

[15] Ambient Weather. Disponível em: <http://www.ambientweather.com/ockta250kit.html>. Acessado em 15/02/2012.

[16] *Atlas da Energia Elétrica do Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. 3ª edição. Brasília. 2008.

[17] BARBOSA, C.F.O.; PEREIRA, E.J.S.; PINHO, J.T.; SOUZA, H.M.S.; BLASQUES, L.C.M.; GALHARDO, M.A.B.; MACEDO, W.N. *Manual de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-eólico-diesel para geração de energia elétrica*. Belém, Brasil. 2008.

[18] TERRA. Acessado em: 07/02/2012. Disponível em: <http://invertia.terra.com.br/sustentabilidade/noticias/0,,OI5599146-EI18950,00.html>.

[19] VILSAN, M.; IRINA, N. *A Hybrid Wind-Photovoltaic Power Supply for a Telecommunication System* Research Institute for Electrical Engineering. P-18.p. 589-591. 1997.

[20] BARBOSA, C.F.O.; PINHO, J.T.; PEREIRA, E.J.S.; GALHARDO, M.A.B.; VALE, S.B.; MARANHÃO, W.M.A. *Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica*. Scielo Proceedings. 2004.

[21] GEDAE. Disponível em: <http://www.ufpa.br/gedae/projetos.htm> Acessado em 07/02/2012.

[22] Alentejo Litoral. Disponível em: <http://www.alentejolitoral.pt/PortalRegional/Paginas/homepage.aspx>. Acessado em 21/02/2012.

[23] Hybrid System (biomass and solar termal). Disponível em: http://www.cres.gr/mednet/case_studies/adene1.files/frame.htm. Acessado em: 21/02/2012.

[24] SILVA, S.B. *Sistema Híbrido Solar Fotovoltaico, célula a combustível e baterias aplicados a comunidades isoladas na região da Amazônia brasileira*. Anais do III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém – PA. Setembro, 2010.

[25] ANDRADE, H.C.L.; PEREIRA, A.L.; ROSAS, P.A.C.; ARAUJO, A.M.; MEDEIROS, A.L.R.; PRIMO, A.R.M. *Análise econômica de sistemas híbridos eólico-solar-diesel*. Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Salvador – BA. Agosto/2008.

[26] HEINEMAM, J.T. *Estudo da viabilidade para implementação de um sistema híbrido-eólico-fotovoltaico de baixa potência com conexão à rede elétrica*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

[27] KUGLER, H. *Sob os raios do sol*. Revista Ciência Hoje. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/2010/02/sob-os-raios-do-sol> Acessado em 01/02/2012.

[28] Solarbuzz. Disponível em: <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>. Acessado em: 07/02/2012.

[29] DUTRA, R.M.; TOLMASQUIM, M.T. *Estudo da viabilidade econômico para projetos eólicos com base no novo contexto elétrico*. Revista Brasileira de Energia. Vol. 9. Nº. 1. Rio de Janeiro, Brasil. 2003.

[30] Brasil. Decreto Nº 5.025, 30 de março de 2004. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5025. Acessado em 16/02/2012.

[31] BARBOSA, C.F.O.; PINHO, J.T. *Avaliação Econômica De Sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel para Geração de eletricidade na Amazônia*. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Florianópolis, Brasil. 2008.

[32] Disponível em: <http://www.energiapura.com> Acessado em 29/02/2012.