

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FRANCIELLE BITTENCOURT FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
INTEGRADO COM ENERGIA SOLAR E EÓLICA UTILIZANDO O SOFTWARE  
RETSCREEN**

**ALEGRETE  
2015**

**FRANCIELLE BITTENCOURT FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
INTEGRADO COM ENERGIA SOLAR E EÓLICA UTILIZANDO O SOFTWARE  
RETSCREEN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Felipe Bovolini Grigoletto

**ALEGRETE  
2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F383d Ferreira, Francielle Bittencourt

Dimensionamento de um sistema de geração de energia  
elétrica integrado com energia solar e eólica utilizando o  
software RetScreen / Francielle Bittencourt Ferreira.  
99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: Felipe Bovolini Grigoletto".

1. Microrredes. 2. Geração distribuída. 3. Energia eólica.  
4. Energia solar. I. Título.

Autoria: Francielle Bittencourt Ferreira

Título: DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA INTEGRADO COM ENERGIA SOLAR E EÓLICA UTILIZANDO O SOFTWARE RETSCREEN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Instituição	Assinatura
1	Felipe Bovolini Grigoletto	Prof. Dr.	unipampa	<i>Felipe B. Grigoletto</i>
2	Giovani Guarienti Pozzebon	Prof. Dr.	unipampa	<i>G. Pozzebon</i>
3	Marcelo Hahn Durgante	Prof. Me.	unipampa	<i>Marcelo Durgante</i>

Data da aprovação: 16 de Janeiro de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre me iluminar e me guiar pelo caminho do bem.

Aos meus pais, Pedro e Elaine. Vocês são a base sólida na construção do meu futuro. Pai, obrigada por ser esse pai maravilhoso sempre disposto a tudo para me proporcionar a oportunidade de estudar. Mãe, obrigada por ser essa super mãe, sempre preocupada e pronta para ajudar em qualquer situação. Vocês são os melhores pais do mundo.

As minhas irmãs, Jéssica e Andressa, por me ensinarem que o amor dos pais sempre se multiplica e que ter paciência é fundamental para a boa convivência.

A sobrinha e afilhada Valentina, que mesmo com seus poucos meses de vida veio pra mostrar o amor incondicional, proporcionar união e muita felicidade.

A amiga Célia, que mesmo a alguns quilômetros de distância sempre se fez presente. Obrigada pelos conselhos de sempre e por ser essa amiga espetacular.

A amiga Daniele pela amizade sincera e pelas incontáveis horas de chimarrão e conversa. Agradeço aos seus pais, Denilce e Otito, que sempre me trataram como filha e me acolheram em sua casa.

Ao meu namorado Marco Túlio, pelo apoio incansável. Obrigada por sempre acreditar em mim, até mesmo nas horas que nem eu mesma acreditava.

Ao amigo Pedro Hidalgo, pela ajuda valiosa neste trabalho.

Ao orientador Professor Felipe Grigoletto, pelo apoio, paciência e conhecimento transmitido.

Ao professor Marcelo Durgante, por acompanhar desde o começo este trabalho, sempre transmitindo seu conhecimento de maneira extraordinária.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

## **RESUMO**

Este trabalho de conclusão de curso mostra o estudo do dimensionamento de um sistema de geração de energia elétrica utilizando fontes de energias renováveis através do software RetScreen. Este software é importante para ter uma visão da viabilidade de cada projeto, pois ele analisa os gastos, tanto financeiros como de recursos e mão de obra, e o retorno do investimento inicial. As análises de gastos e retorno financeiro evitam possíveis frustrações quando o projeto for colocado em prática. O trabalho mostra que projetos apenas com energia solar ainda são mais caros e possuem tempo de retorno maior do que de projetos com energia eólica, por isso a melhor solução é mesclar as duas tecnologias.

Palavras-chave: geração distribuída, energia eólica, energia solar, RetScreen.

## **ABSTRACT**

This course conclusion work shows the study of the design of a power generation system using renewable energy sources through the RETScreen software. This software is important to have a vision of the viability of each project, as it analyzes the costs, both financial resources and manpower, and the return on the initial investment. The analysis of costs and financial return avoid possible frustrations when the project is put into practice. The work shows that only projects with solar energy are still more expensive and have turnaround time greater than projects with wind, so the best solution is to merge the two technologies.

**Key-words:** distributed generation, wind power, solar energy, RETScreen,



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1    Microrredes .....	16
2.1.1    Histórico .....	16
2.1.2    Características das Microrredes.....	18
2.1.3    Benefícios das Microrredes .....	22
2.1.4    Arquiteturas e tecnologias das microrredes.....	23
2.2    Geração distribuída (GD) .....	24
2.2.1    Histórico .....	24
2.2.2    Aplicações da GD.....	25
2.2.3    Recursos da geração distribuída .....	31
2.2.3.1. Geração eólica .....	32
2.2.3.2 Células fotovoltaicas.....	34
2.2.3.3 Sistemas de armazenamento .....	34
<b>3. O RECURSO EÓLICO .....</b>	<b>39</b>
3.1.    Mecanismos dos ventos.....	39
3.2.    Fatores que influenciam o regime dos ventos .....	40
3.3.    A energia extraída do vento .....	41
3.4.    Distribuição de frequência de velocidade do vento.....	45
3.5.    A distribuição de Weibull .....	45
3.6.    Solidez.....	46
3.7.    Fatores de capacidade e disponibilidade .....	47
3.8.    Sistemas eólicos de geração de energia.....	47
3.8.1.    Sistemas isolados.....	48
3.8.2.    Sistemas híbridos.....	49
3.8.3.    Sistemas interligados à rede .....	50
<b>4. O RECURSO SOLAR .....</b>	<b>54</b>
4.1.    Formas de utilização da energia solar .....	57
4.2.    Aplicações dos sistemas fotovoltaicos .....	60
4.2.1.    Sistemas isolados.....	60
4.2.2.    Sistemas conectados à rede .....	61
4.3.    Etapas preliminares do projeto de um sistema fotovoltaico .....	65
<b>5. RETSCREEN .....</b>	<b>68</b>

<b>6. DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONECTADO À REDE UTILIZANDO O SOFTWARE RETSCREEN..</b>	<b>70</b>
6.1. Caso 1 – Sistema de geração de energia através de painéis fotovoltaicos .....	70
6.2. Caso 2 – Sistema de geração de energia através de aerogeradores .....	77
6.3. Caso 3 - Sistema de geração de energia com 50% solar e 50% eólico.....	80
6.4. Caso 4 – Sistema de geração de energia elétrica com 70% eólico e 30% solar .....	84
6.5. Caso 5 – Sistema de geração de energia elétrica com 70% solar e 30% eólico .....	87
6.6. Caso 6 – Sistema de geração de energia elétrica com 60% eólico e 40% solar .....	90
6.7. Caso 7 – Sistema de geração de energia elétrica com 60% solar e 40% eólico .....	93
6.8. Resultados e discussões.....	96
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento de novas fontes renováveis para geração de energia, ou menos poluentes, a preocupação com a emissão de gases de efeito estufa, principalmente com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o grande interesse na melhoria da qualidade da energia que é fornecida aos consumidores juntamente com as preocupações tarifárias, motivam o setor elétrico a buscar cada vez mais soluções práticas que possam atender os interesses dos consumidores, dos distribuidores e dos geradores de energia elétrica<sup>1</sup>. Uma possível solução são as chamadas Redes Inteligentes, as quais têm como objetivo a criação de uma nova infraestrutura para a distribuição de energia elétrica. O que possibilita o desenvolvimento, a integração e a aplicação de novas tecnologias de comunicação nas chamadas Microrredes, tendo como consequência a otimização no controle e na operação das redes elétricas<sup>2</sup>. A figura 1.1 ilustra um exemplo de microrrede residencial.

Figura 1.1 - Ilustração de uma Smart Grid

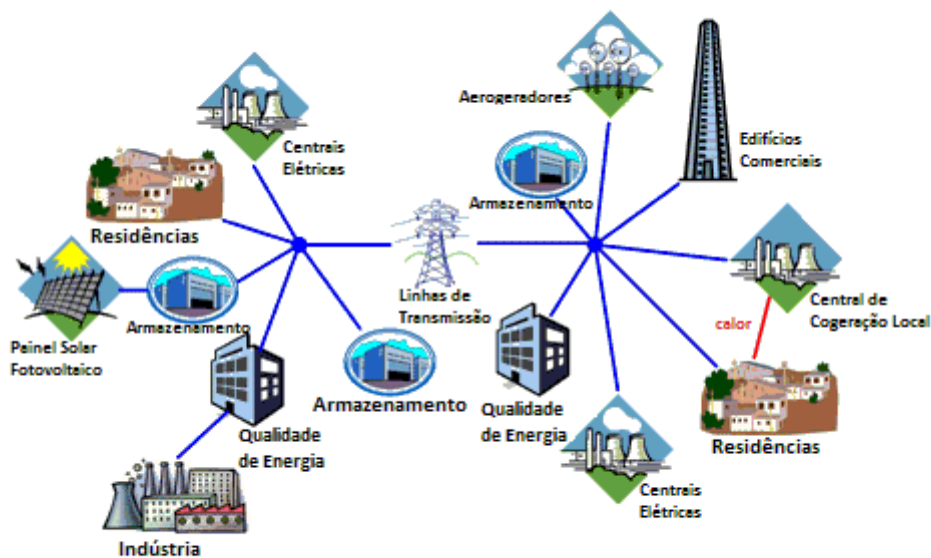


Para a adoção de uma arquitetura de Rede Inteligente deve-se levar em conta o tipo de região de implantação, a regulamentação do setor elétrico, a concessionária e as fontes de energia que estão disponíveis e que podem ser exploradas. Também devem ser identificadas e avaliadas, as tecnologias que podem ser aplicadas na Rede Inteligente, pois um dos desafios dessa estrutura é a harmonização das funcionalidades solicitadas. Dentre essas funcionalidades estão à interoperabilidade entre os equipamentos, os investimentos exigidos e a repercussão nas tarifas cobradas ao consumidor.

Para os avanços em Redes Inteligentes deve-se incluir a associação de geração distribuída, microgeração, os sistemas de armazenamento de recursos e o gerenciamento pelo lado da demanda como participantes do sistema elétrico. Os eletrodomésticos inteligentes bem como os veículos elétricos, se tornam componentes importantes de estudo na área, aliados a geração de energia com fontes renováveis, que podem ser provenientes de biomassa e fontes de energia solar e eólica<sup>3</sup>.

De acordo com o INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética, geração distribuída é a expressão que define a geração de energia elétrica que está junta ou próxima dos consumidores sem levar em conta a potência, a tecnologia ou a fonte de energia. A economia de investimentos em transmissão e a redução das perdas na geração distribuída são algumas de suas vantagens, fazendo com que haja grande melhora na estabilidade do fornecimento de energia elétrica<sup>6</sup>. A figura 1.2 ilustra o Sistema Elétrico com a inserção de geradores distribuídos.

Figura 1.2 - Sistema elétrico com a inserção de geração distribuída



Uma das vantagens das Redes Inteligentes é a possibilidade de participação do consumidor no mercado de geração de energia elétrica, através da interação com as concessionárias. Essa interação proporciona um novo ciclo de serviços integrados, um maior

controle da demanda de energia elétrica e o principal, o consumidor se torna também um produtor.

Os casos descritos a seguir mostram projetos e resultados das ações para o incentivo do desenvolvimento das redes. Na Inglaterra, foi implantado o sistema de inteligência na oferta de energia com livre escolha, ou seja, o cliente escolhe o seu fornecedor de energia. Através da sua matriz energética, de seus sistemas de atendimento e oferta de serviços e da concepção do sensoriamento das redes, facilitam a evolução do sistema e transição para a Rede Inteligente sem traumas. Em 2009, o parlamento britânico aprovou a normativa para realização da “smart metering”, ou seja, a medição inteligente, até 2020 pelas companhias de energia e gás. Essa medida deve qualificar toda a rede de comunicação fundamental.

No Japão, ainda não existe um programa de medição inteligente, porém o país possui um plano bem elaborado, que já vem sendo empregado, para eficientização de equipamentos eletroeletrônicos, em edificações, nos transportes e na produção industrial. Esse plano possui metas e regulamentações bem estabelecidas. Nos Estados Unidos existem vários incentivos para promover a rede inteligente. Em um de seus primeiros atos no governo, o atual presidente Barack Obama, criou um fundo de US\$ 4,5 bilhões de dólares para modernizar a rede de eletricidade com as tecnologias smart grid. Lá existem campos de testes para os conceitos de smart grid, que funcionam como centro de aprendizagem. Na cidade de Boulder, no estado do Colorado, o consórcio Xcel Energy vem estudando e testando mecanismos para potencializar o uso da energia. Em algumas residências já estão sendo avaliadas a eficiência deste tipo de rede<sup>3</sup>.

Na Europa, existem alguns projetos implantados em nível de testes, alguns em âmbito nacional. O projeto que merece destaque é do grupo empresarial ENEL de energia, o qual executou a troca de 32 milhões de medidores na Itália pelos medidores inteligentes. Este projeto já tem resultados financeiros e estruturais comprovados<sup>3</sup>.

No Brasil, no dia 17 de abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou um conjunto de regras específicas, a RN 482, para estimular a instalação de geração distribuída de pequeno porte. Esta resolução normativa engloba dois segmentos de potência: a microgeração (até 100 kW), e a minigeração (de 100 kW a 1 MW)<sup>4</sup>. A resolução criou um sistema de compensação de energia, onde toda a energia injetada por unidade consumidora, sendo ela com microgeração ou minigeração distribuída, é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada com o uso da energia elétrica na mesma unidade consumidora.

Essa energia pode ser utilizada em outra unidade, desde que esta possua mesma titularidade da unidade onde os créditos foram gerados<sup>5</sup>.

Porém no Brasil os níveis de compensação econômica ainda são baixos em comparação aos utilizados pelos países desenvolvidos<sup>4</sup>. Com o subsídio financeiro é possível o desenvolvimento de modelos de microrredes que utilizem geração distribuída com fontes renováveis, tornando-as economicamente viáveis e possibilitando a diversificação da matriz energética, aumentando o crescimento sustentável do país<sup>2</sup>.

O objetivo desse trabalho é realizar o dimensionamento de um sistema de microgeração de energia elétrica com fontes de energia renováveis, integrando energia solar e eólica, para suprir demandas de cargas residenciais. Para que tal objetivo fosse alcançado, inicialmente foi construída uma situação hipotética de consumo residencial. Após isso foi feita a análise de diferentes configurações de integração de energia solar e eólica no software RetScreen, visando assim achar o melhor cenário.

A estrutura do trabalho está disposta da seguinte forma: o capítulo 1 apresenta uma breve introdução, no capítulo 2 são abordados conceitos básicos das Microrredes, o capítulo 3 é referente ao recurso eólico, o capítulo 4 é referente ao recurso solar, o capítulo 5 é referente ao software RetScreen, no capítulo 6 são discutidos casos com diferentes configurações de dimensionamento da microrrede através do software RetScreen, e no capítulo 7 são abordadas as conclusões do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 OLIVEIRA, Rafael Deléo; VIEIRA, José Carlos de Melo, **Benefícios e Desafios das Redes Inteligentes**, Revista Eletrônica de Energia, v. 2, n.1, p. 3-14, jan./dez. 2012

2 ALCÂNTARA, Márcio Venício Pilar, **Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica**, Revista O Setor Elétrico, Capítulo VII, 2008. Disponível em: <[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed71\\_fasc\\_smart\\_grids\\_cap7.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed71_fasc_smart_grids_cap7.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2014.

3 LIMA, Carlos Alberto Fróes; JANNUZZI, Gilberto de Marino, **Smart grid será realidade em seu potencial com o envolvimento do órgão regulador e com compromissos com o consumidor**, Revista O Setor Elétrico, Capítulo VI, 2011. Disponível em: <[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed70\\_fasciculo\\_smart\\_grids\\_cap6.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed70_fasciculo_smart_grids_cap6.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2014.

4 GARCIA, Douglas; DUZZI, Francisco Elio, **Aspectos de evolução do smart grid nas redes de distribuição**, Revista O Setor Elétrico, Capítulo III, 2012. Disponível em: <[http://www.osestoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed75\\_fasc\\_distribuicao\\_cap3.pdf](http://www.osestoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed75_fasc_distribuicao_cap3.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2014.

5 ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> > Acesso em: 16 abr. 2014.

6 INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: 23 jan. 2014.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Microrredes

As microrredes inteligentes podem ser conceituadas como pequenos e modernos sistemas que reproduzem em escala reduzida o sistema elétrico centralizado dos tempos atuais. Através de uma rede centralizada elas podem gerar, distribuir e regular o fluxo de eletricidade aos seus consumidores<sup>1</sup>.

#### 2.1.1 Histórico

Ao final do século XIX, através de Thomas Alva Edison e outros pioneiros na área de energia elétrica, surge o conceito de microrredes<sup>1</sup>. No entanto os termos “microrrede” e “geração distribuída” ainda não existiam formalmente. Mas com o início da indústria de energia elétrica, entre 1880 e 1890, os sistemas elétricos já possuíam características com a estrutura das microrredes e com a geração distribuída.

Em 1882, Edison criou os primeiros sistemas elétricos, situados na Pearl Street Station, em Nova York. Eles possuíam capacidade total de geração de menos de 1MW, em geração de eletricidade com corrente contínua (CC), abastecendo apenas alguns quarteirões. Os “Jumbo Dynamo”, denominados por Edison, tinham potência nominal de 100kW. A rede elétrica de Pearl Street Station é uma microrrede primitiva, pois há uma pequena distância entre o gerador e as cargas, e a área geográfica atendida era restrita<sup>2</sup>. As microrredes primitivas ainda foram estruturas dominantes no sistema elétrico pelas primeiras décadas do século XX<sup>1</sup>.

Como apenas uma unidade geradora fornecia toda a energia para a rede elétrica isolada, as primeiras microrredes não eram muito confiáveis, pois se essa unidade falhasse, o sistema deixaria de operar. Nessa época a energia elétrica era empregada essencialmente na iluminação, concentrando assim a maior parte da demanda à noite, tornando assim economicamente viável o acionamento das unidades geradoras apenas em certo período do dia<sup>2</sup>.

A natureza CC da corrente elétrica era um fator limitador nas microrredes da época, surgindo assim a necessidade da substituição pela Corrente Alternada (CA). Essa substituição se deu por duas razões:

- Para poder transmitir energia elétrica por grandes distâncias, precisamos de tensões maiores. Isso não era possível com a CC. Entretanto, transformadores logo se tornaram



disponíveis, para fazer a manipulação da CA na conexão das redes elétricas com distintos níveis de tensão.

- Nikola Tesla inventou o motor de indução polifásico, que se tornou o principal equipamento motriz da indústria.

Através das microrredes primitivas, vários fatores levaram a preferência pela geração centralizada, dentre os quais cita-se<sup>1</sup>:

- Brasil, Estados Unidos e Canadá, exploraram as usinas hidrelétricas de grande porte que estavam localizadas muito longe dos centros de carga. Com isso, houve grandes desenvolvimentos em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica;
- O grande desenvolvimento das redes de transmissão e distribuição possibilitou maior confiabilidade para despachar a energia elétrica à longa distância.
- Grandes usinas hidrelétricas e térmicas apresentam significativa economia de escala. Uma vez que as usinas maiores são construídas e operadas com menor custo por quilowatt de capacidade e por quilowatt-hora de energia;
- Utilização de frequências padrão (50 ou 60 Hz), o que permite a interconexão entre vários sistemas.
- Os governos criaram políticas e regulamentações favoráveis.

Com a busca por geração de energia elétrica de forma autônoma, com baixa emissão de poluentes e que seja compatível com a rede elétrica convencional, no início do século XXI, o conceito de microrredes voltou a chamar a atenção dos pesquisadores, dos operadores de redes elétricas e da indústria<sup>3</sup>. As redes elétricas inteligentes locais são ideais para isso, já que elas possuem controle avançado e ainda são compatíveis com a rede elétrica convencional (legacy grid).

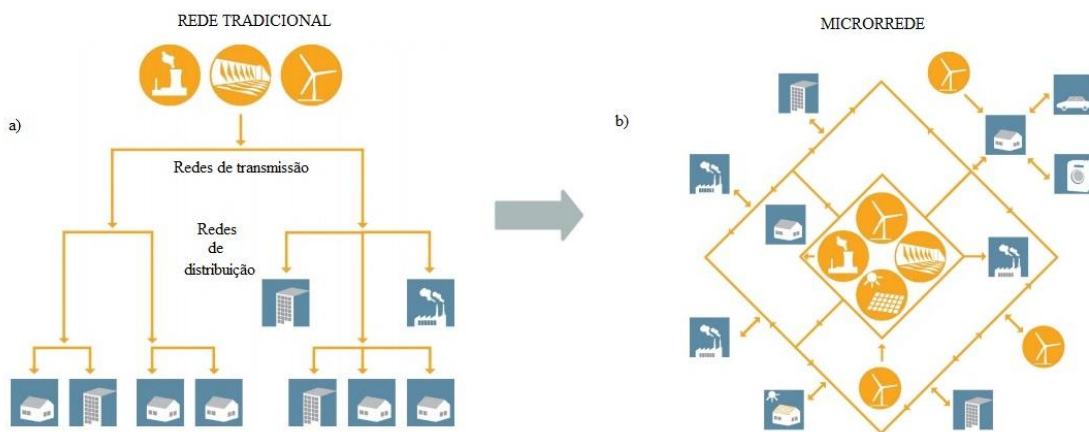
As redes elétricas se baseiam na topologia radial, em que o gerador é conectado aos consumidores através de uma estrutura análoga a uma árvore. Os grandes geradores estão situados em regiões afastadas dos centros de consumo, e fornecem fluxo de potência unidirecional (sentido geração-transmissão-distribuição)<sup>5</sup>.

A figura 2.1(a) mostra que as longas redes de transmissão de energia em alta tensão exercem a função do tronco da árvore, fazendo o transporte da eletricidade por extensas

distâncias dos geradores às cargas. Quando as redes de distribuição estão próximas as cargas, estas atuam como os galhos da árvore, estabelecendo a conexão das cargas às redes de transmissão de longa distância.

As tradicionais redes de energia elétrica estão sendo progressivamente modificadas através da instalação de geradores de pequena escala posicionados próximos aos consumidores. A figura 2.1(b) ilustra essas modificações<sup>4</sup>.

Figura 2.1 - (a) rede elétrica tradicional; (b) rede baseada em microrredes



Fonte: ABB - Asea Brown Boveri Ltd, 2008

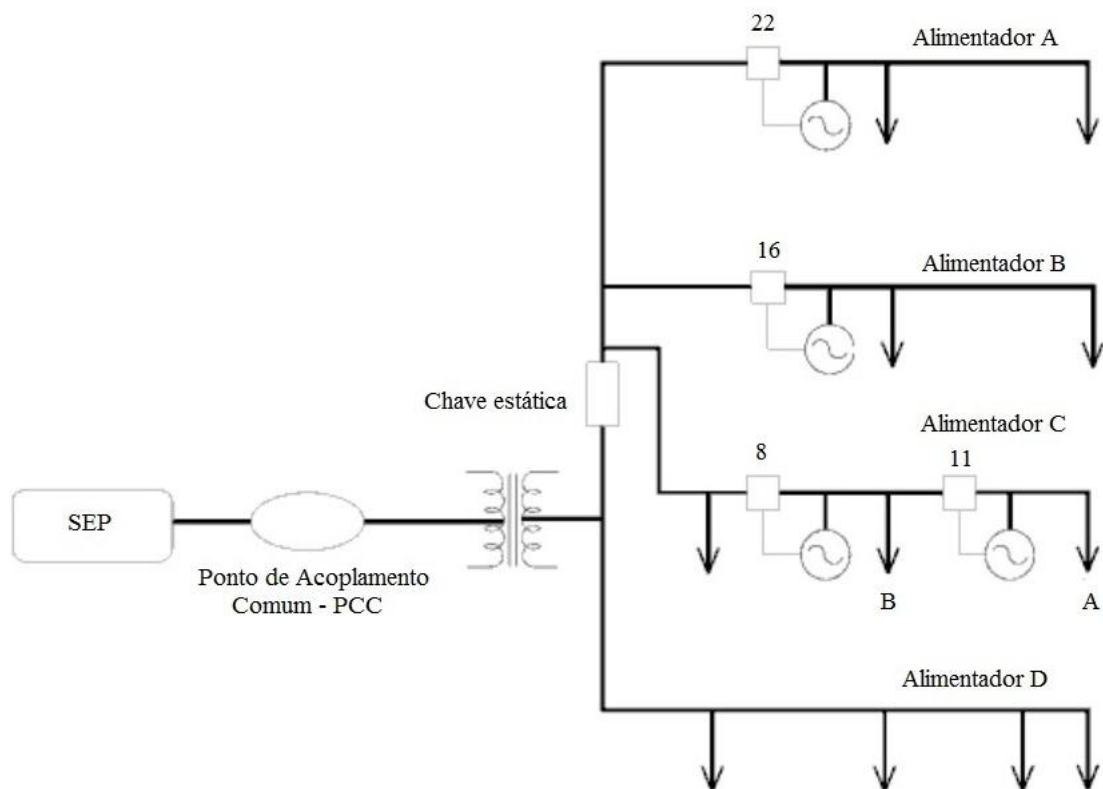
### 2.1.2 Características das Microrredes

Os componentes de uma microrrede são especificamente<sup>5</sup>:

- Um conjunto de geradores e cargas controláveis, ambos próximos fisicamente e em CA;
- Deve haver ao menos um gerador baseado em tecnologia de energias renováveis como, por exemplo, energia eólica ou solar;
- Possuem capacidade de operar isoladas da rede principal do Sistema Elétrico de Potência (SEP), ou ainda conectadas à mesma através de um único ponto de conexão chamado de ponto comum de acoplamento (point of common coupling -PCC). O PCC viabiliza a interação da microrrede com o SEP, facilitando a importação/exportação de energia;
- A característica de que nenhum de seus componentes seja indispensável à operação da rede elétrica como, por exemplo, um único controle e/ou unidade de armazenamento de dados centrais. Dessa forma, a microrrede pode oferecer maior confiabilidade que as redes elétricas convencionais, continuando em operação mesmo com a perda de um ou mais de seus componentes.

A arquitetura básica de uma microrrede é ilustrada na figura 2.2<sup>6</sup>. Esta é constituída por um grupo de alimentadores radiais, que podem fazer parte de uma rede de distribuição ou de um sistema elétrico de edificações, havendo apenas um ponto de conexão com o SEP (PCC). Na configuração da figura 2.2, A, B, C e D são os alimentadores, que podem conter geração local, pelo fato de que alguns possuem cargas essenciais. O alimentador D não precisa de geração local, pois as cargas que estão conectadas a ele não são críticas. Os alimentadores podem ser desconectados da rede através da chave estática, que secciona a conexão em menos de um ciclo. Ainda há quatro microfontes nos vértices 8, 11, 16 e 22, que tem a função de controlar a operação através de medidas das tensões e correntes locais. Havendo problemas na qualidade da energia disponível, a chave estática abre e isola as cargas críticas.

Figura 2.2 - Arquitetura básica de uma microrrede



As microfontes são as unidades geradoras das microrredes, e possuem as seguintes características<sup>3</sup>:

- Possuem pequeno porte e seu custo é baixo em comparação as unidades geradoras de redes tradicionais;
- Possuem fontes renováveis, como por exemplo os mini-aerogeradores painéis solares fotovoltaicos e células de combustível;

- Sua instalação é próxima ao usuário da energia;
- Dispõe de interfaces de eletrônica de potência.

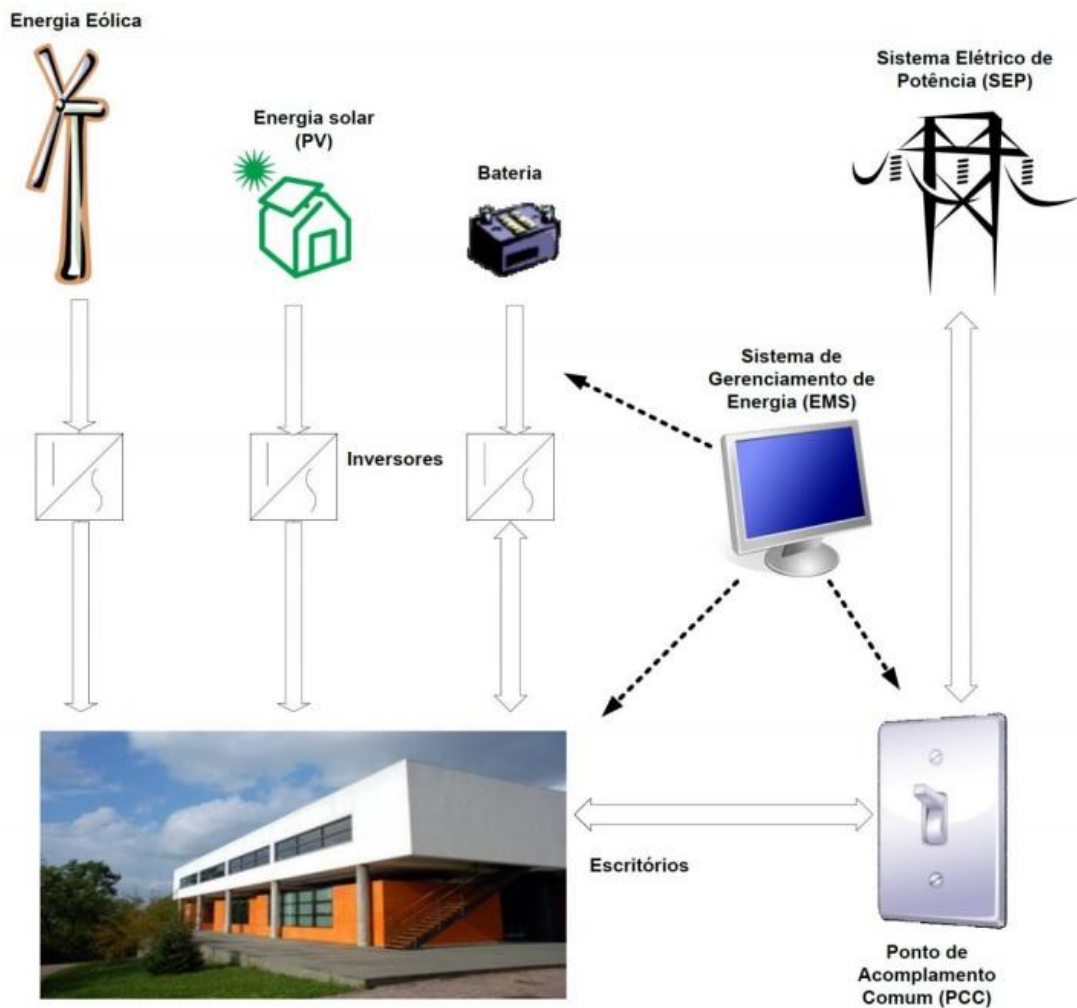
As microrredes podem atuar conectadas entre si e também conectadas a rede principal, aumentando assim a sua confiabilidade, capacidade e eficiência. Elas não são necessariamente propriedades de empresas de serviço público, podem ser construídas e operadas por comunidades, vizinhanças, universidades, corporações, hospitais, etc., ou por qualquer outra organização que tenha autoridade legal sobre a infraestrutura de energia elétrica<sup>7</sup>.

A microrrede quando conectada ao SEP, é ligada ao barramento de baixa tensão e atua como um subsistema de rede de distribuição. Por isso as cargas internas da microrrede são alimentadas por suas diversas microfontes. Com o objetivo de fazer o intercâmbio bidirecional de energia entre o SEP e a microrrede, quando há excesso de geração em qualquer um dos lados, é feita a conexão ao SEP através do PCC<sup>8</sup>. A conexão é feita por uma interface de eletrônica de potência, realizada através de inversores de frequência.

A microrrede pode trabalhar de forma autônoma, desconectada do SEP. Quando isso ocorre, as cargas e microfontes locais operam como um sistema unificado e controlável. O isolamento é vantajoso quando ocorrem distúrbios na qualidade de energia no SEP. A capacidade de proteger tanto as cargas quanto as fontes de energia internas, através do isolamento, aumenta a confiabilidade local, que pode ser maior que a fornecida pelo próprio SEP<sup>8</sup>.

A figura 2.3 mostra um diagrama de implementação de uma microrrede em um prédio de escritórios. As fontes geradoras de energia, como os aerogeradores e os painéis solares fotovoltaicos, estão situadas dentro ou próximas da edificação. A bateria é um elemento bidirecional, que pode atuar na absorção da energia em excesso, ou fornecimento de energia quando ocorre alguma falha na microrrede. Quando a capacidade de geração das microrredes é maior que a requerida pelas cargas, esse excesso é transportado para o SEP através do PCC. Caso contrário, se a microrrede não é capaz de suprir a demanda interna, ela importa do SEP.

Figura 2.3 - Diagrama simplificado de uma microrrede comercial



Fonte: SIOSHANSI, Fereidoon P., 2011.

Essa microrrede também pode operar isolada do SEP. Quando isso ocorre as cargas são supridas pelas microfuentes. O sistema de gerenciamento de energia (Energy Management System- EMS) é responsável pela determinação de quais cargas continuam utilizando a microrrede e quais devem ser desconectadas, mantendo assim um balanço de potência ideal entre a oferta e a demanda de energia. As flutuações decorrentes do uso de geração de energia a partir de fontes renováveis são balanceadas através da carga e da descarga das baterias, sendo controladas pelo EMS.

Como os diversos geradores, as cargas e dispositivos de armazenamento estão agrupados nas microrredes, isso torna a microrrede semelhante a um único e controlável ativo para o SEP, simplificando assim a integração de um grande número de dispositivos de energia renovável. As microrredes já foram consideradas tecnologias limitadas a suprir cargas em áreas remotas, porém agora elas oferecem uma opção para a transição na operação das redes

elétricas tradicionais para as redes inteligentes, dinâmicas e flexíveis. Sendo assim as redes inteligentes podem englobar diversas microrredes que possam interagir entre si e com o SEP<sup>5</sup>.

O pequeno tamanho das microrredes e a possibilidade de investimento privado, proporcionam grandes chances de inovações empresarias, pois elas têm a capacidade de aplicação das mais recentes tecnologias inteligentes, o que traz grande aumento na eficiência e na confiabilidade e permite a criação de ilhas de sustentabilidade energética dentro do Sistema Interligado Nacional (SIN)<sup>7</sup>.

### **2.1.3 Benefícios das Microrredes**

**Aumentam a confiabilidade:** as microrredes conectadas umas às outras e ao SIN, permite que elas deem suporte entre si e apoiem o SIN quando a demanda e o custo da energia estiverem altos. Tal interação evitaria apagões e quedas de energia em períodos de pico. Através de seus sensores e chaves automáticas, a microrrede faz com que sejam totalmente evitados os blecautes, ou em situações críticas, restritos a áreas bem pequenas.

**Torna fácil e eficiente o atendimento do crescimento da demanda:** permitem que comunidades locais ou até mesmo prédios individuais aumentem de forma rápida o fornecimento de energia elétrica através de pequenos grupos geradores locais. Em relação as tarifas, as microrredes permitem a visualização de sinais de preço em tempo real, fazendo com que se ajuste automaticamente o uso e a necessidade da energia para cada consumidor individualmente<sup>7</sup>.

**Incentivo para inovações tecnológicas:** com os custos da expansão da geração e da transmissão no sistema centralizado, as microrredes apresentam-se como alternativas favoráveis e de menor custo para o consumidor. Através do controle local da infraestrutura da microrrede, surge um novo modelo de negócio, no qual os empresários e suas tecnologias participam de um mercado aberto e competitivo. Elas tiram o máximo aproveitamento possível das energias limpas e renováveis: como elas incluem em seu sistema baterias e armazenadores de energia, possuem maior flexibilidade para utilizar diversas fontes de energia, dentre elas eólica e solar fotovoltaica, as quais ainda são um desafio para o sistema centralizado. Se o sol brilha e o vento sopra, as microrredes produzem energias para si próprias e ainda podem vender os excedentes. Se o tempo não cooperar muito, a microrrede reverte a energia gerada ou a energia fornecida pelo sistema centralizado para ser armazenada<sup>7</sup>.

As redes inteligentes pode incluir bem mais do que apenas melhorias tecnológicas à rede elétrica tradicional. Uma microrrede apropriadamente projetada e implementada, quando estiver em operação poderá apresentar as seguintes características<sup>1</sup>:

- Possibilitará a participação ativa dos seus usuários;
- Acolherá todos os tipos de geração e armazenamento;
- Novos produtos, serviços e mercados de energia poderão ser criados;
- Atenderá as perturbações do sistema de forma autônoma;
- Operação de forma resiliente contra ataques que possam surgir, podendo eles ser físicos ou cibernéticos (cyber attacks), e desastres naturais.

#### **2.1.4 Arquiteturas e tecnologias das microrredes**

As arquiteturas das microrredes são definidas de acordo com o segmento o qual elas são aplicadas.

- Microrrede comunitária/da distribuidora: o termo comunidade implica que a região onde a microrrede está inclui consumidores residenciais. Essa arquitetura ainda tem pouca aceitação, pelo fato de que ainda não há padrões definidos e há muitas barreiras regulatórias a serem removidas. A microrrede da distribuidora é aquela construída e mantida pela concessionária de energia conectada à rede de distribuição. Esse tipo de microrrede é utilizada próxima a grandes centros de cargas, facilitando assim o atendimento de pico de carga e reduzindo as perdas.
- Microrrede comercial/industrial: desde a década de 1950, existem nos Estados Unidos plantas de refinarias de petróleo que contém microrredes baseadas em geração termofóssil. O Japão é considerado um líder moderno nos setores comercial e industrial nas microrredes, algumas estão em instalações governamentais. No Brasil, o conceito de microrrede é caracterizado pelos produtores independentes de energia e os autoprodutores.
- Microrrede institucional/campus universitário: essa estrutura oferece as melhores oportunidades de desenvolvimento, uma vez que os prédios se localizam na mesma área e são constituídos por uma só instituição. Nos Estados Unidos há vários campi universitários que possuem microrredes. Esse exemplo poderia ser seguido no Brasil, gerando assim sua própria energia e ainda servindo como base para pesquisas nas redes inteligentes.

- Microrredes em sistemas isolados: essa estrutura é a maior em operação no mundo, porém possui capacidade reduzida. Na região norte do Brasil, historicamente, há uso de geradores térmicos a óleo. Mas a fonte que tem apresentado significativo crescimento é a solar fotovoltaica. As centrais eólicas também vêm ganhando espaço nessa região.
- Microrredes militares: é a estrutura que existe em menor número, porém vem se desenvolvendo atualmente.

## **2.2 Geração distribuída (GD)**

As microrredes possibilitam a integração com a geração distribuída a partir de fontes renováveis de energia, assegurando assim o fornecimento de energia de forma independente de outras fontes fósseis.

### **2.2.1 Histórico**

A elaboração do termo geração distribuída não é tão recente assim. Thomas A. Edison em 1882, na cidade de Nova York, criou e instalou o primeiro sistema de geração distribuída. Sua primeira central de geração, situada na Rua Pearl Street, era capaz de fornecer energia para lâmpadas incandescentes para cinquenta e nove clientes, em uma área de aproximadamente um km<sup>2</sup>. Basicamente geração distribuída tem por conceito ser uma fonte geradora de energia que está posicionada próxima à carga<sup>9</sup>.

Quando o sistema é centralizado as linhas de transmissão podem ficar sobrecarregadas, fazendo com que o sistema fique inclinado à ocorrência de contingências. Complementar a isto, caso haja necessidade de modernização e expansão das linhas, essas ações nem sempre serão ambientalmente ou socialmente viáveis, e até mesmo quando a matriz energética em questão for pouco diversificada e bastante dependente dos recursos hidrológicos, como é o caso do Brasil, o país está sujeito ao racionamento de energia elétrica. A inserção de geradores distribuídos ao sistema elétrico, que usem fontes alternativas de energia elétrica, é uma solução para os problemas citados<sup>10</sup>.

Uma das grandes vantagens da GD é que a unidade geradora de energia elétrica está localizada próxima à carga, ocasionando assim a redução das perdas associadas ao transporte da energia. Outra vantagem relevante é a diversificação nas tecnologias utilizadas para produção da energia. Com isso é possível escolher a melhor tecnologia que atenda as especificações de cada carga e da disponibilidade dos recursos energéticos locais<sup>11</sup>. As tecnologias para GD tem se desenvolvido para atender a potências cada vez maiores<sup>12</sup>.



A geração distribuída possui algumas desvantagens que devem ser levadas em conta. Dentre elas está a complexidade no planejamento e operação do sistema elétrico, o que inclui garantias no sistema de suporte e também a realização das manutenções e medidas de segurança previstas. Em alguns casos pode haver a redução do fator de utilização das instalações das concessionárias de distribuição, tendendo assim ao aumento do preço de fornecimento das mesmas. Com a interligação à rede, o produtor independente perde parte de sua autonomia, uma vez que ele não pode mais agir pensando apenas no seu próprio benefício.

Nos EUA o incentivo inicial à geração distribuída surgiu em 1978, com as mudanças na legislação dadas pelo Public Utilities Regulatory Policies Act (PURPA), e posteriormente, em 1992, ampliadas pelo Energy Policy Act através da desregulamentação da geração de energia. Vários países também deram início a alteração de suas legislações referentes ao setor elétrico. O progresso mundial no campo da computação facilitou a difusão da geração distribuída<sup>11</sup>.

No Brasil de uns anos para cá também surgiram tendências para a inserção de geração distribuída. Algumas das causas da busca pelo conceito de geração distribuída são:

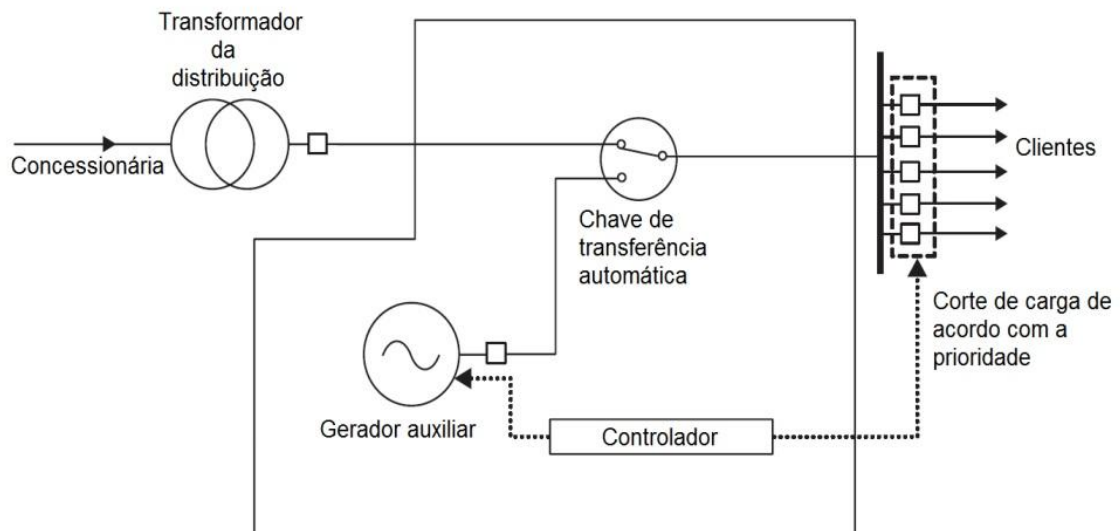
- Os consumidores querem a diminuição do custo da energia e melhor confiabilidade da mesma.
- Uma reestruturação institucional do setor elétrico que tenha a criação do consumidor livre e do comercializador de energia. Que possibilite o livre acesso dos produtores independentes e consumidores livre ao sistema de transmissão de energia. Também que os produtores independentes possam vender sua energia de forma legalizada.
- O crescimento do gás natural como opção para a geração, visto que há um aumento na oferta, sendo ela de origem nacional ou externa.
- A preocupação e conscientização com os problemas ambientais, buscando soluções que reduzam o impacto ambiental na geração.
- Avanços nas tecnologias para que as fontes renováveis se tornem cada vez mais atrativas e possam competir no mercado.
- Redução dos custos nos sistemas de controle, processamento e transmissão de dados. O que viabiliza a operação de sistemas elétricos mais complexos<sup>11</sup>.

### **2.2.2 Aplicações da GD**

A seguir são exemplificadas algumas aplicações de geração distribuída<sup>13</sup>.

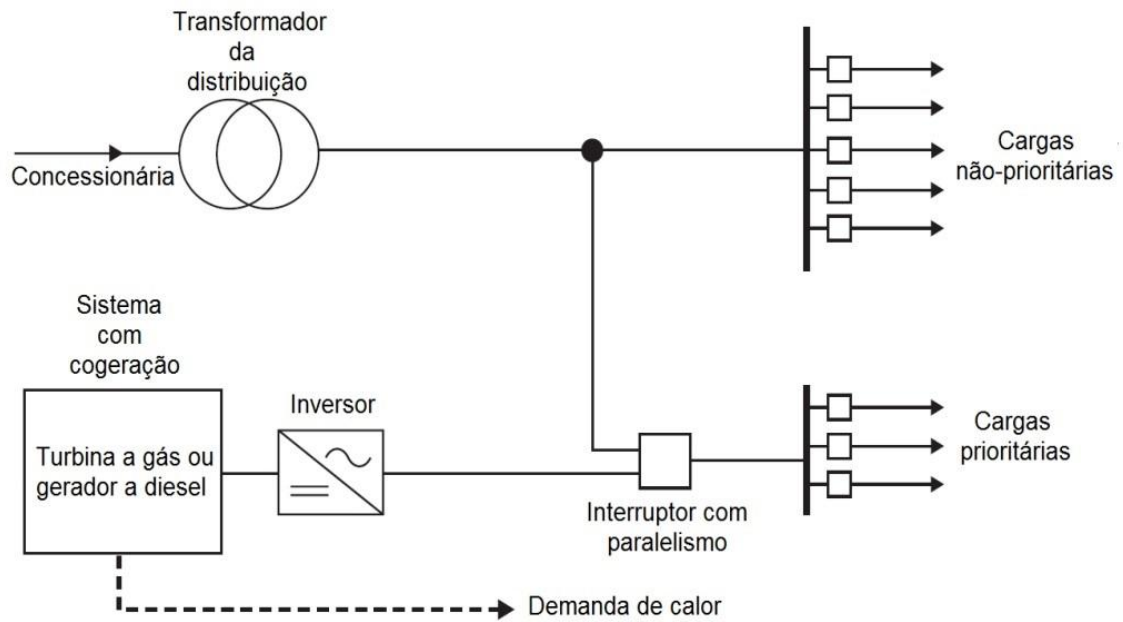
- Geração auxiliar: para proteger cargas comuns de longas interrupções, um gerador à gás ou diesel conectado a carga através de transferência automática pode ser utilizado, como é ilustrado na figura 2.4. No entanto para cargas sensíveis, esse tipo de geração não é suficiente, pois tem uma partida na ordem de 10 segundos para suprir a potência do sistema. Deve-se ter cuidado com o uso de motores a combustão, devido à alta emissão de gases tóxicos, o que vai contra a proposta das microrredes de serem ecologicamente corretas. Como opção para isso há o biodiesel, que são menos poluentes e podem ser reaproveitados de outros processos. Através de um controlador é possível selecionar as cargas mais importantes em relação às outras.

Figura 2.4 - Esquema de geração auxiliar



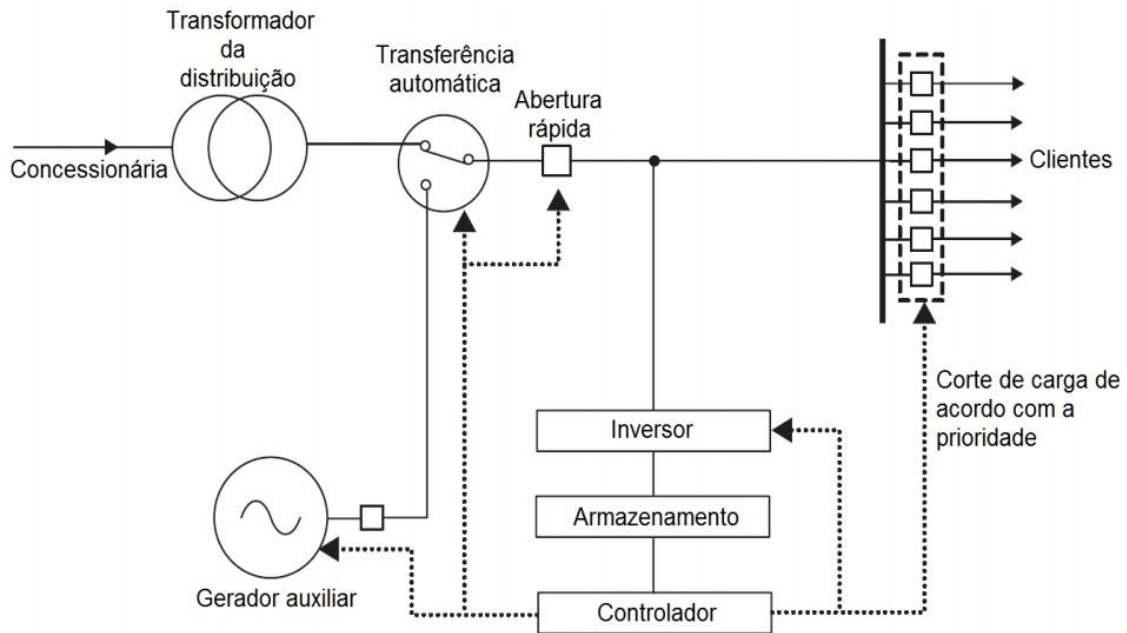
- Geração principal com cargas térmicas: quando há cargas térmicas com tamanhos diferentes, como fornos e centrais de condicionamento de ar ou até mesmo usinas siderúrgicas, é recomendado o uso de microturbinas para o aproveitamento do calor por cogeração, como mostrado na figura 2.5. As microturbinas geram energia DC, necessitando ter um conversor, porém são mais econômicas e entregam energia de alta qualidade. Tal energia pode ser utilizada para suprir cargas prioritárias, operando em paralelismo com a rede de acordo com a demanda de calor.

Figura 2.5 - Esquema de geração paralela com cargas térmicas



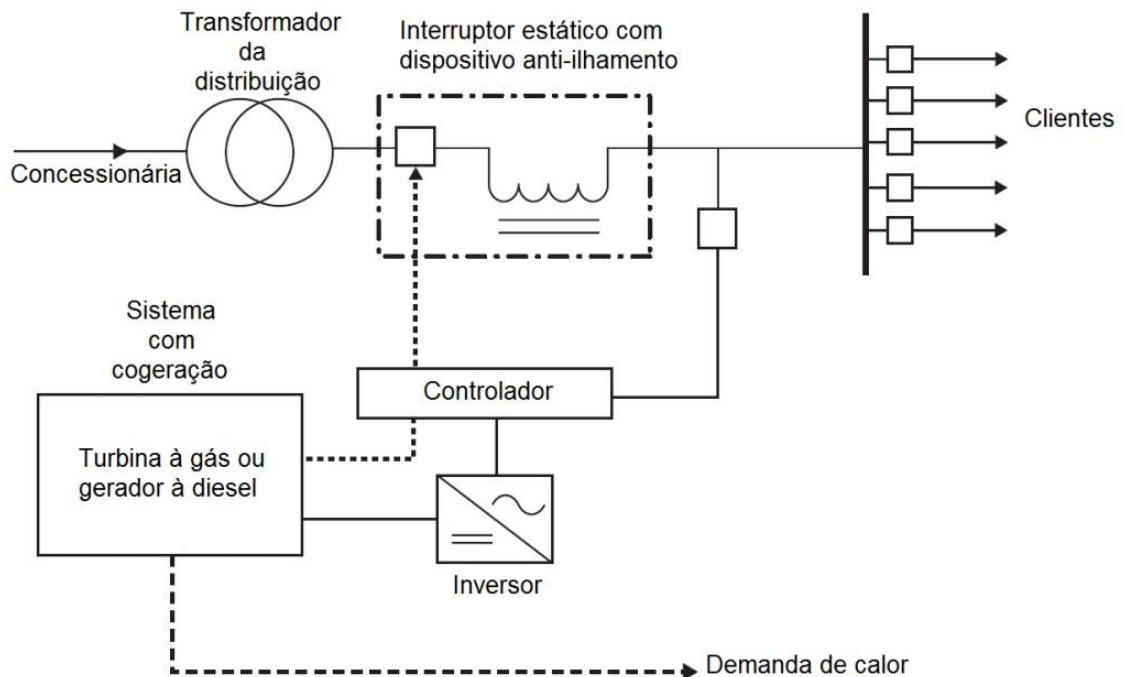
- Geração auxiliar com mecanismo de armazenamento: é ideal para cargas sensíveis e que não possam ter seu fornecimento de energia interrompido, como mostrado na figura 2.6. Além da geração auxiliar é possível a utilização de um mecanismo de armazenamento. Durante a partida, pode-se utilizar um flywheel, o que garante a não interrupção do fornecimento. O sistema de controle para o sistema de armazenamento melhora a qualidade da energia e a transferência automática entre o motor e a concessionária e o corte da carga. Por razões econômicas os geradores com combustíveis alternativos podem ser usados em horários de pico, expandindo assim a capacidade do sistema. Como o custo da energia é mais alto nesse período de pico, a concessionária pode comprar essa operação.

Figura 2.6 - Esquema de geração auxiliar com armazenamento



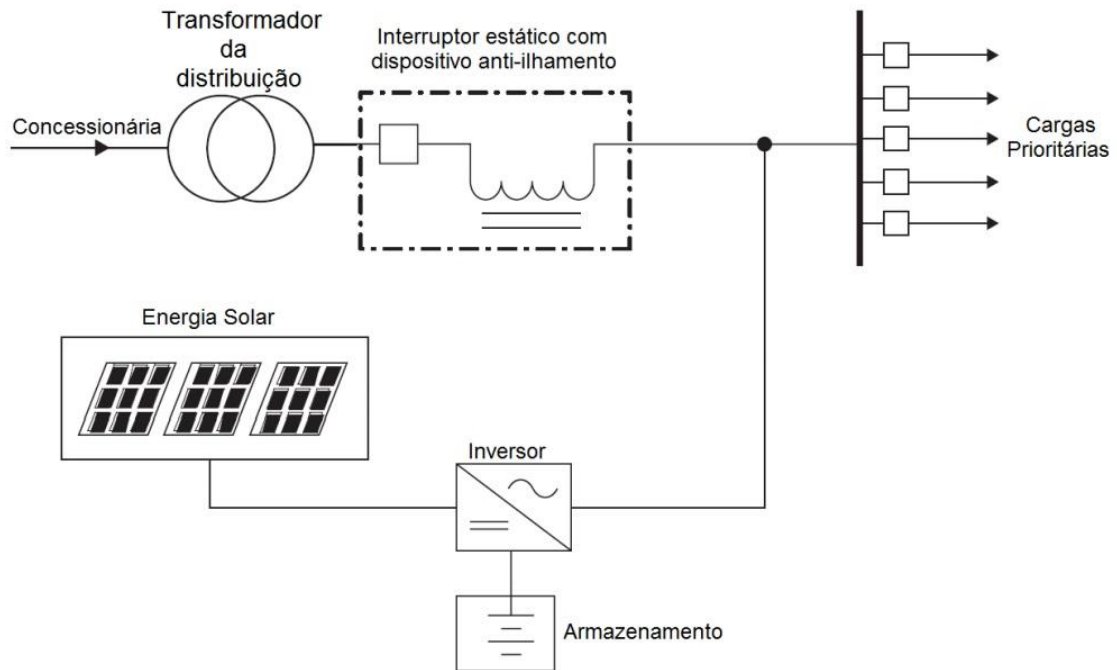
- Cargas térmicas constantes e operação ilhada: quando temos grandes pacotes de energia térmica que sejam de utilização constante, é possível dividir uma parte da rede com dispositivo anti-ilhamento, como mostrado na figura 2.7. A energia gerada pela turbina é de boa qualidade, isso melhora o desempenho das cargas da microrrede. Outra vantagem é que quando ocorre uma falta na rede a turbina continua alimentando o sistema separado da concessionária. Uma das funções de controle desse sistema é a determinação do momento adequado para a separação de parte ou de todo o sistema.

Figura 2.7 - Cogeração de grande porte, capaz de ilhamento



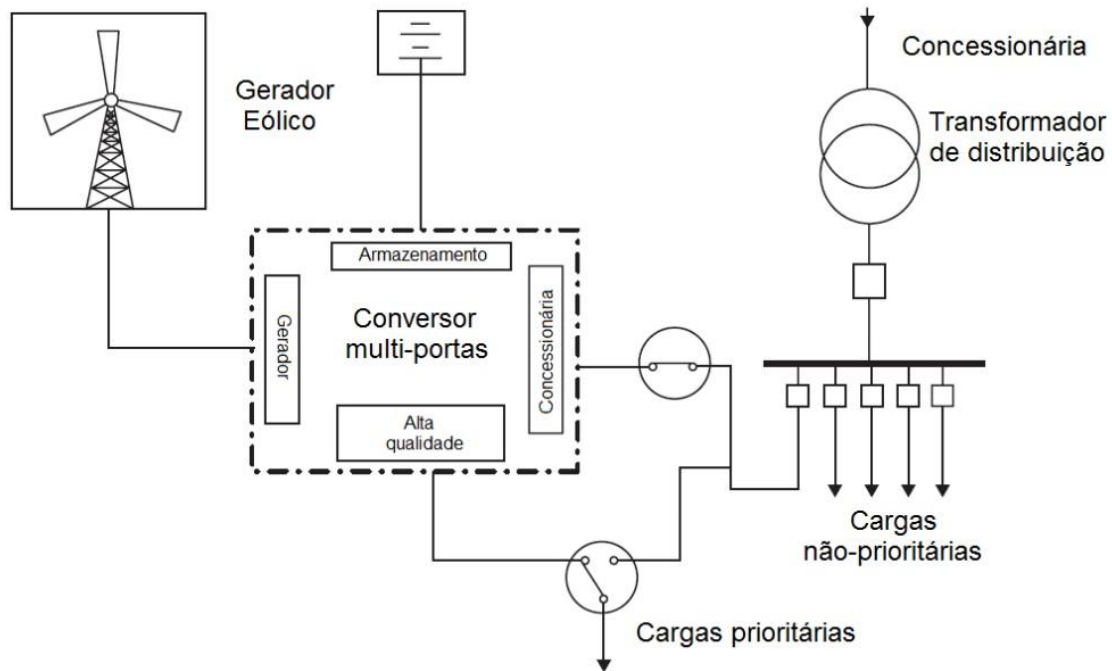
- Acoplamento de células solares: podem-se adicionar células solares ligadas por um inversor à barra da microrrede, como mostrado na figura 2.8. Essa implementação pode ser realizada com um filtro ativo de potência e um sistema de armazenamento por baterias.

Figura 2.8 - Acoplamento de energia solar



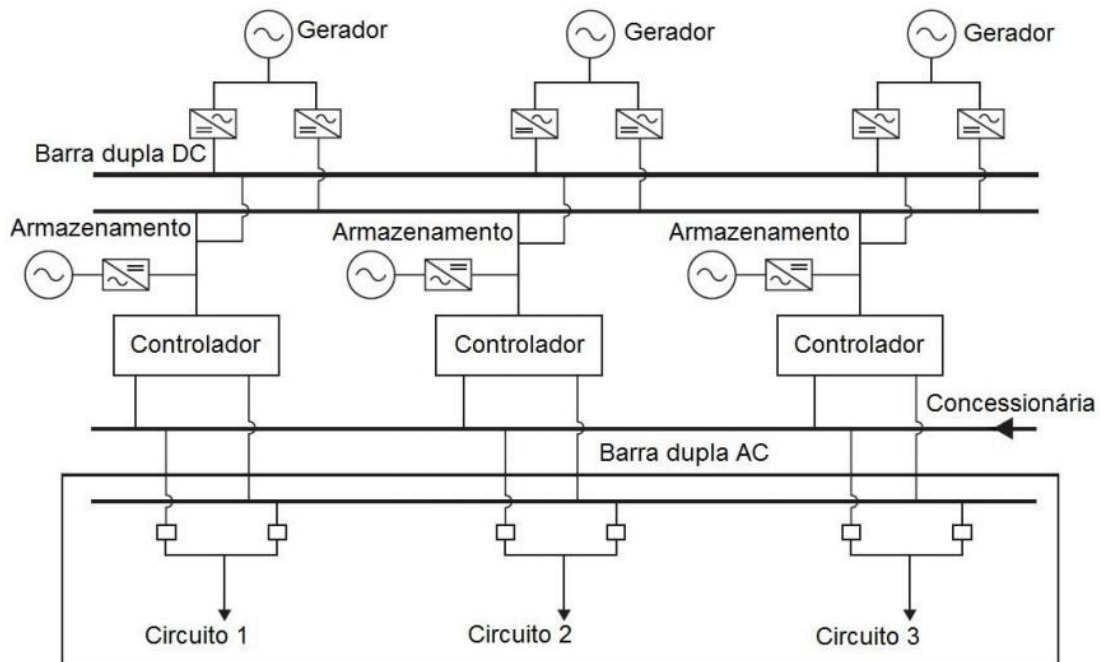
- Acoplamento de geradores eólicos: neste caso a energia gerada localmente é utilizada seletivamente, de acordo com a importância da carga. Para esse tipo de estrutura é necessária uma eletrônica de potência bem sofisticada, para permitir o paralelismo entre a geração eólica, o armazenamento e a distribuição das cargas com o suprimento normal da concessionária, como mostrado na figura 2.9

Figura 2.9 - Acoplamento de gerador eólico



- Sistema com barra dupla DC: quando queremos uma operação independente da concessionária e com alta qualidade de energia, podemos utilizar a geração distribuída como principal fonte. Os geradores eólicos, células solares, a combustível, turbinas de cogeração, entre outros, são ligados a um esquema de barra dupla DC, conectado a flywheels, e então a barra de consumo. A barra de consumo estaria novamente em arranjo de barra dupla AC, sendo uma delas o ponto de acoplamento com a concessionária. Assim o sistema fica protegido contra faltas na geração distribuída através do isolamento da barra DC. Para esse arranjo, é necessário um sistema de controle muito avançado, que seja capaz de controlar o fator de potência, o despacho econômico da GC, além de todas as outras funcionalidades já descritas nos outros arranjos, como mostrado na figura 2.10.

Figura 2.10 - Sistema com barra dupla DC



A implementação das microrredes pode ser feita de forma progressiva, evoluindo conforme a necessidade dos clientes e a viabilidade econômica e comercial. Para obter êxito na geração sem interrupções de fornecimento, é preciso dar atenção ao tempo de partida das turbinas e geradores a combustão, para que seja mantida a capacidade de fornecimento da energia apenas pelos dispositivos de armazenamento.

Uma questão bem delicada e que precisa de um estudo detalhado e cuidadoso é o paralelismo com a rede, de modo que as faltas que ocorram na microrrede não afetem o sistema de distribuição. O paralelismo é muito vantajoso para ambos os lados, pois a concessionária pode comprar a energia excedente na microrrede nos horários de pico.

Uma grande motivação para o desenvolvimento da geração distribuída nas microrredes, é que seus proprietários possam futuramente vender a energia no mercado aberto.

### 2.2.3 Recursos da geração distribuída

Os geradores de energia distribuída presentes em uma microrrede são tipicamente fontes alternativas ou renováveis de energia. A geração distribuída tem como principal objetivo a exploração das vantagens das fontes renováveis que emitam pouco carbono e a busca pela alta eficiência de sistemas que produzam calor e energia por cogeração.

Como exemplo desses recursos pode-se citar alguns pequenos sistemas que geram calor como subproduto de seus processos, turbinas de aquecimento de água para piscinas ou até mesmo os fornos da padaria. Já as fontes renováveis podem ser células fotovoltaicas, aerogeradores e pequenas centrais hidrelétricas. Para a melhor escolha dessas fontes deve-se levar em conta os fatores geográficos, tais como clima, relevo e um estudo da disponibilidade do combustível.

A seguir estão descritos alguns tipos de recursos para a geração de energia distribuída.

### **2.2.3.1. Geração eólica**

É uma das formas mais promissoras de geração de energia por fontes renováveis. Essa tecnologia já é utilizada pelo homem há muitos anos, em barcos a vela, em moinhos e para bombeamento de água. A geração de energia se dá pelo contido do vento nas pás do cata-vento. Quando giram as pás originam energia mecânica que aciona o rotor do aerogeradores, produzindo assim a eletricidade. Essa energia mecânica está diretamente relacionada com a densidade do ar, a área coberta pela rotação das pás e a velocidade do vento<sup>11</sup>.

A expressão que relaciona os fatores para calcular a potência aproveitada, é a equação (2.1):

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad (2.1)$$

Onde:

$C_p$  = coeficiente de potência

$P$  = potência (W)

$V$  = velocidade do vento (m/s)

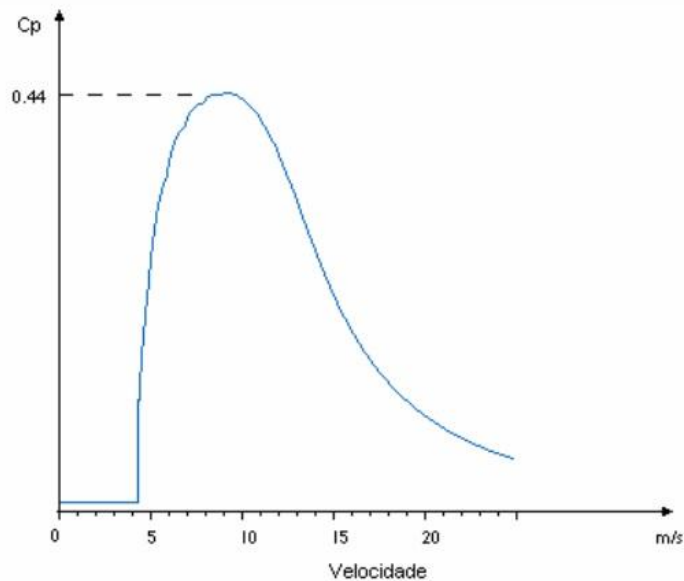
$A$  = área varrida pela hélice (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = densidade do ar (1.225 kg/m<sup>3</sup>)

O coeficiente de potência ( $C_p$ ) determina a eficiência da turbina eólica de acordo com a velocidade de vento, sendo seu máximo 0,59, o limite de Betz. A figura 2.11 mostra que o coeficiente de potência eleva-se até certa velocidade do vento, em geral antes de atingir a velocidade nominal, após isso ele diminui com o aumento da velocidade em função de limitar a conversão da energia eólica na potência nominal da máquina.



Figura 2.11 - Curva de rendimento de uma turbina eólica típica



Fonte: LEITE, Andréa Pereira, 2005.

Os planaltos são os melhores locais para instalação das turbinas eólicas. Para o projeto é preciso levar em conta as intensidades de vento na região, a topografia, o uso final da energia e a facilidade de acesso ao local. Os parques eólicos são locais onde a incidência de vento é grande, o que justifica o investimento nos aerogeradores de grande porte. No Brasil, o Nordeste e o litoral das regiões Sul e Sudeste, são regiões de grande potencial eólico. Em estados do Nordeste, a escassez de água é um grande problema. A geração de energia eólica aliada à energia solar apresenta-se como uma eficiente para o abastecimento de energia elétrica<sup>11</sup>.

Apesar de a energia eólica ser renovável e ambientalmente correta, deve haver restrições na operação perto de centros urbanos, ou seja, perto das cargas. Os prédios e a vegetação densa são obstáculos que reduzem a velocidade do vento para as hélices. A rotação das pás pode causar interferências em ondas de rádio e TV. Outro fator negativo dos parques eólicos é a ameaça aos pássaros em migração, e a possível alteração do clima local, pois modifica a velocidade dos ventos que passam pelas pás. O fator que minimiza esses efeitos negativos é a rotação lenta das pás<sup>15</sup>. Para causar pouco impacto ambiental é necessário um planejamento adequado para a instalação dos parques eólicos.

### 2.2.3.2 Células fotovoltaicas

Anualmente o sol fornece  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia para a atmosfera terrestre. Esse valor equivale a 10000 vezes o consumo mundial de energia em um ano. Além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar é considerada uma fonte energética inesgotável<sup>16</sup>.

O Brasil é um privilegiado em relação ao seu potencial energético solar. Tem uma capacidade em torno de 2500 MW, o que é cinco vezes maior que nos Estados Unidos, por exemplo. Logo, as oportunidades de exploração dessa tecnologia são bem amplas, destacando-se o aproveitamento térmico e fotovoltaico<sup>11</sup>.

Através de módulos fotovoltaicos compostos de células, a luz solar é transformada diretamente em eletricidade. Essas células consistem em dispositivos semicondutores capazes de fazer a conversão de energia solar incidente em corrente contínua, possuindo rendimento entre 3% a 25%, dependendo da intensidade do espectro de iluminação, da temperatura, do projeto e do material da célula. A célula pode adotar o comportamento de uma bateria de baixa tensão, em média 0,5 volts, e sua carga é completada em uma taxa proporcional a incidência de iluminação. Um sistema completo de abastecimento de energia elétrica é constituído por equipamentos de condicionamento de potência e um sistema de armazenamento. Sua aplicação ainda é mais viável em pequena escala<sup>11</sup>.

### 2.2.3.3 Sistemas de armazenamento

O desperdício de energia elétrica é um tema constantemente discutido devido ao crescimento da demanda de energia, o mau uso da energia elétrica e preocupação com os fatores ambientais. O armazenamento de energia elétrica é uma das soluções para o desperdício, uma vez que a energia que já foi gerada pode ser armazenada para uso posterior ou até mesmo para venda. Em se tratando de Redes Inteligentes e Microrredes, é necessário considerar geração de energia solar e eólica. A energia eólica é difícil de prever, pois os ventos sopram aleatoriamente. Já a energia solar sem um sistema de armazenamento é inútil no período noturno. Para o armazenamento de energia existem várias formas, tais como: baterias, ultra capacitores, células combustíveis, dentre outras<sup>17</sup>.

## 1. Células combustíveis

São definidas como dispositivos eletroquímicos capazes de transformar energia química em energia elétrica, podendo produzir calor desde que seja fornecido um combustível e um oxidante. Sendo o hidrogênio o combustível ou algum composto que o tenha na sua composição, e o oxigênio como oxidante. São constituídas por dois eletrodos, um catodo e um anodo, e entre eles um eletrólito. A função do eletrólito é permitir a passagem dos íons de um eletrodo para outro. Cada célula individual é capaz de produzir 0,8 volts. Para obtenção da tensão desejada é necessária a associação em série das células. Uma associação em paralelo aumenta a capacidade de corrente.

As células combustíveis apresentam dois problemas técnicos fundamentais: uma baixa taxa de reação, que leva a redução das intensidades de corrente e potência por área, e o fato de que o hidrogênio não é um combustível que está prontamente disponível, pois na natureza ele sempre se encontra associado a outros elementos. Como não possuem partes rotativas ou móveis, elas possuem elevada durabilidade e alto rendimento. Mas para a utilização nas Smart Grids, é necessário o uso de sistemas auxiliares. São utilizados compressores para que haja circulação do ar e do combustível pelos canais das células. Isso é necessário em todos os tipos de pilhas de células combustíveis, com exceção das que possuem pequenas dimensões. Outra parte vital de um sistema de pilhas são os motores elétricos, que põe em funcionamento as bombas, os sopradores e os compressores.

Elas produzem energia em tensão contínua, variando a tensão consideravelmente atendendo a potência solicitada, o que não é satisfatório para uma ligação direta com a carga elétrica, deve-se ter algum tipo de condicionamento de potência. Isso pode ser feito por um regulador de tensão ou um conversor CC/CC. Caso seja necessário fornecer à carga corrente alternada, deve-se acrescentar ao sistema um inversor CC/CA, aumentando significativamente os custos do sistema. Com o calor produzido pelo funcionamento das pilhas, é possível utiliza-lo para aquecimento de água, aumentando assim a eficiência do sistema. Essa aplicação é muito útil quando se trata de consumidores residências. Tendo como subprodutos da reação do hidrogênio o calor e a água pura, as pilhas são vistas como tendo “zero emissões”.

Os custos dos materiais, da fabricação, das pesquisas e da construção, são as principais desvantagens das células combustíveis. Também não existe uma boa infraestrutura para a produção, o transporte e o armazenamento do hidrogênio. O combustível a ser usado tem que

estar livre de contaminantes, senão a célula tem o desempenho reduzido podendo parar de funcionar<sup>17</sup>.

## 2. Ultracapacitores

Seu primeiro protótipo foi desenvolvido no Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems do MIT, Massachusetts Institute of Technology, com o intuito de substituir as baterias convencionais. Também são conhecidos como Electric Double-layer capacitors (EDLCs), ou capacitor de dupla camada. Eles usam uma camada de eletrólito com espessura molecular, diferenciando-se assim de um capacitor comum que utiliza uma folha manufaturada de material como dielétrico. Eles têm uma densidade de energia altíssima, pois a energia armazenada é inversamente proporcional à espessura do dielétrico. Os ultracapacitores possuem capacitâncias na ordem de centenas e até mesmo de milhares de Farads.

Podem ser substitutos das baterias em aplicações que exijam grande corrente de descarga. Diferentemente das baterias convencionais que podem ser recarregadas centenas ou milhares de vezes, os ultracapacitores podem ser recarregados centenas de milhares de vezes. O tempo de carregamento é extremamente rápido, podendo ser usado em sistemas solares residenciais. Suas vantagens são: rápido tempo de resposta, pouca manutenção, tempo de vida elevado, alta eficiência, grande densidade de potência, podendo ser dez vezes maior que uma bateria convencional, métodos simples de recarga, pelo fato de que ele não precisa ser totalmente descarregado, não sofre com efeitos de sobrecarga, possui baixa resistência interna, porém seu custo ainda é muito elevado. Sua tensão por célula é baixa, entre 2 e 3 volts, como a tensão não se mantém constante durante a descarga, é exigido um complexo sistema de controle eletrônico, o que acarreta em uma perda de energia<sup>17</sup>.

## 3. Baterias

Seu princípio de funcionamento é dado pela liberação de energia entre os pólos positivo (catodo), que é reduzido pela absorção dos elétrons liberados pela oxidação do negativo (anodo). A diferença de potencial entre os terminais é dada pela menor quantidade de íons positivos liberados. São classificadas em dois grupos: baterias primárias são geradores que não podem ser recarregadas após o esgotamento de sua capacidade. Já as baterias secundárias através da colocação de energia no dispositivo, atuando como acumulador, faz com que a bateria suporte diferentes recargas.

Através do processo de descarga tem-se a conversão de energia elétrica em energia química. A água é decomposta com a passagem de corrente em sentido contrário ao de descarga, liberando assim o hidrogênio que toma para si o íon sulfato das placas, fazendo com que se restabeleça o ácido que tinha se dissociado na descarga. Já o oxigênio da água oxida o chumbo da placa positiva, recuperando assim o dióxido de chumbo. Já a placa negativa produz chumbo esponjoso. Conforme a diferença de potencial entre os eletrodos aumenta, é possível observar exteriormente que o eletrólito se torna mais concentrado. A classificação é dada de acordo com o material do eletrodo e do eletrólito, o formato e as dimensões do dispositivo. A International Electro Technical Standardisation Commission, sediada em Genebra, que estabelece as especificações para as baterias.

Como exemplo de reações químicas que as baterias usam tem-se: bateria de zinco-carbono, baterias de lítio, baterias de chumbo-ácido, baterias de níquel-cadmio, baterias de níquel-metal, baterias de lítio-íon, bateria de zinco-ar e bateria de gel<sup>17</sup>.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 REY, J. P. **Renewable Energy / Microgrids and Smart Grids (Course Notes - Minicourse)**. Vitória - ES - Brasil: UFES – DEL, 2011.

2 IEEE Global History network. 2012.

Disponível em: <[http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Pearl\\_Street\\_Station](http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Pearl_Street_Station)>. Acesso em: 15 jul. 2014.

3 LASSETER, R. H., **MicroGrids, s.l.**: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions. 2002.

4 ABB - Asea Brown Boveri Ltd, **.When Grids Get Smart ABB's Vision for the Smart Grid**. 2008. Disponível em:

<[http://www02.abb.com/db/db0003/db002698.nsf/0/23bd705661c12f6ec12575bb002a5be9/\\$file/ABB+paper+smart+grids+June+version.pdf](http://www02.abb.com/db/db0003/db002698.nsf/0/23bd705661c12f6ec12575bb002a5be9/$file/ABB+paper+smart+grids+June+version.pdf)>. Acesso em: 16 jul. 2014.

5 SIOSHANSI, Fereidoon P. **Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy**. Massachusetts: Elsevier, 2011.

6 LASSETER, R. H. Microgrids and Distributed Generation. **Journal of Energy Engineering, American Society of Civil Engineers**, setembro, 2007.

7 ALCÂNTARA, Márcio Venício Pilar. Microrredes inteligentes: um novo modelo de negócio para a distribuição de energia elétrica, **Revista O Setor Elétrico**, Capítulo VII, 2008. Disponível em:

<[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed71\\_fasc\\_smart\\_grids\\_cap7.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed71_fasc_smart_grids_cap7.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2014.

8 LASSETER, R. H. & PIAGI, P. **Microgrid: A Conceptual Solution**. Madison, WI, USA, Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual.

9 DIAS M. V. X.; BOROTINI, E. C.; HADDAD, J. Geração Distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras, **Revista Brasileira de Energia**, vol. 11, n. 2, 2005. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=187>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

10 CAMARGO, Celso de Brasil. **Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais**, 3ª ed., vol. 1. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006, p. 239.

11 BARBOSA, Wilson Pereira; AZEVEDO, Abílio César Soares. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: VANTAGENS E DESVANTAGENS**. II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais da Amazônia 2014. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo\\_gd.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2014.

12 INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Notas sobre Geração Distribuída**, 2001. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/down\\_loads/forum/Notas%20sobre%20GD.pdf](http://www.inee.org.br/down_loads/forum/Notas%20sobre%20GD.pdf)>. Acesso em: 30 jan. 2014.

13 CHOWDHURY, S.P; CROSSLEY P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. IET 2009 (1ª ed.). Cap. 1, 2, 3, 4 e 7.

14 LEITE, Andréa Pereira. **Modelagem de fazendas eólicas para estudos de confiabilidade**. Rio de Janeiro, 2005.

15 PORT, Rafael Jorge. **Uma análise sobre medição e faturamento de potência e energias não ativas**. Itajubá, 2006.

16 CRESESB – Centro de Referência para Energia solar e Eólica de Salvo Brito. **Tutorial de Energia Solar – Princípios e Aplicações**, 2006.

17 JUNG, Jackson. **Armazenamento de energia em Smart Grids**. Porto Alegre, 2010

### 3. O RECURSO EÓLICO

O vento pode ser conceituado como o deslocamento das massas de ar através das variações de pressão causadas pelo aquecimento desigual da superfície terrestre. Esse deslocamento é responsável pela produção de energia cinética, sendo esta a fonte primária de energia para os aerogeradores<sup>1</sup>.

A seguir serão descritos os mecanismos de geração dos ventos e os principais fatores de influência no regime dos ventos de uma região.

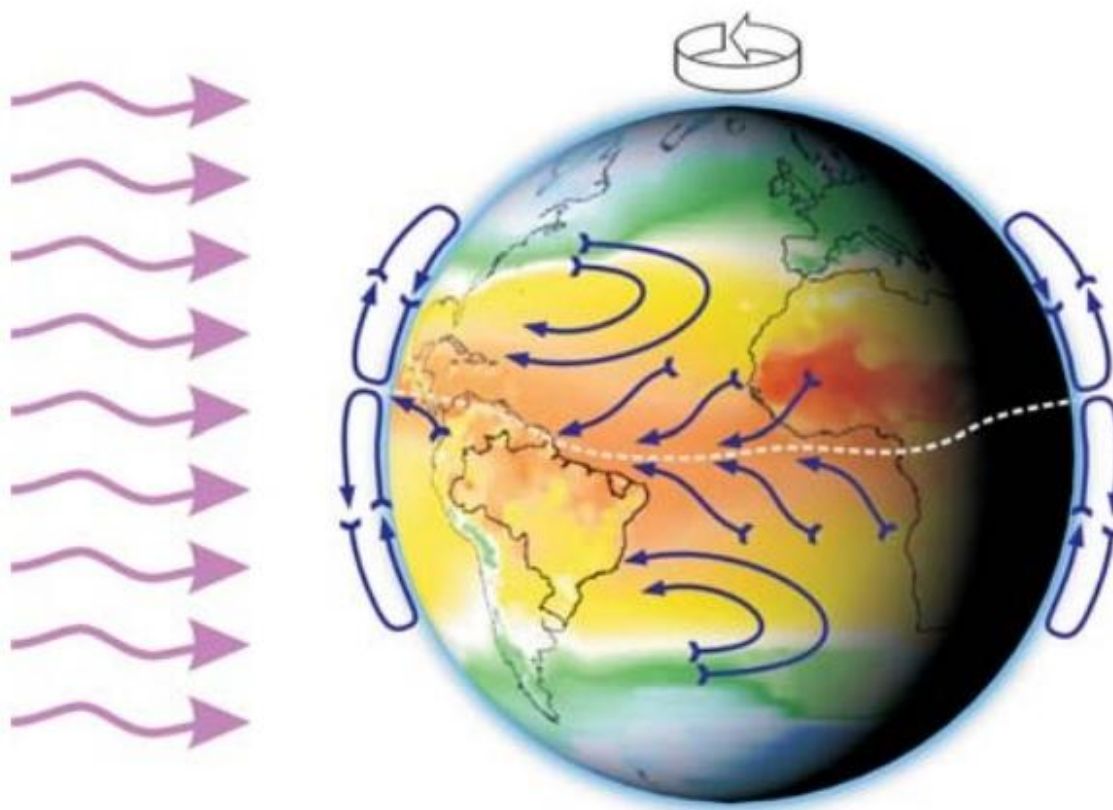
#### 3.1. Mecanismos dos ventos

Os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, portanto a energia eólica pode ser considerada como uma das formas de manifestação da energia proveniente do Sol. Os movimentos da Terra e a orientação dos raios solares são responsáveis por essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera. Nas regiões tropicais os raios solares chegam à Terra quase que perpendicularmente, como consequência disso o ar que está nas baixas altitudes sobe, e é substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca para as regiões polares. A figura 3.1 ilustra esse mecanismo<sup>2</sup>.

Em alguns lugares do planeta os ventos nunca param de “soprar”. Isso se deve ao fato de que os mecanismos que produzem os ventos estão sempre presentes na natureza. Eles são chamados de ventos planetários ou constantes, e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

Figura 3.1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar



### 3.2.Fatores que influenciam o regime dos ventos

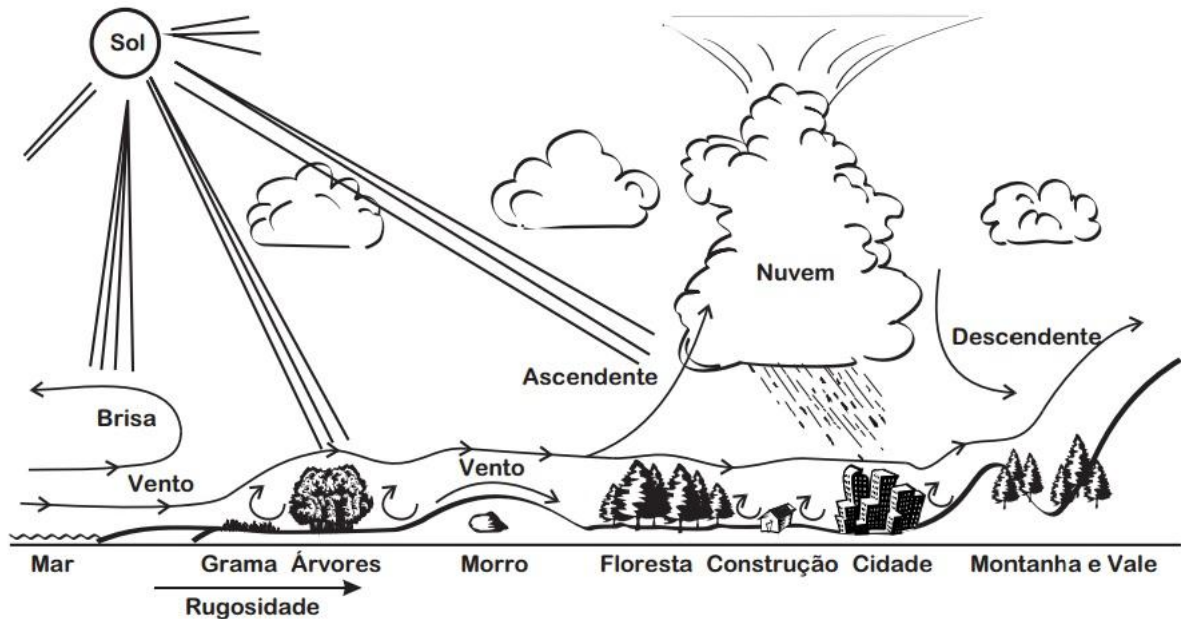
Alguns dos principais fatores que influenciam no regime de ventos estão:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

O levantamento das informações de cada região pode ser realizado através de mapas topográficos e de uma visita ao local, podendo avaliar e modelar a rugosidade do terreno e os obstáculos. A figura 3.2 mostra de forma genérica o comportamento dos ventos sob influência das características do solo.



Figura 3.2 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno



Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998

### 3.3.A energia extraída do vento

A energia cinética de uma massa de ar  $m$  em movimento a uma velocidade  $v$  é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Onde:

$E$  = energia cinética [J]

$m$  = massa de ar [kg]

$v$  = velocidade da massa de ar em movimento [m/s]

Se considerarmos a mesma massa de ar em movimento com uma velocidade  $v$ , que seja perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário, ilustrado na figura 3.3, podemos definir a potência disponível de vento que passa pela seção A, sendo transversal ao fluxo, pela equação 3.1:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.2)$$

Onde:

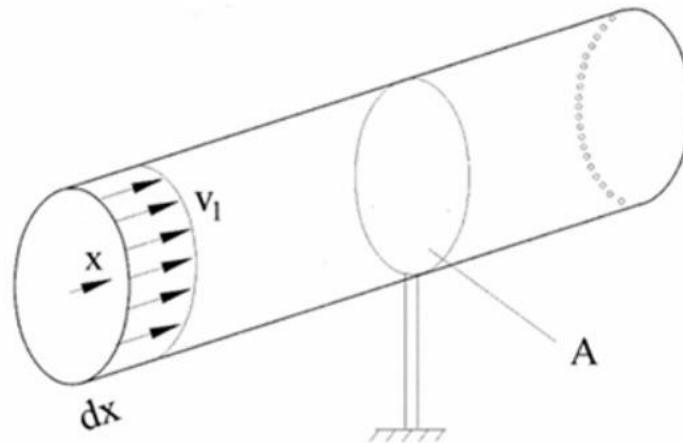
$P$  = potência do vento [W]

$\rho$  = massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ]

$A$  = área da seção transversal [ $\text{m}^2$ ]

$v$  = velocidade do vento [ $\text{m/s}$ ]

Figura 3.3 - Fluxo de ar através de uma área transversal  $A$



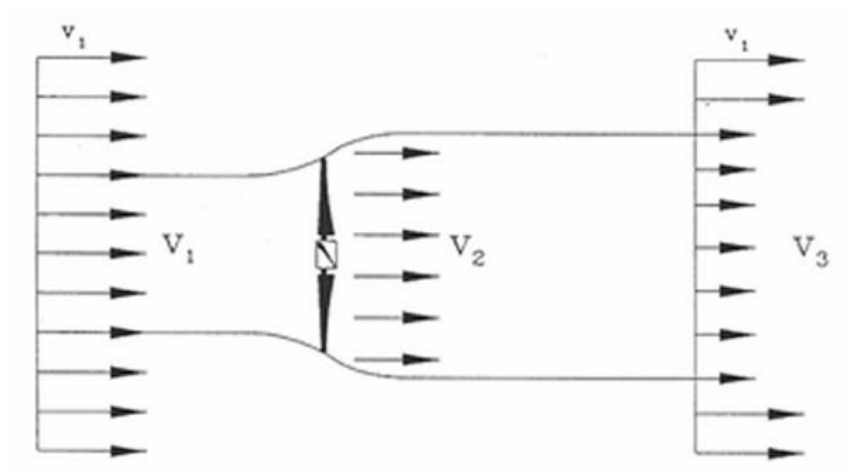
Reescrevendo a expressão 3.2 na forma de unidade por área, obtemos a equação mais importante para a análise da energia eólica. A densidade de potência ou fluxo de potência é definida de equação 3.3:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.3)$$

Quando reduzimos a velocidade do deslocamento da massa de ar, através da rotação das pás, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica. Na conversão para energia elétrica, a potência disponível do vento não pode ser totalmente utilizada pelo aerogerador. Levando em consideração tal característica física, é necessário introduzir um índice denominado coeficiente de potência  $C_p$ . Esse coeficiente é definido como a fração da energia do vento que passa pelo rotor do aerogerador e este transforma em trabalho mecânico.

A determinação do valor máximo desse coeficiente foi desenvolvida pelo físico alemão Albert Betz. Albert considerou um conjunto de pás em um tubo, ilustrado na Figura, sendo  $v_1$  a velocidade do vento na região anterior as pás,  $v_2$  a velocidade do vento no nível das pás e  $v_3$  a velocidade do vento após deixar as pás.

Figura 3.4 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás



Pela figura 3.4, observa-se que Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade  $v_1$  que é retardada pelo conjunto de pás e uma velocidade  $v_3$  a jusante das pás. Pela lei da continuidade, temos a expressão 3.4:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \rho_3 v_3 A_3 \quad (3.4)$$

Levando em conta que a diminuição da pressão do ar é mínima, podemos considerar que a densidade do ar é constante. Sendo assim, a energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

$$E_{\text{ex}} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.5)$$

A potência extraída do vento por sua vez é dada por:

$$\dot{E}_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2) \quad (3.6)$$

Observando a relação entre as velocidades  $v_1$  e  $v_3$  podemos fazer duas considerações:

- Como a velocidade do vento não é alterada,  $v_1 = v_3$ , não há potência extraída;
- A velocidade  $v_3$  é reduzida a zero, assim o fluxo de massa de ar também é zero, não havendo potência extraída também.

Partindo destas considerações, concluímos que a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre  $v_1$  e  $v_3$ . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor  $v_2$  é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (3.7)$$

Conforme o teorema de Rankine-Froude, assume-se que a relação entre as velocidades  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (3.8)$$

Inserindo a equação 3.7, que representa a massa de ar, e a equação 3.8, da velocidade  $v_2$ , tem-se:

$$E_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.9)$$

Onde:

$$\text{Potência do vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$\text{Coeficiente de potência } C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

Ao considerar o coeficiente de potência  $C_p$  em função de  $\frac{v_3}{v_1}$  temos que:

$$C_{p_{\text{Betz}}} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (3.10)$$

$$\text{onde } \frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3}.$$

O valor máximo teórico do coeficiente de potência, conhecido como Limite de Betz, é igual a 0,59<sup>8</sup>.

Pesquisas de desenvolvimento tecnológico buscam formas de aumentar o coeficiente de potência, entretanto os avanços atingidos apresentam ainda modestos ganhos na potência através do aumento da área varrida pelo rotor, a localização do aerogerador em locais onde se tenha as maiores velocidades de vento e a utilização de torres mais altas, são fatores que ajudam no incremento de potência na saída do aerogerador.

Alguns parâmetros são determinantes para a determinação do coeficiente de potência. São eles:

- Número de pás do rotor;
- Distribuição do comprimento da corda ao longo da pá;
- Características aerodinâmicas dos aerofólios;
- Variação da torção das pás<sup>9</sup>.

### 3.4. Distribuição de frequência de velocidade do vento

Como o vento tem característica estocástica e sua velocidade é uma variável aleatória contínua, é necessário fazer a discretização dos dados para facilitar a análise. Como padrão em estudos relacionados à geração eólica, as velocidades do vento são divididas em faixas de 1 m/s.

Os dados a serem analisados são retirados de estações anemométricas que medem continuamente e registram a velocidade média dos ventos em períodos discretos, que podem ser de minutos ou horas.

A velocidade média do vento para o período de estudo, é obtida pela expressão 3.11:

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.11)$$

Onde:

$v_i$  = velocidade do vento registrada [m/s]

$n$  = número de registros

$i$  = identificação do registro

### 3.5. A distribuição de Weibull

Dentre as muitas funções densidade de probabilidade existentes, a que melhor representa o comportamento da velocidade do vento é a função de Weibull. A função densidade de probabilidade de Weibull é definida por:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (3.12)$$

Onde:

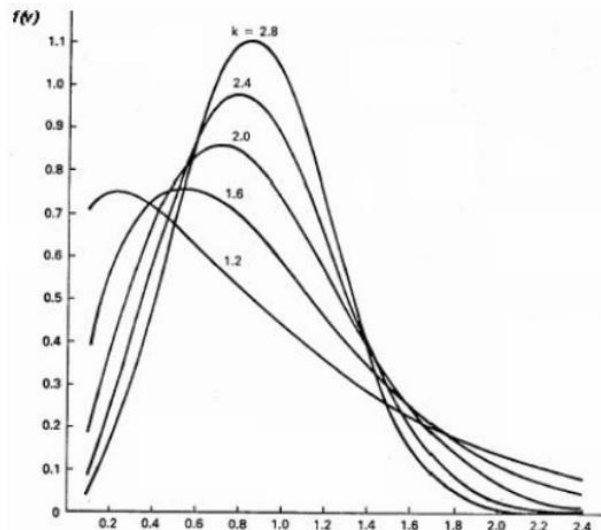
$v$  = velocidade para a qual se deseja calcular a probabilidade

$c$  = parâmetro de escala

$k$  = parâmetro de forma

Observando a figura 3.5, vemos que quanto maior o valor do parâmetro  $k$ , mais estreita e mais pontuda é a curva de Weibull, isso indica que existe uma menor variação da velocidade de vento. Já o fator de escala, que está relacionado com o valor médio da velocidade, quanto maior for, maior será o valor da velocidade média.

Figura 3.5 - Formas que a função de Weibull pode assumir para valores distintos de  $k$  e  $c$  igual a 1



Fonte: LEITE, Andréa Pereira, 2005

### 3.6.Solidez

A solidez de um aerogerador, representada pela letra grega  $\sigma$ , é definido como a relação entre a área projetada total das pás do rotor e a área varrida pelo rotor. A expressão que descreve a solidez é:

$$\sigma = \frac{\text{área projetada das pás}}{\text{área varrida pelo rotor}} \quad (3.13)$$

Rotores de alta solidez têm como característica alto torque e desempenho ótimo em baixas velocidades. Os de baixa solidez podem operar com rendimentos maiores em velocidades elevadas, porém tem uma característica de partida pobre. Aerogeradores empregados na geração de energia elétrica possuem característica de rotores de baixa solidez<sup>4</sup>.

### 3.7. Fatores de capacidade e disponibilidade

Fator de capacidade de um aerogerador é a razão entre a energia produzida em um determinado período, neste caso um ano, e a energia produzida caso ele estivesse operando em sua capacidade nominal. O fator de capacidade, FC, é descrito pela expressão 3.14:

$$FC = \frac{\text{energia produzida no ano (kWh)}}{\text{potência nominal do aerogerador (kW)} * 8760h} \quad (3.14)$$

O fator de disponibilidade é calculado pelo tempo equivalente na potência nominal de sua produção total de energia no período de um ano. Este fator,  $F_{disp}$ , é descrito pela expressão 3.15:

$$F_{disp} = \frac{\text{energia anual produzida (kWh)}}{\text{potência nominal do aerogerador (kW)}} \quad (3.15)$$

### 3.8. Sistemas eólicos de geração de energia

O uso da energia eólica é bastante abrangente, pode ser de apenas alguns quilowatts em sistemas residenciais, em escala intermediária de alguns Megawatts em sistemas de geração distribuída ou em grande escala com capacidade de gerar dezenas ou centenas de Megawatts. As condições para que se estabeleçam os padrões de geração dependem da demanda localizada ou do sistema como um todo<sup>1</sup>.

Em sistemas eólicos com menores potências instaladas, como os residenciais e os de geração distribuída de médio porte, têm-se diferentes configurações quanto à conexão com a rede e à forma de armazenamento da energia gerada. Existem três configurações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. A figura 3.6 ilustra os diferentes tamanhos dos aerogeradores e algumas de suas aplicações.

Figura 3.6 - Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores e suas principais aplicações



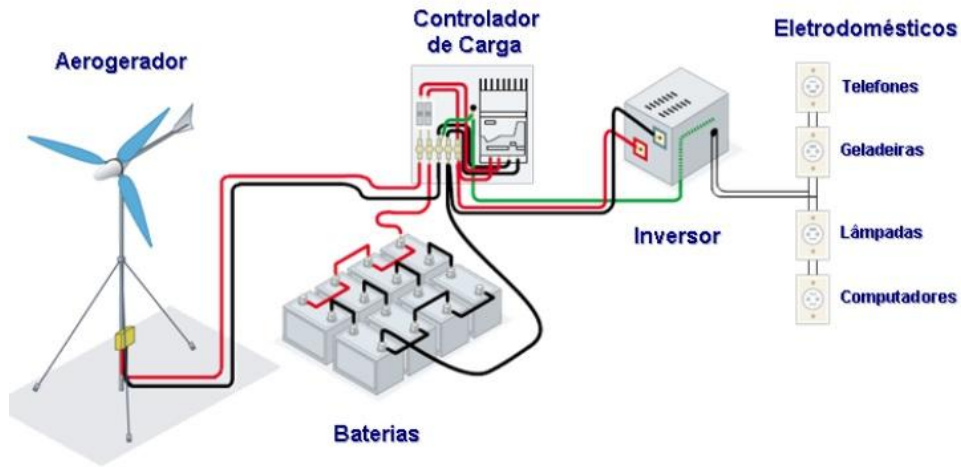
### 3.8.1. Sistemas isolados

Em geral estes sistemas precisam de um sistema de armazenamento, que pode ser feito através de baterias, para utilização de aparelhos elétricos, ou como energia gravitacional, podendo armazenar a água bombeada em reservatórios para uso posterior, como mostrado na figura 3.7. Existem sistemas que não precisam de armazenamento, como os sistemas de irrigação, uma vez que a água bombeada é diretamente consumida.

Nos sistemas que utilizam baterias, é necessária a presença de um dispositivo que controle a carga e a descarga da bateria. O objetivo deste controlador é evitar danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda. Quando a alimentação dos equipamentos é feita em corrente alternada (CA), é preciso utilizar um inversor. Este sistema é usado quando se deseja utilizar eletrodomésticos convencionais.



Figura 3.7 - Configuração de um sistema eólico isolado

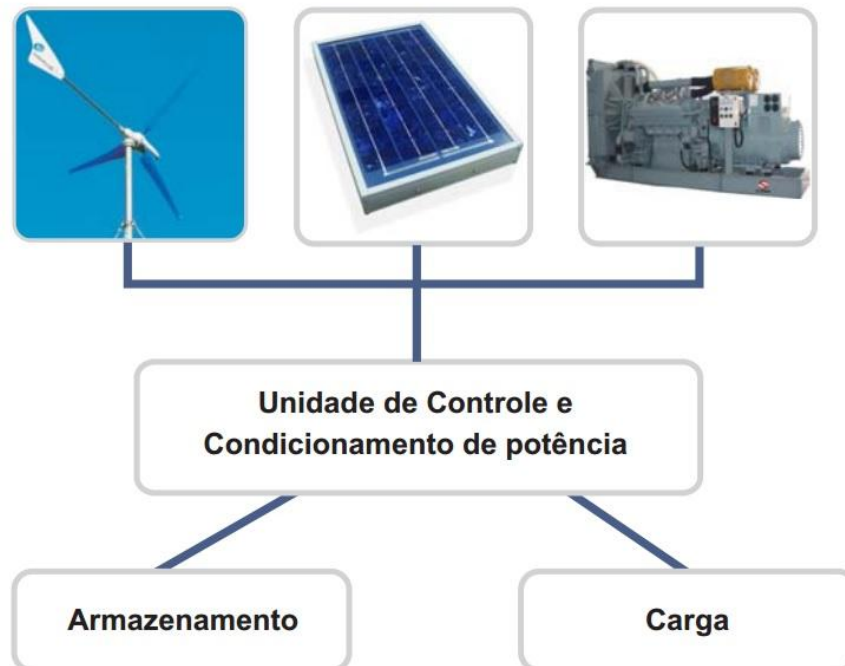


### 3.8.2. Sistemas híbridos

Quando desconectados da rede convencional, estes sistemas possuem diversas fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. Quando usamos várias formas de geração de energia há um aumento na complexidade do sistema, isto exige um aperfeiçoamento no uso de cada uma das fontes. Sendo assim, é necessário um controle de todas as fontes, para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário, como mostrado na figura 3.8.

Esses sistemas geralmente são empregados em sistemas de médio e grande porte, que possam atender um número grande de clientes. Neste sistema também é necessário o uso de um inversor quando as cargas trabalham em corrente alternada. Como há grande complexidade nos arranjos e diversas opções, cada sistema deve ter um estudo de caso particular.

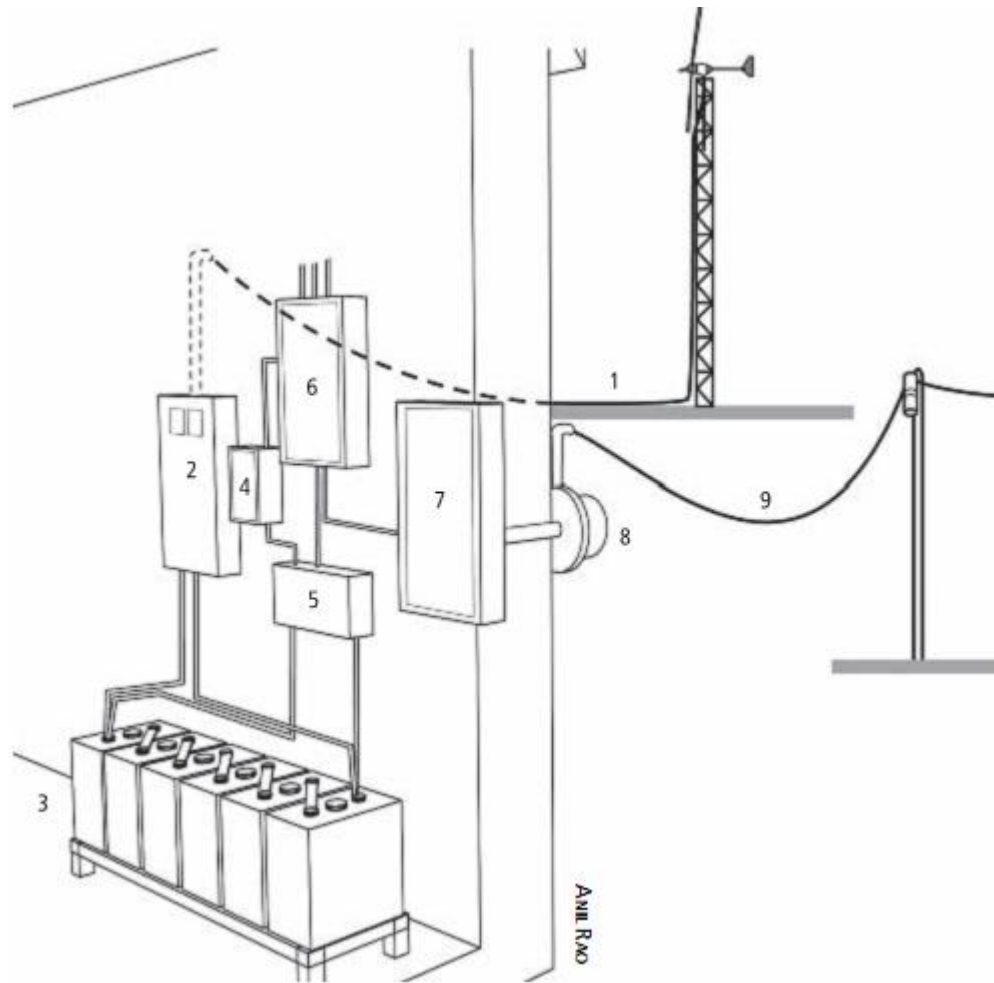
Figura 3.8 - Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel



### 3.8.3. Sistemas interligados à rede

Este sistema admite duas opções: com sistema de armazenamento e sem sistema de armazenamento. Na configuração com sistema de armazenamento com bancos de bateria, o sistema tem a energia gerada pelo aerogerador levada ao ponto de uso por uma linha de corrente alternada. Esta linha vai até um retificador que está ligado ao banco de baterias que funciona em corrente contínua. O sistema possui um inversor de frequência onde a corrente contínua é convertida em corrente alternada para uso em 110 V ou 220 V na frequência de 60Hz. A partir do inversor há um painel usado para alimentação de cargas críticas, que faz com que o sistema seja levado até um medidor bidirecional que está ligado à rede de distribuição, podendo estar localizado na residência, como mostrado na figura 3.9.

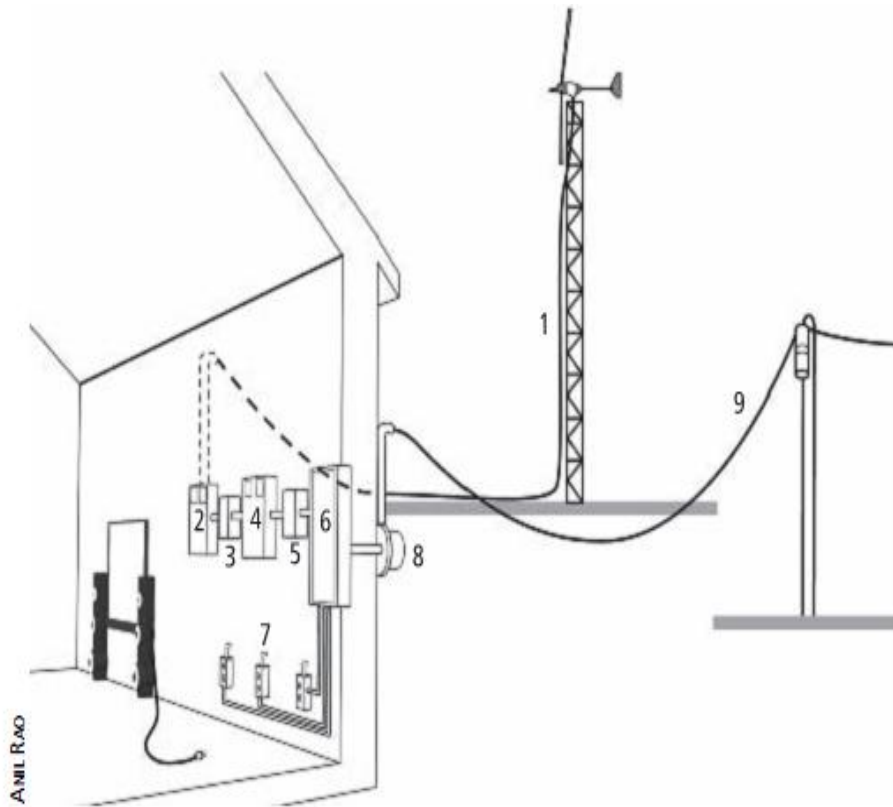
Figura 3.9 - Sistema Eólico com baterias e conectado à rede



A energia gerada neste sistema tem como prioridade a alimentação das cargas. A energia excedente é armazenada no banco de baterias até que fique cheio, e possa ser injetado na rede. Quando há falta de vento, não havendo geração de energia no sistema eólico, a prioridade para alimentação das cargas é da rede. O banco de baterias só pode ser utilizado em caso de back-up do sistema eólico ou quando há queda na rede<sup>5</sup>.

Quando o sistema possui um grande número de aerogeradores, o uso dos bancos de baterias torna-se inviável. Assim, toda a energia produzida é injetada na rede. Esse tipo de configuração necessita de um medidor bidirecional, como mostra a figura 3.10. As cargas são alimentadas pela energia gerada pelo aerogerador, e em caso de falta quem fornece energia é a rede. Do mesmo modo que o caso com sistemas de armazenamento, o excedente é injetado na rede.

Figura 3.10 - Sistema eólico sem banco de baterias e conectado à rede



A regulamentação para injeção de energia na rede foi feita pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em abril de 2012 através da resolução N°482. Esta resolução diz que microgeração distribuída limita-se aos 100 kW instalados, a minigeração entre 100kW e 1MW instalados e quanto a compensação de energia elétrica diz que:

O sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda<sup>7</sup>.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 MELO, Gilberto Martins. **Um estudo da viabilidade de pequenos aerogeradores na produção de energia elétrica.** Recife, 2009.

2 CRESESB – Centro de Referência para Energia solar e Eólica de Salvo Brito. **Energia Eólica, Princípios e Tecnologia**, 2009.

3 LEITE, Andréa Pereira. **Modelagem de fazendas eólicas para estudos de confiabilidade**. Rio de Janeiro, 2005.

4 COCHRAN, B. C., **The Influence of Atmospheric Turbulence on the Kinetic Energy Available During Small Wind Turbine Power Performance Testing**, CEDER-CIEMAT, Espanha, 2002.

5 NEVES, Carlo G. **Tecnologia de Sistemas Eólicos**. Disciplina de Graduação de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente – UNIPAMPA. Bagé-RS, 2012.

6 ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de Abril de 2012.

#### 4. O RECURSO SOLAR

A energia solar é convertida para energia elétrica pelos efeitos sobre determinados materiais semicondutores, eles podem ser termoelétricos e fotovoltaicos. Os efeitos termoelétricos são caracterizados pelo surgimento de uma diferença de potencial em condições específicas, já nos efeitos fotovoltaicos os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica<sup>1</sup>.

A disponibilidade da radiação solar depende da latitude local e da posição no tempo, fatores esses que são consequência do movimento de rotação e translação da Terra<sup>2</sup>. Portanto a cada dia o grau de intensidade da radiação é diferente, conforme visto na Figura 4.1.

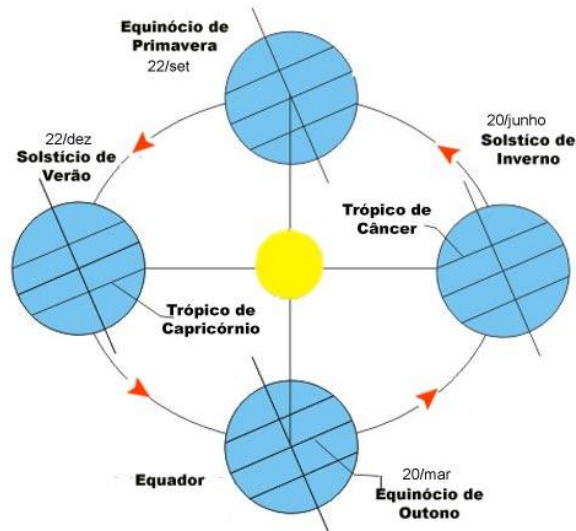
Figura 4.1. Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol



Fonte: MAGNOLI, 1998.

O movimento anual do planeta em torno do Sol é uma trajetória elíptica em um plano que é inclinado de aproximadamente  $23,5^\circ$  em relação ao plano equatorial. Como resultado dessa inclinação temos a variação da elevação do Sol no horizonte em relação a mesma hora, no decorrer dos dias, dando origem as estações do ano. Essa inclinação dificulta os cálculos da posição do Sol para determinada data, como pode ser visto na figura 4.2.

Figura 4.2 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de  $23,5^\circ$



A declinação solar ( $\delta$ ) é a posição angular do Sol no meio dia solar em relação ao plano do Equador (Norte positivo). Esse ângulo varia de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$$

Para determinação da trajetória de movimento aparente do Sol é necessário somar a declinação com a latitude local.

Para definir a declinação solar em qualquer época do ano, basta utilizar a equação 4.1:

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (4.1)$$

Onde:

$\delta$  = declinação solar ( $^\circ$ )

$n$  = dia do ano

Conhecendo as horas do nascer e do pôr do sol, é possível determinar a quantidade de radiação solar que incidirá sobre a Terra através das equações 4.2 e 4.3.

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (4.2)$$

Onde:

$H_{SR}$  = horário do nascer do sol

$L$  = latitude local

$\delta$ = ângulo de declinação solar[°], para o nascente é utilizado o sinal negativo (-) entre parênteses, já para o poente é utilizado o valor positivo (+)

$$\text{Sunrise or Sunset} = 12:00 - \frac{H_{SR}}{15^\circ/h} \quad (4.3)$$

A insolação extraterrestre pode ser aferida matematicamente, conforme a equação 4.4<sup>4</sup>.

$$I_0 = 1370 \left[ 1 + 0,034 \left( \frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (4.4)$$

Onde:

$I_0$  = insolação extraterrestre [W/m<sup>2</sup>]

$n$  = número do dia

Algumas metodologias analíticas também permitem determinar, em função das características geofísicas do local, a insolação incidente sobre a superfície da terra,  $I_B$ , conforme dado na equação 4.5, onde os coeficientes são definidos nas equações 4.6, 4.7 e 4.8.

$$I_B = A e^{-km} \quad (4.5)$$

$$m = \frac{1}{\text{sen } \beta} \quad (4.6)$$

$$A = 1150 + 75 \text{ sen} \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (n - 275) \right] \quad (4.7)$$

$$k = 0,174 + 0,035 \text{ sen} \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (n - 100) \right] \quad (4.8)$$

Onde:

$A$  = insolação extraterrestre aparente [W/m<sup>2</sup>]

$k$  = profundidade ótica da atmosfera [W/m<sup>2</sup>]

$\beta$ = ângulo de altitude solar [°]

É interessante conhecer a insolação incidente diretamente sobre o coletor, dada por  $I_{BC}$ , na equação 4.9, onde algoritmos específicos podem ser implementados, através das equações de 4.5 a 4.10.

$$I_{BC} = I_B \cos\theta \quad (4.9)$$

$$\cos\theta = \cos\beta \cdot \cos(\varphi_s - \varphi_c) \cdot \text{sen}\Sigma + \text{sen}\beta \cdot \cos\Sigma \quad (4.10)$$



Onde:

$\theta$  = ângulo de incidência [°]

$\varphi_s$  e  $\varphi_c$  = ângulos azimutais solares e do coletor, respectivamente [°]

$\Sigma$  = ângulo de inclinação do coletor [°]

A atmosfera interfere na incidência solar sobre os coletores,  $I_c$ , dessa forma é necessário ampliar o cálculo analítico, com as equações 4.11 a 4.16, através de uma definição mais precisa das componentes de incidência,  $I_{DC}$  e  $I_{RC}$ . O  $I_{DC}$  é a insolação difusa na atmosfera e  $I_{RC}$  é a insolação refletida pelo solo sobre o coletor.

$$I_{DH} = C \cdot I_B \quad (4.11)$$

$$I_{BH} = I_B \cdot \text{sen}(\beta) \quad (4.12)$$

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \text{sen} \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (n - 100) \right] \quad (4.13)$$

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (4.14)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot I_B \cdot (\text{sen} \beta + c) \cdot \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (4.15)$$

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (4.16)$$

Onde:

$\rho$  = refletância do solo

$C$  = fator de difusão do céu

$I_{BH}$  = componente direta incidente sobre uma superfície horizontal

$I_{DH}$  = componente difusa de insolação sobre uma superfície horizontal.

#### 4.1. Formas de utilização da energia solar

##### 1. Energia Solar Fototérmica

A partir da radiação solar incidente em um corpo, é preciso saber a quantidade de energia que esse corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor. Para utilizar esse tipo de energia, é necessário que saibamos captá-la e armazená-la. Com esse objetivo específico, os coletores solares são os equipamentos mais difundidos. Eles são aquecedores de fluidos, que podem ser líquidos ou gasosos. São classificados em coletores concentradores e coletores planos, em

função da existência ou não de dispositivos de concentração da radiação solar. O fluido aquecido deve ser mantido em reservatórios termicamente isolados até seu uso final<sup>5</sup>.

Atualmente os coletores solares planos são bastante utilizados para aquecimento de água em residências, hospitais, hotéis, etc. proporcionando conforto e redução do consumo de energia elétrica.

## 2. Arquitetura Bioclimática

É o estudo que tem como objetivo harmonizar as construções ao clima e características locais, levando em consideração o homem que habitará ou trabalhará nelas. Tira proveito da energia solar através de correntes convectivas naturais e de microclimas criados por vegetação apropriada. Mas essa arquitetura não se limita apenas as características arquitetônicas adequadas, considera também o desenvolvimento de equipamentos e sistemas que são necessários ao uso da edificação com uso de materiais de conteúdo energético menor possível. Por exemplo, aquecimento de água, circulação de ar e de água, iluminação, etc.<sup>5</sup>.

## 3. Energia Solar Fotovoltaica

Pelo efeito fotovoltaico, a energia é obtida da conversão direta da luz em eletricidade. Esse efeito foi relatado por Edmond Becquerel, em 1839. Edmond observou o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão<sup>5</sup>.

### 3.1 Tipos de células fotovoltaicas

Silício Monocristalino - É a mais usada historicamente como conversor direto de energia solar em eletricidade. Seu processo de fabricação é básico e bem constituído. Sua fabricação começa com a extração do cristal de dióxido de silício, que é desoxidado em grades fornos, purificado e solidificado. Ao fim desse processo, o cristal de silício atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético. Para funcionar como célula fotovoltaica ele precisa de outros dispositivos semicondutores e grau de pureza que chegue à faixa de 99,9999%.

As células monocristalinas, entre as células fotovoltaicas que utilizam o silício, são as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito

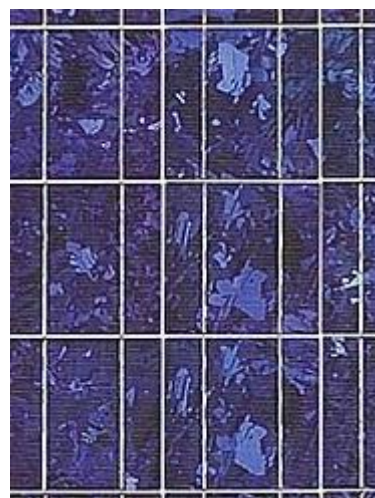
acima atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

Figura 4.3 - Exemplo de célula monocristalina



Silício policristalino - Seu custo é menor em relação às células monocristalinas, pois seu processo de preparação das células é menos rigoroso. No entanto sua eficiência se reduz um pouco. O processo é semelhante ao das células monocristalinas. Elas podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nos dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. No decorrer dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais.

Figura 4.4 - Exemplo de célula policristalina



Silício Amorfo - A célula de silício amorfo é diferente das demais, pois apresenta estruturas cristalinas de alto grau de desordem na estrutura dos átomos. Seu uso tem se mostrado bem vantajoso, tanto em relação às propriedades elétricas quando ao processo de fabricação. A absorção da radiação solar é na faixa do visível, que ao ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos. Por isso esse tipo de célula está sendo cada vez mais usado em sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Apesar de seu custo de produção ser reduzido, o silício amorfo tem duas desvantagens: baixa eficiência na conversão comparada as células mono e policristalinas e suas células sofrem um processo de degradação já nos primeiros meses de operação, o que rediz a eficiência ao longo da vida útil.

Mas o silício amorfo apresenta vantagens compensadoras, são elas:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- Baixo consumo de energia na produção.

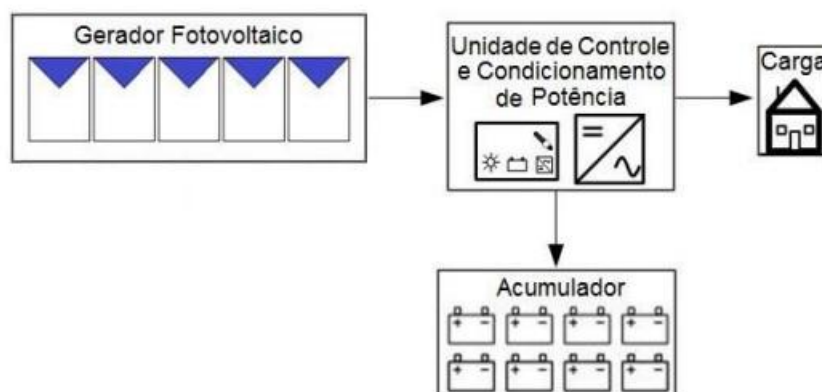
## **4.2. Aplicações dos sistemas fotovoltaicos**

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Nos dois casos os sistemas podem operar a partir apenas de fonte fotovoltaica ou podem ser combinados com outras fontes de energia. Essa escolha é determinada pela aplicação e/ou disponibilidade dos recursos energéticos<sup>6</sup>.

### **4.2.1. Sistemas isolados**

Sistemas isolados, puramente fotovoltaicos ou híbridos geralmente necessitam de algum tipo de armazenamento, como mostrado na figura 4.5. Este armazenamento pode ser feito em baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica, ou em outras formas de armazenamento de energia. A bateria também funciona como uma referência de tensão c.c. para os inversores formadores da rede do sistema isolado. Os sistemas isolados de geração de energia contam também com uma unidade responsável pelo controle e condicionamento de potência composta por inversor e controlador de carga.

Figura 4.5 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico isolado



Os sistemas isolados podem ser divididos em: sistemas individuais ou microrredes. Em sistemas individuais a geração de energia é exclusivamente para atendimento de uma única unidade consumidora. Já em uma microrrede a geração é compartilhada entre um pequeno grupo de unidades consumidoras, que possuem pequena distância entre si.

Com o crescimento do potencial de uso das fontes renováveis e o aumento da demanda atendida em uma microrrede isolada, a Aneel publicou em junho de 2012 a Resolução Aneel Nº 493/2012, que substitui Resolução Aneel Nº 83/2004 e estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) e também do Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI)<sup>1</sup>.

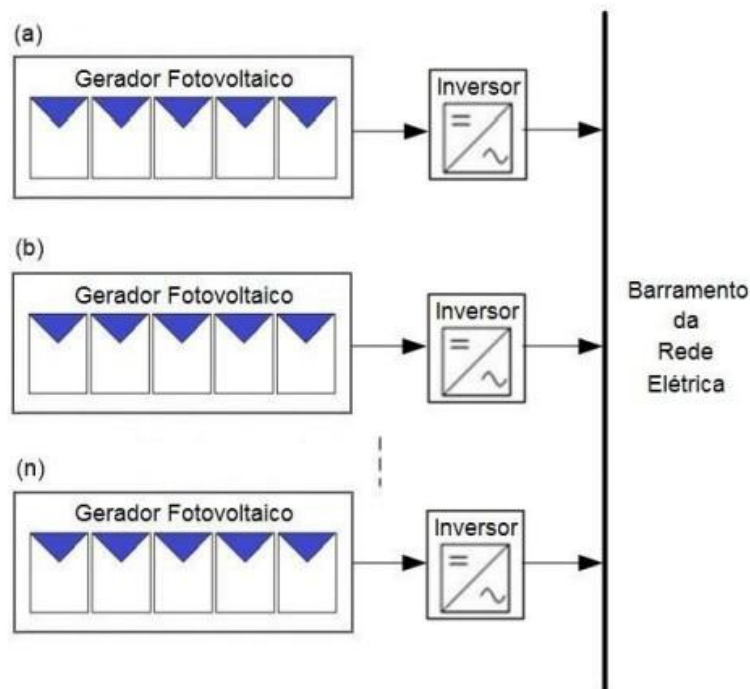
#### 4.2.2. Sistemas conectados à rede

Nessa configuração a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é injetada diretamente na rede elétrica. É indispensável o uso de um inversor que atenda as exigências de qualidade e segurança, evitando a degradação do sistema elétrico ao qual o gerador está interligado. Através da Resolução 482 de abril de 2012, esse tipo de sistema foi incluído na regulamentação disposta pela Aneel. Essa resolução estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. A figura 4.6 mostra o esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Essa resolução ainda não permite a operação ilhada desse tipo de sistema, portando em caso de falta de energia na rede de distribuição o sistema fotovoltaico para de funcionar.

Como toda a energia produzida é entregue diretamente a rede, esse sistema dispensa o uso de sistema de armazenamento. Esses sistemas são considerados de um único tipo, no qual o gerador fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico que está conectado.

Esse tipo de instalação está se tornando cada vez mais popular em diversos países europeus, no Japão e nos Estados Unidos, e recentemente no Brasil. A faixa de potência instalada destes sistemas vai de poucos kW em instalações residenciais até alguns MW, em grandes sistemas operados por empresas. A forma de conexão com a rede depende, dentre outras características, da legislação local vigente.

Figura 4.6 - Sistema fotovoltaico conectado à rede



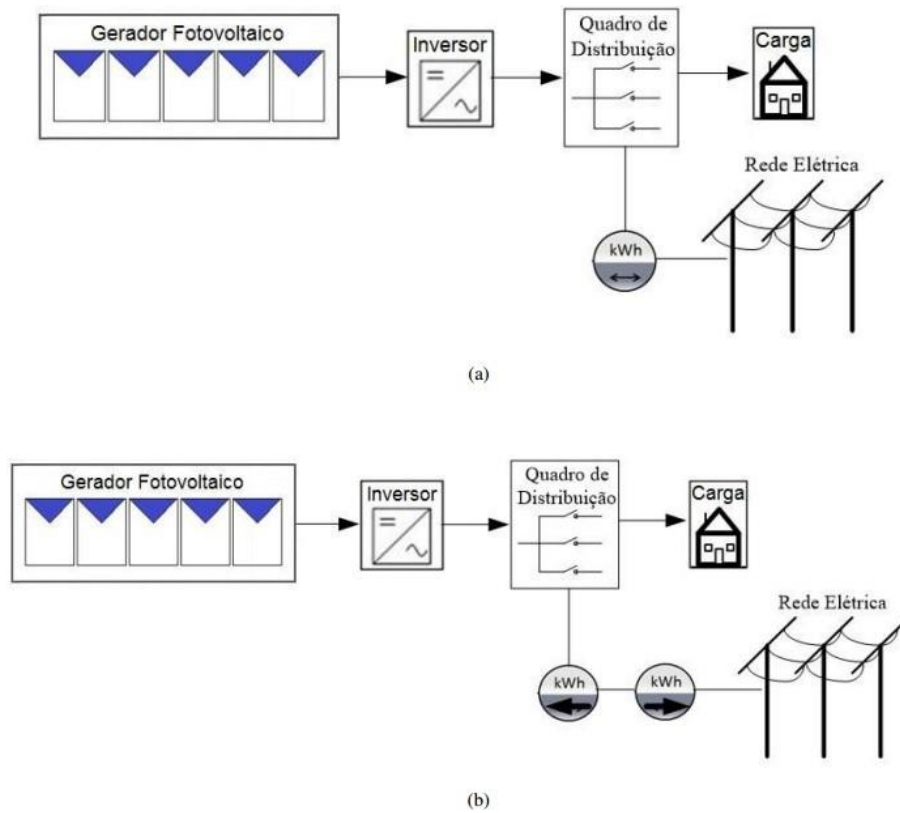
### 1. Micro e minigeração fotovoltaica

Os sistemas de micro e minigeração são regulamentados pela Resolução Normativa Aneel N° 482/2012, e devem atender aos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3, e às normas de acesso das distribuidoras locais. Essa resolução estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, cujas definições são:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
- Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda.

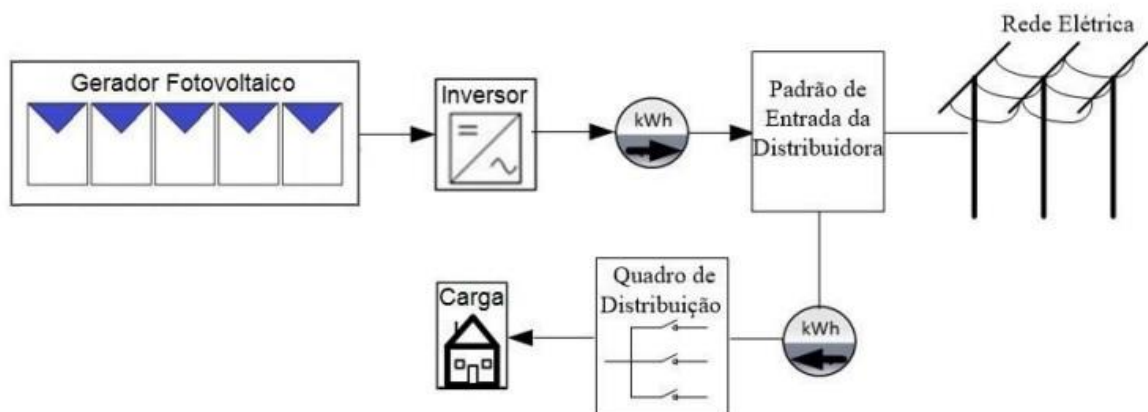
Os tipos de medição de energia são classificados em: medição bilateral de registros independentes e medições simultâneas. Nas medições bilaterais de registros independentes, mostrada na figura 4.7 (a) e (b), a energia consumida e a energia injetada na rede de distribuição são registradas separadamente pelo medidor bidirecional. Em cada instante de tempo o registro é feito em apenas um dos sentidos. Esse tipo de medição é o requerido pela Aneel na regulamentação em vigor. A resolução normativa nº 569, de 23 de julho de 2013 estipula que as unidades consumidoras do grupo B, onde estão os clientes residenciais, não podem ser cobradas pelo excedente de reativos devido ao seu baixo fator de potência.

Figura 4.7 - Medição bidirecional de registros independentes (a) com a utilização de um medidor bidirecional e (b) com a utilização de dois medidores unidirecionais



As medições simultâneas são adotadas quando são necessárias informações precisas sobre o consumo e a produção de energia no sistema fotovoltaico. Nesse tipo de medição toda energia gerada é medida, assim como toda a energia consumida. A figura 4.8 mostra que a medição da energia gerada pelo sistema fotovoltaico é independente da medição de energia consumida pela unidade consumidora. O balanço energético é feito pela distribuidora. Essa medição também está prevista na regulamentação da Aneel.

Figura 4.8 - Medições simultâneas

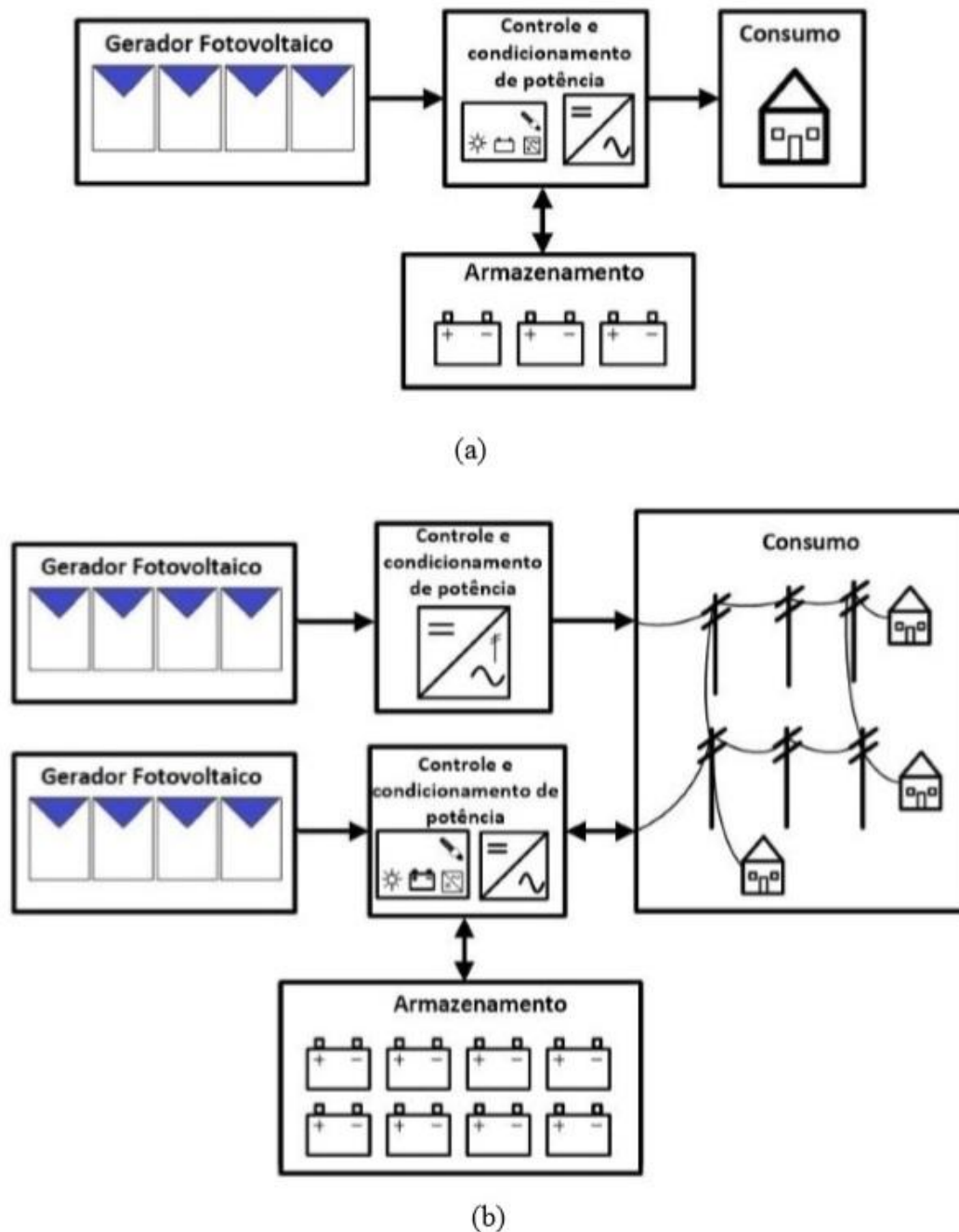


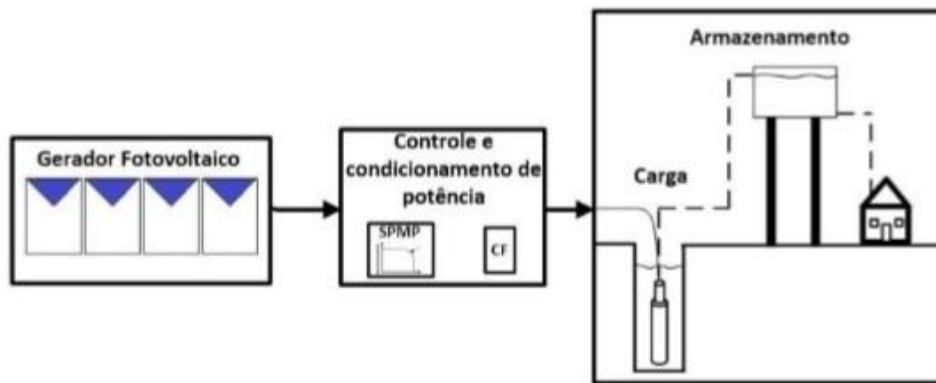


### 4.3. Etapas preliminares do projeto de um sistema fotovoltaico

Pelas figuras 4.9 e 4.10 é possível observar os blocos básicos de um sistema fotovoltaico, tais como geração, equipamentos de controle e condicionamento de potência, e em caso de sistemas isolados, armazenamento de energia.

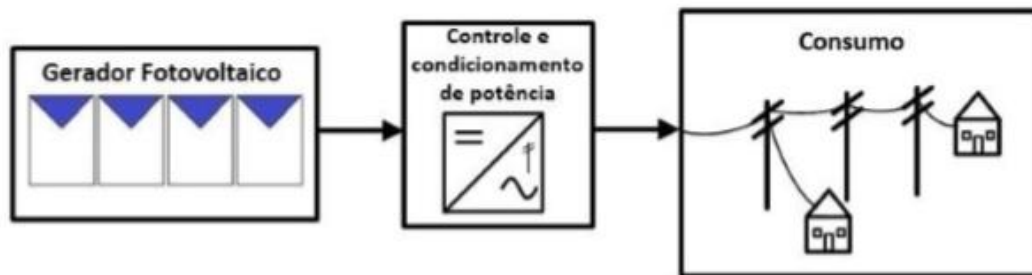
Figura 4.9 – Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos isolados: (a) Isolado para eletrificação individual; (b) Isolado para eletrificação com microrrede; (c) Bombeamento de água





(c)

Figura 4.10 – Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos: Microgeração conectada a rede



As principais etapas do projeto de um sistema fotovoltaico são:

1. Levantamento adequado do recurso solar disponível no local da aplicação;
2. Definição da localização e configuração do sistema;
3. Levantamento adequado da demanda e consumo de energia elétrica;
4. Dimensionamento do gerador fotovoltaico;
5. Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência que, no caso de sistemas conectados a rede, se restringe ao inversor para interligação com a rede;
6. Dimensionamento do sistema de armazenamento, para o caso de sistemas isolados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANEEL, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª edição, Brasília, 2008.
- 2 DUFFIE & Beckman, **Solar engineering of thermal processes**, Wiley, 2006.
- 3 MAGNOLI, Demétrio; SCALZARETTO, Reginaldo. **Geografia, espaço, cultura e cidadania**. São Paulo: Moderna, 1998. v. 1. (Adaptado)

4 MASTERS, GILBERT M., **Renewable and efficient electric power systems**, Wiley, 2004.

5 CRESESB - Centro de Referência para Energia solar e Eólica de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações**, 2006.

6 PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, 2014.

7 ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de Abril de 2012.

## 5. RETSCREEN

O RetScreen é um software utilizado para implementação de projetos que utilizem tanto energias renováveis quanto não renováveis. O programa também apresenta modelos de eficiência energética, possibilitando assim uma redução nos custos de pré-viabilidade. O RetScreen pode avaliar a produção de energia, os custos do projeto durante seu tempo de vida e analisa a emissão dos gases de efeito estufa. O programa, de um modo geral, traz análises de projetos de geração de energia com fontes de energia limpa, como projetos de energia eólica, de sistemas fotovoltaicos, de pequenas hidroelétricas, de cogeração, de calor por biomassa, de aquecimento de ar e água por energia solar, de bombas de calor de fonte subterrânea e de refrigeração<sup>1</sup>.

Para a simulação dos projetos o programa usa como base uma planilha do Excel, que possui divisão de cores entre as células que devem obrigatoriamente ser preenchidas, com a cor amarela, as células que podem ou não ser preenchidas com a cor cinza, as células que possuem dados pré-estabelecidos na cor azul e as células que representam os resultados obtidos na cor branca. O programa possui o ícone Manual que traz todas as informações para utilização do mesmo, também o ícone Livro Texto onde há todo conteúdo do programa, outro ícone é Treinamento e Suporte, onde estão especificados conteúdos sobre simulações de projetos, e o ícone Estudo de Casos que traz alguns exemplos de experiências já realizadas. A figura 5.1 mostra a tela inicial do programa.

Figura 5.1 – Tela inicial do software RetScreen

**Informação sobre o projeto** [Veja banco de Dados do projeto](#)

Nome do Projeto

Localização do Projeto

Preparado para

Preparado por

Tipo de projeto

Tecnologia

Tipo de grid

Tipo de análise

Poder calorífico de referência

Ver parâmetros

Idioma

Manual do usuário

Moeda

Unidades

**Condições de Referência do site** [Selecionar local de dados climáticos](#)

Localização dos dados climáticos

Mostrar dado

[Completar planilha de Carga e Rede](#)

RETScreen4 2013-08-27      © Minister of Natural Resources Canada 1997-2013      NRC/CanmetENERGY

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 MAGALHÃES, Cristiane da Conceição; SIQUEIRA, Antônio Marcos de Oliveira.

**Software RetScreen: Uma ferramenta de apoio de tomada de decisão.** UFAM, Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, 2005.

## 6. DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONECTADO À REDE UTILIZANDO O SOFTWARE RETSCREEN

Para ser caracterizada como microgeração distribuída é necessário que se tenha potência instalada até 100kW. Para este projeto é utilizada uma potência instalada de 50kW.

A figura 6.1 ilustra uma situação hipotética de consumo mensal utilizada para todos os casos a seguir.

Figura 6.1 – Ilustração do consumo mensal e preço da eletricidade

### RETScreen Proj. Rede e Carga - Projeto produção de Eletricidade

Projeto produção de Eletricidade		Unidade
Sistema de produção de eletricidade do caso referência		
Tipo de grid		Rede central & carga interna
Características da carga do caso de referência		
<b>Mês</b>		<b>Eletricidade carga média bruta kW</b>
Janeiro		10
Fevereiro		20
Março		10
Abril		15
Maio		5
Junho		4
Julho		5
Agosto		6
Setembro		5
Outubro		4
Novembro		3
Dezembro		5
Carga de ponta sist. elétrico acima da média mensal máxima		100,0%
Carça de pico - anual		40
Demanda de eletricidade	MWh	71
Preço da eletricidade - caso de referência	\$/kWh	0,122
Custo total de eletricidade	\$	8.677

Para a cidade de Alegrete – RS, a tarifa da energia, de acordo com a ANEEL, é de R\$0,33793 por kWh. Como o software é Canadense, seus valores são calculados em dólar, sendo a cotação média R\$2,70. Portanto o custo é de \$/kWh 0,122.

### 6.1.Caso 1 – Sistema de geração de energia através de painéis fotovoltaicos

A figura 6.2 ilustra a análise dos recursos solares disponíveis mensalmente para a cidade de Alegrete.

Figura 6.2 – Avaliação dos recursos solares disponíveis

Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto

Tipo de análise  Método 1  Método 2

**Avaliação de recursos**

Sistema de posicionamento solar  Fixo

Inclinação  25,0

Azimut  32,5

Mostrar dado

Mês	Radiação solar diária - horizontal kWh/m <sup>2</sup> /d	Radiação solar diária - inclinada kWh/m <sup>2</sup> /d	Preço eletricidade exportada \$/MWh	Eletricidade exportada p/ rede MWh
Janeiro	6,73	6,33	122,2	3,381
Fevereiro	5,85	5,27	122,2	2,557
Março	5,00	4,17	122,2	2,251
Abril	3,81	2,92	122,2	1,553
Maio	3,19	2,09	122,2	1,165
Junho	2,60	1,63	122,2	0,890
Julho	2,94	1,85	122,2	1,045
Agosto	3,70	2,64	122,2	1,469
Setembro	4,47	3,61	122,2	1,930
Outubro	5,36	4,69	122,2	2,559
Novembro	6,43	5,99	122,2	3,128
Dezembro	6,86	6,53	122,2	3,494
<b>Ano</b>	<b>4,74</b>	<b>3,97</b>	<b>122,22</b>	<b>25,422</b>

Radiação Solar anual - horizontal MWh/m<sup>2</sup> 1,73

Radiação Solar anual - inclinado MWh/m<sup>2</sup> 1,45

No modelo energético exemplo, o sistema de posicionamento solar dos painéis é fixo com inclinação de 25°. Para cada mês do ano é calculada a radiação solar diária, tanto para superfície horizontal como para superfície inclinada. Neste caso, levam-se em consideração as medições para superfície inclinada.

Figura 6.3 – Determinação dos painéis fotovoltaicos e do inversor para o caso 1

**Fotovoltaica**

Tipo

Potência elétrica kW

Fabricante

Modelo  205 unidade(s)

Eficiência %

Temperatura de operação normal da célula °C  °F

Coefficiente de Temperatura % / °C

Área do coletor solar m<sup>2</sup>  pe<sup>2</sup>

Perdas diversas %

**Inversor**

Eficiência %

Capacidade kW

Perdas diversas %

**Resumo**

Fator de Utilização %

Eletricidade fornecida à carga MWh

Eletricidade exportada p/ rede MWh

O próximo passo é a escolha dos painéis fotovoltaicos através do banco de dados do software, mostrado na figura 6.3. Foi escolhido painéis da marca Yingli Solar, modelo YL245P-29b, pois o mesmo é certificado pelo INMETRO com nota “A”, e apresenta eficiência de 15%. O painel pesa 19,1kg e tem dimensões 1650 x 990 x 40 (mm).

## Especificações do painel

### Condições Padrões de Teste\*(CPT):

- Potência máxima (Pmax): 245Wp
- Tolerância: 0% a +5%
- Tensão em circuito aberto (Voc): 37,8V
- Tensão de Pico (Vmpp): 30,2V
- Corrente de curto-circuito (Isc): 8,63A
- Corrente de Pico (Impp): 8,11A
- Voltagem máxima do sistema: 1000V
- Tipo de célula: Silício Policristalino
- Dimensões painel: 1650 x 990 x 40 (mm)
- Moldura: Alumínio
- Peso: 19,1 kg

\*CPT: Irradiação de 1000W / m<sup>2</sup>, Espectro de Massa de Ar 1.5 e Temperatura de Célula de 25°C

Figura 6.4 - Painel fotovoltaico



Para a conexão com a rede é necessário o uso de um inversor grid-tied. Escolhi o modelo INV-A1-50KW, da marca Shenzhen ORO Power Equipment.



## Especificações do produto

- Topologia do circuito: ponte completa
- Inversor de onda senoidal
- Tipo: Inversor CC/CA
- Fases: três
- Fonte de alimentação: energia solar
- Potência de saída: 1000W

Figura 6.5 - Inversor



Figura 6.6 – Definição dos custos do projeto para o caso 1

## Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Opções					
<input checked="" type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
	<input type="radio"/> Alocação de custo				

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo	1	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	0,9%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Fotovoltaica	kW	50,23	\$ 1.274	\$ 63.990	
Carga de Ponta - Eletricidade da Rede	kW	28,00	\$ -	\$ -	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
Cabos e conectores	custo	1	\$ 1.416	\$ 1.416	
Suporte para fixação dos painéis	custo	1	\$ 7.407	\$ 7.407	
Subtotal				\$ 72.814	89,3%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 100	\$ 100	
Transporte	projeto		\$ -	\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p		\$ -	\$ -	
Inversor	custo	1	\$ 458	\$ 458	
Contingências	%	10,0%	\$ 74.112	\$ 7.411	
Juros durante a construção		1 mes(es)	\$ 81.524	\$ -	
Subtotal				\$ 7.969	9,8%
<b>Total de custos de investimento</b>				<b>\$ 81.524</b>	<b>100,0%</b>

Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>O&amp;M</b>				
Peças e mão de obra	projeto	1	\$ 1.111	\$ 1.111
Definido pelo usuário	custo		\$ -	\$ -
Contingências	%	25,0%	\$ 1.111	\$ 278
Subtotal				\$ 1.389
<b>Custo combustível - caso proposto</b>				
Eletricidade	MWh	9	\$ 122,222	\$ 1.141
Subtotal				\$ 1.141

Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>Custo combustível - caso de referência</b>				
Eletricidade	MWh	71	\$ 122,222	\$ 8.677
Subtotal				\$ 8.677

A figura 6.6 mostra a análise dos custos. Foi estipulado valor para custos iniciais de projeto de engenharia como R\$2000,00, ou \$741. Cada painel custo R\$ 860,00, para o projeto são necessários 205 painéis, totalizando \$63990, ou R\$172.733,00. Os cabos totalizam R\$ 975,20. Suportes para os painéis uma média de R\$20.000,00. O inversor custa R\$ 1235,20. Custos com mão de obra são estimados em R\$3000,00. O investimento total para o projeto é de \$81.524, ou seja R\$ 220.114,80.

Figura 6.7 – Parâmetros financeiros

## Análise Financeira RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Parâmetros financeiros			
<b>Geral</b>			
Reajuste do custo do combustível	%		3,0%
Taxa de inflação	%		6,6%
Taxa de desconto	%		
Vida do projeto	ano		20

A figura 6.7 ilustra o começo da análise financeira, através da determinação da taxa de reajuste da tarifa de energia, a taxa de inflação e a vida útil do projeto.

Figura 6.8 – Receita anual para o caso 1

<b>Receita anual</b>			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		25
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		122,22
Receita com eletricidade exportada	\$		3.107
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		0,0%

A figura 6.8 mostra que 25MWh são exportados para a rede, o que geraria uma receita de \$3.107, ou seja R\$8.388,90 para o consumidor. Porém, na prática isso não acontece, pois a concessionária responsável pela região, a empresa AESSUL não faz ressarcimento de valores para a energia que é injetada na rede. Utilizando um banco de créditos de energia. Por esse motivo a taxa de indexação sobre a eletricidade exportada é zero.

Figura 6.9 – Resumo dos custos do projeto e sumário econômico para o caso 1

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	0,9%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	89,3%	\$	72.814
Balanco do sistema e misc.	9,8%	\$	7.969
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>81.524</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	1.389
Custo combustível - caso proposto		\$	1.141
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>2.530</b>
<b>Custos periódicos(créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-81.524
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	3.107
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>11.784</b>

A figura 6.9 mostra um resumo dos custos totais do projeto.

Figura 6.10 – Viabilidade financeira para o caso 1

Viabil. Financeira		
TIR antes impostos-capital próprio	%	14,9%
TIR antes impostos - ativos	%	14,9%
TIR após impostos - capital	%	14,9%
TIR após impostos - ativos	%	14,9%
Retorno simples	ano	8,8
Retorno do capital próprio	ano	8,2
Valor Presente Líquido (VPL)	\$	421.867
Economia anual no ciclo de vida	\$/an	21.093
Razão custo benefício (C-B)		6,17
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2	Sem redução

A figura 6.10 ilustra a viabilidade financeira do projeto para o caso 1. Neste caso temos que o tempo de retorno é de 8,2 anos.

Figura 6.11 – Fluxo de caixa anual para o caso 1

Fluxo de caixa anual			
Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
#	\$	\$	\$
0	-81.524	-81.524	-81.524
1	9.389	9.389	-72.134
2	9.525	9.525	-62.609
3	9.661	9.661	-52.948
4	9.798	9.798	-43.150
5	9.935	9.935	-33.215
6	10.072	10.072	-23.143
7	10.209	10.209	-12.934
8	10.345	10.345	-2.589
9	10.479	10.479	7.890
10	10.613	10.613	18.503
11	10.745	10.745	29.248
12	10.875	10.875	40.123
13	11.002	11.002	51.124
14	11.125	11.125	62.250
15	11.246	11.246	73.495
16	11.362	11.362	84.857
17	11.473	11.473	96.329
18	11.578	11.578	107.907
19	11.677	11.677	119.584
20	302.283	302.283	421.867

A figura 6.11 ilustra o fluxo de caixa anual.

## 6.2.Caso 2 – Sistema de geração de energia através de aerogeradores

Para os mesmos valores de consumo mostrados na figura 6.1, agora o sistema é projetado para atender a demanda apenas com turbinas eólicas. A figura 6.11 ilustra os dados de velocidade de vento para Alegrete.

Figura 6.11 – Dados de velocidade de vento

	Unidade	Localização	Localização do
		dos dados climáticos	Projeto
Latitude	'N	-29,8	-29,8
Longitude	'E	-55,8	-55,8
Elevação	m	132	132
Temperatura para projeto de aquecimento	°C	7,2	
Temperatura para projeto de refrigeração	°C	31,7	
Amplitude da Temperatura do Solo	°C	14,9	

Mês	Velocidade
	do Vento
	m/s
Janeiro	3,3
Fevereiro	3,4
Março	3,3
Abril	3,4
Maio	3,5
Junho	3,5
Julho	3,9
Agosto	3,8
Setembro	3,9
Outubro	3,8
Novembro	3,7
Dezembro	3,5
<b>Anual</b>	<b>3,6</b>

Figura 6.12 – Determinação das turbinas eólicas para o caso 2

### Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto			
Tipo de análise		<input checked="" type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input type="radio"/> Método 3	
<b>Turbina eólica</b>			
Potência elétrica	kW	50,0	178,6%
Fabricante		Endurance Wind Power	
Modelo		S-343 - 18.3m	
Fator de Utilização	%	100,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	50	100,0%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	388	

A figura 6.12 mostra a escolha da turbina. A turbina Endurance S-343 possui um diâmetro do rotor da turbina de 6,37 metros, tendo assim uma área varrida de 31,87 metros. Esse fator é bem importante, uma vez que se relaciona diretamente com a quantidade de energia eólica que as pás podem interceptar.

Figura 6.13 – Definição dos custos do projeto para o caso 2

## Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Opções					
<input checked="" type="radio"/> Método 1	<input checked="" type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
	<input type="radio"/> Alocação de custo				
Custos iniciais (créditos)					
	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo	1	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	1,6%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Turbina eólica	kW	50,00	\$ 819	\$ 40.960	
Carga de Ponta - Eletricidade da Rede	kW	28,00	\$ -	\$ -	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
	custo	3	\$ -	\$ -	
	custo	1	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ 40.960	89,1%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 100	\$ 100	
Transporte	projeto		\$ -	\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p		\$ -	\$ -	
	custo		\$ -	\$ -	
Contingências	%	10,0%	\$ 41.801	\$ 4.180	
Juros durante a construção		1 mes(es)	\$ 45.981	\$ -	
Subtotal				\$ 4.280	9,3%
<b>Total de custos de investimento</b>				<b>\$ 45.981</b>	<b>100,0%</b>
Custo anual (créditos)					
	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	
<b>O&amp;M</b>					
Peças e mão de obra	projeto	1	\$ 370	\$ 370	
Definido pelo usuário	custo		\$ -	\$ -	
Contingências	%	25,0%	\$ 370	\$ 93	
Subtotal				\$ 463	
<b>Economia anual</b>					
Custo combustível - caso de referência					
Eletricidade	MWh	71	\$ 122.222	\$ 8.677	
Subtotal				\$ 8.677	

A figura 6.13 mostra os custos do projeto. Os custos de engenharia são os mesmo do caso 1, R\$ 2000,00. Cada turbina eólica custa \$4096,00, ou seja, R\$ 11.059,60. Nesse valor também está incluso o controlador de carga e os acessórios para instalação. São necessárias 10 turbinas para suprir a demanda, totalizando R\$ 110592,00. O custo total do projeto é de \$45.981, ou seja R\$124.148,70.

Os parâmetros financeiros são os mesmos do Caso 1, mostrados na Figura 6.7.

Figura 6.14 – Receita anual para o caso 2

Receita anual			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		388
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		122,22
Receita com eletricidade exportada	\$		47.459
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		

A figura 6.14 mostra a energia anual exportada para a rede. Como já dito anteriormente as concessionária responsável pela região não prevê ressarcimento financeiro. Portanto, no caso prático esse valor não seria recebido pelo cliente.

Figura 6.15 – Custo do projeto e sumário econômico para o caso 2

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	1,6%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	89,1%	\$	40.960
Balanço do sistema e misc.	9,3%	\$	4.280
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>45.981</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	463
Custo combustível - caso proposto		\$	0
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>463</b>
<b>Custos periódicos(créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-27.588
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	47.459
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>56.137</b>

A figura 6.15 mostra um resumo dos custos do projeto para o caso 2.

Figura 6.16 – Viabilidade financeira para o caso 2

<b>Viabil. Financeira</b>			
TIR antes impostos-capital próprio	%		18,7%
TIR antes impostos - ativos	%		18,7%
TIR após impostos - capital	%		18,7%
TIR após impostos - ativos	%		18,7%
Retorno simples	ano		6,3
Retorno do capital próprio	ano		5,8
Valor Presente Líquido (VPL)	\$		234.653
Economia anual no ciclo de vida	\$/an		11.733
Razão custo benefício (C-B)			6,10
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2		Sem redução

A figura 6.16 mostra a viabilidade financeira do projeto para o caso 2. Neste caso o tempo de retorno do investimento é de 5 anos e 8 meses.

Figura 6.17 – Fluxo de caixa anual para o caso 2

Fluxo de caixa anual			
Ano #	Antes imposto \$	Após imposto \$	Cumulativo \$
0	-45.981	-45.981	-45.981
1	7.458	7.458	-38.523
2	7.629	7.629	-30.895
3	7.801	7.801	-23.093
4	7.976	7.976	-15.118
5	8.151	8.151	-6.967
6	8.328	8.328	1.361
7	8.505	8.505	9.866
8	8.683	8.683	18.549
9	8.861	8.861	27.411
10	9.040	9.040	36.451
11	9.218	9.218	45.668
12	9.395	9.395	55.063
13	9.570	9.570	64.633
14	9.745	9.745	74.378
15	9.917	9.917	84.294
16	10.086	10.086	94.380
17	10.252	10.252	104.632
18	10.414	10.414	115.046
19	10.571	10.571	125.617
20	109.036	109.036	234.653

Por fim, a figura 6.17 ilustra o fluxo de caixa do projeto para o caso 2.

### 6.3.Caso 3 - Sistema de geração de energia com 50% solar e 50% eólico

A análise a seguir é de um sistema com 50% de geração de energia através de painéis fotovoltaicos e 50% de geração de energia elétrica através de turbinas solares.



Figura 6.18 – Determinação das turbinas eólicas e dos painéis fotovoltaicos para o Caso 3

## Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto			
<b>Carga de base do sistema de eletricidade</b>	Turbina eólica		
Tecnologia			
Tipo de análise	<input type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input type="radio"/> Método 3		
<b>Turbina eólica #1</b>			
Potência elétrica	kW	25,0	89,3%
Fabricante	Endurance Wind Power		
Modelo	S-343 - 18,3m		
Fator de Utilização	%	50,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	46	93,5%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	63	
			5 unidade(s)
<b>Carga intermediária do sistema elétrico</b>	Fotovoltaica		
Tecnologia			
<b>Fotovoltaica #2</b>			
Potência elétrica	kW	25,24	90,1%
Fabricante	Yingli Solar		
Modelo	mono-Si - Panda - YL245C-30b		
Fator de Utilização	%	50,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	3	5,6%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	108	216,8%
			103 unidade(s)

A figura 6.18 mostra a definição das turbinas eólicas e dos painéis fotovoltaicos. Para esse caso são necessárias 5 turbinas eólicas e 103 painéis fotovoltaicos.

Figura 6.19 – Definição dos custos do projeto para o caso 3

## Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Opções					
<input type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
	<input type="radio"/> Alocação de custo				
Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	-
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo			\$ -	-
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	1,1%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Turbina eólica	kW	25,00	\$ 819	\$ 20.480	
Carga Intermediária - Fotovoltaica	kW	25,24	\$ 1.274	\$ 32.151	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
Cabos e conectores	custo	1	\$ 1.416	\$ 1.416	
Suporte para fixação dos painéis	custo	1	\$ 7.407	\$ 7.407	
Subtotal				\$ 61.455	88,8%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 200	\$ 200	
Transporte	projeto			\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p			\$ -	
Inversor	custo	1	\$ 458	\$ 458	
Contingências	%	10,0%	\$ 62.853	\$ 6.285	
Juros durante a construção		1 mes(es)	\$ 69.139	\$ 65	
Subtotal				\$ 7.008	10,1%
<b>Total de custos de investimento</b>				<b>\$ 69.203</b>	<b>100,0%</b>
Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	
<b>O&amp;M</b>					
Peças e mão de obra	projeto		\$ 1.111	\$ -	
Definido pelo usuário	custo			\$ -	
Contingências	%	25,0%	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	
<b>Economia anual</b>					
<b>Custo combustível - caso de referência</b>					
Eletricidade	MWh	71	\$ 122,222	\$ 8.677	
Subtotal				\$ 8.677	

A figura 6.19 mostra a análise dos custos do projeto para o caso 3. Os custos de engenharia são os mesmo do caso 1, R\$ 2000,00. O custo total das turbinas eólicas é de R\$55.296,00. Os painéis fotovoltaicos totalizam R\$ 86.807,70. O custo total do projeto é de \$69.203, ou seja R\$186.848,10.

Figura 6.20 – Receita anual para o caso 3

<b>Receita anual</b>			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		171
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		0,12
Receita com eletricidade exportada	\$		21
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		0,0%

A figura 6.20 mostra que 171MWh por ano são exportados para a rede.

Figura 6.21 – Custos do projeto e sumário econômico para o caso 3

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	1,1%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	88,8%	\$	61.455
<b>Balanco do sistema e misc.</b>	<b>10,1%</b>	<b>\$</b>	<b>7.008</b>
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>69.203</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	0
Custo combustível - caso proposto		\$	0
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>0</b>
<b>Custos periódicos(créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-69.203
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	21
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>8.698</b>

A figura 6.21 mostra um resumo dos custos do projeto para o caso 3.

Figura 6.22 – Viabilidade financeira para o caso 3

Viabil. Financeira		
TIR antes impostos-capital próprio	%	17,1%
TIR antes impostos - ativos	%	17,1%
TIR após impostos - capital	%	17,1%
TIR após impostos - ativos	%	17,1%
Retorno simples	ano	8,0
Retorno do capital próprio	ano	7,1
Valor Presente Líquido (VPL)	\$	417.982
Economia anual no ciclo de vida	\$/an	20.899
Razão custo benefício (C-B)		7,04
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2	(440)

A figura 6.22 mostra a viabilidade econômica para o caso 3. Para este caso o retorno do investimento é de 7 anos e 1 mês.

Figura 6.23 – Fluxo de caixa anual para o caso 3

Fluxo de caixa anual			
Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
#	\$	\$	\$
0	-69.203	-69.203	-69.203
1	8.958	8.958	-60.245
2	9.227	9.227	-51.018
3	9.503	9.503	-41.516
4	9.787	9.787	-31.728
5	10.080	10.080	-21.648
6	10.382	10.382	-11.266
7	10.693	10.693	-573
8	11.013	11.013	10.440
9	11.343	11.343	21.782
10	11.682	11.682	33.465
11	12.032	12.032	45.497
12	12.393	12.393	57.890
13	12.764	12.764	70.654
14	13.146	13.146	83.800
15	13.540	13.540	97.339
16	13.945	13.945	111.285
17	14.363	14.363	125.648
18	14.793	14.793	140.441
19	15.237	15.237	155.678
20	262.304	262.304	417.982

A figura 6.23 ilustra o fluxo de caixa anual para o caso 3.

#### 6.4.Caso 4 – Sistema de geração de energia elétrica com 70% eólico e 30% solar

A próxima análise é feita para 70% de geração de energia elétrica através de turbinas eólicas e 30% de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos.

Figura 6.24 – Determinação das turbinas eólicas e dos painéis fotovoltaicos para o Caso 4

##### Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto			
<b>Carga de base do sistema de eletricidade</b>			
Tecnologia	Turbina eólica		
Tipo de análise	<input checked="" type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input type="radio"/> Método 3		
<b>Turbina eólica #1</b>			
Potência elétrica	kW	35,0	125,0%
Fabricante	Endurance Wind Power		
Modelo	S-343 - 18.3m		
Fator de Utilização	%	70,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	49	99,0%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	165	
<b>Carga intermediária do sistema elétrico</b>			
Tecnologia	Fotovoltaica		
<b>Fotovoltaica #2</b>			
Potência elétrica	kW	15,19	54,3%
Fabricante	Yingli Solar		
Modelo	mono-Si - Panda - YL245C-30b		
Fator de Utilização	%	30,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	1	1,0%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	39	79,3%

A figura 6.24 mostra que para o caso 3 são necessárias 7 turbinas eólicas e 62 painéis fotovoltaicos.

Figura 6.25 – Definição dos custos do projeto para o caso 4

**Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade**

Opções		
<input checked="" type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum
	<input type="radio"/> Alocação de custo	

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo			\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	1,2%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Turbina eólica	kW	35,00	\$ 819	\$ 28.672	
Carga Intermediária - Fotovoltaica	kW	15,19	\$ 1.274	\$ 19.353	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
Cabos e conectores	custo	1	\$ 1.416	\$ 1.416	
Suporte para fixação dos painéis	custo	1	\$ 7.407	\$ 7.407	
Subtotal				\$ 56.849	88,6%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 200	\$ 200	
Transporte	projeto			\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p			\$ -	
Inversor	custo	1	\$ 458	\$ 458	
Contingências	%	10,0%	\$ 58.247	\$ 5.825	
Juros durante a construção	2,25%	1 mes(es)	\$ 64.072	\$ 60	
Subtotal				\$ 6.542	10,2%
<b>Total de custos de investimento</b>				\$ 64.132	100,0%

Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>O&amp;M</b>				
Peças e mão de obra	projeto		\$ 1.111	\$ -
Definido pelo usuário	custo			\$ -
Contingências	%	25,0%	\$ -	\$ -
Subtotal				\$ -

Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>Custo combustível - caso de referência</b>				
Eletricidade	MWh	71	\$ 122,222	\$ 8.677
Subtotal				\$ 8.677

A figura 6.25 mostra a análise dos custos para o caso 4. Os custos de engenharia são os mesmo do caso 1, R\$ 2000,00. O custo total das turbinas eólicas é de R\$77414,40. Os painéis fotovoltaicos totalizam R\$52253,10. O custo total do projeto é de \$64.132, ou seja R\$172.156,40.

Figura 6.26 – Receita anual para o caso 4

Receita anual			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		205
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		0,12
Receita com eletricidade exportada	\$		25
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		0,0%

A figura 6.26 mostra que 205MWh são exportados anualmente para a rede.

Figura 6.27 – Resumo dos custos de projeto de sumário econômico para o Caso 4

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	1,2%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	88,6%	\$	56.849
Balanco do sistema e misc.	10,2%	\$	6.542
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>64.132</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	0
Custo combustível - caso proposto		\$	0
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>0</b>
<b>Custos periódicos(créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-64.132
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	25
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>8.702</b>

A figura 6.27 mostra um resumo dos custos do projeto para o caso 4.

Figura 6.28 – Viabilidade econômica para o caso 4

<b>Viabil. Financeira</b>		
TIR antes impostos-capital próprio	%	18,0%
TIR antes impostos - ativos	%	18,0%
TIR após impostos - capital	%	18,0%
TIR após impostos - ativos	%	18,0%
Retorno simples	ano	7,4
Retorno do capital próprio	ano	6,6
Valor Presente Líquido (VPL)	\$	405.064
Economia anual no ciclo de vida	\$/an	20.253
Razão custo benefício (C-B)		7,32
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2	(374)

A figura 6.28 mostra a viabilidade econômica para o caso 4. Neste caso o investimento inicial é pago em 6 anos e 6 meses.

Figura 6.29 – Fluxo de caixa anual para o caso 4

Fluxo de caixa anual			
Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
#	\$	\$	\$
0	-64.132	-64.132	-64.132
1	8.963	8.963	-55.169
2	9.231	9.231	-45.939
3	9.507	9.507	-36.432
4	9.791	9.791	-26.640
5	10.084	10.084	-16.556
6	10.386	10.386	-6.170
7	10.697	10.697	4.527
8	11.017	11.017	15.544
9	11.347	11.347	26.891
10	11.687	11.687	38.578
11	12.036	12.036	50.614
12	12.397	12.397	63.011
13	12.768	12.768	75.779
14	13.150	13.150	88.929
15	13.544	13.544	102.473
16	13.950	13.950	116.423
17	14.367	14.367	130.790
18	14.798	14.798	145.588
19	15.241	15.241	160.828
20	244.236	244.236	405.064

A figura 6.29 mostra o fluxo de caixa anual para o caso 4.

### 6.5.Caso 5 – Sistema de geração de energia elétrica com 70% solar e 30% eólico

A próxima análise é feita para 70% de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos e 30% de geração de energia elétrica através de turbinas eólicas.

Figura 6.30 – Determinação das turbinas eólicas e dos painéis fotovoltaicos para o Caso 5

Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade			
<b>Sistema de eletricidade do caso proposto</b>			
Carga de base do sistema de eletricidade			
Tecnologia	Turbina eólica		
Tipo de análise	<input type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input type="radio"/> Método 3		
<b>Turbina eólica #1</b>			
Potência elétrica	kW	15,0	53,6%
Fabricante	Endurance Wind Power		
Modelo	S-343 - 18.3m		
Fator de Utilização	%	30,0%	3 unidade(s)
Eletricidade fornecida à carga	MWh	32	64,7%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	7	
<b>Carga intermediária do sistema elétrico</b>			
Tecnologia			
Fotovoltaica #2			
Potência elétrica	kW	35,04	125,1%
Fabricante	Yingli Solar		
Modelo	mono-Si - Panda - YL245C-30b		
Fator de Utilização	%	70,0%	143 unidade(s)
Eletricidade fornecida à carga	MWh	18	35,3%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	197	397,0%

A figura 6.30 mostra que para o caso 4 são necessárias 3 turbinas eólicas e 143 painéis fotovoltaicos.

Figura 6.31 – Definição dos custos do projeto para o caso 5

Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Opções					
<input type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
<input type="radio"/> Alocação de custo					

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	-
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo			\$ -	-
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	1,0%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Turbina eólica	kW	15,00	\$ 819	\$ 12.288	
Carga Intermediária - Fotovoltaica	kW	35,04	\$ 1.274	\$ 44.637	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
Cabos e conectores	custo	1	\$ 1.416	\$ 1.416	
Suporte para fixação dos painéis	custo	1	\$ 7.407	\$ 7.407	
Subtotal				\$ 65.749	88,9%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 200	\$ 200	
Transporte	projeto			\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p			\$ -	
Inversor	custo	1	\$ 458	\$ 458	
Contingências	%	10,0%	\$ 67.147	\$ 6.715	
Juros durante a construção	2,25%	1 mes(es)	\$ 73.862	\$ 69	
Subtotal				\$ 7.442	10,1%
<b>Total de custos de investimento</b>				<b>\$ 73.931</b>	<b>100,0%</b>

Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>O&amp;M</b>				
Peças e mão de obra	projeto		\$ 1.111	\$ -
Definido pelo usuário	custo			\$ -
Contingências	%	25,0%	\$ -	\$ -
Subtotal				\$ -

Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>Custo combustível - caso de referência</b>				
Eletricidade	MWh	71	\$ 122.222	\$ 8.677
Subtotal				\$ 8.677

A figura 6.31 mostra a análise dos custos para o caso 5. Os custos de engenharia permanecem os mesmos do caso 1, R\$ 2000,00. O custo total das turbinas eólicas é de R\$33.177,60. Os painéis fotovoltaicos totalizam R\$120.519,90. O custo total do projeto é de \$73.931, ou seja R\$199.631,70.

Figura 6.32 – Receita anual para o caso 5

Receita anual			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		205
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		0,12
Receita com eletricidade exportada	\$		25
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		0,0%



A figura 6.32 mostra que 205MWh são exportados anualmente para a rede.

Figura 6.33 – Resumo dos custos de projeto de sumário econômico para o Caso 5

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	1,0%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	88,9%	\$	65.749
<b>Balanco do sistema e misc.</b>	<b>10,1%</b>	<b>\$</b>	<b>7.442</b>
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>73.931</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	0
Custo combustível - caso proposto		\$	0
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>0</b>
<b>Custos periódicos(créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-73.931
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	25
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>8.702</b>

A figura 6.33 mostra um resumo dos custos do projeto para o caso 5.

Figura 6.34 – Viabilidade econômica para o caso 5

<b>Viabil. Financeira</b>		
TIR antes impostos-capital próprio	%	16,4%
TIR antes impostos - ativos	%	16,4%
TIR após impostos - capital	%	16,4%
TIR após impostos - ativos	%	16,4%
Retorno simples	ano	8,5
Retorno do capital próprio	ano	7,5
Valor Presente Líquido (VPL)	\$	430.184
Economia anual no ciclo de vida	\$/an	21.509
Razão custo benefício (C-B)		6,82
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2	(398)

A figura 6.34 mostra a viabilidade econômica para o caso 5. Neste caso o investimento inicial é pago em 7 anos e 5 meses.

Figura 6.35 – Fluxo de caixa anual para o caso 5

Fluxo de caixa anual			
Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
#	\$	\$	\$
0	-73.931	-73.931	-73.931
1	8.963	8.963	-64.969
2	9.231	9.231	-55.738
3	9.507	9.507	-46.231
4	9.791	9.791	-36.440
5	10.084	10.084	-26.355
6	10.386	10.386	-15.969
7	10.697	10.697	-5.272
8	11.017	11.017	5.745
9	11.347	11.347	17.092
10	11.687	11.687	28.778
11	12.036	12.036	40.815
12	12.397	12.397	53.212
13	12.768	12.768	65.980
14	13.150	13.150	79.130
15	13.544	13.544	92.674
16	13.950	13.950	106.623
17	14.367	14.367	120.990
18	14.798	14.798	135.788
19	15.241	15.241	151.029
20	279.155	279.155	430.184

A figura 6.35 mostra o fluxo de caixa para o caso 5.

### 6.6.Caso 6 – Sistema de geração de energia elétrica com 60% eólico e 40% solar

A próxima análise é feita para 60% de geração de energia elétrica através de turbinas eólicas e 40% de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos.

Figura 6.36 – Determinação das turbinas eólicas e dos painéis fotovoltaicos para o Caso 6

#### Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto			
<b>Carga de base do sistema de eletricidade</b>			
Tecnologia	Turbina eólica		
Tipo de análise	<input type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input type="radio"/> Método 3		
<b>Turbina eólica #1</b>			
Potência elétrica	kW	30,0	107,1%
Fabricante	Endurance Wind Power		
Modelo	S-343 - 18.3m		
Fator de Utilização	%	60,0%	6 unidade(s)
Eletricidade fornecida à carga	MWh	48	97,1%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	109	
<b>Carga intermediária do sistema elétrico</b>			
Tecnologia	Fotovoltaica		
<b>Fotovoltaica #2</b>			
Potência elétrica	kW	20,09	71,8%
Fabricante	Yingli Solar		
Modelo	mono-Si - Panda - YL245C-30b		
Fator de Utilização	%	40,0%	82 unidade(s)
Eletricidade fornecida à carga	MWh	1	2,3%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	69	139,3%

A figura 6.36 mostra que para o caso 4 são necessárias 6 turbinas eólicas e 82 painéis fotovoltaicos.

Figura 6.37 – Definição dos custos do projeto para o caso 6

**Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade**

Opções					
<input type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
<input type="radio"/> Alocação de custo					

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	-
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo			\$ -	-
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	1,1%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Turbina eólica	kW	30,00	\$ 819	\$ 24.576	
Carga Intermediária - Fotovoltaica	kW	20,09	\$ 1.274	\$ 25.596	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
Cabos e conectores	custo	1	\$ 1.416	\$ 1.416	
Suporte para fixação dos painéis	custo	1	\$ 7.407	\$ 7.407	
Subtotal				\$ 58.996	88,7%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 200	\$ 200	
Transporte	projeto			\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p			\$ -	
Inversor	custo	1	\$ 458	\$ 458	
Contingências	%	10,0%	\$ 60.394	\$ 6.039	
Juros durante a construção	2,25%	1 mes(es)	\$ 66.434	\$ 62	
Subtotal				\$ 6.759	10,2%
<b>Total de custos de investimento</b>				<b>\$ 66.496</b>	<b>100,0%</b>

Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>O&amp;M</b>				
Peças e mão de obra	projeto		\$ 1.111	\$ -
Definido pelo usuário	custo			\$ -
Contingências	%	25,0%	\$ -	\$ -
Subtotal				\$ -

Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>Custo combustível - caso de referência</b>				
Eletricidade	MWh	71	\$ 122.222	\$ 8.677
Subtotal				\$ 8.677

A figura 6.37 mostra a análise dos custos para o caso 6. O custo total das turbinas eólicas é de R\$66.355,20. Os painéis fotovoltaicos totalizam R\$69.109,20. O custo total do projeto é de \$66.496, ou seja R\$179.539,20.

Figura 6.38 – Receita anual para o caso 6

Receita anual			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		179
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		0,12
Receita com eletricidade exportada	\$		22
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		0,0%

A figura 6.38 mostra que 179MWh são exportados anualmente para a rede.

Figura 6.39 – Resumo dos custos de projeto de sumário econômico para o Caso 6

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	1,1%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	88,7%	\$	58.996
Balanco do sistema e misc.	10,2%	\$	6.759
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>66.496</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	0
Custo combustível - caso proposto		\$	0
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>0</b>
<b>Custos periódicos (créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-66.496
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	22
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>8.699</b>

A figura 6.39 mostra um resumo dos custos do projeto para o caso 6.

Figura 6.40 – Viabilidade econômica para o caso 6

<b>Viabil. Financeira</b>		
TIR antes impostos-capital próprio	%	17,6%
TIR antes impostos - ativos	%	17,6%
TIR após impostos - capital	%	17,6%
TIR após impostos - ativos	%	17,6%
Retorno simples	ano	7,6
Retorno do capital próprio	ano	6,8
Valor Presente Líquido (VPL)	\$	411.060
Economia anual no ciclo de vida	\$/an	20.553
Razão custo benefício (C-B)		7,18
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2	(419)

A figura 6.40 mostra a viabilidade econômica para o caso 6. Neste caso o investimento inicial é pago em 6 anos e 8 meses.

Figura 6.41 – Fluxo de caixa anual para o caso 6

Fluxo de caixa anual			
Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
#	\$	\$	\$
0	-66.496	-66.496	-66.496
1	8.959	8.959	-57.536
2	9.228	9.228	-48.309
3	9.504	9.504	-38.805
4	9.788	9.788	-29.017
5	10.081	10.081	-18.936
6	10.383	10.383	-8.553
7	10.694	10.694	2.141
8	11.014	11.014	13.155
9	11.344	11.344	24.499
10	11.683	11.683	36.182
11	12.033	12.033	48.215
12	12.394	12.394	60.609
13	12.765	12.765	73.374
14	13.147	13.147	86.521
15	13.541	13.541	100.061
16	13.946	13.946	114.008
17	14.364	14.364	128.372
18	14.794	14.794	143.166
19	15.238	15.238	158.404
20	252.656	252.656	411.060

A figura 6.41 mostra o fluxo de caixa para o caso 6.

### 6.7.Caso 7 – Sistema de geração de energia elétrica com 60% solar e 40% eólico

A próxima análise é feita para 60% de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos e 40% de geração de energia elétrica através de turbinas eólicas.

Figura 6.42 – Determinação das turbinas eólicas e dos painéis fotovoltaicos para o Caso 7

#### Modelo Energético RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Sistema de eletricidade do caso proposto			
<b>Carga de base do sistema de eletricidade</b>			
Tecnologia	Turbina eólica		
Tipo de análise	<input type="radio"/> Método 1 <input type="radio"/> Método 2 <input type="radio"/> Método 3		
<b>Turbina eólica #1</b>			
Potência elétrica	kW	20,0	71,4%
Fabricante	Endurance Wind Power		
Modelo	S-343 - 18.3m		
Fator de Utilização	%	40,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	41	82,7%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	29	
<b>Carga intermediária do sistema elétrico</b>			
Tecnologia	Fotovoltaica		
<b>Fotovoltaica #2</b>			
Potência elétrica	kW	30,14	107,6%
Fabricante	Yingli Solar		
Modelo	mono-Si - Panda - YL245C-30b		
Fator de Utilização	%	60,0%	
Eletricidade fornecida à carga	MWh	8	16,7%
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	150	302,0%

A figura 6.42 mostra que para o caso 4 são necessárias 4 turbinas eólicas e 123 painéis fotovoltaicos.

Figura 6.43 – Definição dos custos do projeto para o caso 7

Análise de Custos RETScreen - Projeto produção de Eletricidade

Opções					
<input checked="" type="radio"/> Método 1	<input type="radio"/> Notas/faixa	Notas/faixa			
<input type="radio"/> Método 2	<input type="radio"/> Segunda moeda	Nenhum			
	<input type="radio"/> Alocação de custo				

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade	Custos relativos
<b>Estudo de viabilidade</b>					
Estudo de viabilidade	custo	0	\$ -	\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Desenvolvimento</b>					
Desenvolvimento	custo			\$ -	
Subtotal				\$ -	0,0%
<b>Engenharia</b>					
Engenharia	custo	1	\$ 741	\$ 741	
Subtotal				\$ 741	1,0%
<b>Sistema de produção de eletricidade</b>					
Carga de base - Turbina eólica	kW	20,00	\$ 819	\$ 16.384	
Carga Intermediária - Fotovoltaica	kW	30,14	\$ 1.274	\$ 38.394	
Construção de estrada	km	0	\$ -	\$ -	
Linha de Transmissão	km	0	\$ -	\$ -	
Subestação	projeto	0	\$ -	\$ -	
Ações de Eficiência energética	projeto	1	\$ -	\$ -	
Cabos e conectores	custo	1	\$ 1.416	\$ 1.416	
Suporte para fixação dos paineis	custo	1	\$ 7.407	\$ 7.407	
Subtotal				\$ 63.602	88,9%
<b>Balanco do sistema e misc.</b>					
Peças de reposição	%	100,0%	\$ 200	\$ 200	
Transporte	projeto			\$ -	
Treinamento & Comissionamento	d-p			\$ -	
Inversor	custo	1	\$ 458	\$ 458	
Contingências	%	10,0%	\$ 65.000	\$ 6.500	
Juros durante a construção	2,25%	1 mes(es)	\$ 71.500	\$ 67	
Subtotal				\$ 7.225	10,1%
<b>Total de custos de investimento</b>				\$ 71.567	100,0%

Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>O&amp;M</b>				
Peças e mão de obra	projeto		\$ 1.111	\$ -
Definido pelo usuário	custo			\$ -
Contingências	%	25,0%	\$ -	\$ -
Subtotal				\$ -

Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
<b>Custo combustível - caso de referência</b>				
Eletricidade	MWh	71	\$ 122.222	\$ 8.677
Subtotal				\$ 8.677

A figura 6.43 mostra a análise dos custos para o caso 7. O custo total das turbinas eólicas é de R\$44.236,80. Os painéis fotovoltaicos totalizam R\$103.663,80. O custo total do projeto é de \$63.602, ou seja R\$171.736,20.

Figura 6.44 – Receita anual para o caso 7

Receita anual			
<b>Receita com eletricidade exportada</b>			
Eletricidade exportada p/ rede	MWh		179
Preço eletricidade exportada	\$/MWh		0,12
Receita com eletricidade exportada	\$		22
Taxa de indexação sobre a eletricidade exportada	%		0,0%

A figura 6.44 mostra que 179MWh são exportados anualmente para a rede.

Figura 6.45 – Resumo dos custos de projeto de sumário econômico para o Caso 7

<b>Custo projeto e sumario econ./receita</b>			
<b>Custos iniciais</b>			
Engenharia	1,0%	\$	741
Sistema de produção de eletricidade	88,9%	\$	63.602
Balanco do sistema e misc.	10,1%	\$	7.225
<b>Total de custos de investimento</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$</b>	<b>71.567</b>
<b>Pagamento anual de custos e empréstimos</b>			
O&M		\$	0
Custo combustível - caso proposto		\$	0
<b>Total de custos anuais</b>		<b>\$</b>	<b>0</b>
<b>Custos periódicos(créditos)</b>			
Valor residual do projeto - crédito		\$	-71.567
<b>Economia anual e receita</b>			
Custo combustível - caso de referência		\$	8.677
Receita com eletricidade exportada		\$	22
<b>Total de economia e receita anual</b>		<b>\$</b>	<b>8.699</b>

A figura 6.45 mostra um resumo dos custos do projeto para o caso 7.

Figura 6.46 – Viabilidade econômica para o caso 7

<b>Viabil. Financeira</b>		
TIR antes impostos-capital próprio	%	16,7%
TIR antes impostos - ativos	%	16,7%
TIR após impostos - capital	%	16,7%
TIR após impostos - ativos	%	16,7%
Retorno simples	ano	8,2
Retorno do capital próprio	ano	7,3
Valor Presente Líquido (VPL)	\$	424.062
Economia anual no ciclo de vida	\$/an	21.203
Razão custo benefício (C-B)		6,93
Custo de Redução de GEE	\$/tCO2	(432)

A figura 6.46 mostra a viabilidade econômica para o caso 7. Neste caso o investimento inicial é pago em 7 anos e 3 meses.

Figura 6.47 – Fluxo de caixa anual para o caso 7

Fluxo de caixa anual			
Ano	Antes imposto	Após imposto	Cumulativo
#	\$	\$	\$
0	-71.567	-71.567	-71.567
1	8.959	8.959	-62.608
2	9.228	9.228	-53.380
3	9.504	9.504	-43.876
4	9.788	9.788	-34.088
5	10.081	10.081	-24.007
6	10.383	10.383	-13.624
7	10.694	10.694	-2.930
8	11.014	11.014	8.084
9	11.344	11.344	19.428
10	11.683	11.683	31.111
11	12.033	12.033	43.144
12	12.394	12.394	55.538
13	12.765	12.765	68.303
14	13.147	13.147	81.450
15	13.541	13.541	94.991
16	13.946	13.946	108.937
17	14.364	14.364	123.301
18	14.794	14.794	138.096
19	15.238	15.238	153.333
20	270.729	270.729	424.062

A figura 6.47 mostra o fluxo de caixa para o caso 7.

## 6.8. Resultados e discussões

Tabela 5.1 – Resumo dos investimentos iniciais e tempos de retorno de todos os casos

Caso	Investimento inicial	Tempo de retorno
1	R\$ 220.114,80	8 anos e 2 meses
2	R\$124.148,70	5 anos e 8 meses
3	R\$ 186.848,10	7 anos e 1 mês
4	R\$173.156,40	6 anos e 6 meses
5	R\$199.613,70	7 anos e 5 meses
6	R\$179.539,20	6 anos e 8 meses
7	R\$171.725,40	7 anos e 3 meses

No caso 1 é apresentado um projeto de geração de energia apenas com painéis fotovoltaicos. Esse projeto não é viável pelo seu custo elevado e por ter o maior tempo de retorno entre todos os casos analisados, 8 anos e 2 meses.



Já no caso 2 o projeto de geração de energia é composto apenas por turbinas eólicas. O custo em relação ao caso 1 é reduzido em 56,4%. O tempo de retorno do investimento inicial é reduzido em 2 anos e 4 meses.

Como nem sempre tem sol para a geração de energia solar e os ventos podem ser irregulares, a melhor solução é mesclar as duas tecnologias. No caso 3 há 50 % de cada tipo de tecnologia e o custo é intermediário entre os casos 1 e 2, porém o tempo de retorno ainda é alto, 7 anos e 1 mês.

No caso 4 há 70% de geração de energia eólica e 30% de geração de energia solar. O custo final do projeto é mais baixo que no caso 3. Diminuiu também o tempo de retorno para 6 anos e 6 meses. No caso contrário, caso 5, onde há 70% de geração solar e 30% de geração eólica, o custo se eleva bem como o tempo de retorno, tornando essa opção a mais inviável de implementação.

No caso 6, há 60% de geração de energia eólica e 40% de energia solar. O custo do projeto é parecido com o caso 4, tendo acrescentado apenas 2 meses no tempo de retorno. Já no último caso analisado, há 60% de geração de energia solar e 40% de energia eólica. Neste caso o custo é o menor entre os casos, porém aumenta 9 meses o tempo de retorno se comparado ao caso 4 que tem o menor tempo de retorno entre os casos que possuem ambas as tecnologias.

## 7. CONCLUSÕES

Com o sucessivo crescimento da preocupação com a demanda de energia elétrica e o meio ambiente, a geração distribuída vem conquistando cada vez mais espaço pela redução da distância entre a geração e o consumidor. Sendo benéfica para o meio ambiente, os consumidores, as concessionárias de energia elétrica e para o Sistema Elétrico. A noção de redes inteligentes vem ganhando popularidade em vários países pelo mundo. A tecnologia Micro Grid vem se desenvolvendo cada dia mais em redes de baixa tensão, aumentando a confiabilidade do sistema de fornecimento de energia elétrica e também aumentando a eficiência energética no consumo. Porém, para atingir uma operação estável e segura, é necessário que questões técnicas, regulamentares e econômicas estejam bem resolvidas.

No século XXI há grande preocupação com a escassez das fontes de energia não renováveis. Por esse motivo há grande desenvolvimento científico e tecnológico que proporciona um aumento na utilização das fontes de energias renováveis como energia eólica, solar, das marés, geotérmica, biomassa, entre outras.

Os recursos esgotáveis que demoraram milhões de anos para se formar estão sendo usando em larga escala, mudando assim substancialmente a composição da atmosfera e alterando o balanço térmico do planeta, acarretando assim no aquecimento global, no degelo dos pólos, formação de chuvas ácidas e o envenenamento da atmosfera e de todo o meio ambiente. Já num futuro bem próximo os efeitos desse uso indiscriminado são catastróficos. É assim que constantemente buscamos outras fontes de energias que sejam renováveis.

A energia eólica, proveniente dos ventos, é uma das alternativas para a diminuição do uso dos combustíveis fósseis. É uma energia renovável, limpa e esta disponível em todos os lugares. Essa fonte de energia utilizada para geração de energia elétrica teve início há pouco mais de 30 anos pelos conhecimentos da indústria aeronáutica.

Indiretamente quase todas as formas de energia são dependentes da energia solar. A radiação solar é utilizada diariamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes, e também para a geração de energia mecânica ou elétrica. A radiação solar pode ser convertida em energia elétrica através da utilização de alguns sistemas, como o termoelétrico e o fotovoltaico.

Através da observação da atual situação energética mundial, este trabalho apresenta soluções para geração de energia limpa através de energia solar e eólica. Dentre todos os casos apresentados os mais vantajosos são os que mesclam as duas tecnologias. O caso 4, onde há 70% de geração de energia eólica e 30% de geração de energia solar, é o mais viável devido ao seu custo intermediário entre todos os casos e por seu tempo de retorno ser o menor entre todos, 6 anos e 6 meses.