

Universidade de São Paulo

OLÍVIA BONFIM MELO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA
ECONÔMICA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO
SETOR RESIDENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2014

OLÍVIA BONFIM MELO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA
ECONÔMICA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO
SETOR RESIDENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ba Bonfim Melo, Olivia
Análise da viabilidade técnica econômica de painéis
fotovoltaicos instalados no setor residencial / Olivia
Bonfim Melo; orientador José Carlos de Melo Vieira
Junior. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Energia. 2. Fotovoltaico. 3. Residencial. 4.
Geração Distribuída. 5. Análise. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Olívia Bonfim Melo

Título: "Análise da viabilidade técnica e econômica de painéis fotovoltaicos instalados no setor residencial"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30 / 06 / 2014,

com NOTA 9,0 (nove , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Mário Oleskovicz - (SEL/EESC/USP)

Mestre Daniel Petean - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Agradecimentos

A Deus, por sempre iluminar meu caminho e por ter me proporcionado uma experiência inesquecível durante estes cinco anos de faculdade.

A minha família, em especial minha Mãe, Vó Benha e Dani por todo amor, carinho e educação, que me transformaram na pessoa que sou hoje. E por sempre estarem do meu lado.

Aos meus amigos, que foram mais do que simples colegas de classe. Amigos com quem pude conviver e compartilhar conhecimento e momentos de carinho, alegria e amizade. Em especial ao Rodrigo Kalid e Eduardo Pereira, que sempre me apoiaram em momentos bons e ruins.

Ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior por ter sido um excelente orientador durante minha iniciação científica e trabalho de conclusão de curso e por toda a ajuda e apoio durante todos os anos de universidade.

Por fim, a todos aqueles que me auxiliaram de alguma forma na conclusão desta etapa tão importante de minha vida.

Sumário

Resumo.....	9
Abstract	11
1. Introdução.....	13
1.1) Objetivos	15
1.2) Desenvolvimento do trabalho.....	15
2. Revisão Bibliográfica	17
2.1) Geração Fotovoltaica.....	17
2.1.1) Células Fotovoltaicas	17
2.1.2) Tecnologias	21
2.1.3) Cenário Mundial.....	23
2.1.4) Cenário Brasileiro – Mecanismo de Compensação de Crédito	27
2.2) Análise dos Dados Solarimétricos do Brasil – Seleção do Local de Projeto	29
2.3) Principais Componentes do Sistema Fotovoltaico	31
3. Metodologia.....	35
3.1) Local de Projeto	35
3.2) Caracterização da Carga.....	35
3.3) Metodologia apresentada no Manual de Engenharia para Dimensionamento dos Painéis Solares Fotovoltaicos	37
3.3.1) Apresentação da Metodologia	38
3.4) Metodologia de Dimensionamento dos Painéis Fotovoltaicos utilizando o <i>Software Homer Energy</i>	43
3.4.1) Entradas do Programa	43
3.4.2) Modelagem do Sistema Fotovoltaico	45
3.4.3) Valores das Entradas Fornecidas.....	47
3.3.5) Metodologia – <i>Homer Energy</i>	50
4. Simulações e Análises	53
4.1) Geração Fotovoltaica Autônoma.....	53
4.1.1) Resultados Metodologia apresentada no Manual de Engenharia	53
4.1.2) Resultados do <i>Homer Energy</i> - Residência Única	55
4.1.3) Resultado <i>Homer Energy</i> – Conjunto de Residências.....	56
4.1.4) Análise para Áreas Remotas.....	57
4.1.5) Análise dos Resultados.....	60
4.2) Geração Fotovoltaica Conectada na Rede de Distribuição	60
4.2.1) Cenário 1 – Classe de consumo inferior a 100 kWh	60
4.2.2) Cenário 2 – Classe de consumo de 100 a 200 kWh	62
4.2.3) Cenário 3 – Classe de Consumo entre 200 e 300 kWh	65
4.2.4) Cenário Classe de Consumo Superior a 500kWh.....	67
4.2.5) Análise dos Resultados.....	70
4.3) Considerações Finais sobre o Capítulo	70
5. Conclusão	73
6. Referências Bibliográficas.....	75
7. Apêndice.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 1: Radiação global média (kWh/m ²) [3].....	30
Tabela 2: Valores das curvas de carga	37
Tabela 3: Fator de correção do módulo fotovoltaico	38
Tabela 4: Eficiência na conversão de potência	39
Tabela 5: Refletância da vizinhança.....	40
Tabela 6: Coeficientes empíricos de Bennett	41
Tabela 7: Características de instalação.....	48
Tabela 8: Informações dos equipamentos de projeto	48
Tabela 9: Radiação solar	48
Tabela 10: Dados da curva de carga.....	49
Tabela 11: Radiações nos coletores e horas de sol pleno	54
Tabela 12: Valores necessários ao longo do dimensionamento do sistema	54
Tabela 13: Resultado residência isolada - Bateria de menor capacidade	56
Tabela 14: Resultado residência isolada - Bateria maior capacidade.....	56
Tabela 15: Caracterização da carga.....	56
Tabela 16: Resultado conjunto de residências - Bateria de menor capacidade	57
Tabela 17: Resultado conjunto de residências - Bateria de maior capacidade.....	57
Tabela 18: Preço do Km rede [32]	58
Tabela 19: Custo do sistema autônomo de geração solar fotovoltaica.....	58
Tabela 20: Distância de viabilidade	59
Tabela 21: Resultado para a classe de consumo inferior a 100 kWh	61
Tabela 22: Resultado classe de consumo inferior a 100 kWh - Com geração distribuída	61
Tabela 23: Valores da curva de carga para consumo entre 100 e 200 kWh.....	63
Tabela 24: Resultado para classe de consumo entre 100 e 200 kWh.....	64
Tabela 25: Resultado para classe de consumo entre 100 e 200 kWh - Com geração distribuída	64
Tabela 26: Curva de carga para a classe de consumo entre 200 e 300 kWh.....	66
Tabela 27: Resultado classe de consumo entre 200 e 300 kWh.....	67
Tabela 28: Resultado classe de consumo entre 200 e 300 kWh - Com geração distribuída	67
Tabela 29: Valores da curva de carga para classe de consumo superior a 500 kWh.	68
Tabela 30: Resultado classe de consumo superior a 500 kWh.....	69
Tabela 31: Resultado classe de consumo superior a 500 kWh - Com geração distribuída	69
Tabela 32: Cenários para residência única isolada.....	70

Tabela 33: Comunidade isolada - Bateria 1000Ah	71
Tabela 34: Comunidade isolada - Bateria 3000 Ah	71
Tabela 35: Sistema conectado - Resultado por classe.....	71
Tabela 36: Velocidade do vento.....	81
Tabela 37: Dimensionamento sistema eólico residência isolada	81
Tabela 38: Dimensionamento sistema eólico conjunto de residências	82
Tabela 39: Resultado classe de consumo inferior a 100 kWh.....	83
Tabela 40: Resultado classe de consumo inferior a 100 kWh - Com geração distribuída	83

Lista de Figuras

Figura 1: Junção PN, configuração dos materiais tipo P , tipo N e região de depleção. [12]	18
Figura 2: Sentido de movimento dos elétrons e lacunas na célula fotovoltaica. [12]	19
Figura 3: Curvas de corrente e potencia em relação a tensão. [10].....	19
Figura 4a) 4b) : Curva característica do painel fotovoltaico [13].	20
Figura 5: Estrutura silício mono e policristalino [14].	21
Figura 6: Filme fino [15].....	22
Figura 7: Concentrador fotovoltaico [16].....	22
Figura 8: Evolução da capacidade instalada de geradores fotovoltaicos [18].....	23
Figura 9: Países de maior participação [17].	24
Figura 10: Sistemas conectados a rede e isolados [17]	25
Figura 11: Evolução do preço do painel fotovoltaico [18].....	25
Figura 12: Mecanismos de incentivo [17].....	26
Figura 13: Mecanismos mais utilizados por País [17].	27
Figura 14: Matriz energética brasileira [4].....	27
Figura 15: Esquema geração distribuída [21].....	29
Figura 16: Radiação no território brasileiro [3].....	30
Figura 17: Curva de carga consumidor residencial: dia útil.....	36
Figura 18: Ilustração Sistema Fotovoltaico Autônomo.....	46
Figura 19: Ilustração do sistema híbrido	46
Figura 20: Influência das variáveis de programa na curva de carga [6].....	50
Figura 22: Curva de carga para consumo entre 100 e 200 kWh [22].....	63
Figura 23: Curva de carga classe de consumo entre 200 e 300 kWh [22].	65
Figura 24: Curva de carga classe de consumo superior a 500 kWh [22].	68
Figura 25: Velocidade do vento no Brasil [34]	79
Figura 26: Esquema gerador eólico [35].....	80
Figura 27: Característica turbina eólica [38].....	82

Resumo

MELO, O. **Análise da viabilidade técnica econômica de painéis fotovoltaicos instalados no setor residencial**. 2014. 87p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

A produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis é uma eficiente solução para atender à crescente demanda por energia elétrica de forma sustentável e diversificar a matriz energética. Tendo em vista a vulnerabilidade do setor energético, evidenciado pela crise que o país vive atualmente, com a escassez de água nos reservatórios e o elevado preço da geração de energia pelas usinas termelétricas, o estudo deste tema se torna ainda mais importante. Este trabalho de conclusão de curso teve como foco avaliar algumas condições técnicas e econômicas da produção de energia solar fotovoltaica, visando a integração de painéis solares fotovoltaicos para atendimento de consumidores residenciais, considerando duas situações: paralelamente ao fornecimento de energia pela rede de distribuição, como geração distribuída, e isoladamente em regiões remotas. Através dos resultados e análises realizadas foi possível observar que apesar do elevado investimento inicial, em alguns cenários, ambas as configurações do sistema fotovoltaico (em paralelo a rede de distribuição ou isoladamente) são economicamente viáveis. Dessa forma, através das análises feitas neste trabalho, pode-se constatar que em diversas situações a produção de energia através dos painéis fotovoltaicos é benéfica para o país, sendo uma interessante solução para diversificação da matriz energética e atendimento de áreas remotas.

Palavras-chave: Energia – Fotovoltaicos – Residencial – Geração Distribuída - Análise

Abstract

MELO, O. Analysis of economic and technical feasibility of photovoltaic panels installed on the residential sector. 2014. 87p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The production of electricity from renewable sources is an efficient solution to meet the growing demand for electricity in a sustainable manner and diversify the energy matrix. Given the vulnerability of the energy sector, evidenced by the crisis that the country is currently living with the scarcity of water in reservoirs and the high price of energy generation by thermal plants this question becomes even more important. This research is focused on evaluating some technical and economic conditions about the photovoltaic solar energy, targeting the integration of solar panels for residential consumers, considering two scenarios: parallel to the electric power supply and isolation in remote regions. Through the results and analyses it was observed that despite the high initial investment, in some scenarios, both configurations of photovoltaic (parallel distribution network or separately) are economically viable. Thus through the analysis done in this paper can be seen that in many situations the production of energy using photovoltaic panels is beneficial for the country, being an interesting solution to diversify sources of energy and to supply remote areas.

Key words: Energy – Photovoltaic – Residential – Distributed Generation - Analyze

1. Introdução

A energia se tornou ao longo da história um requisito base para o desenvolvimento social, econômico e cultural da sociedade humana. Este fato pode ser observado na relação desta com índices de crescimento e qualidade de vida. Comparando-se o consumo de energia per capita e os indicadores que compõem o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), nota-se que países com alto IDH utilizam elevada quantidade de energia direta e indireta [1]. Além disso, ultrapassar a barreira de consumo de uma tonelada equivalente de petróleo¹ por ano é um marco para o desenvolvimento e evolução social.

No entanto apesar de sua grande importância, a produção de eletricidade é a principal fonte de poluentes atualmente, tendo significativa participação na queima de combustíveis fósseis do mundo, destacando-se o uso do carvão e óleo combustível, que são as fontes fósseis mais poluentes. Além disso, os líquidos e os resíduos sólidos decorrentes da geração de eletricidade também causam prejuízos ao ambiente, como resíduos ácidos de minas de carvão, vazamento de petróleo e rejeitos radioativos.

Em complemento ao problema da poluição ambiental causado pela produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, ressalta-se a preocupação relacionada a incertezas sobre a duração das reservas desses combustíveis. Considerando a estimativa de que 80% da energia produzida no mundo se originam de recursos não renováveis, a falta destes pode comprometer seriamente o desenvolvimento econômico e a estrutura social atual [1]. Logo, isso leva a uma necessidade de diversificação da matriz energética.

A produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis é uma eficiente solução para atender à crescente demanda por energia elétrica de forma sustentável. Com a evolução tecnológica constatada nos últimos anos, esse meio de produção está cada vez mais viável e conta com uma grande variedade de meios de geração e de recursos utilizados. As principais fontes renováveis são: biomassa, geotérmica, hidrelétrica, oceânica, solar e eólica [2].

A geração de eletricidade a partir das fontes renováveis não está livre de impactos ambientais. Estes, no entanto, ocorrem em menor quantidade e na maioria das vezes são consideravelmente menos agressivos.

Entre as fontes renováveis destaca-se a solar fotovoltaica. Trata-se de uma fonte não poluente e praticamente inesgotável. Possui vantagens significativas sobre as demais fontes, dentre elas: não produz poluição térmica nem química, está disponível em grande escala, os raios solares

¹ Equivalente de Petróleo é uma unidade referente a quantidade de calor liberado na combustão de uma tonelada de petróleo. A unidade é frequentemente usada para quantificar energia.

atingem todas as partes da superfície da Terra, tornando-se assim, particularmente importante em regiões de difícil acesso [1].

O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial para aproveitamento da energia solar durante todo o ano. Apesar das diferentes características climáticas no território brasileiro, a média anual de radiação é alta em todo o país. O valor máximo ($6,5\text{kWh/m}^2$) ocorre no norte da Bahia. A menor irradiação solar ($4,25\text{kWh/m}^2$) ocorre no litoral norte de Santa Catarina. Esses valores de irradiação solar incidente em qualquer região do Brasil são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha, França e Espanha, onde projetos para aproveitamento de recursos solares são amplamente viabilizados [3].

A utilização da energia solar fotovoltaica pode trazer muitos benefícios para o país, regulando a oferta de energia elétrica em períodos de estiagem e diminuindo a dependência do mercado de petróleo. Sobre este ponto, ressalta-se a redução da emissão de gases poluentes à atmosfera durante o processo de geração de eletricidade, e a possibilidade de redução da necessidade de geração termelétrica, a qual tem um grande impacto financeiro devido ao elevado custo dos combustíveis fósseis. Além disso, pode-se viabilizar o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro.

Apesar de todos esses fatos, a energia solar ainda tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira, sendo responsável apenas por 0,01% do total da potência instalada no País [4]. Em 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) iniciou através da Resolução Normativa 482/2012 e posteriormente a 483/2012, a tratativa de regulamentação para a geração distribuída no Brasil por meio do mecanismo de compensação de energia elétrica. O grande potencial para geração fotovoltaica no Brasil, a pouca exploração do recurso e a nova resolução da ANEEL levam à importância do estudo desse tema que pode se tornar uma grande oportunidade de geração elétrica para o País.

Além da geração fotovoltaica, outra fonte renovável que se destaca é a eólica. O Brasil tem uma participação de 2,41% da geração eólica em sua matriz energética, uma quantidade incipiente se considerado o potencial de geração do país.

Sendo assim, este projeto de conclusão de curso visa avaliar condições técnicas e econômicas de instalação de painéis fotovoltaicos em residências, buscando analisar a tratativa internacional do tema, analisar os mecanismos de incentivo no Brasil, evidenciar barreiras, benefícios, possibilidades, as vantagens e desvantagens da implantação em larga escala dessa tecnologia. Além da geração fotovoltaica foi também escopo deste projeto a análise da geração

eólica. No entanto como o foco do trabalho é o atendimento de residências de baixo consumo ou pequenas comunidades com o sistema gerador local, o sistema de turbinas eólicas não se mostrou economicamente viável por necessitar de grande investimento inicial o que não é interessante para atendimento de residências com cargas baixas. A análise considerando o gerador eólico é apresentado no Apêndice 1 do documento.

1.1) Objetivos

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é avaliar a inserção de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica em residências visando diversificar a matriz energética brasileira através do incentivo a geração distribuída conectada à rede de distribuição e a implantação de sistemas de geração fotovoltaica para atender o consumo de energia em áreas remotas sem acesso à rede de distribuição. Para isso foi feita a análise de ambas as configurações de sistemas fotovoltaicos (conectado a rede e isolado) e analisado a viabilidade econômica.

Além disso, é também escopo deste trabalho destacar as vantagens de utilização da energia fotovoltaica, comparações econômicas entre a implantação dos sistemas fotovoltaicos e avaliar a extensão da rede elétrica para áreas remotas, análise dos mecanismos de incentivo à geração distribuída fotovoltaica conectada à rede de distribuição no Brasil e a análise econômica da inserção de turbinas eólicas em áreas remotas e como geração distribuída.

1.2) Desenvolvimento do trabalho

Para o desenvolvimento do projeto foi realizada uma revisão bibliográfica que envolve o estudo do funcionamento das células fotovoltaicas, as tecnologias disponíveis atualmente, os mecanismos de incentivo à geração distribuída em diversos países e no Brasil e a análise do potencial brasileiro para a geração fotovoltaica através dos dados solarimétricos. Para este estudo da irradiação solar foram utilizados dados do Atlas Solarimétrico do Brasil [3]. A análise dos valores referentes à insolação média e sazonal resultou na escolha de uma região com maior potencial para a geração de energia fotovoltaica.

A determinação da carga a ser atendida é de extrema importância, pois influencia no dimensionamento do sistema fotovoltaico. Para a obtenção da potência utilizou-se curvas de carga residencial. Esse método se mostrou eficaz para ser empregado no projeto, pois fornece dados generalizados para grupos de consumidores e a demanda de energia por hora.

Após a obtenção dos dados foi realizado o dimensionamento do sistema considerando dois cenários, sendo eles a geração fotovoltaica autônoma e o sistema fotovoltaico conectado à rede de

distribuição elétrica. Duas metodologias para o dimensionamento do sistema foram utilizadas, uma com base no livro Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [5] que foi aplicada para o primeiro cenário (geração autônoma), e a outra através de simulações no *software Homer Energy*, aplicada em ambos os cenários avaliados [6]. Com os resultados obtidos foi possível levantar discussões que envolveram, por exemplo, a comparação de custos entre a extensão da rede de distribuição elétrica e a implantação do sistema fotovoltaico e o uso do sistema fotovoltaico conectado à rede considerando o mecanismo de compensação de crédito determinado pela ANEEL [7][8]. Dessa forma foi possível analisar a viabilidade econômica e a melhor forma de aplicação dos sistemas autônomos e híbridos de acordo com a carga considerada.

2. Revisão Bibliográfica

Os tópicos a seguir apresentam a revisão bibliográfica referente aos temas de grande relevância para o desenvolvimento do trabalho.

2.1) Geração Fotovoltaica

As células fotovoltaicas, que compõem um painel fotovoltaico, convertem energia solar em energia elétrica. Foram desenvolvidas em 1954 pelos pesquisadores do *Bell Laboratories* e são utilizadas como principal fonte de geração de energia elétrica nas atividades espaciais. No início da década de 90 o desenvolvimento de tecnologias mais baratas e as questões ambientais levaram à aplicação terrestre dos painéis.

No princípio de sua aplicação, as células fotovoltaicas ou fotocélulas apresentavam eficiência de 10%, sendo que atualmente a eficiência é de aproximadamente 17,5% para aplicações comerciais, e 25% para aplicações e estudos em laboratório [9].

As perspectivas de geração de energia elétrica com painéis fotovoltaicos são promissoras. A Alemanha é o atual líder do mercado, ultrapassando Japão e Estados Unidos. No Brasil, esta forma de geração de energia elétrica é pouco explorada e utilizada sendo sua capacidade de produção de 20MW, a maioria visando atender regiões isoladas com difícil acesso a rede de distribuição de energia [10].

2.1.1) Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas têm como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico, que explica a conversão de energia solar em energia elétrica.

- **Conceitos**

Alguns conceitos são importantes para a compreensão do funcionamento da célula fotovoltaica:

- a. Material ‘tipo P’ e ‘tipo N’: material tipo P é aquele em que a carga predominante é positiva, resultando nas chamadas ‘lacunas’. Material tipo N é aquele em que a carga predominante é negativa, ou seja, há elétrons a mais do que o necessário para ocorrer o emparelhamento das cargas [9].

- b. Dopagem: é a introdução de impurezas (elementos químicos diferentes do original) em um material com o objetivo de alterar suas propriedades, sendo geralmente utilizada para alterar as características de condução de alguns elementos [9].
- c. Junção PN: é um material semiconductor do tipo P em contato com um material semiconductor do tipo N. A junção pode ocorrer dentro de um mesmo material pela criação de regiões com diferentes dopagens [9][11]. A Figura 1 mostra esquema da junção PN e a configuração das cargas do material tipo P e tipo N.
- d. Região de Depleção: é a região de ligação entre o material tipo P e o material tipo N na junção PN [9]. A região de depleção e a configuração de suas cargas são ilustradas na Figura 1.
- e. Fóton: São as partículas solares, também chamadas de quanto luminoso. A luz comporta-se como um fluxo de partículas com energia [9]. (corrigir o alinhamento deste parágrafo para

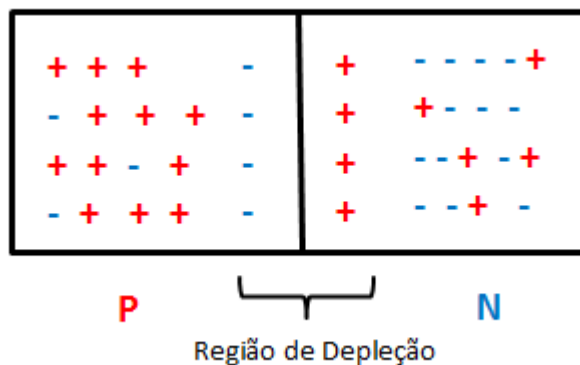


Figura 1: Junção PN, configuração dos materiais tipo P , tipo N e região de depleção [12].

- **Princípio de Funcionamento**

As células fotovoltaicas são constituídas de material semiconductor, sendo o silício o material mais comum na fabricação.

O silício é um mal condutor, pois não possui elétrons livres, por isso utiliza-se a dopagem para torná-lo adequado. Realizando a dopagem com fósforo é obtido material do tipo P. Já quando a dopagem é feita com o elemento boro, a dopagem do silício resulta em material do tipo N. Unindo os dois materiais tem-se a junção PN.

A célula fotovoltaica é composta de uma camada delgada do material tipo N e uma camada espessa do material tipo P. Na junção PN os elétrons do lado N migram para o lado P, fazendo com que a parte N fique com carga positiva. Da mesma forma a difusão de lacunas do lado P para o lado N deixam a parte P com a carga negativa. A Figura 2 mostra esquematicamente o

movimento das cargas e a configuração final da junção. Desse modo forma-se um dipolo associado a um campo elétrico devido ao movimento das cargas.

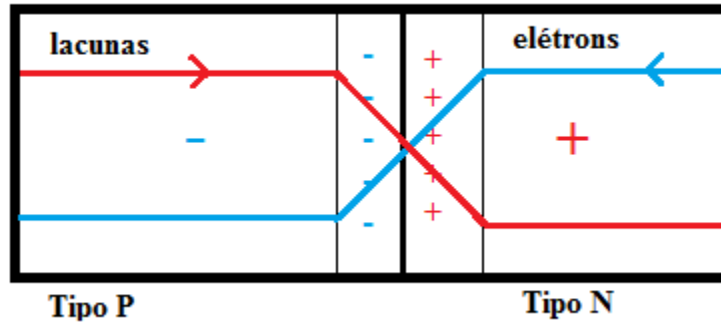


Figura 2: Sentido de movimento dos elétrons e lacunas na célula fotovoltaica [12].

Com a incidência da radiação solar, ocorre a absorção de fótons que proporcionam energia para promover a condução dos elétrons. Devido ao campo elétrico da junção PN o fluxo de elétrons ocorre do lado P para o lado N. Ao se inserir uma carga externa no circuito haverá a passagem de corrente elétrica [9][11].

As células fotovoltaicas comportam-se com fonte de corrente até certo nível de tensão. As curvas características de tensão, corrente e o ponto ótimo de operação são apresentadas na Figura 3. Nela é possível observar as células dependendo de suas especificações técnicas possuem um ponto ótimo de atuação em relação a tensão, sendo que antes de atingir ou ultrapassando este valor (específico para cada tipo de célula) a corrente e potencia da célula diminuem.

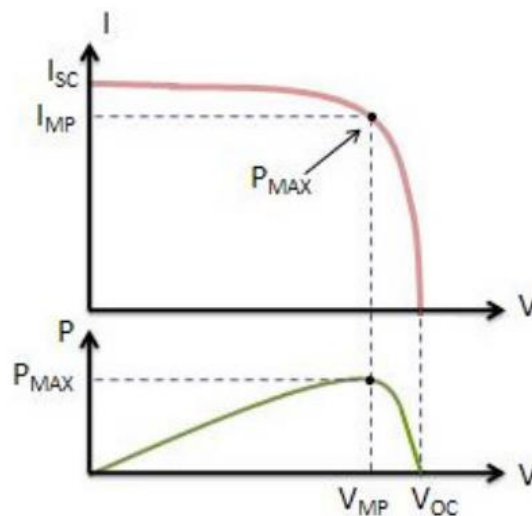


Figura 3: Curvas de corrente e potência em relação à tensão [10].

- **Manutenção**

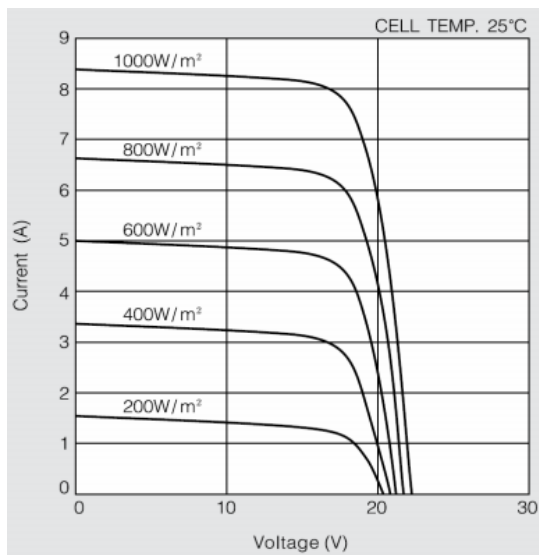
A manutenção dos módulos fotovoltaicos consiste na verificação da existência de oxidação nos elementos do painel e retirada de obstáculos na vizinhança que possam sombrear os módulos e assim reduzir seu rendimento. A simplicidade da manutenção é vantagem importante nos geradores fotovoltaicos [9][11].

- **Eficiência e Efeito dos Fatores Ambientais**

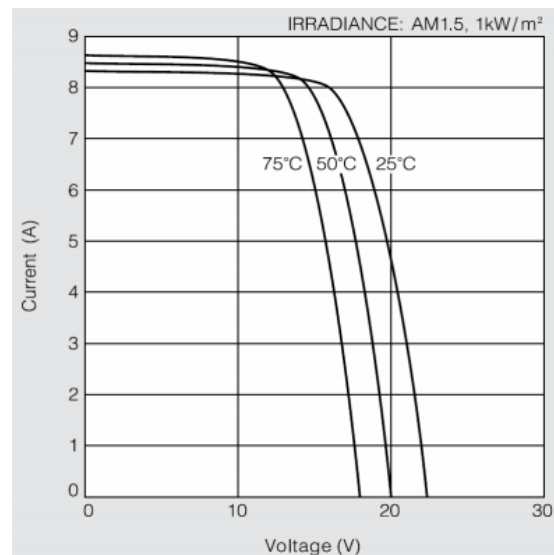
A eficiência da célula fotovoltaica é definida como a potência máxima de saída pela área da célula, sendo que o padrão é de $1000\text{W}/\text{m}^2$ a 25°C . Os principais fatores que influenciam a eficiência da célula são temperatura do ambiente e a intensidade de irradiação solar. Além disso, a eficiência é reduzida de acordo com a vida útil do painel, com uma taxa de aproximadamente 1% ao ano [10].

A mudança na intensidade de radiação incidente no plano do painel fotovoltaico provoca mudança na corrente de saída, Figura 4a. A corrente varia de forma diretamente proporcional com a radiação incidente na superfície do painel fotovoltaico [9][11].

O aumento da temperatura dos painéis fotovoltaicos causa redução na tensão e aumento na corrente. Dessa forma, em locais com elevada temperatura, utilizam-se células ligadas em série gerando maior tensão e conseqüentemente menor corrente, mecanismo utilizado para correção do efeito da temperatura, Figura 4b [9].



(a) Efeito da irradiação solar.



(b) Efeito da temperatura.

Figura 4: Curvas características do painel fotovoltaico [13].

2.1.2) Tecnologias

Atualmente são diversas as tecnologias e materiais utilizados na produção da célula fotovoltaica, a variedade se justifica principalmente pelos diferentes tipos de aplicação.

- **Silício Cristalino**

Em geral, o material mais utilizado para fabricação das células fotovoltaicas devido a sua disponibilidade e preço. As células podem ser divididas em dois grupos, aquelas feitas com silício monocristalino e policristalino. O primeiro possui estrutura homogênea, exige silício com elevado grau de pureza, é mais caro e tem uma maior eficiência. Já o policristalino, apesar da necessidade dos mesmos processos produtivos do anterior, necessita de menor gasto de energia para sua produção. Ambas as estruturas podem ser vistas na Figura 5.

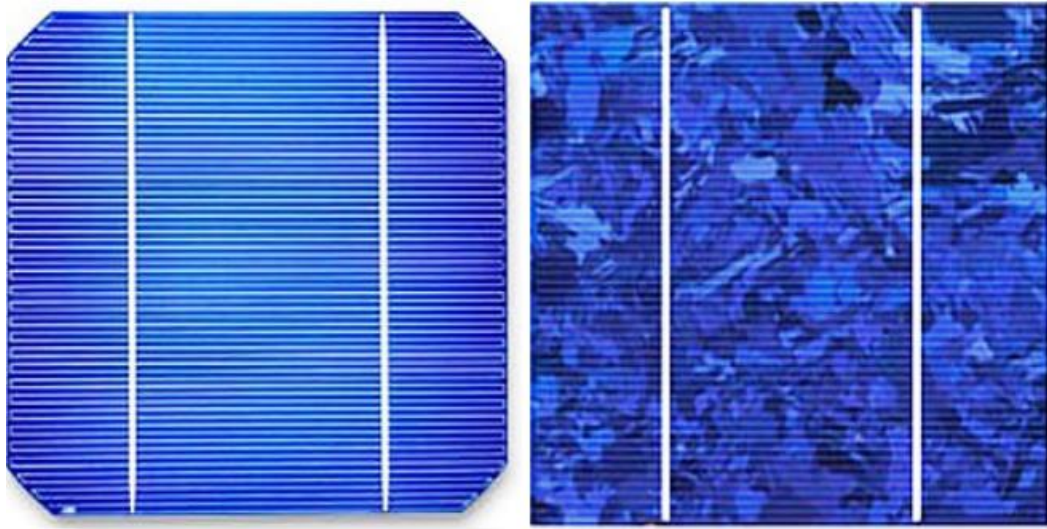


Figura 5: Estrutura silício mono e policristalino [14].

- **Filmes Finos**

A produção das células tipo filme é feita através do depósito de várias camadas finas de material condutor. Os mais utilizados são silício amorfo, telureto de cádmio e disseleneto de cobre. Após a formação das camadas, as células são cobertas por um material de proteção (em geral plástico ou vidro). Na figura 6 é mostrado um exemplo de placa de filme fino produzida com vidro. O custo desse tipo de produção é inferior ao das células de silício, no entanto a eficiência também menor.



Figura 6: Filme fino [15].

- **Concentrador Fotovoltaico**

Essa tecnologia consiste em reduzir a quantidade de células fotovoltaicas necessárias para a produção aproveitando melhor a irradiação solar. Para isso são utilizados espelhos que concentram e direcionam a irradiação para os painéis instalados, como mostrado na Figura 7.



Figura 7: Concentrador fotovoltaico [16].

2.1.3) Cenário Mundial

A geração de energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos está em constante crescimento principalmente em países da Europa, Ásia e Estados Unidos. O principal motivo do aumento da participação da geração fotovoltaica na matriz energética são os incentivos financeiros e regulatórios dados a essa forma de geração. Isso é feito, no exterior, principalmente visando atingir as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e também para diminuir a dependência que vários países possuem do mercado externo de energia [17].

A evolução mundial da capacidade instalada de geração fotovoltaica e os países com maior representatividade são mostrados na Figura 8. Como pode ser visto, a capacidade instalada dobrou do período de 2010 para 2012, sendo na Europa os principais produtores.

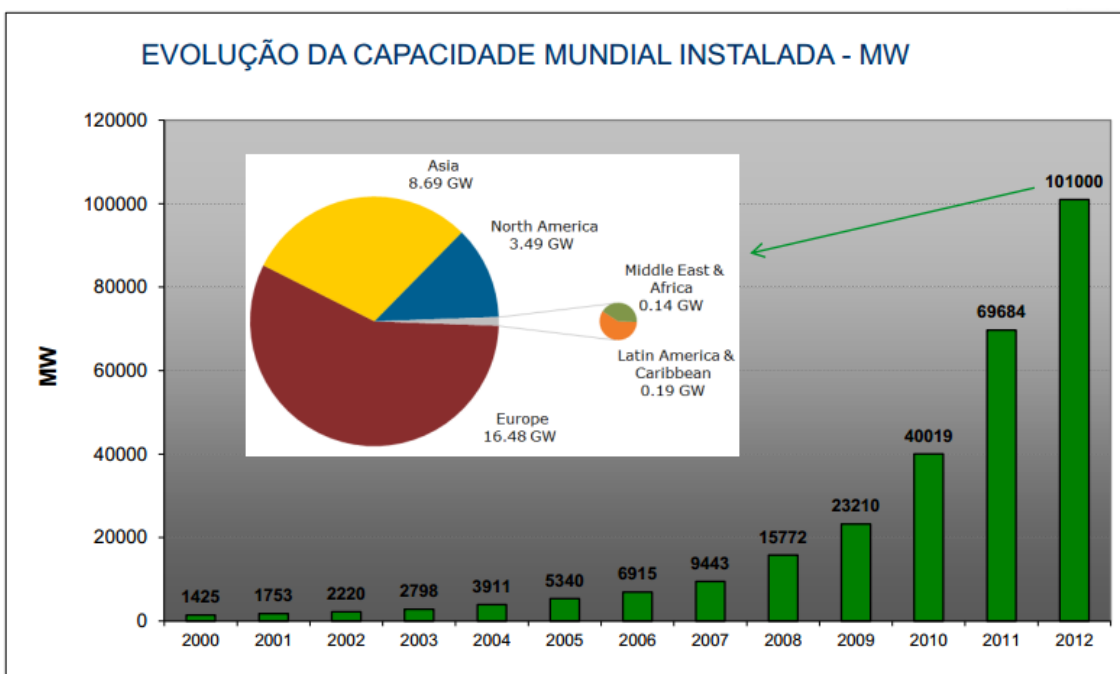


Figura 8: Evolução da capacidade instalada de geradores fotovoltaicos [18].

Outro importante aspecto da evolução do uso de painéis fotovoltaicos é que inicialmente a capacidade instalada se concentrava em apenas três países, sendo eles: Alemanha (20%), Japão (40%) e Estados Unidos (20%) [17]. No entanto esse perfil tem sendo modificado com a participação relevante de outros países, como Itália e Espanha, na capacidade instalada. Essa mudança no perfil da capacidade instalada e sua distribuição entre os países é mostrada na Figura 9.

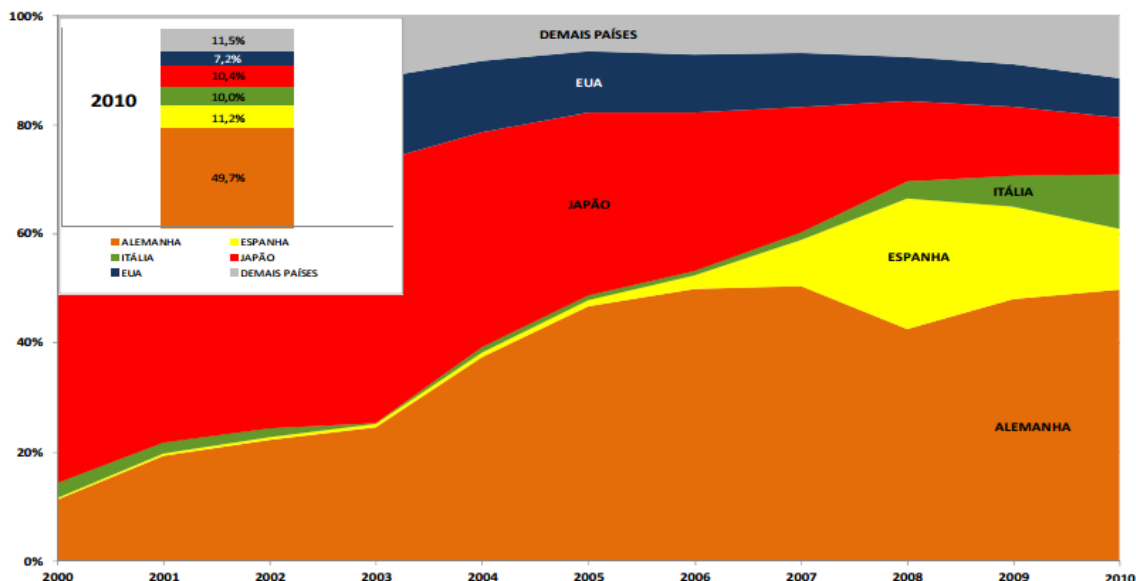


Figura 9: Países de maior participação [17].

Além do aumento da capacidade instalada é interessante avaliar as circunstâncias de emprego da carga. A geração fotovoltaica inicialmente era predominantemente empregada isoladamente, ou seja, não conectada à rede de distribuição elétrica. Isso acontecia devido à inviabilidade técnica, como por exemplo problemas de proteção de rede, e econômica da instalação dos painéis conectados a rede, sendo viável apenas em locais remotos, de difícil acesso à rede de distribuição. Com a diminuição dos custos e com a evolução tecnológica a instalação dos painéis conectados à rede foi se tornando plausível. Essa evolução no emprego da geração fotovoltaica pode ser observada na Figura 10.

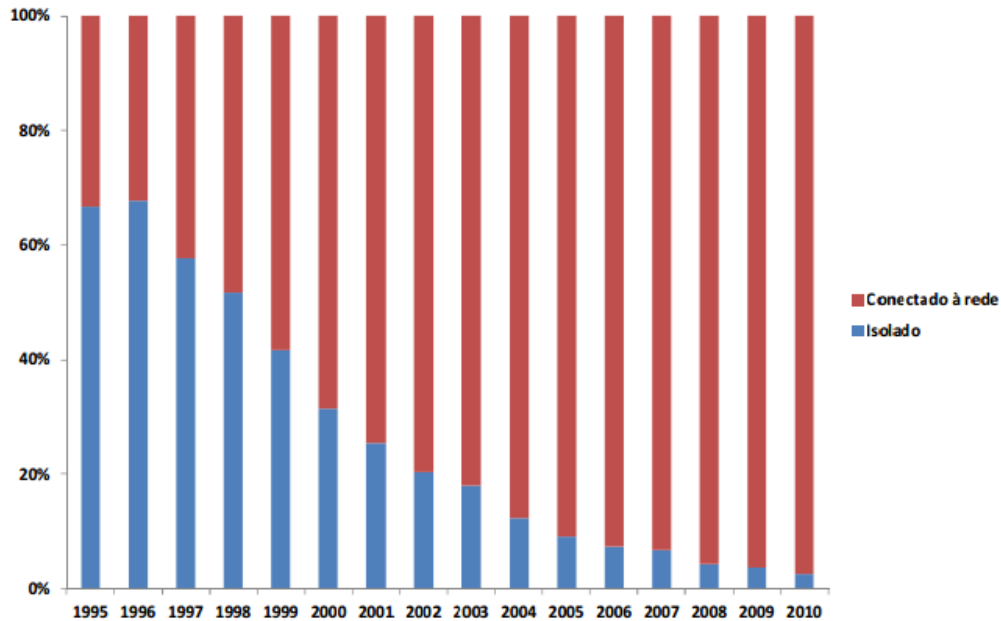


Figura 10: Sistemas conectados a rede e isolados [17].

No entanto é importante destacar que em nenhum dos países europeus o custo da geração fotovoltaica se equiparou ao preço exercido pela concessionária de energia. O custo médio da geração fotovoltaica residencial nos países europeus é de € 203 MWh, enquanto o preço médio exercido pelas concessionárias é de € 160 MWh [17]. Apesar disso a tendência do custo de geração fotovoltaica é de redução, o que pode ser comprovado pela redução dos custos dos painéis ao longo dos anos (Figura 11). Dessa forma espera-se que em breve o custo da geração fotovoltaica equipare-se com o preço da tarifa exercida pelas concessionárias distribuidoras.

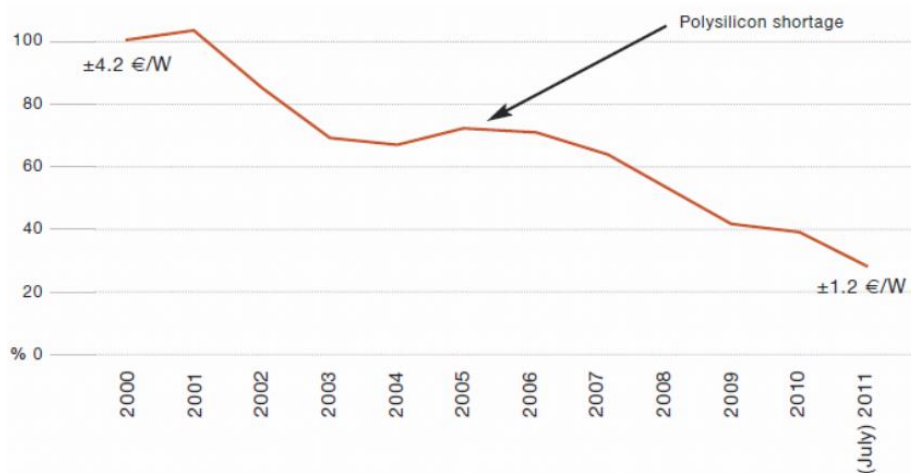


Figura 11: Evolução do preço do painel fotovoltaico [18].

- **Principais Mecanismos de Incentivo**

Os principais mecanismos de incentivo à geração a partir de fontes renováveis são o sistema de cotas (no qual a distribuidora é obrigada a ter parte da energia necessária para atender o seu mercado proveniente de fonte renovável) e o sistema de preços, em que a energia renovável produzida é medida e remunerada diferenciadamente. A forma como cada método é empregada varia de acordo com a regulação e necessidade de cada País.

Existem muitas outras formas de incentivo, que se adaptam a realidade do local que esta sendo empregada. Um resumo dos mecanismos elaborado pela Agência Internacional de Energia é mostrado no quadro da Figura 12.

Mecanismo	Breve descrição
Tarifa-prêmio	Aquisição, pela distribuidora, da energia a uma tarifa superior àquela paga pelo consumidor. Subsídio dado pelo governo e repassado aos demais consumidores.
Cotas (ROC, RPO, REC, RPS e leilões)	Instrumento de aquisição obrigatória de determinado patamar de geração elétrica a partir de fontes renováveis.
Subsídio ao investimento inicial	Subsídio direto, seja sobre equipamentos específicos, seja sobre o investimento total no sistema fotovoltaico.
Dedução no imposto de renda	Dedução no imposto de renda de parte ou todo investimento realizado em sistemas fotovoltaicos.
Incentivo à aquisição de eletricidade “verde” oriunda de sistemas fotovoltaicos	Confere ao consumidor final o direito de escolha quanto à aquisição de eletricidade proveniente de geração fotovoltaica, mediante o pagamento de uma tarifa maior.
Obrigatoriedade de aquisição de FV no portfólio obrigatório de renováveis	Instrumento de aquisição obrigatória de determinado patamar de geração elétrica proveniente de geração fotovoltaica.
Fundos de investimentos para FV	Oferta de ações em fundos privados de investimentos
Ações voluntárias de bancos comerciais	Concessão preferencial de hipotecas para construções que possuam sistemas fotovoltaicos e empréstimos para instalações destes sistemas.
Ações voluntárias de distribuidoras	Mecanismos de suporte à aquisição de energia renovável pelos consumidores, instalação de plantas centralizadas de FV, financiamento de investimentos e modelos de aquisição de eletricidade derivada de FV.
Padrões em edificações sustentáveis	Estabelecimento de padrões mínimos de desempenho para edificações (existentes e novas), cujo contexto favorece, entre outras, a adoção de sistemas fotovoltaicos.

Figura 12: Mecanismos de incentivo [17].

Além disso, os mecanismos mais utilizados por cada País podem ser identificados no quadro da Figura 13.

Mecanismo	Alemanha	Itália	França	EUA	Japão	Espanha
Tarifa-prêmio (" <i>feed-in tariff</i> ")	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Subsídio ao investimento inicial		✓	✓	✓	✓	
Incentivo à aquisição da energia produzida				✓		
Dedução no imposto de renda			✓	✓		
Obrigação de aquisição da energia pela concessionária				✓	✓	✓
Fundos de investimentos para FV	✓			✓		✓
<i>Net metering/Net billing</i>				✓		
Ações voluntárias de bancos comerciais	✓	✓		✓	✓	
Ações voluntárias de distribuidoras	✓			✓	✓	✓
Padrões em edificações sustentáveis	✓					✓

Figura 13: Mecanismos mais utilizados por País [17].

2.1.4) Cenário Brasileiro – Mecanismo de Compensação de Crédito

A geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas possui uma participação incipiente de 0,01% na matriz de energia elétrica brasileira, esta é fortemente concentrada na geração hidráulica como pode ser visto na figura 14 [4].

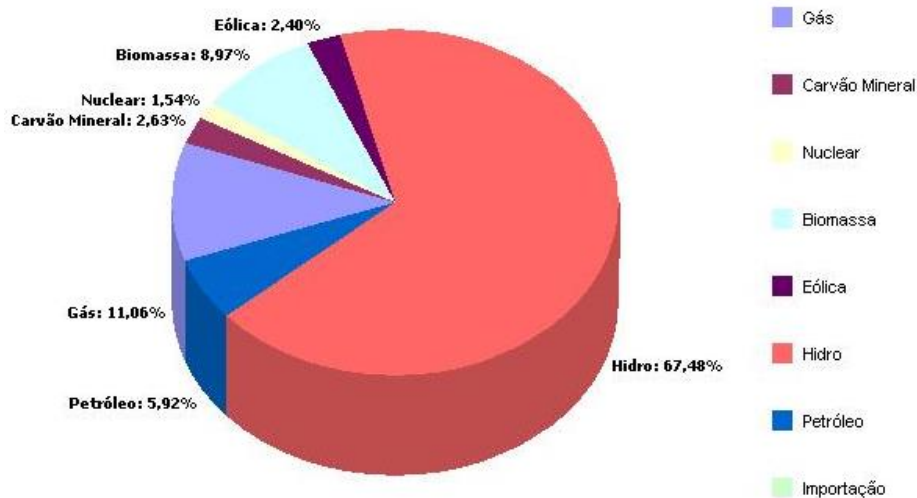


Figura 14: Matriz de energia elétrica brasileira [4].

No Brasil praticamente a totalidade das instalações de geração distribuída por meio dos painéis fotovoltaicos visava o atendimento de regiões isoladas sem acesso a rede de distribu o, uma vez que as condições regulatórias para conexão dos painéis fotovoltaicos à rede de distribu o de energia apenas foram estabelecidas pela ANEEL em 2012 [7][8].

Visando diminuir os impasses para o crescimento da geração fotovoltaica no País a ANEEL publicou a Resolução Normativa 482/2012 [7], que foi resultado da Consulta pública nº15/2010 [19] e da Audiência Pública nº 042/2011 [20] onde todas as partes interessadas puderam expressar suas opiniões sobre a tratativa da geração distribuída no País.

Na Resolução 482/2012 foram determinadas as seguintes definições:

- Microgeração Distribuída: central geradora com potência instalada menor que 100 kW conectada na rede de distribuição por meio de instalações das unidades consumidoras.
- Minigeração Distribuída: central geradora com potência instalada superior a 100kW e inferior a 1MW conectada na rede de distribuição por meio de instalações das unidades consumidoras.

Além disso, ficou definida como seria a tratativa para a conexão de micro e minigeração distribuída à rede de distribuição elétrica. O modelo adotado no Brasil consiste no sistema de compensação de créditos de energia elétrica. Para isso o consumidor deve ter um medidor de energia bi lateral, ou seja, que mede quanto de energia foi utilizada da rede e quanto de energia foi injetada na rede.

Esse sistema define que a energia excedente da geração distribuída da residência seja absorvida pela rede, que estaria funcionando como uma bateria nesse caso, e o consumidor teria um crédito para posterior utilização da energia nos próximos 36 meses. Outra opção para o consumidor seria a utilização da energia excedente gerada no sistema distribuído em outra unidade consumidora que esteja também em seu nome, por exemplo, uma pessoa que possui duas residências em seu nome. Não é permitido até o momento que o consumidor venda para a distribuidora ou para outras pessoas a energia excedente gerada em seu sistema de geração.

No sistema de compensação de crédito, uma vez que a geração distribuída não seja capaz de suprir toda a necessidade energética do consumidor este consumirá da rede de distribuição elétrica, normalmente. Na fatura de energia elétrica será cobrado o valor da energia, caso ele tenha consumido além da capacidade de seu sistema gerador, ou mostrará se há ou não créditos disponíveis (caso tenha gerado mais energia do que consumido).

Todos os consumidores deverão pagar o custo de disponibilidade do sistema independente de ter ou não produzido energia elétrica suficiente para suprir o seu consumo. A disponibilidade de energia tem seu valor definido de acordo com a instalação da residência, sendo o equivalente em reais para 30 kWh (instalação monofásica), 50 kWh (bifásica) ou 100 kWh (trifásica), valores conforme normas ANEEL [21].

A tributação relativa à energia, de acordo com a aprovação do Conselho Nacional de Política Fazendária, será sobre o total de energia que chega à unidade consumidora. Ou seja, o consumidor pagará ICMS sobre o montante de energia gerada e utilizada da rede. Essa questão tem causado muita polêmica no setor elétrico e nos conselhos de consumidores. Para incentivar a implantação da geração distribuída o estado de Minas Gerais estabeleceu que o ICMS no estado seria aplicado apenas entre a diferença de energia produzida e consumida pela unidade consumidora. [21]

Além do ICMS outros impostos que continuarão sendo pagos são o PIS e COFINS que juntos somam 9,25%, também será sobre o montante total de energia [21].

A Figura 15 exemplifica um sistema de geração distribuída conectado a rede de distribuição.

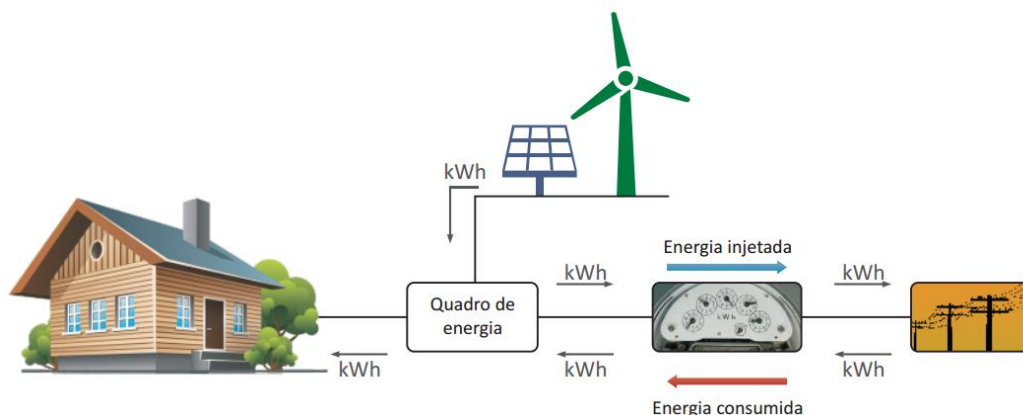


Figura 15: Esquema geração distribuída [21].

2.2) Análise dos Dados Solarimétricos do Brasil – Seleção do Local de Projeto

Uma importante maneira de avaliar o potencial brasileiro para geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos é a análise dos valores e mapas de irradiação solar. Para isso foi utilizado o Atlas Solarimétrico do Brasil [3].

Serão observados os valores de irradiação solar por região para que se possa definir o local com melhor aproveitamento deste recurso energético.

Está além do escopo deste relatório a descrição e estudo da tecnologia de obtenção dos valores de irradiação solar para o território brasileiro. Um estudo completo e detalhado sobre o assunto pode ser obtido no Atlas Solarimétrico do Brasil [3], utilizado como base para o estudo apresentado neste relatório.

A média anual de irradiação solar no Brasil é apresentada na Tabela 1 e mostrada na Figura 16. Apesar da grande extensão do território e das diferentes características climáticas a variação de irradiação é pequena entre as regiões.

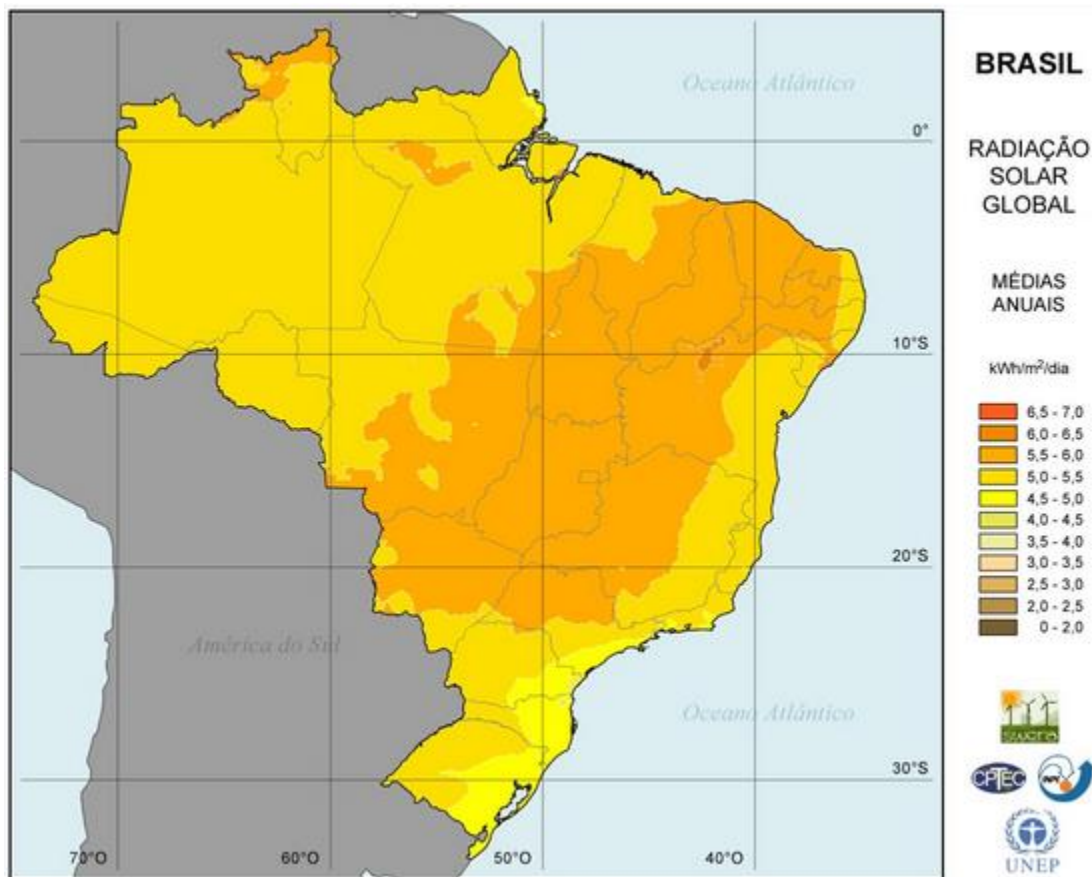


Figura 16: Irradiação solar no território brasileiro [3].

Tabela 1: Irradiação solar global média (kWh/m²) [3].

Região	Radiação Global Média (kWh/m ²)
Norte	5,5
Nordeste	5,9
Centro-Oeste	5,7
Sudeste	5,6
Sul	5,2

A média global de irradiação solar pode esconder detalhes importantes de cada região por se tratar de um valor generalizado. Os mapas solarimétricos fornecem dados importantes de cada estado sendo relevante o seu estudo.

O maior valor de radiação no Brasil é de 6,5 kWh/m², norte da Bahia próximo à divisa com o Piauí, e o menor é de 4,25 kWh/m² no litoral de Santa Catarina. Os valores de irradiação variam de 4,2 a 6,7 kWh/m² [3].

Os valores de irradiação solar sazonal, avaliados nos mapas de insolação, mostram que a região Sul apresenta os menores níveis de irradiação e a maior variação inter sazonal. Isso ocorre devido à grande nebulosidade existente no local. Na região Norte amazônica há maior irradiação no inverno do que no verão devido ao elevado índice pluviométrico e à intensidade de nuvens na estação mais quente. Na região Sudeste também há grande variação inter sazonal, assim como na região Central, onde os melhores níveis de irradiação ocorrem na estação seca. Os valores máximos de irradiação durante todo o ano são na região oeste nordestina, ao sul do Tocantins. Neste local também é observada a menor variação inter sazonal devido ao clima semiárido, caracterizado por apresentar baixa umidade e baixo índice pluviométrico.

Com os dados mostrados na Tabela 1 conclui-se que as regiões com melhor potencial para a geração de energia elétrica através de painel fotovoltaico são Centro-Oeste, Norte, e o interior do Nordeste, mas os altos índices de irradiação solar permitem a geração de energia elétrica fotovoltaica em todo o território brasileiro.

Os altos níveis de irradiação permitem a geração de energia elétrica fotovoltaica em qualquer parte do País, mas as regiões Norte e Nordeste se destacam pelas características climáticas favoráveis a este meio de geração. Além disso, grande parte das residências sem acesso a energia elétrica encontram-se nessas regiões.

Dessa forma, para todos os cenários e simulações desenvolvidos nesse trabalho serão utilizados dados de irradiação referentes à latitude de 08°08'54 e altitude de 480 metros, sendo relativos à região Nordeste, mais especificamente a cidade Betânia do Piauí.

2.3) Principais Componentes do Sistema Fotovoltaico

A composição do sistema fotovoltaico pode ser alterada de acordo com a maneira que será aplicado o sistema. Por exemplo, se operando de forma isolada para a geração de energia elétrica, existe a necessidade de utilização do banco de baterias. Caso contrário elas não são estritamente necessárias. A seguir são apresentadas descrições dos principais equipamentos que constituem um sistema fotovoltaico.

- **Módulo Fotovoltaico:** É composto por células conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização da energia. As células têm como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico, este explica a conversão de energia solar em energia

elétrica. Uma célula tem aproximadamente 0,4 Volts de tensão e uma densidade de corrente de 30 mA/cm² [5].

- Baterias: têm como finalidade armazenar a energia excedente produzida pelos painéis solares para uma posterior utilização em situação nas quais o módulo não estará gerando energia ou estiver com seu desempenho afetado (períodos noturnos ou dias com pouca insolação). O banco de baterias deve ser dimensionado para atender a demanda de energia em dias de baixa insolação considerando as características meteorológicas do local onde o projeto será instalado [5].
- Inversor de potência: sua função é converter a corrente contínua (CC) do banco de baterias para corrente alternada (CA) utilizada nas residências e ajustar o valor da tensão para o nível necessário para o funcionamento dos equipamentos (110 ou 220 V_{ca}) [5].
- Controlador de carga: tem como finalidade controlar o processo de carga e descarga do banco de baterias, permitindo que sejam carregadas completamente e descarregadas até um nível seguro para não danificar a bateria. É dimensionado de acordo com a corrente e tensão do arranjo fotovoltaico

3. Metodologia

Nos tópicos a seguir são descritas as metodologias empregadas neste trabalho, sendo elas referentes à caracterização da carga por meio das curvas de carga e os dois métodos utilizados para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.

Em relação às duas metodologias utilizadas para o dimensionamento do sistema, a principal diferença entre elas é que a primeira utiliza como dado predominante a potência total instalada enquanto a segunda se baseia no pico de demanda da curva de carga do consumidor.

3.1) Local de Projeto

A escolha da localidade para aplicação de projeto se baseou no nível de irradiação solar. Sendo assim como mostrado anteriormente as regiões com melhor potencial para a geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos são Centro-Oeste, Norte, e o interior do Nordeste. Contudo vale frisar que os altos índices de irradiação solar permitem a geração de energia elétrica fotovoltaica em todo o território brasileiro.

Além do grande nível de irradiação solar, grande parte das residências sem acesso à energia elétrica em áreas remotas encontram-se nas regiões Norte e Nordeste.

Dessa forma, para todos os cenários e simulações desenvolvidos nesse trabalho serão utilizados dados de irradiação solar referentes à latitude de 08°08'54 e altitude de 480 metros, sendo relativo à região Nordeste, mais especificamente a cidade Betânia do Piauí.

3.2) Caracterização da Carga

A potência de carga utilizada em uma residência típica é de extrema importância para o projeto de instalação dos painéis fotovoltaicos. É com base nela que é realizado o dimensionamento do sistema gerador. Neste trabalho serão utilizadas curvas de carga estimadas a partir de dados de consumidores reais e apresentadas por Francisquini (2006) no trabalho “Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e alimentadores de distribuição” [22], em que as curvas de carga para um determinado grupo de consumo é estimado a partir da curva de carga individual dos consumidores.

A curva de carga é uma importante ferramenta, pois fornece o consumo de potência por hora, o que será necessário para a simulação no *software Homer Energy*. Além disso, generaliza a demanda de energia elétrica dividindo as residências em grupos de acordo com o consumo de energia elétrica. Devido à grande diferença na quantidade de energia gasta por cada consumidor o

trabalho classifica as residências em subclasses de acordo com o consumo mensal. As classes são as seguintes: (kWh/mês): 0-100, 101-200, 201-300, 301-500 e acima de 500.

- **Curvas de Carga**

Neste trabalho de conclusão de curso será utilizada a subclasse de baixo consumo, 100 kWh/mês para a análise do sistema isolado, por se tratar da grande maioria de consumidores que ainda não possuem acesso à energia elétrica. Para o sistema conectado à rede de distribuição serão avaliadas diferentes classes, suas respectivas curvas serão apresentadas no desenvolver do trabalho. Na Figura 17 é apresentada a curva de carga para a categoria “dia útil”, obtida por meio do trabalho citado [22]. A Tabela 2 apresenta os valores das curvas de carga para a classe 100 kWh/mês para as categorias: dia útil, Sábado, e Domingo.

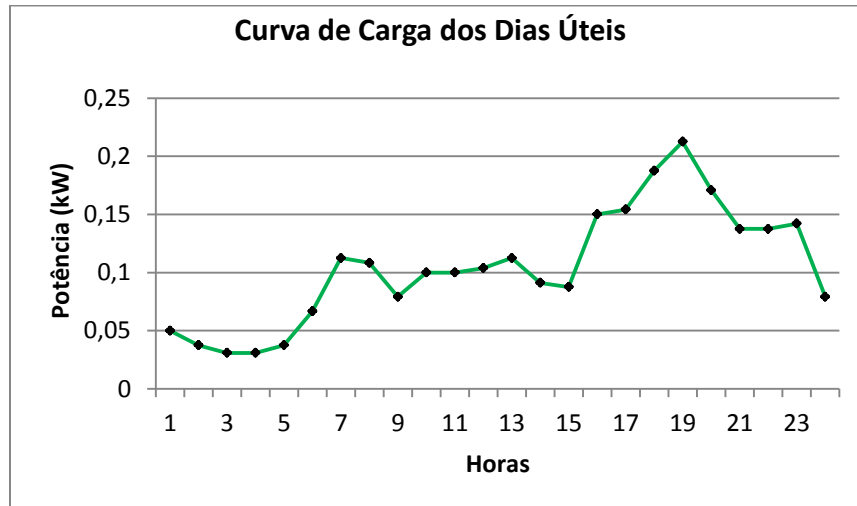


Figura 17: Curva de carga consumidor residencial: dia útil.

Tabela 2: Valores das curvas de carga.

Horas	Potência (kW)		
	Dia Útil	Sábado	Domingo
1	0,05	0,0678	0,075
2	0,0375	0,0428	0,0464
3	0,0308	0,0428	0,0464
4	0,0308	0,0428	0,0428
5	0,0375	0,0286	0,0428
6	0,0666	0,0286	0,0393
7	0,1125	0,0464	0,0428
8	0,1083	0,0536	0,0607
9	0,0792	0,0893	0,0536
10	0,1	0,1214	0,0607
11	0,1	0,125	0,0643
12	0,1038	0,125	0,05
13	0,1125	0,1	0,0678
14	0,0912	0,1036	0,0607
15	0,0875	0,1	0,0893
16	0,15	0,1214	0,0536
17	0,1542	0,1178	0,075
18	0,1875	0,1464	0,0821
19	0,2125	0,1571	0,1178
20	0,1708	0,1714	0,1464
21	0,1375	0,125	0,1214
22	0,1375	0,1571	0,0928
23	0,142	0,1107	0,0857
24	0,0792	0,0678	0,0643
Total	2,519	2,292	1,682

3.3) Metodologia apresentada no Manual de Engenharia para Dimensionamento dos Painéis Solares Fotovoltaicos

A primeira metodologia utilizada foi baseada no livro Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [5]. Esta metodologia utiliza a potência total instalada na residência para dimensionar o sistema. Por utilizar a potência total instalada trata-se de um sistema com alta confiabilidade de suprimento de toda a carga, uma vez que é dimensionado considerando todos os equipamentos existentes na residência. Trata-se de um projeto com alto grau de especificidade para a residência em questão. Outras características, vantagens e desvantagens serão discutidas na apresentação dos resultados.

3.3.1) Apresentação da Metodologia

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico o primeiro passo é determinar o valor da potência nominal de projeto. Para isso serão utilizadas as curvas de cargas para residências, com consumo inferior a 100 kWh/mês.

O segundo passo é dimensionar as quantidades necessárias de cada componente para atender a demanda de energia. No dimensionamento do arranjo fotovoltaico calcula-se o número de módulos fotovoltaicos instalados em paralelo e em série. A quantidade de painéis em paralelo (N_{mp}) é dada pela equação (1) [5], sendo I_n a corrente nominal do módulo e I_p a corrente de projeto. O fator de correção do módulo (f_m) é a correção da dispersão de raios solares na atmosfera relacionados principalmente com a poluição do ambiente, seu valor é indicado na Tabela 7.

$$N_{mp} = \frac{I_p}{f_m I_n} \quad (1)$$

Tabela 3: Fator de correção do módulo fotovoltaico.

Material	f_m
Cristalino	0,9
Amorfo	0,7

A corrente de projeto (I_p) é obtida pela equação (2), depende do número de horas de Sol Pleno (SP), em horas, e do consumo ampère-hora corrigido (C_c), em Ah/dia.

$$I_p = \frac{C_c}{SP} \quad (2)$$

O consumo ampère-hora corrigido (C_c) é obtido pela equação (3), que considera a potência total das cargas (P_t) e a tensão nominal do sistema (V_n). As demais variáveis são: eficiência na conversão de potência (η_c), relacionada com a perda de energia que ocorre em sistemas com controladores de carga e inversores de potência, o seu valor é apresentado na Tabela 4; fator de eficiência da fiação (η_f), é a perda de energia causada pela fiação com valor padrão de 0,98; fator de eficiência da bateria (η_b), definido como a razão entre o número de ampère-hora de saída e número de ampère-hora de entrada, o valor padrão é de 0,95.

$$C_c = \frac{P_t}{\frac{(n_c \times V_n)}{\eta_f \times \eta_b}} \quad (3)$$

Tabela 4: Eficiência na conversão de potência.

η_c	
CC-CA	0,85
CA-CC	0,8

O número de horas de Sol Pleno é equivalente à energia total diária incidente sobre a superfície inclinada em kWh/m² (quilowatt-hora por metro quadrado). Pode ser calculado através da equação (4) [5].

$$SP = \frac{H_T}{1.000} \left[\frac{kWh/m^2}{w/m^2} \right] \quad (4)$$

Duffie e Beckman (1991) [24] propõem a equação (5) para o cálculo da irradiação solar global incidente no plano inclinado em média mensal (H_T), expressa em kWh/m²/mês, e a equação (6) para o cálculo da irradiação solar extraterrestre (H_0), expressa em kWh/m²/mês. Nesse trabalho, os autores também determinaram o valor para a constante solar (G_{SC}), definida como o fluxo de energia radiante que incide normalmente ao plano de uma superfície fora da atmosfera terrestre, sendo o valor dessa constante igual a 1.367 W/m²[24].

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_D}{H} \right) R_B + H_D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho_g \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (5)$$

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 \times G_{SC}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d}{365} \right) \right] \times \times (\cos \vartheta - \cos \delta \times \sin \omega_s + \omega_s \times \sin \vartheta \times \sin \delta) \quad (6)$$

O valor de R_B , calculado através da equação (7), corresponde à razão entre a irradiação extraterrestre incidente no plano inclinado e a irradiação incidente no plano horizontal, sendo que ω_s , calculado através da equação (8), corresponde ao pôr-do-sol aparente para a superfície inclinada.

$$R_B = \frac{\left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s \right] \times (\sin \delta \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma)}{\cos \vartheta \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s \times (\sin \delta \cdot \sin \vartheta)} + \frac{\sin \omega_s \cdot \cos \delta \times (\cos \vartheta \cdot \cos \beta + \sin \vartheta \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma)}{\cos \vartheta \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s \times (\sin \delta \cdot \sin \vartheta)} \quad (7)$$

$$\omega_s = \text{mínimo} \left[\frac{\cos^{-1}(-\tan \vartheta \tan \delta)}{\cos^{-1}[-\tan(\vartheta + \beta)] \tan \delta} \right] \quad (8)$$

O valor para a refletância da vizinhança (ρ_g) está relacionado com o material presente nas proximidades do local a ser instalado o sistema fotovoltaico. O valor padrão para cada material é indicado na Tabela 5 [25].

Tabela 5: Refletância da vizinhança.

Material	ρ_g
Terra	0,04
Tijolo vermelho	0,27
Concreto	0,22
Gramma	0,20
Barro/argila	0,14
Superfície construção clara	0,60

Os ângulos Φ , δ , β e γ presentes nas equações são definidos da seguinte forma:

- Latitude Geográfica (Φ): coordenada geográfica definida na esfera ou superfície terrestre;
- Inclinação do plano inclinado (β): ângulo formado entre o plano horizontal e o plano inclinado formado pelos módulos fotovoltaicos, expresso em graus [25];
- Ângulo azimutal de superfície (γ): ângulo formado entre a projeção da reta normal ao plano inclinado e a direção Norte-Sul. Seu valor varia de -180° a 180° e indica o desvio do Norte Geográfico [25];
- Declinação Solar (δ): pode ser calculada pela equação (9), conhecida como equação de Cooper [8], em que (d) representa o dia Juliano e varia de 1 (1º de janeiro) a 365 (31 de dezembro) [27].

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(2\pi \frac{284+d}{365}\right) \quad (9)$$

Em [27] propõe-se a equação (10) para a obtenção da irradiação solar incidente no plano horizontal em média mensal (H), expressa em kWh/m²/mês. Para o cálculo são necessários os valores da irradiação solar extraterrestre (H_0) e dos valores da altitude de localização do plano inclinado (h), duração média do período diurno \bar{N} (h/dia), insolação média diária \bar{n} (h/dia) e dos coeficientes empíricos de Bennett (a, b e c) tabelados e apresentados na Tabela 6 [27].

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} + ch \quad (10)$$

Tabela 6: Coeficientes empíricos de Bennett.

Mês	a	B	c
Janeiro	0,225	0,4812	0,0007
Fevereiro	0,221	0,5026	0,0006
Março	0,221	0,5142	0,0005
Abril	0,188	0,5574	0,0005
Mai	0,197	0,5423	0,0004
Junho	0,235	0,4780	0,0004
Julho	0,264	0,4386	0,0004
Agosto	0,291	0,3768	0,0006
Setembro	0,260	0,4242	0,0006
Outubro	0,235	0,4744	0,0005
Novembro	0,207	0,4816	0,0007
Dezembro	0,237	0,4343	0,0007

Collares-Pereira e Rabl (1979) propõem a equação (11) para o cálculo da irradiação solar difusa incidente no plano inclinado em média mensal (H_D), expressa em kWh/m²/mês [28].

$$\frac{H_D}{H} = 0,775 + 6,06.10E - 3 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 4,55.10E - 3 \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos(115K_T - 103) \quad (11)$$

Para calcular o número de módulos em série é utilizada a equação (12) que considera a tensão nominal da bateria (V_{nb}), o número de baterias em série (B_s) e a tensão do módulo para a temperatura mais elevada (V_{tmax}), valor fornecido pelo fabricante.

$$N_{ms} = \frac{1,2 \times V_{nb} \times B_s}{V_{tmax}} \quad (12)$$

Para obter o número total de módulos fotovoltaicos é utilizada a equação (13), sendo N_{ms} o número de módulos instalados em série e N_{mp} o número de módulos em paralelo [5].

$$N_{mt} = N_{ms} \times N_{mp} \quad (13)$$

O próximo passo é o dimensionamento do banco de baterias. A quantidade de baterias em paralelo (B_p) é obtida pela equação (14). Leva-se em conta o consumo ampère-hora corrigido (C_c), os dias de armazenamento necessários (d_a), a capacidade da bateria (C_b) e a profundidade de descarga máxima (p_{max}) para a qual será utilizado o valor de 20%, garantindo que a vida útil da mesma seja de quatro (4) anos. O desconto por temperatura (D_t) é o fator que corrige a capacidade

da bateria para baixas temperaturas, pois nessa situação o equipamento pode apresentar perda de capacidade. Para países tropicais o valor padrão para correção é um (1).

$$B_p = \frac{C_c \times d_a}{P_{\max} \times D_t} \quad (14)$$

A quantidade de baterias em série (B_s) é calculada pela equação (15) considerando-se a tensão nominal do sistema (V_n) e a tensão nominal da bateria (V_{nb}). A partir das quantidades de baterias em série e em paralelo o número total de baterias é calculado pela equação (16).

$$B_s = V_n \div V_{nb} \quad (15)$$

$$B_t = B_s \times B_p \quad (16)$$

O dimensionamento do controlador de carga é realizado pela equação (17), que utiliza o número de módulos em paralelo (N_{mp}), a corrente de curto circuito do módulo (I_{cc}) e a capacidade do controlador (C_c), ambos fornecidos pelo fabricante.

$$N_c = \frac{N_{mp} \times I_{cc}}{C_c} \quad (17)$$

Para estimar o custo da energia gerada (CEG) pelo sistema fotovoltaico usam-se as equações (18) a (24) para o cálculo [29].

$$X = \frac{1+i}{1+d} \quad (18)$$

$$P_a = \frac{1-X^n}{1-X} \quad (19)$$

$$VP2 = P_a \times CI \quad (20)$$

$$VP1 = \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^n \times CF \quad (21)$$

$$CCV = Inv.inicial + VP1 + VP2 \quad (22)$$

$$CCVA = \frac{CCV}{X + P_a} \quad (23)$$

$$CEG = \frac{CCVA (R\$)}{E_g/ano(kWh/ano)} \quad (24)$$

Sendo, X: fator de descapitalização (adimensional); P_a : fator de amortização (adimensional); VP2: valor presente acumulativo para os gastos anuais fixos em manutenção (em R\$); P1: valor presente (em R\$) para um item que seria adquirido n anos mais tarde (troca de inversores a cada 10 anos totalizando duas trocas, portanto $n = 10$ e $n = 20$); Inv.inicial: investimento inicial de instalação do gerador fotovoltaico; CCV: custo do ciclo de vida (em R\$); CCVA: custo do ciclo de vida anualizado (em R\$); CI: valor gasto anualmente em manutenção (estimado em R\$ 200,00); CI': valor de aquisição dos inversores; i: taxa de inflação (4,5%_{aa}); d: taxa de desconto (10%_{aa}); n: vida útil do empreendimento (30 anos); E_g/ano : energia gerada anualmente (kWh/ano).

3.4) Metodologia de Dimensionamento dos Painéis Fotovoltaicos utilizando o *Software Homer Energy*

Homer Energy é um programa computacional de modelagem específico para projetar e analisar sistemas híbridos ou autônomos de geração de energia elétrica. Utilizando rotinas de otimização, o programa é capaz de determinar a viabilidade econômica do sistema de geração sob estudo e otimiza os resultados referentes à capacidade, custo de operação, investimento inicial, custo de manutenção, emissão de gases poluentes, entre outros. O programa é uma eficiente ferramenta para o estudo da viabilidade de fontes alternativas de energia [6].

3.4.1) Entradas do Programa

A seguir alguns conceitos relevantes a respeito do *software* são apresentados, assim como a definição das principais entradas necessárias para as simulações. Os valores fornecidos serão apresentados em tópico adiante.

Para realizar as simulações usando o programa é necessário o fornecimento de diferentes dados relativos à carga de projeto, características técnicas dos equipamentos utilizados e

informações sobre a forma de geração de energia escolhida. A seguir são apresentados alguns conceitos relevantes a respeito do *software*, assim como a definição das principais entradas necessárias para as simulações. Os valores fornecidos serão apresentados em tópico adiante.

1. Definição da Carga

Para a simulação no *Homer Energy* é necessário o fornecimento de um valor para a carga final. A carga final ou potência de alimentação é o máximo consumo de energia que poderá ocorrer no local do projeto.

2. Distribuição da Carga

É o perfil de distribuição da carga ao longo do dia estabelecendo o valor da demanda de potência em cada hora. Este é um parâmetro importante, pois determina os horários de pico de utilização de carga. Tendo em vista o comportamento de demanda de energia é possível analisar qual o melhor dimensionamento do sistema para o fornecimento de energia visando um alto desempenho e viabilidade econômica.

3. Características da Fonte Renovável

Considerando-se o uso da energia solar fotovoltaica, deve-se fornecer ao programa a média mensal da potência que pode ser gerada a cada metro quadrado com a irradiação diária do local ($\text{kW/m}^2/\text{d}$). Essa informação é de extrema importância para avaliar a capacidade de geração de energia solar da região escolhida.

O recurso de entrada muda de acordo com a fonte renovável escolhida. Para a energia eólica, por exemplo, seria fornecida a média mensal da velocidade dos ventos no local (m/s). Já no caso da energia hidroelétrica seria necessária a vazão de água (L/s) do rio em questão.

4. Determinações Técnicas

Para que seja feito o dimensionamento do sistema fotovoltaico deve-se fornecer ao programa a potência do equipamento, o custo de aquisição, o custo para reposição e manutenção (\$/ano).

Outros componentes para a formação do sistema elétrico devem ser caracterizados:

- I. Conversor de potência: deve-se especificar a potência do equipamento, o capital investido, o custo para reposição e manutenção (\$/ano).
- II. Bateria: o *Homer Energy* possui uma lista de modelos de bateria, cada uma com especificação da curva de Capacidade x Corrente e características como tensão,

capacidade nominal (Ah), eficiência de armazenamento, vida útil, entre outras. Deve-se escolher a bateria que melhor se enquadra nas características do sistema elétrico. É necessário especificar o capital investido, o custo para reposição e manutenção (\$/ano).

5. Sistema Interligado à Rede Elétrica

Uma das configurações analisadas no projeto foi o gerador fotovoltaico conectado em paralelo com a rede elétrica. Para isso é necessário fornecer ao programa o preço da energia fornecida pela concessionária de distribuição de energia elétrica do local de estudo. Dessa forma o programa *Homer Energy* realizará a comparação entre o custo da energia fornecida unicamente pela rede elétrica, pelo sistema híbrido composto pela energia solar fotovoltaica e rede elétrica, e apenas pelo gerador fotovoltaico.

3.4.2) Modelagem do Sistema Fotovoltaico

Na modelagem do sistema fotovoltaico efetuada no programa *Homer Energy* é considerado um sistema com os seguintes equipamentos: módulos fotovoltaicos, baterias e o conversor. Para o caso do sistema fotovoltaico conectado a rede de distribuição não serão utilizadas baterias, uma vez que a rede elétrica terá o papel de “armazenar” ou suprir energia quando necessário, além disso a não utilização das baterias resulta em significativa redução dos custos de projeto. Ambos os sistemas, autônomo e híbrido, são apresentados na Figura 19 e Figura 20, respectivamente.

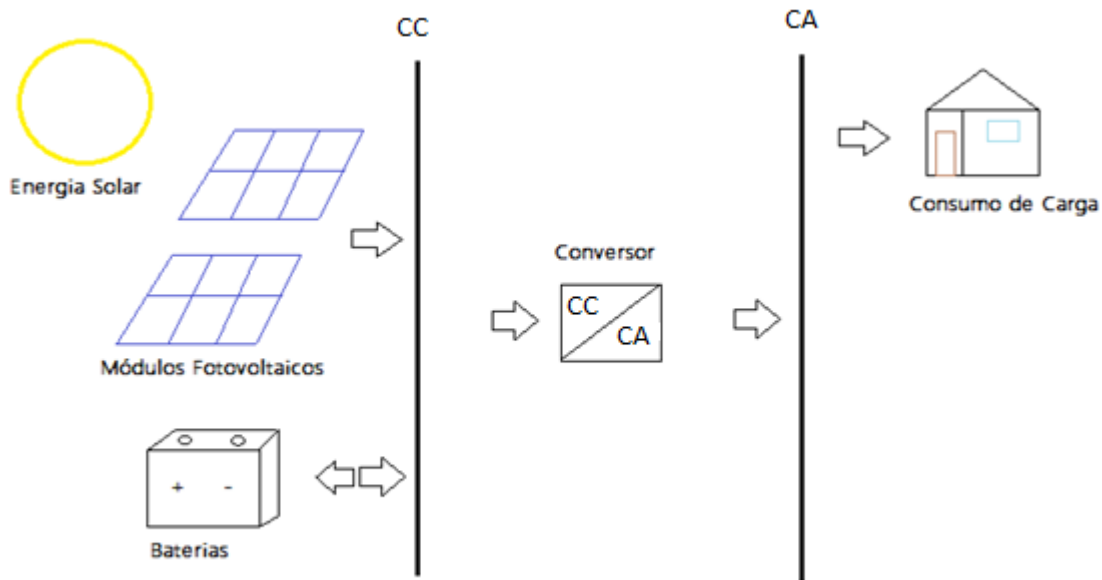


Figura 18: Ilustração Sistema Fotovoltaico Autônomo.

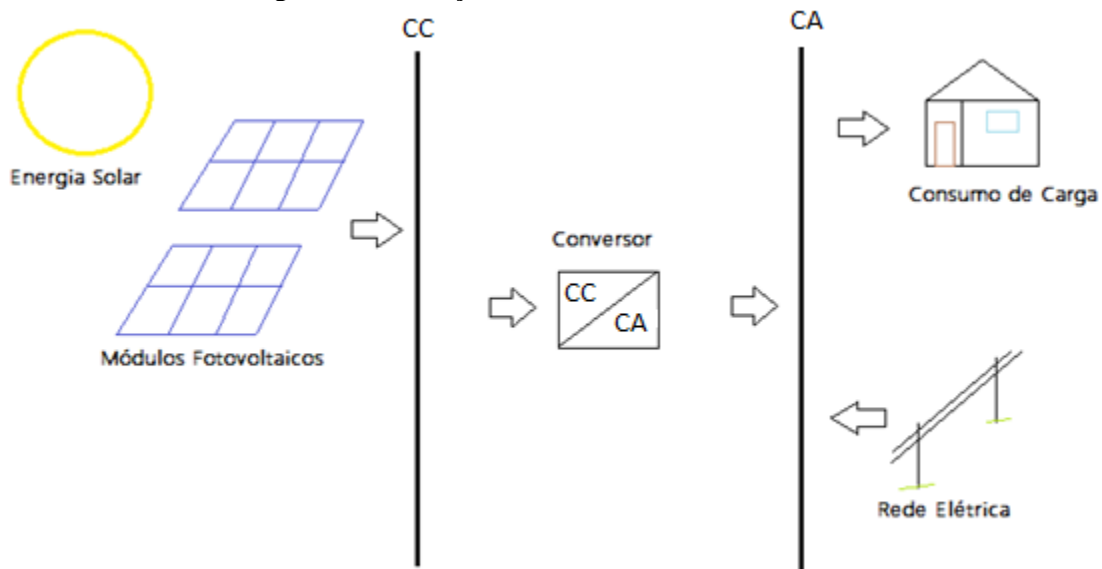


Figura 19: Ilustração do sistema híbrido.

As simulações no programa *Homer Energy* foram feitas considerando diferentes cenários dentro de duas vertentes principais: sistema conectado a rede elétrica e sistema autônomo. Para o sistema conectado à rede de distribuição analisou-se a metodologia de compensação de crédito para diferentes classes consumidoras (baixo e alto consumo). Para o sistema isolado, primeiramente analisou-se apenas uma residência de baixo consumo de energia e posteriormente, um conjunto de

residências de baixo consumo. Dessa forma, foi possível observar se o sistema é viável para ser implantado em uma comunidade ou apenas para residências isoladas.

Para a compreensão dos resultados obtidos com as simulações é necessária a definição de algumas variáveis de saída do *Homer Energy*.

- **Capital Inicial:** é o gasto inicial com a instalação dos componentes para que o sistema possa começar a operar. Esta informação é obtida a partir dos preços dos equipamentos inseridos como dados de entrada no programa.
- **Custo Total:** é o valor presente de todos os custos do projeto considerando o seu tempo de vida útil (se um equipamento ainda não está totalmente depreciado ao final do tempo de projeto, este valor relativo aos anos que ainda restam de funcionamento do equipamento será descontado do custo total), gastos com manutenção e troca de equipamentos, penalidades ambientais, e venda ou compra de energia da rede elétrica.
- **Energia PV:** é a porcentagem de energia do sistema que será gerada pelos painéis fotovoltaicos. Sendo PV a sigla utilizada pelo programa para “painel fotovoltaico”.

3.4.3) Valores das Entradas Fornecidas

A seguir são apresentados os valores das entradas utilizadas nas simulações do *software*.

Os valores dos equipamentos foram obtidos por meio de uma pesquisa de mercado [30] [31]. As características técnicas dos equipamentos, como a potência, foram escolhidas de forma a se ter o melhor rendimento para o sistema e o menor custo possível.

Em relação aos módulos fotovoltaicos foram fornecidos os seguintes dados: o valor do equipamento R\$ 719,00, a capacidade de 140 W do painel. A vida útil do equipamento foi obtida do manual técnico, o ângulo de inclinação e azimutal para instalação do painel foram obtidos a partir de estudos apresentados no Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar, assim como o valor para o grau de refletância da vizinhança, que está relacionado com o material presente nas proximidades do local a ser instalado o sistema fotovoltaico. No caso em análise, foi considerado como sendo grama [25]. Os valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Características de instalação.

Vida útil (anos)	30
Ângulo de Inclinação	6,85°
Ângulo Azimutal	0°
Grau de refletância	0,2

Para o conversor e a bateria inseriram-se respectivamente as seguintes entradas: o preço, a capacidade e a quantidade mínima e máxima de cada componente que pode ser avaliado pelo *software* durante a simulação. As informações dos equipamentos são especificadas na Tabela 8.

Tabela 8: Informações dos equipamentos de projeto.

Equipamento	Marca	Especificação	Preço
Painel Fotovoltaico	Kyocera	KD140SX-UFBS- 140W	R\$ 719,00
Conversor	MPPT Tracer	20A (12V/24V)- 260kW	R\$ 599,00
Bateria1	Hoppeck	3000Ah	R\$ 8.000,00
Bateria2	Hoppeck	1000Ah	R\$ 2.600,00

Para a entrada relativa à caracterização da fonte renovável, neste caso a solar, são necessárias informações da latitude (08°08'54), longitude (40°47'44) e irradiação solar diária mostrada na Tabela 9 obtida do atlas solarimétrico do Brasil.

Tabela 9: Radiação solar.

Irradiação Solar (kWh/m ² /dia)	
Janeiro	5,00
Fevereiro	5,22
Março	5,58
Abril	5,08
Maio	5,36
Junho	5,06
Julho	5,50
Agosto	4,83
Setembro	5,00
Outubro	6,33
Novembro	6,11
Dezembro	5,75

Fonte: Atlas Solarimétrico [4].

Na especificação da carga foram empregados como entrada do programa os dados obtidos com a curva de carga já estudada [22]. Os valores respectivos a cada hora do dia são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Dados da curva de carga.

Hora	Carga (kW)
00:00-01:00	0,0500
01:00-02:00	0,0375
02:00-03:00	0,0308
03:00-04:00	0,0308
04:00-05:00	0,0375
05:00-06:00	0,0666
06:00-07:00	0,1125
07:00-08:00	0,1083
08:00-09:00	0,0792
09:00-10:00	0,1000
10:00-11:00	0,1000
11:00-12:00	0,1038
12:00-13:00	0,1125
13:00-14:00	0,0925
14:00-15:00	0,0875
15:00-16:00	0,1500
16:00-17:00	0,1542
17:00-18:00	0,1875
18:00-19:00	0,2125
19:00-20:00	0,1708
20:00-21:00	0,1375
21:00-22:00	0,1375
22:00-23:00	1,1420
23:00-24:00	0,0792

3.3.5) Metodologia empregada pelo software *Homer Energy*

O software *Homer Energy* utiliza como base de cálculo para o dimensionamento do sistema, além de outras premissas, o pico de carga do consumidor. O pico de carga é obtido pelo programa através da curva de carga fornecida como entrada e, além disso, esta pode ser influenciada por duas variáveis utilizadas pelo software. A primeira delas é a escala (*Scaled*), que pode ser alterada caso se queira, por exemplo, aumentar a magnitude da carga, mas não o seu perfil de consumo. A segunda variável se chamada “variável aleatória” (*Random Variability*) que é introduzida para tornar a curva de carga mais realista, já que em um sistema real é comum a ocorrência de ruídos, como por exemplo, das variações na corrente devido a oscilações de tensão. A influência dessas variáveis na carga pode ser exemplificada através dos gráficos da Figura 20. O primeiro gráfico mostra um exemplo de curva de carga. O segundo gráfico mostra a curva de carga original, porém com a utilização de um fator de escala de dois, pelo qual se dobra o consumo. Já o terceiro gráfico exemplifica a curva de carga original quando influenciada por ruídos decorrentes, por exemplo, das oscilações na corrente causada por problemas nos reguladores de tensão.

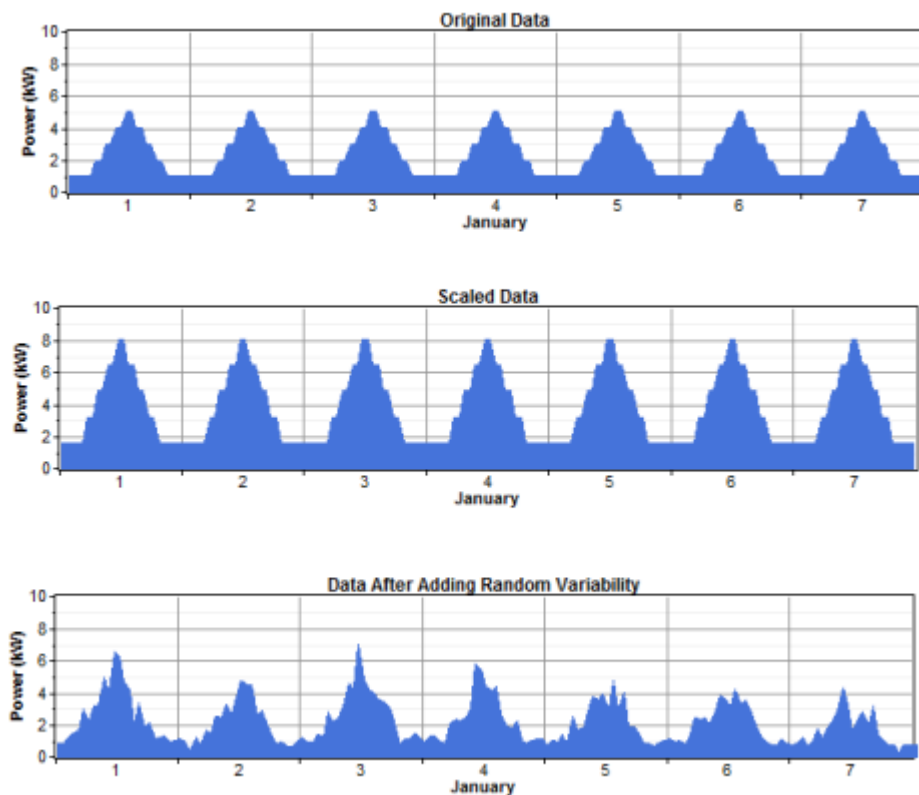


Figura 20: Influência das variáveis de programa na curva de carga [6].

Além disso, o dimensionamento ideal não é obtido baseado no menor número de painéis fotovoltaicos, e sim o melhor custo financeiro. Uma vez que diminuir a quantidade de painéis pode

sobrecarregar as baterias reduzindo seu tempo de vida útil, necessita-se de mais unidades, encarecendo o sistema.

Foram considerados dois cenários de simulação, o primeiro sendo uma residência isolada e no segundo um conjunto de residências com cargas similares. Além disso, foi feita a simulação considerando dois tipos de baterias, uma com grande capacidade e outra com capacidade inferior. As demais entradas utilizadas no *software* já foram descritas anteriormente. Os resultados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

4. Simulações e Análises

Nos tópicos a seguir são apresentados e analisados os resultados referentes ao dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos através das metodologias descritas no capítulo anterior. Os resultados são divididos em duas principais vertentes, sendo elas o gerador fotovoltaico autônomo e o gerador fotovoltaico em paralelo com a rede de distribuição.

4.1) Geração Fotovoltaica Autônoma

Considerando o modelo de geração fotovoltaica autônoma, ou seja, não conectada na rede de distribuição de energia, foram utilizadas duas metodologias diferentes de dimensionamento do sistema, uma baseada em estudos do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [5] e a outra utilizando o *software Homer Energy* previamente descrito [6].

Como dito anteriormente, a principal diferença entre as duas metodologias é que a primeira utiliza como dado predominante a potência total instalada enquanto a segunda se baseia no pico de demanda da curva de carga do consumidor. Ambos os resultados são válidos e a aplicação de um ou outro método está relacionada com as premissas e objetivos do projeto. Uma vez que a primeira metodologia utiliza a potência total instalada este é um sistema com maior grau de segurança no suprimento total da energia necessária na residência, pois considera todo o gasto de energia possível no local. Já a segunda metodologia utiliza como base de dimensionamento o pico de energia consumida para um dia típico, não resultando em sistema sobredimensionado com o primeiro, e conseqüentemente mais barato.

4.1.1) Resultados da metodologia apresentada no Manual de Engenharia

Esta metodologia foi empregada apenas considerando a residência isolada devido à pouca flexibilidade para mudanças das variáveis empregadas.

Para o dimensionamento dos componentes foi considerado um sistema com potência nominal (P_t) de 2,52 kW e tensão (V_n) de 12V. A inclinação (β) para os módulos será de $6,8517^\circ$, a refletância da vizinhança (ρ_g) é 0,2 e ângulo azimutal de superfície (γ) é 0° . A corrente de projeto e o consumo ampère-hora corrigido foram calculados e seus valores são, respectivamente, 54,64 A e 281,88 Ah/dia. Na Tabela 11 são apresentados os valores para as radiações solares e o número de horas de Sol Pleno (SP). Os demais valores correspondentes a variáveis necessárias ao longo do dimensionamento são mostrados na Tabela 12.

Tabela 11: Radiações nos coletores e horas de sol pleno.

Radiação Global no Plano dos Coletores						
Mês	Ho (MJ/m ² / mês)	H Bennett (MJ/m ² /mês)	HD (MJ/m ² /mês)	HB (MJ/m ²)	HT (MJ/m ² /dia)	Sol Pleno (h/dia)
Jan	38,99	18,61	8,15	10,45	18,80	5,22
Fev	37,49	18,28	7,86	10,42	19,12	5,31
Mar	35,43	17,81	7,46	10,34	19,22	5,34
Abr	33,14	17,01	7,00	10,01	18,56	5,15
Mai	31,38	18,18	6,69	11,48	19,62	5,45
Jun	30,56	17,95	6,52	11,42	19,06	5,29
Jul	30,77	18,50	6,57	11,92	19,83	5,50
Ago	32,06	18,59	6,84	11,75	20,33	5,64
Set	34,13	20,37	7,29	13,08	22,35	6,20
Out	36,46	21,34	7,78	13,55	22,72	6,31
Nov	38,37	20,33	8,13	12,20	20,77	5,77
Dez	39,27	18,88	8,22	10,66	18,89	5,24

Tabela 12: Valores necessários ao longo do dimensionamento do sistema.

Mês	Hora pôr do Sol (ω_s)	Hora pôr do Sol aparente (ω'_s)	RB	Período teórico insolação em horas (N)
Jan	93,13	103,43	1,02	12,41
Fev	91,88	98,03	1,08	12,25
Mar	90,34	91,47	1,13	12,04
Abr	88,63	84,21	1,15	11,81
Mai	87,20	78,06	1,12	11,62
Jun	86,50	74,98	1,09	11,53
Jul	86,81	76,37	1,11	11,57
Ago	88,03	81,63	1,14	11,73
Set	89,68	88,65	1,15	11,95
Out	91,38	95,90	1,10	12,18
Nov	92,81	102,02	1,03	12,37
Dez	93,49	104,99	1,00	12,46

A capacidade dos equipamentos escolhidos foi baseada no melhor custo benefício que atendia aos requisitos de projeto.

O painel fotovoltaico escolhido é da marca Kyocera Solar – KD140SX-UFBS, encontrado a R\$ 719,00 a unidade, sendo necessário um arranjo com 8 módulos em paralelo para suprir o consumo na residência, totalizando investimento inicial de R\$ 5.752,00 [12].

A bateria escolhida é do fabricante Hoppeck, com capacidade de 1000 Ah para uma descarga de 20%, indicada pelo fabricante para melhor durabilidade do equipamento, e vida útil de 4 anos. Foram considerados 2 dias de baixa insolação, quando é necessário utilizar a energia

armazenada no banco de baterias. O banco de baterias terá um total de 4 unidades. Cada unidade custa R\$ 2600,00. A vida útil do sistema gerador instalado é de 30 anos, portanto as baterias (4 anos de vida útil) deverão ser trocadas 7 vezes. O valor inicial gasto com baterias será de R\$ 10.400,00. Já o valor total será de R\$ 72.800,00 [30].

O controlador selecionado é da marca Morningstar – Tristar 60A, possui capacidade de 60 A, vida útil de 10 anos e tem um custo de R\$ 870,00 a unidade. São necessários 2 controladores para o sistema. O inversor utilizado é da marca Xantrex Xpower e apenas uma unidade é suficiente para o sistema. Ele também possui 10 anos de vida útil e é encontrado por R\$ 770,00 no mercado nacional. Considerando que a vida útil do sistema gerador será de 30 anos, os controladores e inversores deverão ser trocados 3 vezes. Dessa forma o investimento será de R\$ 5.220,00 para os controladores e R\$ 2.310,00 para o inversor [30].

Leva-se em conta o gasto de R\$ 200,00 para manutenção anual dos equipamentos e um gasto adicional para despesas com a instalação dos módulos, mão de obra e transporte dos componentes. Dessa forma o investimento inicial do projeto tem um custo de R\$ 18.762,00. Considerando todo o ciclo de vida do gerador fotovoltaico para abastecer uma residência de consumo até 100 kWh/mês o investimento será de aproximadamente R\$ 92.082,00. O elevado custo total do projeto se deve principalmente ao elevado preço das baterias.

De acordo com a metodologia de cálculo apresentada no capítulo anterior foi possível estimar o preço da energia, sendo de 4,38 (R\$/kWh).

4.1.2) Resultados do *Homer Energy* - Residência Única

Considerando uma residência isolada, o dimensionamento ideal modelado pelo programa *Homer Energy*, considerando a bateria 2 de menor capacidade (1000Ah) já descrita anteriormente, é composto de 6 painéis fotovoltaicos, 4 baterias e um conversor. Estima-se um custo inicial de R\$ 15.313,00 e o preço da energia em torno de R\$ 1,44. O modelo considerando a bateria de maior capacidade (3000 Ah) resulta em um dimensionamento de 5 painéis fotovoltaicos, 2 baterias e um conversor. O custo inicial e o preço da energia são mais elevados, R\$ 20.194,00 e R\$ 1,92 respectivamente.

Analisando em termos de viabilidade técnica e a depender do local de projeto, o sistema com menor número de baterias poderia ser mais adequado para uma residência isolada mesmo tendo um custo um pouco mais elevado devido ao espaço necessário para instalação. Os resultados para as duas situações e as características da carga são apresentadas nas tabelas 13, 14 e 15. Nas tabelas é apresentado o número de residências, a quantidade de painéis fotovoltaicos (indicado por PV), quantidade de baterias e conversores, o custo inicial, custo total e o preço do quilowatt hora de

energia gerada. O custo inicial de projeto se refere aos equipamentos instalados inicialmente para que o sistema comece a gerar. O custo total de projeto é relativo a todas as trocas de equipamentos necessárias, além disso, o *software* desconta um valor do custo total caso algum equipamento do sistema ainda não esteja totalmente depreciado ao final da vida útil do projeto. Por exemplo, se um inversor ainda possui vida útil de mais 3 anos ao final do término de 30 anos da vida útil do sistema gerador, esses 3 anos que ainda restam de vida útil do inversor são descontados do custo total de projeto.

Tabela 13: Resultado residência isolada - Bateria de menor capacidade.

Nº Residências	kWh/d	PV	Baterias	Conversor	Capital Inicial	Custo total	R\$/kWh
1	2,51	6	4	1	R\$ 15.313,00	R\$ 18.172,00	1,44

Tabela 14: Resultado residência isolada - Bateria maior capacidade.

Nº Residências	kWh/d	PV	Baterias	Conversor	Capital Inicial	Custo total	R\$/kWh
1	2,51	5	2	1	R\$ 20.194,00	R\$ 24.311,00	1,92

Tabela 15: Caracterização da carga.

Média (kWh/d)	2,510
Média (kWh)	0,104
Pico (kW)	0,326

4.1.3) Resultado *Homer Energy* – Conjunto de Residências

Considerando um conjunto de residências e conseqüentemente o aumento da carga, é possível observar com o resultado da simulação que o preço da energia tem uma pequena queda se comparado com o preço para uma única residência. Apesar disso o valor ainda é elevado se comparado ao preço exercido pelas concessionárias de distribuição de energia.

Como no caso anterior foram simuladas duas situações, a primeira com uma bateria de menor capacidade e posteriormente com uma capacidade maior. Novamente o caso com a bateria de menor capacidade é mais barato, no entanto tecnicamente a menor quantidade de baterias facilita a implantação do projeto.

Os resultados obtidos considerando comunidades com 5, 20 e 40 residências são apresentados a seguir. Com os valores obtidos é possível concluir que na grande maioria dos resultados, quanto maior o sistema, mais barato será o custo da energia gerada. A única exceção a esse resultado ocorre para o dimensionamento considerando 40 residências e as baterias de pequeno

porte, devido à grande quantidade de baterias necessárias a energia gerada pelo sistema acaba se tornando mais cara. Os resultados são apresentados nas tabelas 16 e 17, nelas são indicados o número de residências, a quantidade de painéis fotovoltaicos (indicado por PV), quantidade de baterias e conversores, o custo inicial, custo total e o preço do quilowatt hora de energia gerada.

Tabela 16: Resultado conjunto de residências - Bateria de menor capacidade.

N° Residências	kWh/d	PV	Baterias	Conversor	Capital Inicial (R\$)	Custo total (R\$)	R\$/kWh
5	12,5	50	11	1	65.149,00	76.806	1,22
20	50	180	50	1	260.019,00	301,305	1,20
40	100	240	150	1	563.169,00	651.333	1,29

Tabela 17: Resultado conjunto de residências - Bateria de maior capacidade.

N° Residências	kWh/d	PV	Baterias	Conversor	Capital Inicial (R\$)	Custo total (R\$)	R\$/kWh
5	12,5	40	5	1	69.359	78.87	1,25
20	50	200	14	1	256.399	305.737	1,21
40	100	300	40	1	536.299	608.929	1,21

4.1.4) Análise para Áreas Remotas

No Brasil, a maioria das residências sem acesso à energia elétrica está localizada nas regiões Norte e Nordeste, onde também está localizada a maior quantidade de áreas isoladas sem acesso à rede elétrica. Além disso, o local é privilegiado para a implantação de painéis fotovoltaicos devido à alta insolação. Por isso o local selecionado para o projeto continua sendo o mesmo empregado anteriormente sendo relativo à latitude 08°08'54 e altitude de 480, região Nordeste.

A extensão da rede de distribuição tem um elevado custo financeiro e dependendo do local, grande dificuldade de manutenção e instalação. Por isso muitas vezes não é interessante economicamente para a companhia distribuidora de energia elétrica estendê-la até comunidades que ainda não têm acesso, com poucas residências e de baixo consumo e já que o retorno financeiro seria pequeno.

Considerando o grande potencial para produção de energia fotovoltaica na região estudada e não havendo a possibilidade de utilizar a energia fornecida pela rede, o gerador fotovoltaico autônomo seria uma alternativa viável para localidades de difícil acesso e sem conexão com a rede elétrica. Além do fator econômico, a implantação do gerador fotovoltaico ao invés da extensão da

rede evitaria muito impactos ambientais, uma vez que a região em estudo possui grande área natural.

Para ser feita a análise de viabilidade foram utilizados dados de extensão de rede da distribuidora de energia Elektro [32]. A metodologia utilizada para a contabilização do custo do quilômetro de rede é através de “kits”, sendo o kit referente ao preço total para extensão de um quilometro de rede de distribuição. O kit é especificado para cada tipo de rede (nua, compacta, baixa ou alta tensão) e inclui preço dos materiais, equipamentos, mão de obra, custo do projeto e transporte. Neste valor não estão incluídos os custos relativos à manutenção da rede e troca de equipamentos.

Será utilizado o valor relativo à rede compacta de baixa tensão que é a mais adequada às características da residência avaliada. Os preços variam de acordo com a região em que será expandida a rede; o principal fator que influencia na mudança de preço é o valor da mão de obra e a declividade do terreno, que encarece o projeto. Para obter um resultado generalizado será utilizada uma média dos valores de custo de rede das regiões, sendo de R\$ 45.584,00 o quilômetro de rede secundária nua. Os valores para cada região são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Preço do Km rede [32].

Região	Primária (R\$)			Secundária (R\$)	
	Nua	Multipl	Com	Nua	Multipl
Centro	46.531,00	81.698,00	79.014,00	40.794,00	41.812,00
Leste	54.913,00	89.515,00	87.282,00	52.719,00	55.085,00
Oeste	41.856,00	90.370,00	76.152,00	43.514,00	47.801,00
Sul	52.873,00	102.099,00	100.110,00	45.312,00	45.925,00

A análise será feita para a segunda metodologia, utilizando os resultados de dimensionamento do *software Homer Energy*. Os preços dos sistemas anteriormente apresentados são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19: Custo do sistema autônomo de geração solar fotovoltaica.

Número de Residências	Custo Total do Sistema
1	R\$ 24.311,00
5	R\$ 78.870,00
20	R\$ 305.737,00
40	R\$ 608.929,00

O tempo de vida útil considerado para o sistema fotovoltaico é de 30 anos. Este período é também semelhante ao tempo de depreciação total do quilometro de rede.

Além dos custos referentes à rede elétrica deve ser considerado o valor da fatura mensal de energia elétrica. O preço da energia utilizado é de R\$ 0,32/kWh, tarifa aplicada para residências com consumo inferior a 100 kWh/mês, praticada pela concessionária distribuidora de energia elétrica Cepisa que abastece o estado do Piauí (região estabelecida para projeto), de acordo com dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [33].

É calculado o gasto com energia para um período de 30 anos, mesmo tempo de vida útil do sistema fotovoltaico, e não são considerados os possíveis ajustes no preço do quilowatt hora ao longo dos anos. Sendo o consumo da residência em torno de 2,52 kWh/dia, valor baseado na curva de carga da classe estudada em projeto, o gasto com a energia elétrica para 30 anos será de aproximadamente R\$ 8.709,00.

Foi avaliado o valor dos sistemas fotovoltaicos, o custo de extensão do quilômetro de rede e o valor da fatura de energia. Considerando apenas uma residência isolada, o custo total do sistema seria de R\$24.311,00 como mostrado na Tabela 19. Sabendo que o custo médio para a extensão de um quilômetro de rede é de R\$ 45.584,00, pode-se concluir que para atender a apenas uma residência isolada o sistema fotovoltaico é economicamente viável independente da distância de isolamento, ou seja, se for necessário estender a rede para suprir o consumo de apenas um consumidor da classe de consumo inferior a 100 kWh o sistema fotovoltaico é financeiramente a melhor opção.

Para um conjunto de residências, a distância a partir da qual o sistema fotovoltaico se mostra economicamente viável é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20: Distância de viabilidade.

Número de Residências	Distância de viabilidade (Km)
5	1,46
20	5,64
40	11,23

A análise foi realizada tendo-se como base os dados de insolação relativos à latitude de 08°08'54 e uma altitude de 480m. A metodologia empregada é válida para ser utilizada independente do local. No entanto os resultados obtidos podem sofrer variações se considerada uma região com diferentes características, como latitude e insolação.

4.1.5) Análise dos Resultados

Considerando o sistema autônomo fotovoltaico para uma única residência de baixo consumo ou para um conjunto de residências, o preço da energia gerada é alto independente da metodologia avaliada anteriormente, especialmente se comparado ao preço exercido pela companhia de distribuição de energia da região considerada em projeto, em torno de R\$ 0,32/kWh [33]. Além disso, o capital inicial e o custo total do sistema são elevados. Sendo uma residência de baixo consumo, é provável que em muitos casos a família não tenha condições financeiras para tal investimento. Logo, projetos deste tipo deverão ser viabilizados com subsídios governamentais ou financiamentos, por exemplo.

A situação que torna a aplicação da geração fotovoltaica autônoma economicamente viável são as áreas remotas sem acesso a rede de distribuição. Para esses casos a energia fotovoltaica é uma excelente alternativa uma vez que além da vantagem financeira, ela poderá evitar grandes impactos ambientais provocados pela extensão da rede de distribuição. Além disso, a geração distribuída é benéfica também para o planejamento técnico uma vez que em muitas localidades, por exemplo, aquelas isoladas por rios e lagos, são de extrema dificuldade se projetar e executar as obras de rede de distribuição.

4.2 Geração Fotovoltaica Conectada na Rede de Distribuição

Como já mencionado, no Brasil a geração fotovoltaica conectada a rede funcionará através do sistema de compensação de créditos de energia elétrica. A energia não suprida pela geração distribuída será proveniente da rede de distribuição elétrica, e caso seja gerado uma quantidade maior de energia do que a necessária ao consumidor, este ficará com um crédito para o próximo mês. Este crédito é válido para a utilização dentro de um período de 36 meses.

Nas análises a seguir foi utilizada a metodologia de dimensionamento através do software *Homer Energy*, o valor de tarifa de energia da concessionária Cepisa (por sua área de concessão ter sido o local utilizado no projeto), porém não são considerados os possíveis aumentos tarifários ao longo dos anos e taxas de juros ao longo do tempo.

4.2.1) Cenário 1 – Classe de consumo inferior a 100 kWh

Considerando a classe residencial com consumo inferior a 100 kWh/mês, o consumo da residência de acordo com a curva de carga estudada é de aproximadamente 2,52kWh/dia, resultando em aproximadamente 75,6 kWh/mês. O melhor dimensionamento para o sistema, conforme a

metodologia empregada utilizando o *software Homer Energy* e desconsiderando as baterias que não serão necessárias para este cenário, resulta em 4 painéis fotovoltaicos (Kyocera com potência de 0,14 kW como já havia sido mencionado) e um conversor. As baterias não são necessárias nesse caso, uma vez que o sistema estará conectado na rede e esta fará o papel de armazenador/abastecedor do sistema.

Para esse sistema fotovoltaico a geração seria de 1083 kWh no ano. O preço inicial do sistema seria de R\$ 4.673,00, considerando os preços de equipamentos anteriormente definidos para o projeto. Considerando que o consumo anual da residência é de 916 kWh no ano, haveria um excesso de energia produzida de 167 kWh. Esses valores foram obtidos através do *software Homer Energy*.

Sem a implantação do sistema de geração distribuída, a residência em questão gastaria por ano um total de aproximadamente R\$ 432,00 com a fatura de energia, considerando seu consumo mensal por volta de 75 kWh e os impostos PIS e COFINS (a classe de consumo menor que 100 kWh é isenta do ICMS). O cálculo do valor mensal é mostrado na Tabela 21.

Tabela 21: Resultado para a classe de consumo inferior a 100 kWh.

kWh/dia	kWh/Mês	Fatura de Energia Elétrica (R\$)	kWh mínimo de disp.	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
2,52	75,6	24,19	30	9,6	Isento	9,25	36	432

A Tabela 21 mostra os valores considerando a implantação da geração distribuída, o gasto anual com a fatura de energia elétrica da residência, o valor é de R\$ 142,00, sendo que nesse caso o sistema fotovoltaico gera toda a energia consumida. Este valor é devido ao imposto cobrado em cima do total de energia consumida na residência (75 kWh/mês) independente de ter sido gerada pelo sistema distribuído ou não. E o custo de disponibilidade do sistema, que deve continuar sendo pago a distribuidora independente do consumo ou não da energia distribuída pela rede. Para a classe em questão (consumo inferior a 100 kWh, monofásica) o custo da disponibilidade é relativo ao preço de 30 kWh. O valor mensal da fatura de energia elétrica é mostrado na Tabela 22.

Tabela 22: Resultado classe de consumo inferior a 100 kWh - Com geração distribuída.

Mês (kWh)	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	R\$ Imposto	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
75,6	9,6	Isento	9,25	2,22	12	142

Sendo assim, com a implantação da geração distribuída o consumidor economiza R\$ 290,00 ao ano. Considerando o preço inicial do sistema, este levaria 17 anos para ser pago em relação à economia com a conta de energia, não sendo consideradas taxas de juros ao longo tempo e os possíveis reajustes tarifários de energia. Sabendo que o sistema tem uma vida útil de 30 anos, o consumidor ao final da vida útil teria um lucro de aproximadamente R\$3.770,00. No entanto se for considerado que o conversor deverá ser trocado 3 vezes , já que sua vida útil é de 10 anos, e o preço da unidade de R\$ 599,00, o rendimento seria de R\$ 1.973,00.

O sistema dimensionado tem um excesso de geração de 167 kWh/ano considerando o gasto do consumidor conforme a curva de carga utilizada. Este excesso de energia equivale a R\$ 54,00 ao ano e a R\$ 1.600,00 para toda a vida útil do sistema. Até o momento não é permitida a venda do excesso de energia gerada, assim a possibilidade do consumidor seria poder aumentar seu consumo de energia sem acréscimo na fatura ou utilizar os créditos de energia em outra residência que esteja também em seu nome.

4.2.2) Cenário 2 – Classe de consumo de 100 a 200 kWh

Para a classe residencial com consumo entre 100kWh e 200kWh a metodologia utilizada para o dimensionamento foi a mesma, com o auxílio do programa *Homer Energy*. A curva de carga relativa a essa classe foi obtida com a mesma metodologia estudada para a classe anterior e já mencionada anteriormente. Os valores são apresentados no gráfico da Figura 22 e na Tabela 23. O consumo médio diário é de 4,7 kWh/dia, sendo assim aproximadamente 140 kWh por mês.

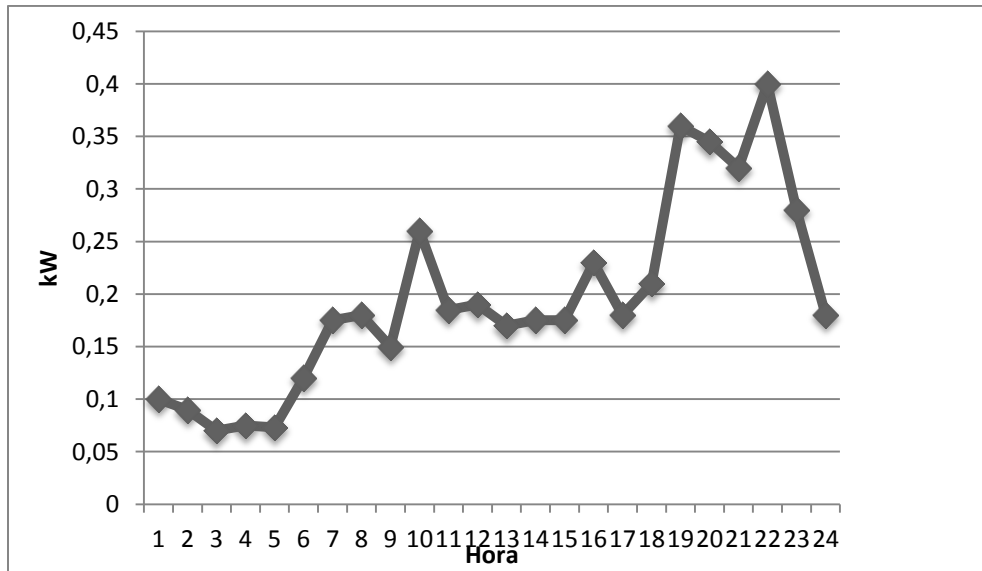


Figura 21: Curva de carga para consumo entre 100 e 200 kWh [22].

Tabela 23: Valores da curva de carga para consumo entre 100 e 200 kWh.

Hora	kW
1	0,1
2	0,09
3	0,07
4	0,075
5	0,073
6	0,12
7	0,175
8	0,18
9	0,15
10	0,26
11	0,185
12	0,19
13	0,17
14	0,175
15	0,175
16	0,23
17	0,18
18	0,21
19	0,36
20	0,34
21	0,32
22	0,4
23	0,28
24	0,18

O sistema fotovoltaico dimensionado no *software Homer Energy* para suprir tal carga deverá ser composto por 7 painéis (Kyocera 0,14 kW) e 1 conversor, sendo a produção total de 1.896 kWh no ano, dados estes fornecidos pelo programa.

O consumo anual da casa é de 1,705 kWh, segundo a curva de carga utilizada para esta classe de consumo. Havendo assim o excesso de 191 kWh ao ano de energia gerada. O custo inicial do sistema é de R\$ 5.632,00, considerando os preços de equipamentos anteriormente definidos para o projeto.

A mesma análise da fatura de energia elétrica foi feita para esse caso e o resultado é mostrado na Tabela 24 a seguir, sendo que o custo anual com a fatura seria de aproximadamente R\$ 848,00.

Tabela 24: Resultado para classe de consumo entre 100 e 200 kWh.

kWh/dia	kWh/Mês	Fatura de Energia (R\$)	kWh mín. de disp.	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
4,7	141	45,12	50	16	12	9,25	71	848

O valor da fatura de energia considerando o sistema de geração distribuída é apresentado na Tabela 25. Para a classe de consumo entre 100 e 200 kWh é obrigatório o pagamento do ICMS e o pagamento da disponibilidade do sistema é um pouco maior. Sendo assim o custo anual com a fatura de energia considerando o sistema fotovoltaico seria de R\$ 307,05.

Tabela 25: Resultado para classe de consumo entre 100 e 200 kWh - Com geração distribuída.

kWh/dia	Mês (kWh)	kWh mínimo de disp.	Disponibilidade de (R\$)	ICMS (%)	PIS CONFINS (%)	Imposto (R\$)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
4,7	141	50	16	12	9,25	9,58	25	307

A economia com a implantação dos painéis fotovoltaicos é de R\$ 541,00 ao ano na fatura de energia. Considerando o custo do sistema, este demora aproximadamente 11 anos para ter o valor recuperado, sendo que o lucro ao final da vida útil seria de R\$10.279,00 e o sistema teria um excedente de 191 kWh no ano. No entanto se for considerado que o conversor deverá ser trocado 3 vezes, já que sua vida útil é de 10 anos, e o preço da unidade de R\$ 599,00, o sistema teria lucro de R\$ 8482,00.

4.2.3) Cenário 3 – Classe de Consumo entre 200 e 300 kWh

A curva de carga referente a essa classe é apresentada na Figura 23 e Tabela 26. O consumo diário mensal médio é de aproximadamente 8,12 kWh/dia.

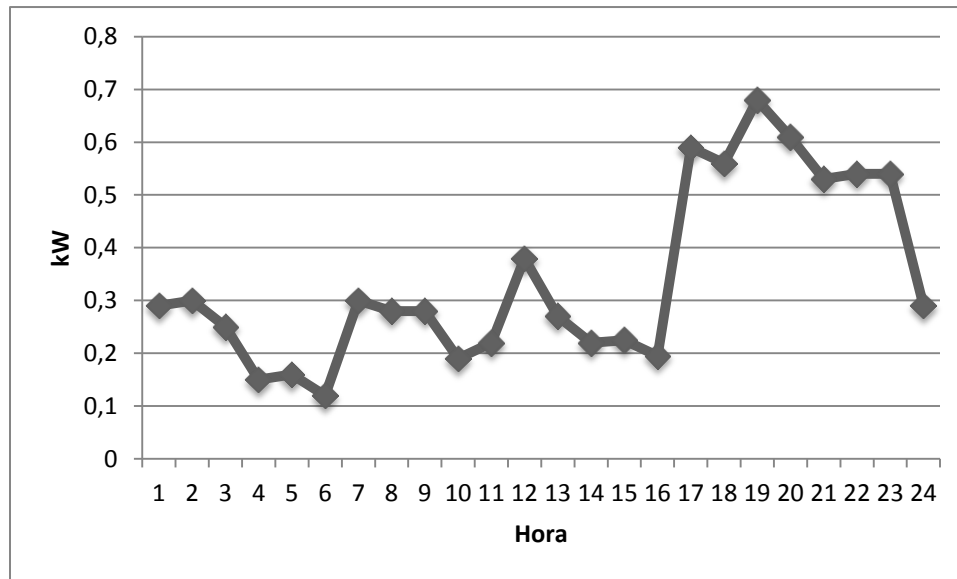


Figura 22: Curva de carga classe de consumo entre 200 e 300 kWh [22].

Tabela 26: Curva de carga para a classe de consumo entre 200 e 300 kWh.

Hora	kW
1	0,29
2	0,3
3	0,25
4	0,15
5	0,16
6	0,12
7	0,3
8	0,28
9	0,28
10	0,19
11	0,22
12	0,38
13	0,27
14	0,22
15	0,225
16	0,195
17	0,59
18	0,56
19	0,68
20	0,61
21	0,53
22	0,54
23	0,54
24	0,29

O dimensionamento do sistema resultou em 11 painéis fotovoltaicos e 1 conversor, sendo que a geração total de energia é de 2,979 kWh/ano e o consumo total da residência de 2964 kWh/ano, dados conforme o *software Homer Energy* e a curva de carga característica da classe em questão. O preço do sistema é de R\$ 8.508,00, considerando os equipamentos já detalhados anteriormente.

A fatura de energia elétrica relativa a essa classe residencial seria um total de R\$ 1.632,00 no ano conforme é mostrado na tabela 26. O consumo da classe é por volta de 243 kWh/mês, a disponibilidade desta classe de consumo é relativa a 100 kWh, o valor do ICMS é maior, sendo de 25%. As demais informações podem ser vista na Tabela 27.

Tabela 27: Resultado classe de consumo entre 200 e 300 kWh

Kwh/dia	Mês kWh	Fatura de Energia Elétrica (R\$)	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
8,12	243	77,95	32	25	9,25	136	1632

Considerando o sistema de geração distribuída esse o valor anual da fatura seria de R\$ 704,00. A Tabela 28 mostra os valores relativos à disponibilidade e impostos relativos à classe de consumo para que se possa obter o valor da fatura.

Tabela 28: Resultado classe de consumo entre 200 e 300 kWh - Com geração distribuída

kWh/dia	Mês (kWh)	kWh mínimo de disp.	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	Imposto (R\$)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
8,12	243,6	100	32	25	9,25	26,69	58,6	704

A redução anual no gasto com energia seria de R\$ 928,00, sendo que o sistema demoraria aproximadamente 10 anos para ter seu investimento recuperado. Além disso, resultaria em um lucro de R\$ 18.560,00 ao fim do período de vida útil do sistema (30 anos).

Considerando que o conversor deverá ser trocado 3 vezes, já que sua vida útil é de 10 anos, e o preço da unidade de R\$ 599,00, o sistema na verdade teria um rendimento de R\$16.763,00.

4.2.4) Cenário Classe de Consumo Superior a 500kWh

A curva de carga relativa à classe de consumo superior a 500kWh mês é apresentada na Figura 24 e na Tabela 29. O consumo médio diário é 46,2 kWh/dia.

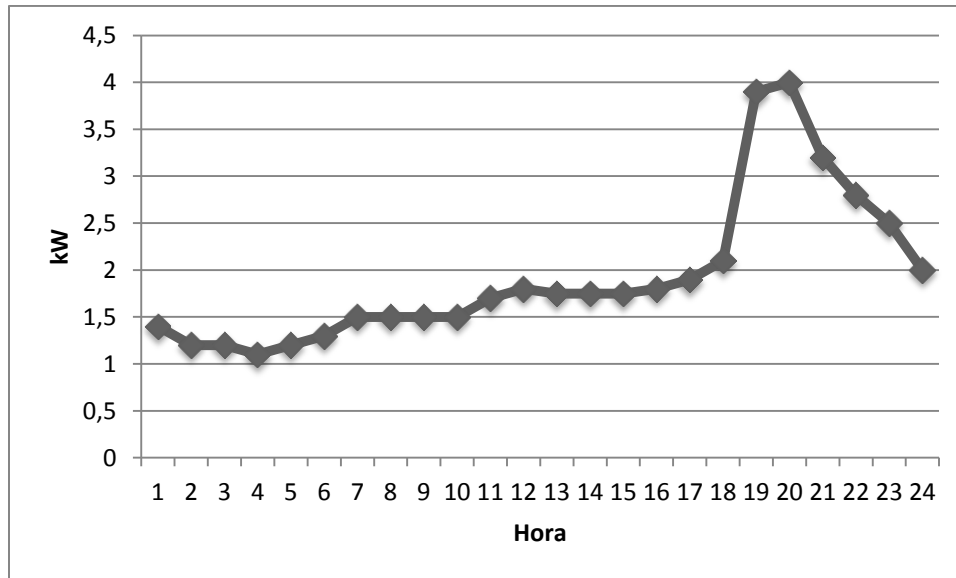


Figura 23: Curva de carga classe de consumo superior a 500 kWh [22].

Tabela 29: Valores da curva de carga para classe de consumo superior a 500 kWh.

Hora	kW
1	1,4
2	1,2
3	1,2
4	1,1
5	1,2
6	1,3
7	1,5
8	1,5
9	1,5
10	1,5
11	1,7
12	1,8
13	1,75
14	1,75
15	1,75
16	1,8
17	1,9
18	2,1
19	3,9
20	4
21	3,2
22	2,8
23	2,5
24	2

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi utilizado um painel com maior capacidade, atualmente a maior oferecida em mercado, 250 W. O sistema deve ser composto de 54 painéis e 3 conversores, segundo resultado do *software Homer Energy*. Sendo o custo do gerador de R\$55.203,00.

O gasto com o pagamento da fatura de energia anualmente para uma residência nessa classe é de R\$ 7.475,00 conforme mostrado na tabela 30. A disponibilidade é relativa a 100kWh, as demais informações são mostradas na Tabela 30.

Tabela 30: Resultado classe de consumo superior a 500 kWh.

Kwh/dia	Mês kWh	Fatura de Energia Elétrica (R\$)	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
46	1380	441,6	32	25	9,25	622	7475

O custo da fatura considerando o sistema de painéis fotovoltaicos seria de R\$ 2198,00. Na Tabela 31 são apresentados os valores referentes à disponibilidade e impostos para se obter o valor total da fatura. A diferença entre os valores das faturas seria de aproximadamente R\$ 5.277,00 no ano. Sendo assim o sistema se pagaria em 11 anos e geraria uma economia com os gastos em energia de R\$100.263,00 em 30 anos (tempo de vida útil do sistema).

Considerando a troca dos conversores, 3 vezes, já que sua vida útil é de 10 anos, e o preço da unidade de R\$ 599,00, o sistema na verdade teria um rendimento de R\$94872,00.

Tabela 31: Resultado classe de consumo superior a 500 kWh - Com geração distribuída.

Kwh /dia	Mês (kWh)	kWh mínimo de disp.	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	Imposto (R\$)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
46	1380	100	32	25	9,25	151,24	183	2198

4.2.5) Análise dos Resultados

Com os resultados obtidos anteriormente é possível concluir que o sistema de geração distribuída avaliado dentro do mecanismo de compensação de crédito será economicamente benéfico para todas as classes consumidoras analisadas.

É possível notar que quanto maior consumo de energia, maior será o benefício da implantação do sistema, mais rápido o capital investido será recuperado e maior será a economia com energia no período de vida útil do sistema.

É importante ressaltar que os valores de impostos ainda são elevados por serem calculados sobre o montante total de energia consumida, e não apenas aquela que poderia ser consumida da rede de distribuição elétrica. No entanto é esperado que à medida que a instalação da geração distribuída comece a ser mais fortemente incentivada, as tributações devem diminuir, assim como já ocorre no estado de Minas Gerais.

4.3 Considerações Finais sobre o Capítulo

Neste tópico é apresentado um resumo dos principais resultados discutidos no capítulo.

Para o sistema fotovoltaico isolado considerando apenas uma residência foram obtidos resultados provenientes de duas metodologias, Manual de Engenharia e o *software Homer Energy*. Para o *software* foram testados dois cenários, o primeiro considerando uma bateria de menor capacidade (cenário 2) e o segundo de maior capacidade (cenário 3). Os três resultados obtidos para a residência isolada são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32: Cenários para residência única isolada.

Cenário	Número de Residências	Metodologia	Custo Inicial	R\$/kWh
1	1	Manual de Engenharia	R\$ 17.992,00	R\$ 4,38
2	1	<i>Homer Energy</i>	R\$ 15.313,00	R\$ 1,44
3	1	<i>Homer Energy</i>	R\$ 20.194,00	R\$ 1,92

Para o sistema fotovoltaico isolado aplicado a uma comunidade de residências de baixo consumo foi utilizado apenas o *software Homer Energy* para o dimensionamento. Os cenários analisados são para uma comunidade de 5, 20 ou 40 residências. O dimensionamento foi feito considerando dois tipos de bateria, sendo de capacidade 1000Ah e 3000Ah. As tabelas 33 e 34 mostram os resultados.

Tabela 33: Comunidade isolada - Bateria 1000Ah.

Nº Residências	Capital Inicial	R\$/kWh
5	R\$ 65.149,00	1,22
20	R\$ 260.019,00	1,20
40	R\$ 563.169,00	1,29

Tabela 34: Comunidade isolada - Bateria 3000 Ah.

Nº Residências	Capital Inicial	R\$/kWh
5	R\$ 69.359,00	1,252
20	R\$ 256.399,00	1,218
40	R\$ 536.299,00	1,213

Para o sistema fotovoltaico conectado a rede de distribuição considerando o sistema de compensação de créditos de energia para mini e micro geração os resultados obtidos são apresentados na Tabela 35 a seguir. Onde são mostradas as classes de consumo avaliadas, o custo inicial dos sistemas e a econômica com a fatura de energia.

Tabela 35: Sistema conectado - Resultado por classe.

Classe de Consumo kWh/mês	Preço Inicial do Sistema (R\$)	Recuperação do Inv. Inicial (anos)
< 100	R\$ 4.673,00	17
100 a 200	R\$ 5.632,00	11
200 a 300	R\$ 8.508,00	10
>500	R\$ 55.203,00	11

5. Conclusão

Por meio dos resultados obtidos no dimensionamento do gerador fotovoltaico e principalmente com as simulações no programa *Homer Energy* foi feita análise e estudo de caso de diferentes configurações do sistema gerador.

Levando em consideração os fatores técnicos e econômicos é possível concluir que a implantação do gerador fotovoltaico autônomo em uma comunidade isolada de baixo consumo sem acesso à rede elétrica pode ser viável economicamente em relação à extensão da rede elétrica, a depender da distância que esta seria estendida. Além disso, possui vantagens, como facilidade de manutenção e menores impactos ambientais, produzindo energia suficiente para atender a necessidade básica da área e melhorando a qualidade de vida da população.

O sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição e funcionando de acordo com a metodologia de compensação de créditos se mostrou economicamente viável para todas as classes consumidoras ao longo da sua vida útil. A grande questão que ainda deve ser explorada seriam formas de financiamento facilitado do sistema, uma vez que o grande empecilho econômico para o sistema fotovoltaico seria o grande custo inicial de projeto.

O sistema híbrido composto pelos módulos fotovoltaicos e a rede elétrica é importante quando o objetivo é a diversificação da matriz energética, pois pouparia a energia elétrica proveniente das usinas hidro e termelétricas.

É evidente a existência de grandes barreiras para a difusão da geração distribuída no Brasil, sendo as principais a falta de políticas de incentivo, a falta de preparação técnica das distribuidoras e também da falta de informação da população sobre o assunto. Especialmente nesse momento do setor energético em que o País está vivenciando a fragilidade de se ter uma matriz energética concentrada em apenas uma fonte (hidráulica), e por causa disso exposto a preços elevados de energia gerados pelas termelétricas, é de extrema importância o estudo relacionado à geração distribuída.

Pode-se concluir que a energia fotovoltaica já é economicamente e tecnicamente viável em diversos cenários apesar do tempo de retorno do investimento ser elevado. As barreiras à geração distribuída estão sendo lentamente vencidas e principalmente as evidências da necessidade de diversificação da matriz energética são claras. Apesar do quilowatt hora da energia fotovoltaica ser mais caro que a tarifa convencional, esse preço deve ser analisado de acordo com o cenário em que está inserido.

Por fim é importante ressaltar que a energia fotovoltaica não deve ser analisada apenas em torno de fatores financeiros, mas principalmente como sendo uma alternativa para produção de

energia no local de consumo, uma diversificação na matriz energética e uma fonte renovável e inesgotável, podendo dessa forma solucionar inúmeros problemas relativos à questão energética.

Como sugestão para trabalhos futuros seria interessante o estudo da inserção de veículos elétricos nas cidades, analisando seu impacto econômico e estrutural.

6. Referências Bibliográficas

- [1] GOLDEMBERG, J. 2008. Energia, meio ambiente e Desenvolvimento. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008. 396 p.
- [2] HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. Energia e Meio Ambiente. 3 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 543 p.
- [3] TIBA, C. et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111p.: Il., tab., mapas.
- [4] Banco de Informações de Geração Aneel; Disponível em www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/; Consulta realizada em: Junho 2014.
- [5] CRESESB – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB. 1999.
- [6] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Getting Started Guide for Homer Version 2.1. 2005 Disponível em: <http://www.homerenergy.com/>. Acesso em Janeiro, 2014.
- [7] Resolução Normativa nº 482/2012, Brasília, Brasil, 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica; Disponível em www.aneel.gov. Acesso em Maio, 2014.
- [8] Resolução Normativa nº 483/2012, Brasília, Brasil, 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica; Disponível em www.aneel.gov. Acesso em Maio, 2014.
- [9] ATKINS,P.W. Físico-química fundamentos. 3 ed. São Paulo: Ltc Editora.
- [10] EPE; Empresa de pesquisa energética; Análise da Inserção da Geração Fotovoltaica na Matriz Brasileira; Rio de Janeiro,2012.
- [11] SEDRA, A. Microeletrônica. 4 ed. São Paulo: Editora Pearson Makron Books, 2000.
- [12] Imagens Solar; Disponível em www.WikiEnergia.com, Acesso em Maio, 2014.
- [13] Kyocera Painéis Fotovoltaicos; Disponível em www.kyocera.com.br, Acesso em Maio, 2014.
- [14] MB Solar; Disponível em www.mbsolar.net, Acesso em Maio, 2014.
- [15] Delta Energy; Disponível em www.deltaenergy.com.br, Acesso em Maio, 2014.
- [16] ADIRSE, ecologia solar; Disponível em www.infoescola.com.br, Acesso em Maio, 2014.
- [17] Agência Internacional de Energia; IEA; 2011; Disponível em: www.iea.org, Acesso em Maio, 2014.
- [18] EPIA - *Global Market Outlook for Photovoltaic*; Disponível em www.epia.org, Acesso em Maio, 2014.
- [19] Consulta Publica Aneel 15/2010; Disponível em www.aneel.gov.br, Acesso em Maio, 2014.

- [20] Audiência Pública 042/2011; Disponível em www.aneel.gov.br, Acesso em Maio, 2014.
- [21] Cartilha Temática Micro e Minigeração Distribuída; Agência Nacional de Energia Elétrica; Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em Maio, 2014.
- [22] FRANCISQUINI, A. A. Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição. 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” /Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira.
- [23] JARDINI, J. A.; TAHAN, C. M. V.; AHN, S. U.; CABRAL, S. L. S. Determination of the Typical Daily Load Curve for Residential Area Based on Field Measurements. *Inn IEEE Proceedings Supplements, T&D*, Chicago,1994.
- [24] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal processes. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [25] ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. Departamento Nacional de Aquecimento Solar. Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar. Abril de 2008, 138 p.
- [26] PEREIRA, J. C. Avaliação do potencial energético solar da região autônoma da Madeira. Agência Regional de Energia e Ambiente da Região Autônoma da Madeira (AREAM), relatório final, Agosto de 2005.
- [27] BENNETT, I. Monthly Maps of Mean Daily Insolation for United States. *Solar Energy*, v. 9, p. 145-158, 1965.
- [28] COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, v. 22 (2), p.155-164, 1979.
- [29] LISITA JÚNIOR, O. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso de 3 kWp instalado no estacionamento do IEE-USP. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia/Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração /Instituto de Física da Universidade de São Paulo – USP, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [30] Minha Casa Solar. Disponível em <www.minhacasasolar.com.br>. Acesso em: Maio, 2014.
- [31] Solar Brasil. Disponível em <www.solarbrasil.com.br>. Acesso em: Maio, 2014.
- [32] Relatório PSR Consultoria Elektro; 2014; Disponível em www.elektro.com.br.
- [33] Agencia Nacional de Energia Elétrica; Disponível em www.aneel.gov.br.
- [34] Centro Brasileiro de Energia Eólica, Disponível em www.portalabeeolica.org.br; Acesso em Abril,2014.
- [35] Marcelo Garcia Ilustrações; Disponível em www.casasabril.com.br; Acesso em Maio 2014.

- [36] Energia Pura; Disponível em www.energiapura.com; Acesso em Maio 2014.
- [37] RETscreen International Group; Disponível em www.etscreen.net/pt/home; Acesso em Maio, 2014.
- [38] NeoSolar Energia; Disponível em www.neosolarenergia.com.br; Acesso em Maio,2014.

7. Apêndice

Além da geração através dos painéis fotovoltaicos foi também analisada a geração a partir de turbinas eólicas instaladas em residências. O resultado não foi economicamente viável comparativamente à geração solar fotovoltaica. Assim, optou-se por focar trabalho na geração fotovoltaica. Dessa forma, as análises referentes à geração eólica são apresentadas neste apêndice.

A utilização de turbinas eólicas para geração de energia se tornou uma opção considerável a partir de 1970 com a crise do petróleo. O primeiro país a implantar o sistema foi a Dinamarca.

No Brasil as turbinas eólicas são responsáveis por 2,4% da matriz energética total [4]. O que é uma participação pequena tendo em vista do potencial de geração do País já que o Brasil possui valores consideráveis de velocidade do vento para geração de energia eólica, as regiões com maior potencial podem ser vistas na Figura 25 que mostra a média de velocidade do vento para as diversas regiões do Brasil.

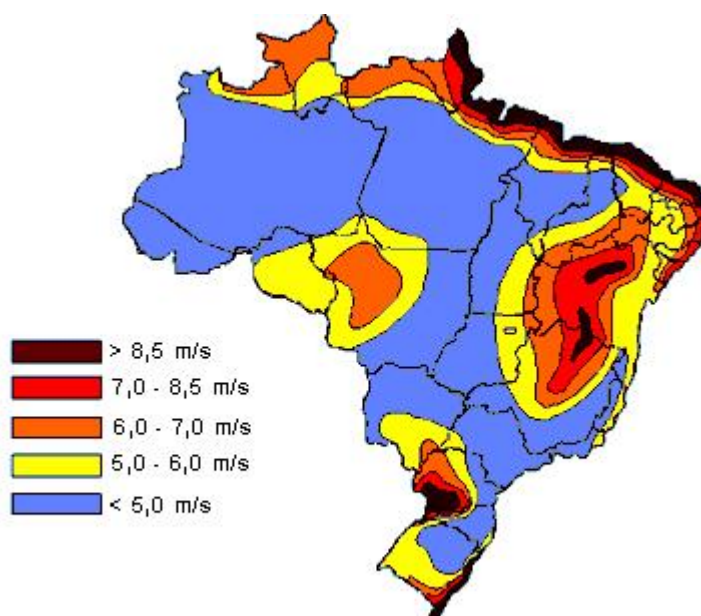


Figura 24: Velocidade do vento no Brasil [34].

Os principais componentes de um sistema fotovoltaico são a turbina eólica formada pelas pás e o rotor, o conversor a depender do tipo de turbina e as baterias caso o sistema não seja conectado a rede de distribuição.

Uma ilustração do sistema eólico para uma residência conectada a rede de distribuição é mostrado na Figura 26 a seguir. Sendo:

- 1) As pás.

- 2) O rotor.
- 3) As baterias, se necessário.
- 4) A rede de distribuição de energia elétrica.
- 5) O medidor bi lateral, ou seja, ele mede a energia injetada e retirada da rede de distribuição.



Figura 25: Esquema gerador eólico [35].

Para o dimensionamento do sistema eólico isolado foi utilizado o *software Homer Energy* já descrito no início do trabalho. E a classe de consumo utilizada é de até 100 kWh/Mês assim como foi realizado para o sistema fotovoltaico.

A turbina eólica utilizada é da marca Skystream Land, sua escolha foi baseada por sua capacidade de geração ser compatível com a necessidade do projeto. Sua potência é de 2,4 kW e seu preço foi obtido através de pesquisa de mercado e é encontrado por volta de R\$30.000,00 [36]. A bateria utilizada foi Surrete 4KS25P, com capacidade de 1900 Ah. E o conversor MPPT Tracer, com preço de R\$ 599,00.

O local escolhido para projeto será o mesmo aplicado durante o trabalho para o sistema fotovoltaico. Sendo a região Nordeste, referente à latitude de 08°08'54 e altitude de 480 metros, mais especificamente a cidade Betânia do Piauí.

A média de velocidade do vento para a região foi obtida a partir do *software* RETscreen. Este *software* desenvolvido no Canada faz análises de fontes de energia limpa e possui um grande banco de dados relativos às fontes renováveis [37]. Os valores médios da velocidade do vento mensal para a região obtido com o programa RETscreen é mostrado na Tabela 36.

Tabela 36: Velocidade do vento.

Mês	Velocidade do Vento (m/s)
Jan	4,00
Feb	4,10
Mar	4,00
Apr	4,50
May	5,00
Jun	5,70
Jul	5,90
Aug	6,20
Sep	6,00
Oct	5,40
Nov	4,00
Dec	4,00

O resultado para a geração autônoma para uma residência obtido através do *Homer Energy* é apresentado na Tabela 37 a seguir. Como pode ser visto o preço inicial do projeto é consideravelmente elevado (aproximadamente o dobro se comparado ao mesmo cenário considerando o sistema fotovoltaico), assim como o custo na energia de R\$ 4,27.

Tabela 37: Dimensionamento sistema eólico residência isolada.

Número de Turbinas	Baterias	Conversor (kW)	Capital Inicial (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo da Energia (R\$/kWh)	Fração renovável (%)
1	3	1	31.975,00	53.871,00	4,27	100

Considerando uma comunidade isolada com 40 residências com o mesmo perfil de consumo, sendo este a classe inferior a 100kWh/mês e os mesmos equipamentos já descritos acima. O dimensionamento do sistema seria de 22 turbinas eólicas, 270 baterias e 18 conversores. Apesar do elevado custo inicial de projeto R\$ 807.000,00, o preço do quilowatt hora é menor do que considerando apenas uma residência, sendo de R\$ 2,70, isso mostra que o sistema é melhor utilizado quando aplicado para uma carga maior. Os valores de dimensionamento são mostrados na Tabela 38.

Tabela 38: Dimensionamento sistema eólico conjunto de residências.

Número de Turbinas	Baterias	Conversor (kW)	Capital Inicial (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo da Energia (R\$/kWh)	Fração renovável (%)
22	270	18	807.000,00	1.356.374	2,70	100

Para o dimensionamento do sistema eólico como mini ou micro geração conectado a rede de distribuição foram utilizadas características técnicas disponíveis nos manuais dos equipamentos. O *software Homer Energy* não foi utilizado neste caso por não conter este tipo de turbina na sua base de cálculo e por não haver no manual destas as informações necessárias para cadastrá-las no programa.

Sendo assim a turbina utilizada foi a Air Breeze, com potencial nominal de 160W. Seu preço no mercado é de R\$ 3800,00 [38]. Sua capacidade de geração em relação à velocidade do vento é mostrada na Figura 27 a seguir.

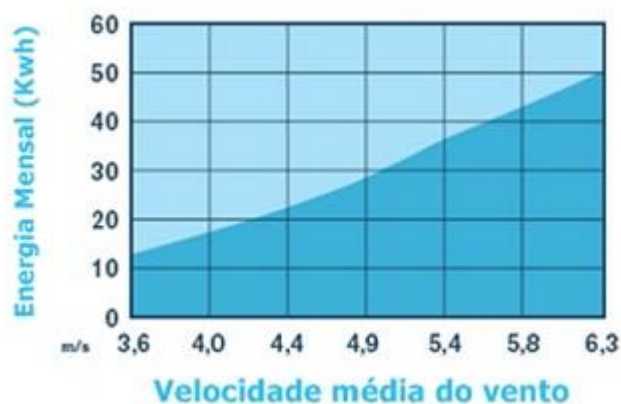


Figura 26: Característica turbina eólica [38]

Sabendo que a menor velocidade do vento para a região segundo a Tabela 35, é de 4,0m/s, essa será a velocidade utilizada para o dimensionamento do sistema, para garantir que mesmo nos meses com menor velocidade a energia seja suprida. Será considerando a classe de menor consumo, inferior a 100 kWh/mês, e também a curva de carga referente a esta classe que já foi apresentada no trabalho. Segundo a curva de carga o consumo mensal desta classe é de 75 kWh. Sendo assim de acordo com o gráfico mostrado na figura acima, seriam necessárias 4 turbinas para suprir o consumo da residência se considerado a velocidade de 4 m/s do vento. Seria necessário um conversor, sendo o mesmo utilizado no restante do trabalho, com preço de R\$ 599,00. O custo inicial do sistema seria de R\$ 15.800,00. Neste preço não está sendo considerado o valor da estrutura e da instalação do sistema eólico.

A Tabela 39 mostra a fatura de energia elétrica de um consumidor de classe inferior a 100 kWh já apresentada anteriormente, enquanto que a Tabela 40 mostra o valor da fatura considerando a implantação da geração distribuída, já explicada anteriormente. Considerando que o sistema eólico gere toda a energia necessária, a diferença entre as faturas é de R\$ 290,00. Considerando o preço inicial do sistema, este levaria 55 anos para ser pago em relação à economia com a conta de energia, não sendo consideradas taxas de juros ao longo tempo e os possíveis reajustes tarifários de energia.

Tabela 39: Resultado classe de consumo inferior a 100 kWh.

kWh/dia	kWh/Mês	Fatura de Energia Elétrica (R\$)	kWh mínimo de disp.	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/CO FINS (%)	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
2,52	75,6	24,19	30	9,6	Isento	9,25	36	432

Tabela 40: Resultado classe de consumo inferior a 100 kWh - Com geração distribuída.

Mês (kWh)	Disponibilidade (R\$)	ICMS (%)	PIS/COFINS (%)	R\$ Imposto	Total Mês (R\$)	Total Ano (R\$)
75,6	9,6	Isento	9,25	2,22	12	142

De acordo com os resultados apresentados nas duas formas de aplicação do sistema de geração eólico é possível concluir que essa forma de geração não é economicamente viável nas condições em que foi analisada. Sendo que a sistema fotovoltaico se mostra mais econômico do que o eólico para ambas as aplicações, conectado a rede de distribuição ou isolado em áreas remotas.

