

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Matheus dos Santos Machado

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELETRICA ATRAVÉS DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

Taubaté – SP

2018

Matheus dos Santos Machado

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Engenheiro pelo Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté. Área de Concentração: Geração de Energia limpa Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

Taubaté – SP

2018



UNITAU

Universidade de Taubaté
Autarquia Municipal de Regime Especial
para Doc. Titul. nº 28.824/75
Reconhecida pelo Conselho
CNPJ 45.176.183/0001-02

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Dantas s/nº Jardim Mourão
Taubaté-SP 12060-440
Tel.: (12) 3525-4193
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

APÊNDICE 4

AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO – BANCA EXAMINADORA

Aluno(s)	RA
Aluno 1: Matheus dos Santos Machado	01256604

Título do Trabalho
GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Professor Orientador	Data da Apresentação
MARCIO ABUD MARCELINO	11/12/2018

Banca Examinadora (nome)	Assinatura	Nota
Orientador (N1) MARCIO ABUD MARCELINO		10,0
Examinador 2 (N2) JOÃO ROBERTO DE MORAES		10,0
Examinador 3 (N3) CAIQUE GUSTAVO DOS SANTOS		10,0
	MB = (N1+N2+N3)/3	10,0

Nota CICTED = 10,0

MÉDIA FINAL = 10,0 (dez)

Exigências da Banca Examinadora

Aprovado

Reprovado

Autorizo a publicação do trabalho na Biblioteca	
Assinatura do Aluno	Assinatura do Orientador

Homologação do Coordenador	
Data da entrega:	Assinatura do Coordenador

Ficha catalográfica elaborada pelo
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

M149g Machadi, Matheus dos Santos
Geração de energia através de painéis fotovoltaicos /
Matheus dos Santos Machadi. – 2018.
65f. : il.

Monografia (Graduação) – Universidade de Taubaté,
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino,
Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Geração de energia. 2. Energia fotovoltaica. 3. Custo econômico. I. Título.

CDD- 670

Dedico este trabalho à minha Família, em especial meu grande avô INÁCIO, que nunca deixou de me incentivar e sempre creditou no meu potencial. Também ao meu pai Miguel e minha mãe Mara, por compreenderem todos os momentos difíceis passados para chegar a esta etapa final.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo apoio e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino, pelo incentivo e interesse com que me orientou neste trabalho, e também por ter se mostrado um grande amigo, que vem me ajudando muito nos últimos tempos.

Ao meu pai Miguel, por todo apoio prático e psicológico, sempre me ajudando nas horas em que mais preciso.

À minha mãe Mara, pelas conversas e auxílio moral.

À minha namorada Laís, por acreditar em mim e me incentivar.

À UNITAU (Universidade de Taubaté) pela formação.

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

APRENDER É UMA DÁDIVA! TUDO QUE
VOCÊ MAIS QUER ESTÁ ESCONDIDO
ATRÁS DO QUE VOCE NÃO SABE.

NINGUÉM PODE TE IMPEDIR DE
APRENDER!

RESUMO

A geração de energia elétrica abrange meios distintos de criação, sendo todos com o mesmo princípio, ou seja, o de converter alguma forma de energia (hidráulica, térmica, solar, etc.) em energia elétrica. Para uma geração eficaz, necessita-se de planejamento prévio bem elaborado, análise simultânea de uma grande quantidade de informações técnica e econômico-financeira, buscando uma relação custo benefício que alcance as necessidades. Este trabalho apresenta aborda a geração de energia elétrica utilizando o sistema fotovoltaico, explorando suas particularidades em função das mais recentes legislações que incluíram as mini e micro gerações de energia elétrica. Apresenta também sua evolução na história, em função da crescente evolução tecnológica dos painéis fotovoltaicos e dos conversores eletrônicos, bem como dos tipos de instalação e composição do sistema, tanto nos aspectos elétricos como nas estruturas mecânicas de fixação dos painéis, demonstrando suas principais vantagens e desvantagens.

Palavras-chave: Geração. Energia. Energia fotovoltaica. Custo econômico.

ABSTRACT

The generation of electric energy comprises different means of creation, all of them having the same principle, that is, of converting some form of energy (hydraulic, thermal, solar, etc.) into electric energy. For an effective generation, well-prepared prior planning is required, simultaneous analysis of a large amount of technical and economic-financial information, seeking a cost-benefit ratio that meets the needs. This paper discusses the generation of electric energy using the photovoltaic system, exploring its particularities in light of the latest legislation that included the mini and micro generations of electric energy. It also presents its evolution in history, due to the increasing technological evolution of photovoltaic panels and electronic converters, as well as the types of installation and composition of the system, both in the electrical aspects and in the mechanical structures of fixation of the panels, demonstrating its main advantages and disadvantages.

Keywords: Generation. Energy. Photovoltaics. Economic cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Receita X Consumo.....	18
Figura 02	Empreendimentos em operação.....	18
Figura 03	Atlas Solarimétrico do Brasil.....	20
Figura 04	Preços médios residenciais por potência de gerador solar.....	22
Figura 05	O eixo da rotação da terra inclinado em relação ao eixo da Órbita elíptica em todo do sol – movimento de translação.....	26
Figura 06	Movimento de translação e rotação do Planeta Terra.....	27
Figura 07	Trajectoria do sol durante o dia nas estações do ano para o Hemisfério Norte.....	27
Figura 08	Composição do espectro da radiação solar.....	28
Figura 09	Componentes da radiação solar.....	30
Figura 10	Atlas da irradiação solar no Brasil.....	31
Figura 11	Ângulo zenital representado por oz	32
Figura 12	Representação da trajetória do sol e ângulo zenital.....	33
Figura 13	Módulo solar com orientação azimutal incorreta.....	33
Figura 14	Módulo solar com orientação azimutal correta.....	34
Figura 15	Estrutura de uma célula fotovoltaica.....	35
Figura 16	Estrutura de uma célula fotovoltaica pronta para uso.....	35
Figura 17	Estrutura de um módulo fotovoltaico pronto para uso.....	36
Figura 18	Representação do processo de uma célula monocristalina de silício.....	38

Figura 19	Reprodução do processo de uma célula policristalina de silício	38
Figura 20	Reprodução de uma célula do tipo filme fino.....	40
Figura 21	Curva característica I x V típica de uma célula de silício	40
Figura 22	Representação de um sistema de geração de energia elétrica Independente.....	43
Figura 23	Sistemas microssistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica	44
Figura 24	Dados técnicos do catálogo de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente.....	45
Figura 25	Apresentação do sistema fotovoltaico e componente conectado à rede.....	48
Figura 26	Apresentação de galpões de armazenamento utilizando energia fotovoltaica.....	48
Figura 27	Usina de geração fotovoltaica conectada à rede.....	49
Figura 28	Localização e coordenadas do estabelecimento.....	55
Figura 29	Tabela demonstrativa do histórico de consumo.....	56
Figura 30	Consumo médio.....	56
Figura 31	Consumo médio diário.....	56
Figura 32	Características técnicas do módulo fotovoltaico.....	57
Figura 33	Dados de entrada e saída sobre o inversor Fronius.....	59
Figura 34	Características dos módulos fotovoltaicos.....	60
Figura 35	Localização da possível instalação do sistema.....	60

Figura 36 Consumo elétrico detalhado..... 61

LISTA DE ABREVIATURAS

AM – Air mass

CC - Corrente contínua

MPP - Maximum Power Point

MPPT - Maximum Power Point Tracking

MWp - Megawatt pico

PV - Painel Fotovoltaico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	ENERGIAS RENOVÁVEIS: CENÁRIO ATUAL	17
2.1	OBJETIVOS	24
2.2	JUSTIFICATIVA	25
3	PARÂMETROS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	26
3.1	ENERGIA FOTOVOLTAICA	26
3.2	MOVIMENTO INFLUENTE ENTRE O SOL E A TERRA	26
3.3	RADIAÇÃO SOLAR	28
3.4	IRRADIÂNCIA OU IRRADIAÇÃO SOLAR	30
3.5	SOLARIMETRIA	31
3.6	MASSA DE AR	32
3.7	TRIÂNGULO AZIMUTAL	32
4	CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	35
4.1	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	35
4.2	CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	37
4.3	CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO	38
4.4	FILMES FINOS	39
4.5	PARÂMETROS ELÉTRICOS DAS CÉLULAS E MÓDULOS	40
5	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO	43
5.1	CLASSIFICAÇÃO	43
5.2	COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO	44
6	SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	47

6.1	CLASSIFICAÇÃO	47
6.1.1	MICROGERAÇÃO: PRODUÇÃO DE POTÊNCIA INSTALADA ATÉ 100 KW	47
6.1.2	MINIGERAÇÃO: PRODUÇÃO DE POTÊNCIA INSTALADA ENTRE 100 KM E 1 MW	48
6.2	COMPONENTES	49
6.3	PONTOS IMPORTANTES DO NORMATIVO Nº 482/15	51
6.4	TARIFAÇÃO E INFLAÇÃO	54
7	ESTUDO DE CASO	55
7.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
8	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje podemos notar que o cenário esta mudando e existe uma excelente perspectiva para a expansão do uso de energia solar.

Nota-se, até no inicio do ano de 2012, uma ausência de normas regulamentadoras sobre o setor técnico fotovoltaico, o que impossibilitava o surgimento de indústrias de produção e mercado para venda dos equipamentos deste segmento.

A expansão do mercado de consumidores de energia elétrica e a falta de infraestrutura, assim como obras inacabadas de usinas hidrelétricas, fazem com que as usinas termelétricas sejam utilizadas constantemente visando evitar a falta de distribuição de energia, entretanto, estas usinas são altamente poluentes ao meio ambiente.

Dentro deste contexto, podemos empregar a micro e a miniusina como solução para o problema, “desafogando” a produção das termelétricas.

Além destas soluções, um dos fatores de peso a se considerar é o fator socioeconômico, onde a produção de energia fotovoltaica é relativamente alta financeiramente quando comparada a outros métodos de geração de energia elétrica, fator este que pode inviabilizar a geração.

Mesmo tendo em vista o alto curso dos seus equipamentos, continua sendo de suma importância o desenvolvimento de novas tecnologias para reduzir os custos de todos os processos que envolvem sua utilização, por meio do aumento de rendimento na conversão da energia solar em elétrica e também pela redução do custo dos módulos fotovoltaicos.

Os consumidores notaram que, a cada ano que passa, sua conta de consumo de energia elétrica vem aumentando de maneira considerável, constatação que reacendeu a esperança no sistema fotovoltaico, visando ao investimento em micro e miniusinas de produção de energia própria.

2. ENERGIAS RENOVÁVEIS: CENÁRIO ATUAL

Os recursos energéticos renováveis oferecem muitas vantagens para um mundo carente de energia. Eles podem ser gerados de diversas maneiras, havendo, portanto vários tipos de energia, quais sejam: a fotovoltaica (FT), que se utiliza de radiação solar, a eólica (EO), que se utiliza do vento para movimentação de pás, a queima de gás natural (GN) carvão e óleo, a nuclear e a biomassa,

Com isto, vê-se despertar um particular interesse em investimento nas fontes alternativas de energia, nos países em desenvolvimento, cujas taxas de crescimento econômico são seriamente comprometidas pelos altos custos da energia, sendo possível enxergar um imenso potencial oferecido por estes recursos.

Considerando suas vantagens pode-se perguntar por que as energias renováveis são relativamente subutilizadas.

A primeira razão seria econômica, visto que os custos para produção das energias renováveis, mesmo tendo caído consideravelmente nas últimas duas décadas, não eliminam outros fatores que limitam a ampliação da sua utilização, tais como: avaliação de diversos projetos desenvolvidos globalmente, escassez de estratégias governamentais coerentes e ceticismo puro e simples por parte de muitos.

Todos esses fatores são obstáculos para o investimento em larga escala na produção de energias renováveis.

Pode-se considerar que as principais fontes de energia alternativa ainda continuarão subutilizadas por tempo indeterminado, tendo em vista existirem dificuldades relativas ao armazenamento de energia.

No entanto, quando as fontes de energia atualmente usadas em grande escala vierem a se esgotar, haverá as fonte de abastecimento alternativo, tais como, as energias eólicas e a energia fotovoltaica como fonte de alimentação inacabável, sendo o sol e o vento fontes complementares com sua flexibilidade e necessidade de espaço reduzida, permitindo-se sua implantação em locais de fácil acesso onde rapidamente se atenderá à demanda.

Pode-se notar, na figura 1, o aumento do consumo em virtude do aumento do número de consumidores, comprovando que, cada vez mais a demanda aumentará.

Figura 1 – Receita X Consumo

	Consumo de energia elétrica (MWh)		Receita de fornecimento de energia elétrica		Número de unidades consumidoras	
		% Cresc		% Cresc		% Cresc
2008	278.592.020,41		R\$ 68.838.701.970,26		63.088.315	
2009	286.871.823,71	5,8%	R\$ 74.456.147.481,54	1,1%	65.450.236	4,2%
2010	302.355.009,08	3,0%	R\$ 79.998.138.965,79	8,2%	67.627.802	3,7%
2011	310.397.201,57	5,4%	R\$ 86.434.360.145,16	7,4%	70.123.763	3,3%
2012	319.871.828,12	2,7%	R\$ 93.674.926.325,39	8,0%	72.242.079	3,7%
2013	329.187.467,53	3,1%	R\$ 83.760.979.904,58	8,4%	74.678.022	3,0%
2014	345.364.995,03	2,9%	R\$ 95.655.417.872,09	-10,6%	77.042.677	3,4%
2015	341.927.631,35	4,9%	R\$ 135.066.056.918,90	14,2%	78.944.393	3,2%
2016	330.109.404,16	-1,0%	R\$ 138.660.435.548,96	41,2%	80.648.668	2,5%
2017	313.257.518,51	-3,5%	R\$ 131.917.580.892,75	2,7%	81.752.588	2,2%
2018 *	79.654.661,37	1,7%	R\$ 34.267.258.561,07	3,9%	82.640.356	4,3%

* Jan-Mar/2018

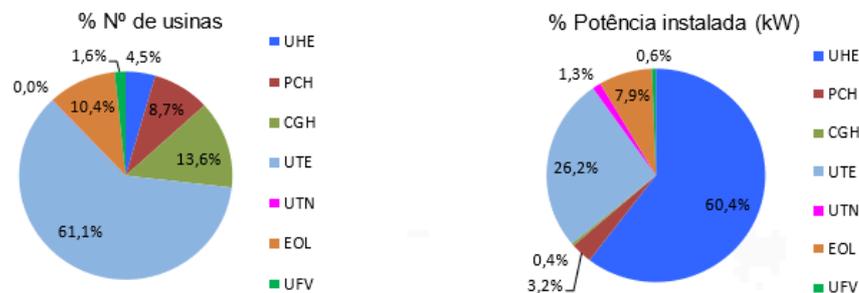
* Jan-Mar/2018

* Mar/2018

Fonte: Aneel, Março 2018.

Tendo em vista a larga escala de crescimento de consumidores, entram em ação as usinas por meio de gerações renováveis apresentadas na figura 2, demonstrando-se o quão viável é a produção e o total para cada usina como contribuição:

Figura 2 - Empreendimentos em operação



Fonte: Aneel, Março 2018

A energia solar oferece grande potencial para conversão em energia elétrica, comparada às demais, devido à necessidade de pouco espaço para sua instalação, sendo capaz suprir uma parte importante das necessidades de energia do planeta.

O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento da energia solar. Até agosto deste ano (2018) foram realizadas 5.040 conexões de geração de energia pelo próprio consumidor – conhecida por micro e minigeração distribuída. Entre as energias renováveis mais utilizadas, a solar fotovoltaica é a fonte que mais se destaca, com 4.955 conexões (Aneel).

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, em condições específicas. No segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares.

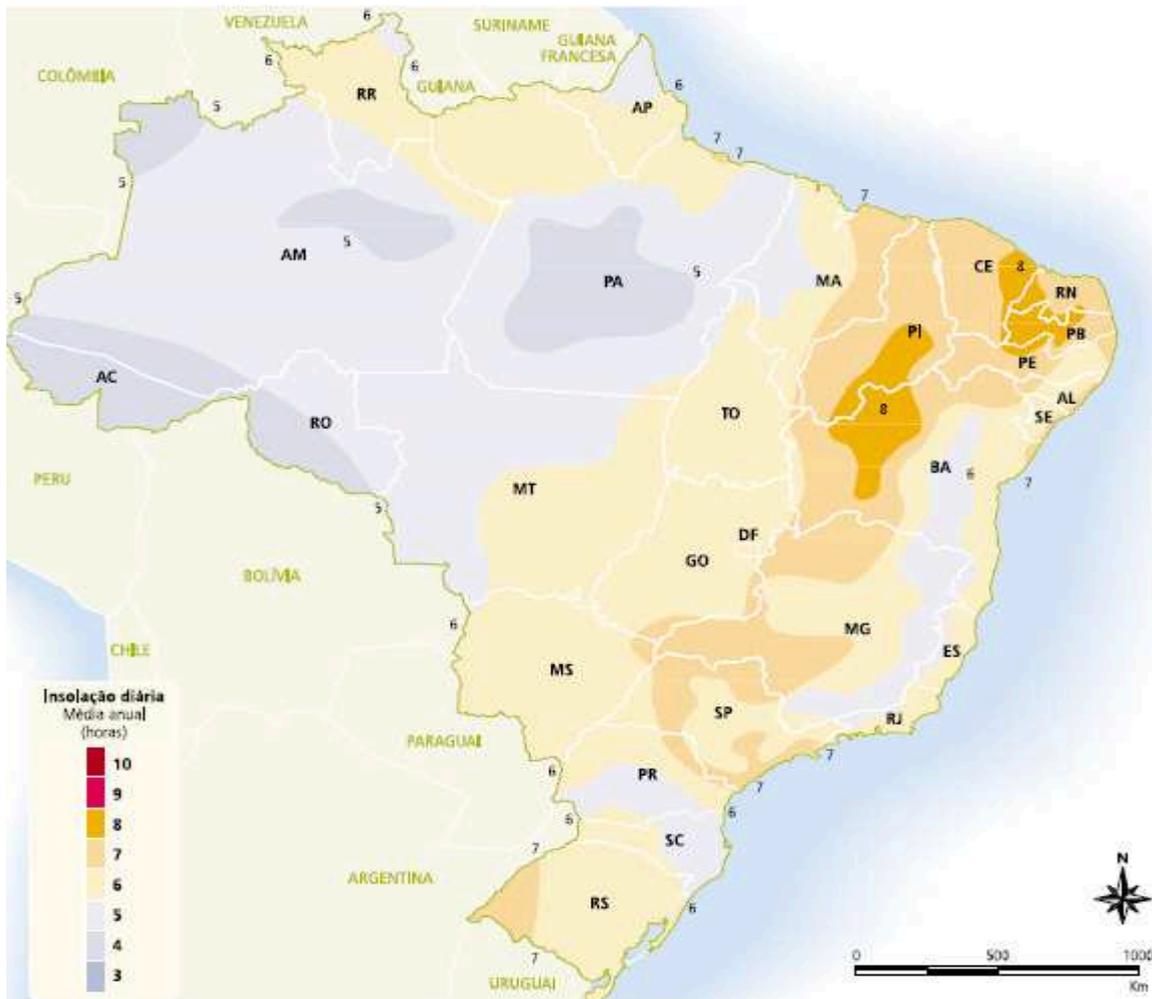
Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são: o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido às suas características climáticas, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas que não tem acesso à rede de energia elétrica.

Desse modo, usa-se a duração solar do dia, sendo o período em que a visibilidade do sol ou de claridade varia em algumas regiões e períodos do ano. Essas variações são mais intensas nas regiões polares e nos períodos de solstício. O inverso ocorre próximo à linha do Equador e durante os equinócios.

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, regiões em que não se observam grandes variações na duração solar do dia. Contudo, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas do País se concentra em regiões mais distantes do Equador.

Desse modo, para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor ou painel solar de acordo com a latitude local e período do ano em que se requer mais energia, conforme pode ser observado na figura 3.

Figura 3 – Atlas solarimétrico do Brasil



Fonte: Recife: Editora Universitária da UFPE (2000 – Adaptado)

Como já mencionado, o aproveitamento da radiação solar depende também das condições climáticas e atmosféricas. Somente parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Mesmo assim, estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2000).

Com vistas a estas informações, pode-se dizer que a conversão da energia fotovoltaica em energia elétrica ocorre quando uma junção semicondutora PN, construída de tal forma que possibilite a incidência de fótons em sua superfície, consegue gerar uma corrente CC fornecida a uma carga. Enquanto a luz estiver iluminando a célula solar, elemento individual do PV (painel fotovoltaico) será produzida energia.

Quando a iluminação é interrompida, cessa a produção de energia. Células solares não necessitam ser carregadas e podem operar em ambientes externos, na superfície da terra, ou no espaço, por mais de 30 anos. (PORTALSOLAR)

Pode-se afirmar, então, que as principais características da energia fotovoltaica são:

- Energia solar amplamente acessível e infinita;
- Os painéis fotovoltaicos (PV) não emitem resíduos de combustão ou radioativos, não contribuindo assim para a mudança global do clima ou poluição do ar e da água;
- Os painéis apresentam baixo custo de operação;
- Na maioria dos painéis não há partes móveis (sem desgaste);
- Os módulos solares apresentam alta confiabilidade, com uma garantia de vida útil superior a 30 anos;
- A produção anual é bastante previsível.
- Os painéis fotovoltaicos têm estrutura modular, podem ser integrados a estruturas novas ou já existentes e são facilmente instalados.

Contudo, existem fatores considerados desvantagens ao se optar por energia solar, tais como:

- A energia do sol é difusa e de densidade relativamente baixa;
- O custo inicial de instalação dos painéis fotovoltaicos é elevado;
- A potência de saída dos painéis fotovoltaicos é imprevisível, dependendo do dia, hora e condições climáticas.

O custo de um sistema de energia solar fotovoltaico depende principalmente do tamanho e da complexidade da instalação.

A grande variação de preço entre os fornecedores é relacionada à qualidade dos componentes utilizados, ao tamanho da empresa (empresas maiores tem mais poder de compra e compram mais barato) e à complexidade da instalação.

Em Julho de 2018, de acordo com uma pesquisa feita junto a 4.500 empresas cadastradas no Portal Solar, tem-se os seguintes preços médios dos geradores de energia solar, já incluindo a instalação, projeto, homologação e o equipamento todo:

- Casa pequena, de 2 pessoas = Sistema de 1.32Kwp preço médio de R\$ 10.673,36;

- Casa média, de 3 a 4 pessoas = Sistema de 2,64Kwp preço médio de R\$ 17.570,00;
- Casa média, 4 pessoas = Sistema de 3,3Kwp preço médio de R\$ 20.320,00
- Casa grande, 4 a 5 pessoas = Sistema de 4,62Kwp preço médio de R\$ 25.695,00;
- Casa grande, 5 pessoas = Sistema de 6,6Kwp preço médio de R\$ 32.410,00
- Mansões, mais de 5 pessoas = Sistemas de até 10,56Kwp preço médio de R\$ 52,240,00

Figura 4 – Preços médios residenciais por potência de gerador solar



Fonte: Portal Solar

Visando aos preços, logo vem o fator de eficiência dos painéis, diferente das células, os painéis como um conjunto têm como conhecimento de eficiência sua porcentagem de energia da luz do sol em converter energia elétrica por m².

Quanto à eficiência do painéis, é valido lembrar que seus ensaios são feitos em condições de laboratórios sendo padrões de indústria e fabricação.

Nos laboratórios são apresentados:

- Temperatura da Célula = 25°C - A temperatura da célula solar em si, não a temperatura do ambiente. (Sim, o painel solar todo durante o teste deve estar em 25°C).
- Irradiação solar = 1000 Watts m² - Este número refere-se à quantidade de energia que incide sobre uma determinada área em um determinado momento. (Essa quantidade de energia de 1000 W/m² é uma média da quantidade de luz solar que incide na superfície terrestre).

- Massa de Ar = 1.5. Este número é difícil de medir, uma vez que se refere à quantidade de luz que tem que passar pela atmosfera terrestre antes que possa bater a superfície da Terra, e está relacionado, principalmente, com o ângulo do sol em relação a um ponto de referência sobre a terra.

O valor da potência gerada pelos painéis depende, principalmente, da intensidade da radiação solar incidente na sua superfície e da temperatura ambiente.

Para cada valor de irradiação solar existe apenas um ponto onde é entregue a máxima potência para carga. Esse valor é o “ponto de máxima potência” ou MPP (*Maximum Power Point*).

Como estes parâmetros são variáveis, o ponto de máxima potência modifica-se durante todo o tempo, portanto, o controle de rastreamento do ponto de máxima potência não é um problema trivial. Para superar esse problema várias estratégias de controle no rastreamento têm sido propostas, tais como, perturbação e observação, condutância incremental, capacitância parasita, tensão constante, redes neurais e lógicas nebulosas (fuzzy), entre outras.

Pode-se considerar que as células fotovoltaicas apresentam grandes variações de corrente e tensão devido às informações já citadas. Existe um ponto de operação do painel fotovoltaico (tensão vs corrente), variável com a intensidade da insolação e da temperatura, em que a potência é máxima considerado MPP.

A energia transferida para uma carga é máxima quando a impedância da fonte está casada à impedância da carga (Teorema da Máxima Transferência de Potência). Quando uma fonte de energia é ligada a uma carga ativa, o ponto de operação é determinado pela intersecção da curva característica elétrica tensão-corrente da saída da fonte com a correspondente curva característica da entrada da carga. Este ponto de operação altera-se sempre que as características da fonte ou da carga variam.

Para a transferência dessa máxima potência gerada pela fonte (painel fotovoltaico) ao estágio seguinte (normalmente um conversor estático CC/CC), a curva de carga deve interceptar o MPP.

Nesse ponto a eficiência do sistema “gerador – carga” é máxima. Quando o sistema não opera no MPP, a energia fornecida à carga é inferior à energia máxima que poderia ser transferida.

A principal vantagem relacionada à operação no MPP é o retorno financeiro do investimento na aquisição do sistema fotovoltaico. Quanto mais energia o sistema produzir, mais rapidamente o investimento terá retorno e maior será a viabilidade do sistema. Assim, para aumentar a eficiência global do sistema é importante que os painéis operem no MPP o maior tempo possível.

Para garantir a máxima eficiência, faz-se necessária a utilização de técnicas que busquem o MPP continuamente. Elas são chamadas de “técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência” (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*).

Os valores de tensão e corrente correspondentes ao MPP são utilizados para modificar a curva de impedância de entrada do conversor estático a fim de que ela intercepte o ponto de máxima potência instantaneamente (“casamento” de impedância).

2.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar um conteúdo sobre geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos, fornecendo informações sobre o sistema para pessoas que não as possuem, detalhando conceitos técnicos, socioeconômicos, seus prós e contras, controle de potência produzida e eficiência dos painéis, visando ao melhor rendimento e custo para uma geração.

Também, apresentará contribuições adicionais fornecendo informações sobre:

- Influência das variações ambientais nas características elétricas das células solares;
- Modelos de sistemas de rastreamento do MPP aplicados a sistemas fotovoltaicos;
- Eficiência dos equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico;
- Conceito sobre equipamentos;

2.2 JUSTIFICATIVA

O interesse pela busca de produção de energia solar fotovoltaica no mercado de negócio vem crescendo significativamente nos últimos anos. Com isto, a ideia é abranger informações para poder fornecer a estes clientes o melhor investimento econômico, com melhor custo-benefício.

Entretanto, um dos problemas mais comuns é o mau dimensionamento de projetos, a quantidade excessiva de painéis, a má localização dos painéis quando não são direcionados para o ponto certo de maior absorção dos raios solares.

A principal finalidade deste trabalho, porém, é poder contribuir com um conjunto de informações que seja útil para um projeto ideal, com uma relação custo-benefício excelente.

3. PARÂMETROS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica é a energia elétrica a partir de luz solar, cuja produção, mesmo em dias nublados ou chuvosos ainda é possível, porém com menor eficiência.

Sua geração é realizada por meio de um processo de conversão de energia solar em energia elétrica, submetendo células fotovoltaicas à irradiação solar, o que faz com que sofram um processo onde os elétrons do material semicondutor são postos em movimento, dando início à geração de energia.

3.2 MOVIMENTO INFLUENTE ENTRE O SOL E A TERRA

A partir das figuras 5 e 6, pode-se observar o movimento de translação da Terra em redor do Sol, com uma trajetória elíptica, completando seu trajeto em aproximadamente 365 dias e seis horas.

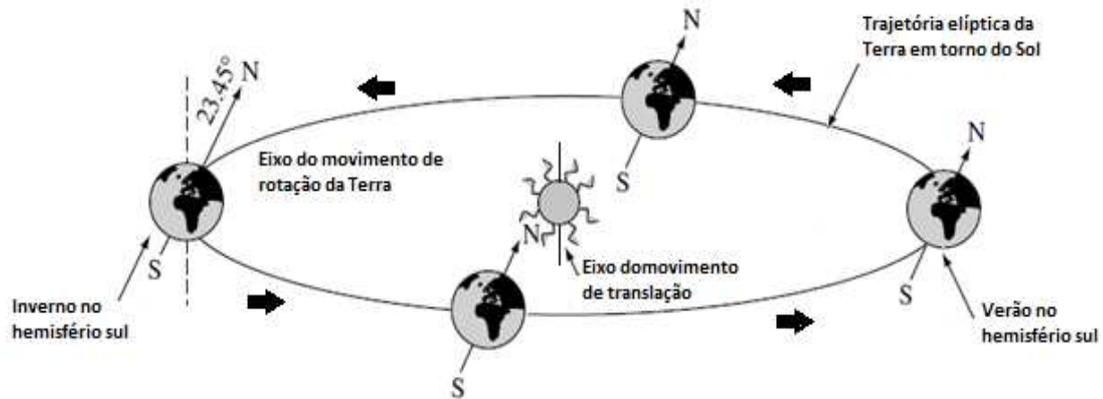
Este movimento de rotação é realizado em torno do eixo polar que está inclinado em relação ao plano formado pela translação do centro da Terra de um ângulo constante de $23,45^\circ$ (Figura 5).

Figura 5 - O eixo de rotação da Terra é inclinado com relação ao eixo da órbita elíptica em torno do Sol (movimento de translação)



Fonte:

Figura 6 - Movimentos de translação e de rotação do planeta Terra.

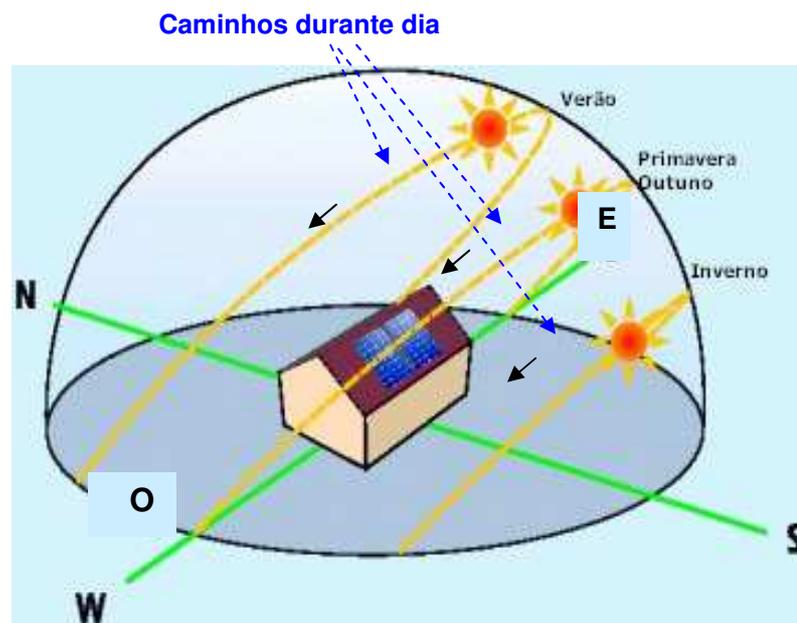


Fonte:

A inclinação do eixo de rotação da Terra faz com que os hemisférios norte e sul do planeta fiquem mais próximos ou distantes do Sol, dependendo da época do ano, dando origem às estações climáticas.

A variação na duração dos dias e também as diferentes massas de ar percorridas pelos raios solares, são os principais fatores que afetam a quantidade de energia solar recebida em cada região do planeta.

Figura 7 - Trajetória do Sol durante o dia nas estações do ano para o Hemisfério Norte



Fonte:

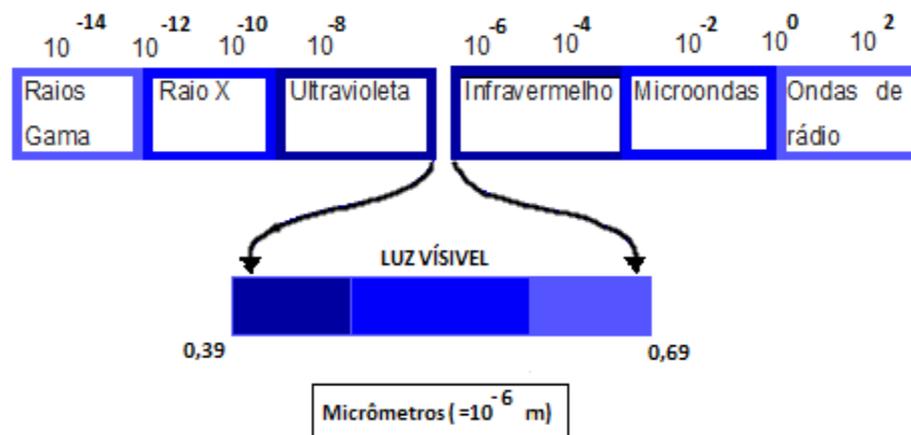
3.3 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é composta por ondas eletromagnéticas, transmitidas do sol para nosso planeta por meio do espaço na forma de radiação eletromagnética.

As ondas são transmitidas de acordo com sua frequência, quanto maior sua frequência maior a energia transmitida, já seu comprimento é o oposto, quanto maior a frequência menor seu comprimento.

Estas ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol podem produzir diversos efeitos sobre objetos e também seres vivos. Quando uma pequena parte destas ondas é captada pelo olho humano, pode ser considerada luz visível. Outra parte não pode ser vista pelo olho humano, mas pode ser percebida de outras formas, como demonstrado na figura 8.

Figura 8 - Composição do espectro da radiação solar



Fonte:

O espectro da radiação solar é denominado pelo conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol.

A radiação solar fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, sendo a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre e climática do planeta, e também por suportar a vasta maioria da cadeia alimentar. (WIKIPÉDIA)

Esta radiação não se apresenta de forma pura, devido à influência das camadas externas do sol, conhecidas como cromosfera e coroa, as quais apresentam pontos de constante anomalia, como erupções cromosféricas e outros fenômenos existentes nas manchas solares e uma complexidade nos ciclos solares.

Levando-se em conta esta radiação, pode-se considerar que a transformação de energia eletromagnética em energia térmica é dada pelos componentes certos. Quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre um componente que possui tais características de absorção, a energia eletromagnética é transformada em energia cinética e transmitida para as moléculas e átomos que os compõe.

Quanto maior o estado de agitação dos átomos e moléculas, maior será a temperatura, gerando alterações em suas propriedades elétricas. Este estado do componente nos permite diversas situações, como por exemplo, o efeito fotovoltaico e o efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico se baseia na emissão de um grande número de elétrons por um componente exposto à luz, que por sua vez exposto, utiliza-se da absorção dos fótons. Parte desta energia obtida é utilizada na liberação dos elétrons, e o restante resulta em energia cinética que é proporcional à frequência limiar atingida pelo impacto dos fótons.

Ambos os efeitos são parecidos, no entanto, pode-se considerar que no efeito fotovoltaico surge uma tensão elétrica no material semiconductor.

Esta tensão surge quando o elétron da banda de valência recebe energia suficiente do fóton para transpassar até a banda proibida ou "GAP" e transpassar para a banda de condução. Ou seja, no efeito fotoelétrico, os elétrons são ejetados da superfície de um material, após exposição à radiação com uma determinada energia, sem nenhuma direção para ser coletado, como no efeito fotovoltaico onde os elétrons são transpassados até a banda de valência para serem coletados na banda de condução, assim produzindo a tensão elétrica.

Toda energia solar incidente sobre um meio específico pode ser refletida, transmitida ou absorvida. Esta parcela de energia absorvida, dependendo do material, dá origem aos processos de "foto-conversão e termoconversão".

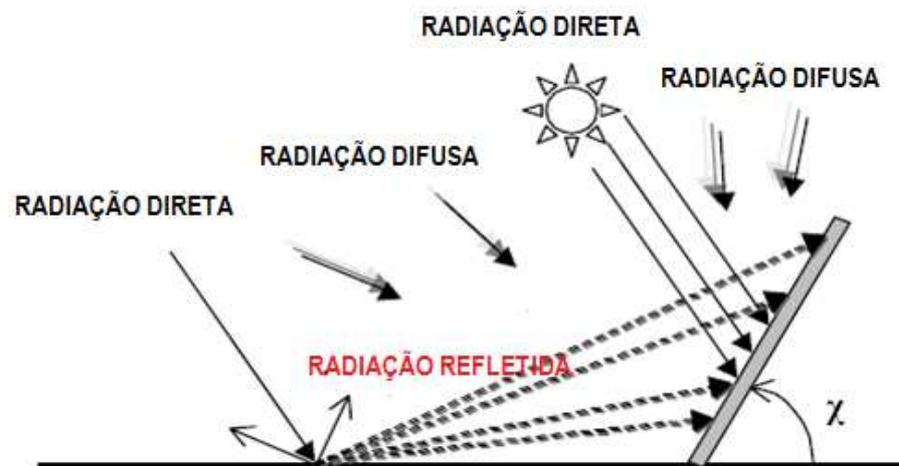
O material exposto passa por dois processos, a irradiância e a irradiação. A irradiação é tratada como densidade de energia na superfície plana perpendicular aos raios solares, sendo expressa em Wh/m^2 por dia.

A intensidade da radiação solar é denominada irradiância e é definida pela densidade de potência incidente sobre uma superfície plana perpendicular aos raios solares com área unitária (W / m^2).

Dentre todas as constantes neste meio, a irradiância solar chega à camada superior da atmosfera. Uma pequena parte dela atinge a superfície terrestre devido à reflexão e à absorção dos raios solares da atmosfera.

Esta pequena parte de irradiância, é chamada de irradiância global G , que por sua vez é constituída por três partes, sendo elas: direta, difusa e refletida na terra (ou albedo), como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Componentes da radiação solar



Fonte: EKUAKILLE *et al.*, 2008

3.4 Irradiância ou Irradiação solar

Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar, expressada pela unidade de potencia W/m^2 (watt por metro quadrado), sendo tratada como uma grandeza física que transpassa a energia durante determinado intervalo de tempo.

Com a evolução da tecnologia, disponibilizaram-se sensores eletrônicos capazes de fornecer medidas de irradiância na superfície terrestre, chegando tipicamente a $1000W/m^2$.

Esta medida é adotada como padrão na indústria fotovoltaica para especificação e avaliação de células fotovoltaicas, sendo mencionada na maioria dos catálogos fornecidos pelos fabricantes, o que também é muito útil para avaliar a eficiência dos dispositivos do sistema fotovoltaico.

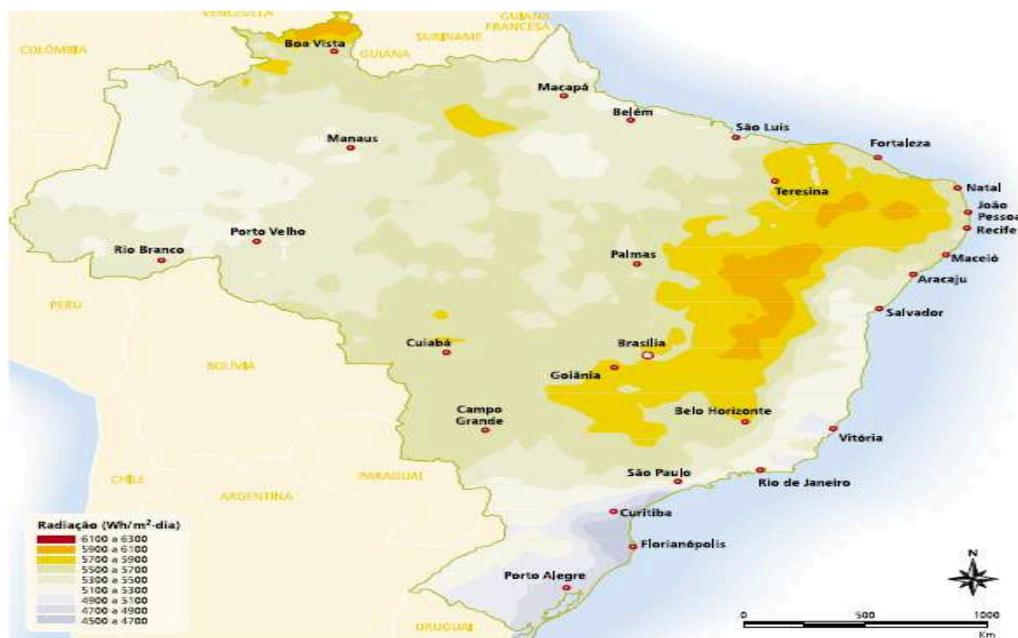
3.5 Solarimetria

Uma grandeza utilizada para expressar a densidade da energia solar que incide sobre determinada área plana em determinado intervalo de tempo, que é representada pela unidade Wh/m^2 (watt-hora por metro quadrado) e torna-se útil ao dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.

Hoje, existem estações solarimétricas responsáveis por construir bancos de dados destinados ao fornecimento informações em formato de tabelas, sobre insolação por todo o planeta. Estas informações são obtidas por meio da interpolação dos dados obtidos, empregando-se sensores, que também disponibilizam mapas solarimétricos e ferramentas computacionais. Estas ferramentas possibilitam informações sobre irradiação solar de qualquer lugar do Brasil, unindo um conjunto de valores responsável pela criação de gráficos ou tabelas mensais e anuais de irradiação solar.

A figura 10 representa todo o território brasileiro, onde se pode ver que seus valores são divididos em 8 faixas que partem de $4500 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$ e vão até $6100 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$. Estes dados são médias anuais obtidas a partir de cada dia do ano, portanto, esta variação é resultante da influência de vários níveis de irradiação, bem como ocorrência de chuvas e presença de nuvens em determinadas épocas do ano.

Figura 10 - ATLAS de Irradiação Solar no Brasil- 1998



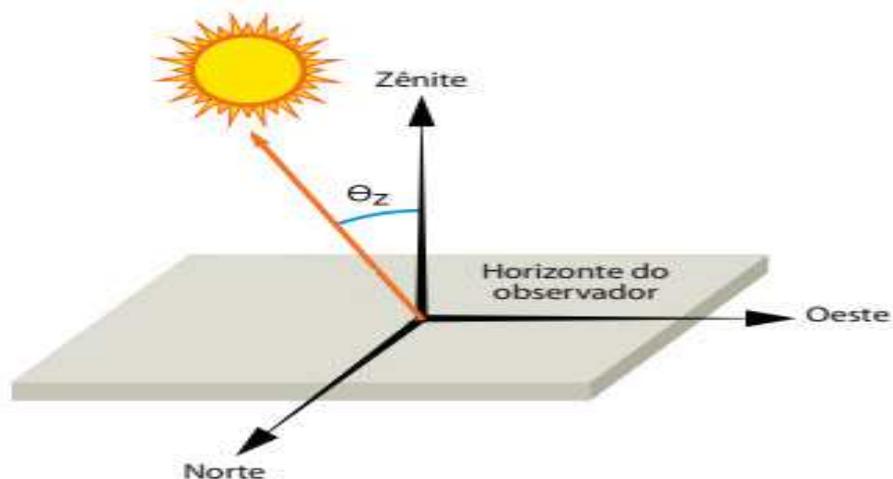
Fonte:

3.6 Massa de Ar

Como já visto, a radiação solar sofre diversas alterações quando ultrapassa a atmosfera terrestre. A chegada desta radiação depende das alterações da espessura da camada de ar e da composição da atmosfera, também do ar e dos elementos suspensos, tais como poeira e vapor de água.

Depois que os raios solares ultrapassam todos estes elementos, delineia-se um trajeto até o solo, gerando uma linha imaginária denominada zênite, criando uma relação entre o ângulo de inclinação do Sol, expressado pela figura 11.

Figura 11 - Ângulo Zenital representado por θ_z

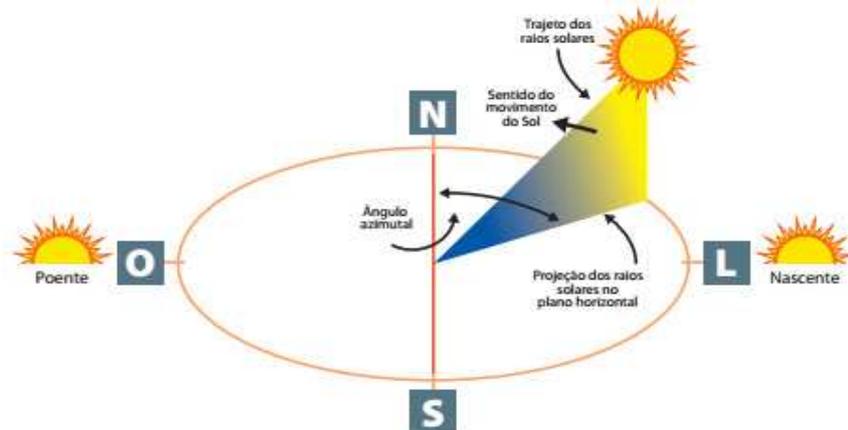


Fonte:

3.7 Ângulo Azimutal

O ângulo azimutal diferente do ângulo zenital representa a trajetória do sol desde o nascente até o poente, descrevendo diferentes ângulos no percorrer deste período, tratando-se do ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul, onde o deslocamento angular é tomado a partir do norte geográfico apresentado na figura 12.

Figura 12 - Representação da trajetória do sol e ângulo azimutal



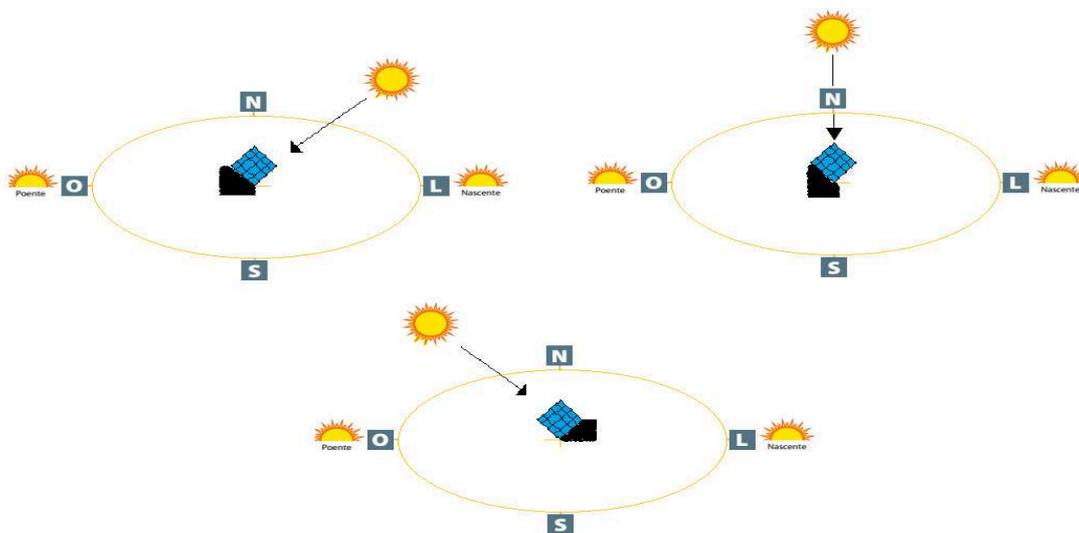
Fonte:

Quando o ângulo azimute coincide com o norte polar da Terra denomina-se esta situação como ângulo azimutal nulo porque o Sol está na metade do trajeto que percorre, desde o instante que nasce até o momento que se põe.

Tornando-se essa uma informação indispensável para a instalação dos módulos, pois uma instalação deve levar em consideração o movimento diário do Sol.

Portanto, se o módulo for posicionado para o Leste, obter-se-á sol apenas pela manhã. Posicionando o módulo para o Oeste, o sol é obtido apenas no período da tarde, como apresenta a figura 13.

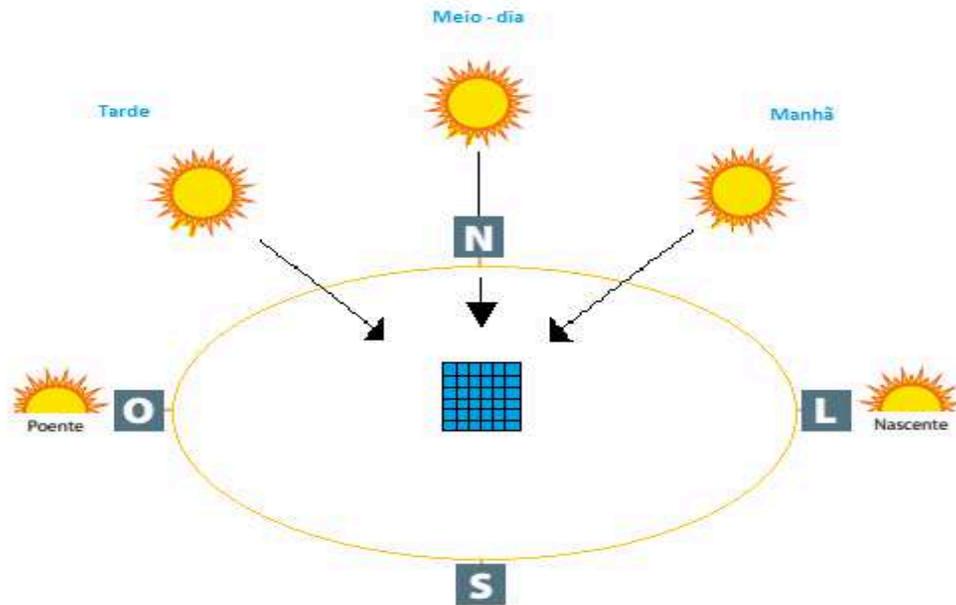
Figura 13 - Módulo Solar com orientação azimutal incorreta



Fonte:

Levando em conta estas informações, é comum a instalação destes módulos serem com sua face voltada para o norte geográfico possibilitando a melhor obtenção de luz durante um período maior apresentado na figura 14.

Figura 14 - Módulo solar com orientação azimutal correta.



Fonte:

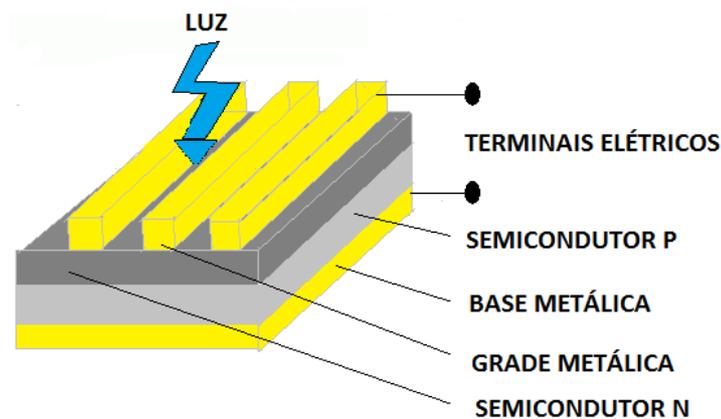
4 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

4.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Em geral podemos afirmar que energia fotovoltaica é a absorção da luz por um determinado componente. Trata-se de um processo físico que gera tensão e corrente elétrica.

O componente que passa por este processo denomina-se célula e, esta célula é composta por duas camadas de material semicondutor P e N, por uma grade de coletores metálicos superior e por uma base metálica no inferior, conforme estrutura apresentada na figura 15.

Figura 15 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte:

Figura 16 - Estrutura de uma célula fotovoltaica pronta para uso



Fonte:

Como apresentado a figura 15, podem-se observar as partes detalhadas da célula fotovoltaica. Suas camadas são fabricadas, geralmente pelo semicondutor do tipo silício. É um material relativamente viável do ponto de vista econômico e simples de ser encontrado. Dentre as camadas P e N, a camada N possui um excedente de elétrons, já o material P apresenta falta de elétrons e, devido a essa diferença, a sua exposição à radiação faz com que os elétrons excedentes da camada N ultrapassem para a camada P, gerando um campo elétrico dentro da barreira de potencial interna da célula. Portanto, pelo fato destas células gerarem potencial elétrico, pode-se utilizá-las como fonte geradora de energia elétrica.

No entanto, uma célula sozinha produz, em média, 0,6 V quando exposta à radiação. Por este motivo surgiu o módulo fotovoltaico apresentado na figura 17, que se baseia em um conjunto de células fotovoltaicas ligadas em série.

Figura 17 - Estrutura de um módulo fotovoltaico pronto para uso



Fonte:

Ainda assim, não produzindo a tensão desejada, surgiu o painel fotovoltaico apresentado na figura 17, que se baseia em um conjunto de vários módulos fotovoltaicos em série ou paralelo, dependendo da aplicação.

4.1 Células Fotovoltaicas

Em 1839, o cientista francês Becquerel deu início a um grande feito, realizando uma das primeiras experiências fotovoltaicas, resultando em uma tensão elétrica gerada quando um material imerso em química sofreu emissão de luz.

Em 1877 dois cientistas ingleses, Adams e Day, observaram um efeito similar ao de Becquerel, no entanto, em outro tipo de semicondutor. Em 1905 o efeito fotoelétrico foi explicado por Albert Einstein o que, supostamente, renderia-lhe o prêmio Nobel à época.

Dentre estas experiências surgiu entre as décadas de 1970 e 1990 um grande desenvolvimento tecnológico que permitiu aplicações na indústria aeroespacial e, posteriormente, também possibilitou aplicações terrestres.

Com a tecnologia dos dias de hoje e o interesse em gerar energia limpa, surgiram novas buscas e pesquisas de desenvolvimento de novas células fotovoltaicas, mais econômicas e eficientes, partindo de um determinado material semicondutor.

O primeiro material que veio ao comércio foi o silício, que, nos dias de hoje, apresenta tecnologia mais elevada, devido ao fato de estar no mercado há mais tempo do que os demais.

Tendo em vista essas informações, podem-se encontrar alguns exemplos de células mais utilizadas no mercado, as quais serão apresentadas no próximo tópico.

4.2 Célula de Silício monocristalino

Vem da extração de um bloco de silício ultrapuro, aquecido em altas temperaturas e submetido a um processo de formação de cristal.

Este processo gera um lingote de silício monocristalino, passando por um processo serrado em espessuras finas (wafers) as quais sofrem processo químico, dopando suas faces com impurezas e formando suas camadas P e N.

Ao final do processo esta camada recebe uma película metálica de duas faces, numa delas uma grade metálica e na outra face um material antirreflexivo responsável pela recepção da luz, que apresenta eficiência de 15% a 18%, processo este apresentado na figura 18.

Figura 18 - Representação do processo de uma célula monocristalina de silício



Fonte:

4.3 Célula de Silício policristalino

Essa Célula utiliza-se mesmo princípio da célula de monocristalino, no entanto, esse modelo apresenta de uma série de cristais agrupados para formação do lingote, sofrendo o mesmo processo de serragem, dopagem da química e aplicação do material antirreflexivo, tendo eficiência entre 13% e 15%, conforme apresentado na figura 19.

Figura 19 - Representação do processo de uma célula policristalina de silício



Fonte:

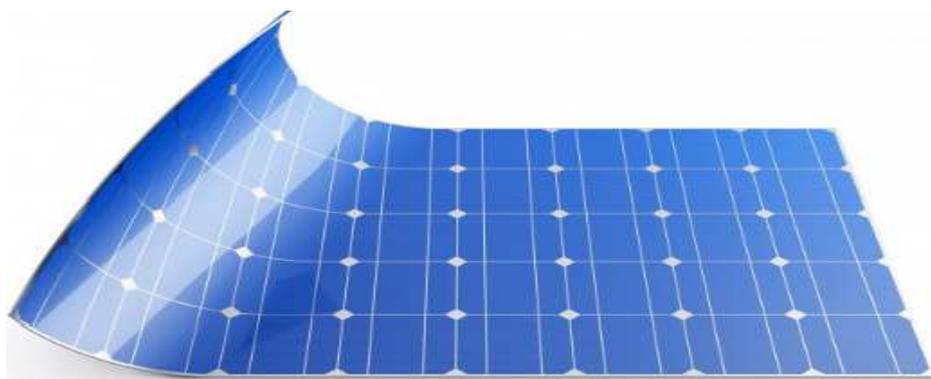
4.4 Filmes finos

Partem de uma tecnologia mais recente. Seu processo de fabricação consiste em finas camadas de silício aplicadas geralmente por vaporização sobre uma base que pode ser flexível ou rígida. Por ser aplicado sobre estas superfícies, onde a perda de matéria prima é menor do que nas anteriores, esta tecnologia possibilita qualquer dimensão, não existindo diferença entre célula e módulo, tendo em vista serem aplicados a uma superfície de qualquer dimensão.

Nos dias de hoje há algumas tecnologias que empregam células de filme fino, como por exemplo, a aplicação de semicondutores do tipo silício amorfa, que, todavia não é muito utilizada, em virtude da baixa eficiência e também por sofrer degradação induzida pela luz nas primeiras 6 a 12 semanas. Para suprir tal problema, ainda continua em processo de avanço tecnológico o semicondutor denominado silício microcristalino, sendo uma das alternativas promissoras para o futuro.

Apresentando vantagens simultâneas à do silício monocristalino, fabricada em dois processos: a primeira fase do processo em alta temperatura adicionada à deposição de filmes de silício, de elevada qualidade, sobre um substrato barato à uma temperatura próxima de 900 °C, tomada como estruturas semelhantes à da célula de policristalino, e a segunda fase do processo em baixa temperatura, próxima de 200 °C a 500 °C, aplicado à deposição de filme fino, tomando películas de silício com estruturas microcristalinas, processo que pode levar em conta uma eficiência de 8,5 %, conforme estrutura física apresentada na figura 20.

Figura 20 - Representação de uma célula do tipo filme fino



Fonte:

4.5 Parâmetros elétricos das células e módulos

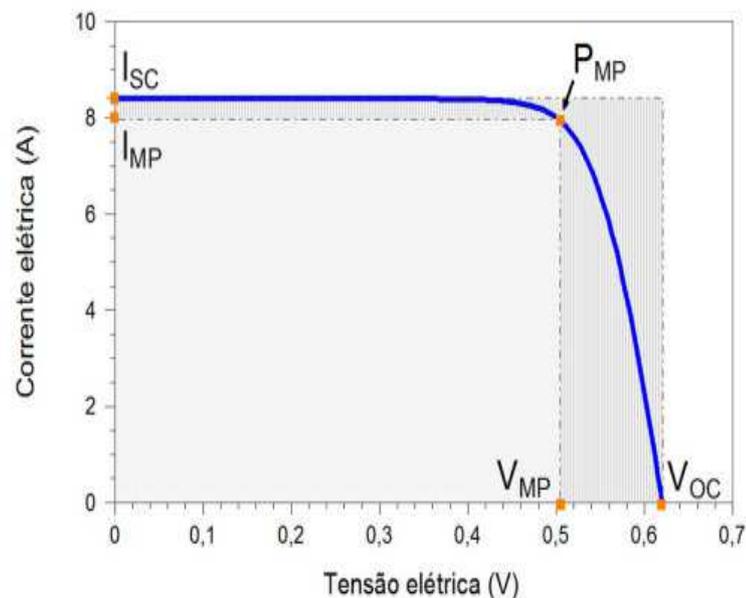
A escolha do tipo do módulo e célula, varia em função da necessidade de corrente que será disponibilizada para suprir a demanda dimensionada.

Assim sendo, os parâmetros ou características elétricas de um módulo precisam ser entendidos para que se possa selecionar o tipo apropriado para cada sistema em particular. As principais características de um módulo fotovoltaico serão analisadas a seguir.

Para isto, é necessário entender os parâmetros principais, os quais são a corrente elétrica em uma célula fotovoltaica, dada pela soma da corrente de uma junção pn, sem se expor à luz com a corrente gerada pelos fótons, absorvidos após exposição à radiação solar.

Esta corrente, em função da tensão no dispositivo, gera uma curva representada como I-V, ou curva característica representada na figura 21.

Figura 21 - Curva característica I x V típica de uma célula de silício



Fonte: (CRESESB, 2014)

Esta curva é dada pela equação:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p}$$

1

Onde:

I_L = corrente fotogeradora (A);

$I(0)$ = corrente de saturação reversa diodo (A);

n = fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2 obtido por ajustes de dados experimentais medidos;

q = carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);

k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

T = temperatura absoluta (K);

E R_s é a resistência em série e R_p é a resistência em paralelo.

Após analisar os dados acima, verifica-se: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência apresentadas a seguir:

A Tensão de circuito aberto (V_{oc}): Determinado com a aferição de tensão entre os terminais de uma célula ou módulo fotovoltaico, quando não há corrente elétrica circulando, também a máxima tensão que a célula fotovoltaica pode produzir, expressada matematicamente como:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

2

Onde:

$I(0)$ = corrente de saturação (A)

I_L = corrente elétrica fotogerada

A Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a máxima corrente obtida pela célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero, e sua

densidade de curto (J_{sc}), e dada pela corrente de curto circuito sobre a área do dispositivo semiconductor que pode ser expressa matematicamente pela equação:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{Area}$$

3

Onde:

I_{sc} : corrente de curto-circuito

J_{sc} : densidade de curto-circuito

Area: área do dispositivo (m^2)

O Fator de forma (FF): denomina a máxima potência da célula fotovoltaica com o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto, pela equação:

$$FF = \frac{(I_{mp} \times V_{mp})}{(I_{sc} \times V_{oc})}$$

4

Onde:

FF: fator de forma [adimensional];

I_{mp} : corrente do MPP [A];

V_{mp} : tensão do MPP [V]

I_{sc} : corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico [A];

V_{oc} : tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico [V].

A Eficiência (η): denomina o parâmetro do quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica, representando a relação entre potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente, sendo representada matematicamente como:

$$\eta = \frac{(I_{mp} \times V_{mp})}{(A \times G)}$$

5

Onde:

η : eficiência do painel [adimensional];

I_{mp} : corrente do MPP [A];

V_{mp} : tensão do MPP [V];

A: área útil do módulo [m^2];

G: irradiância no painel [W/m^2].

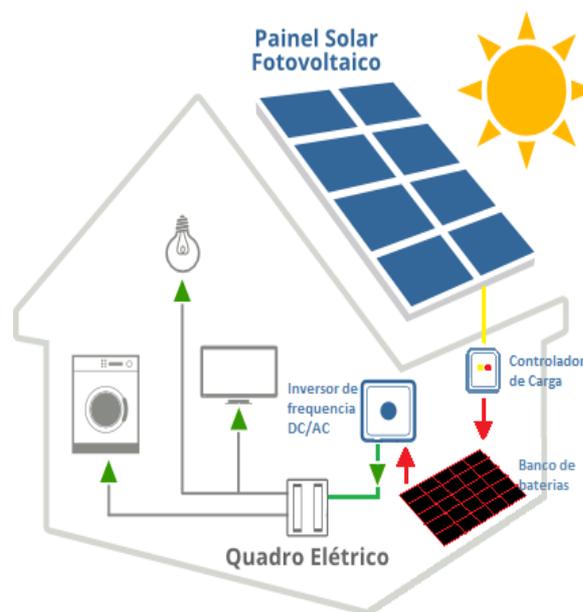
5 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO

5.1 Classificação

Este sistema possibilita duas hipóteses ao usuário: individual ou minirrede. A primeira permite ao usuário geração exclusiva para rede consumidora única, porém, a segunda permite a um grupo pequeno e próximo de usuários disfrutarem desta geração.

Sistemas isolados individuais (Figura 22): podendo ser denominados de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares (SFD), consistem no abastecimento de energia elétrica, por meio de energia solar, a uma única residência ou comércio. Os elementos que delimitam seus parâmetros são: a carga total instalada e o gerador fotovoltaico. Para usufruir destes bens durante o período noturno, é necessário o uso de um acumulador de carga (Bateria), e para proteção da mesma, de um controlador de carga, o que aumenta o rendimento do sistema e prolonga sua vida útil, evitando a carga e descarga excessiva.

Figura 22 - Representação de um sistema de geração de energia elétrica independente



Fonte:

Sistemas isolados em miniredes: são sistemas instalados em locais isolados no Brasil, utilizados para fornecer energia elétrica, os quais não necessitam de meios externos para geração da energia, como por exemplo de um motor a diesel, tendo em vista a emissão de poluentes ao meio ambiente, os nível elevado de ruído, necessidade de manutenção constante, entre outros fatores.

A seguir, representada na figura 23 está toda a estrutura deste sistema para uma potência de 13,5kWp, atendendo a 19 unidades consumidoras na comunidade de Sobrado, no município de Airão, situado no Amazonas. (MANUAL DE ENGENHARIA-FV).

Figura 23 - Sistema Microsistemas Isolados de geração e Distribuição de Energia Elétrica.



Fonte: (Eletrobras.Apresetação na 1ºINOVO FV,2011)

5.2 Componentes do Sistema Fotovoltaico Isolado

Os componentes apresentados na figura 23 fazem parte do sistema de geração, onde cada um tem sua função e seu dimensionamento. Dentre eles:

→ Controlador de Carga:

Tem como objetivo principal em proteger as baterias contra carga e descarga em excesso, contribuindo para o aumento da vida útil. Estes controladores devem

ser projetados devidamente para o tipo de bateria no qual irão ser utilizados dentro do sistema, visto que, cada um tem seus parâmetros de eficiência, de acordo com este componente. Portanto, para dimensioná-lo, de início, arbitra-se qual bateria será utilizada. Em seguida determina-se a tensão e a corrente de operação.

→ Baterias:

No sistema de geração e transmissão de energia elétrica, a função deste componente é fazer o armazenamento de energia elétrica e assegurar a utilização em períodos onde não há geração. Partindo de um conjunto de células eletroquímicas, podem estar conectados em série ou paralelo, armazenando internamente a energia gerada, transformada em energia química, por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução. Existem dois tipos de baterias, as carregáveis e as não carregáveis. Na maioria das vezes, o uso das baterias recarregáveis torna o sistema útil para esta aplicação. Dos mais variáveis tipos de baterias recarregáveis, o mais utilizado é a bateria chumbo-ácido (Pb-ácido). Mesmo com o avanço, no que diz respeito aos tipos de bateria, não se considera economicamente viável seu uso, e na tabela apresentada na figura 24, observam-se os tipos e as principais características de baterias recarregáveis:

Figura 24 - Dados técnicos do catalogo de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente

Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência η_{wh} [%]	Vida útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de operação		Aplicações típicas (exemplos)
							Carga padrão [°C]	Descarga [°C]	
Chumbo ácido ⁷ (Pb-ácido)	H ₂ SO ₄	20-40	50-120	80-90	3-20	250-500	-10 a +40	-15 a +50	Uso estacionário, tração, automotiva
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30-50	100-150	60-70	3-25	300-700	-20 a +50	-45 a +50	Mesmo tipo de aplicações das baterias chumbo-ácido, ferramentas, veículos elétricos
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	KOH	40-90	150-320	80-90	2-5	300-600	0 a +45	-20 a +60	Notebooks, celulares, câmeras fotográficas, veículos elétricos e híbridos, brinquedos
Íon de Lítio (Li-ion, Li-polímero)	Polímeros orgânicos	90-150	230-330	90-95	-	500-1000	0 a +40	-20 a +60	Notebooks, celulares, filmadoras, smart cards, veículos elétricos e híbridos
Bateria alcalina recarregável de Manganês (RAM) ⁸	KOH	70-100	200-300	75-90	-	20-50	-10 a +60	-20 a +50	Produtos de consumo, brinquedos
Cloreto de Níquel e Sódio (NaNiCl)	β'' -Al ₂ O ₃	~100	~150	80-90	-	~1000	+270 a +300	+270 a +300	Veículos elétricos e híbridos (possíveis aplicações estacionárias)

→ Inversor:

Um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada, partindo de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua. Há uma diversidade grande em sua aplicação, a exemplo dos “no-breaks” e acionamentos eletrônicos para motores de indução, entre outros. No caso de sistemas fotovoltaicos, podem-se classificá-los em dois modelos: SFIs (Sistema fotovoltaicos Isolados) e SFCRs (Sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede).

Considerando tratem-se de SFIs, o inversor utilizado para este sistema se denominam autocomutados, sendo chaveados por semicondutores que podem ser postos em estado de condução ou de corte a qualquer ciclo, por meio de um terminal de controle (MANUAL_DE_ENGENHARIA).

6 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

6.1 Classificação

Este sistema de geração de energia opera em paralelismo com a rede elétrica, em locais onde já existe o atendimento de concessionárias de energia. Tem por finalidade reduzir ou eliminar o consumo de energia, podendo até mesmo gerar créditos excedentes, com a respectiva concessionária. Algumas empresas que optam por este meio de geração deixam de ser meros consumidores de energia elétrica e passam a ser produtores.

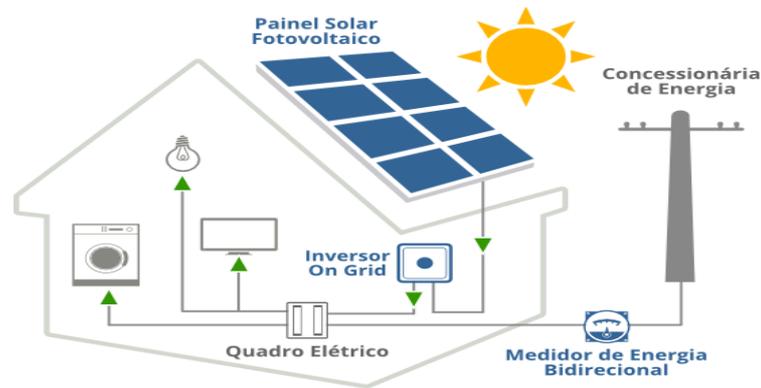
Em 2012 ocorreu um grande feito para este meio de geração, possibilitado pela Aneel, que se tratava da formalização da permissão de acesso às redes públicas de distribuição, aos microgeradores e minigeradores, baseada em fontes renováveis, as quais, além de contemplar a usina fotovoltaica, também contemplam outros meios de fontes renováveis, além de permitirem a produção própria por meio da construção de minissistemas em residências e comércios, o que possibilitou também o comércio de energia, “desafogando” um pouco o sistema de transmissão. Então, podem-se classificar os sistemas de acordo com:

6.1.1 Microgeração: Produção de potencia instalada até 100kW

Esse sistema de geração é instalado em telhados de residências ou empresas, suprimindo o consumo de potência total, proporcionando aos consumidores do sistema, condições de operações favoráveis para a autossuficiência na produção de energia elétrica.

É composto por um conjunto de módulos fotovoltaicos e um inversor específico para este sistema conectado à rede elétrica, bem como por quadros elétricos diferenciados e um medidor de energia bidirecional, conforme figura 25.

Figura 25 - Apresentação do Sistema fotovoltaico e componente conectado a rede



Fonte:

O sistema consiste na captação da energia por módulos instalados no telhado, a qual é injetada internamente no local e, havendo excedente da produção, é exportado para a concessionária local, possibilitando crédito para uso futuro.

6.1.2 Minigeração: Produção de potencia instalada entre 100 kW d 1 MW;

Esse sistema de geração é instalado em telhados de locais maiores, como as indústrias. São construídos para suprir o total fornecimento em condições plenas de operação, proporcionando imunidade a acréscimos futuros na conta de luz e gerando estabilidade no aspecto econômico. Possui a mesma estrutura utilizada na microgeração, com diferença no dimensionamento e quantidade de componentes.

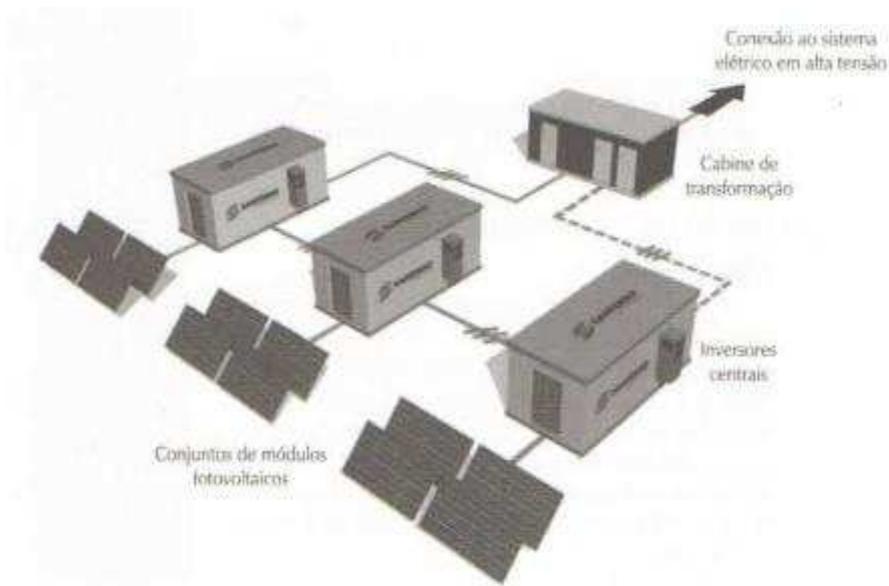
Figura 26 - Galpões de armazenamento utilizando energia fotovoltaica



Fonte:

Este sistema de geração necessita de locais de grande espaço, sendo instalados grandes conjuntos de módulos fotovoltaicos conectados a inversores centrais, interligados a transformadores e linhas de transmissão, conforme figura 27. São semelhantes a usinas hidrelétricas, eólicas, biomassa, entre outras.

Figura 27 - Usina de geração fotovoltaica conectada à rede



Fonte:

6.2 Componentes

Os componentes apresentados na figura 27 fazem parte do sistema de geração, onde cada um tem sua função e seu dimensionamento. A seguir iremos destacar as principais informações, sendo:

→ Inversor:

Este dispositivo eletrônico fornece energia elétrica em corrente alternada (c.a) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c). Para este modelo de geração de energia se utilizam inversores próprios para sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs), os quais se apresentam na tabela a seguir:

Classificação	Descrição
Inversores Centrais	inversores trifasicos de grande porte, com potencia numa faixa que vari de centenas de kWp, utilizados em Usinas fotovoltaica
Inversores Multistring	Inversores trifasicos ou monofasicos dotados de varias entradas para conexões de entradas de string, com potencia de dezenas de kWp
Modulo c.a	modulo fotovoltaico associado a um microinversor

Sua eficiência é expressada pelo conjunto de equações:

$$\eta_{conv} = \frac{P_{c.a.}}{P_{c.c.}}$$

$$\eta_{spmp} = \frac{P_{c.c.}}{P_{PM}}$$

$$\eta_{tot} = \eta_{conv} \times \eta_{spmp}$$

6

Onde:

P c.c (W) – potência instantânea em c.c na entrada do inversor;

P c.a (W) – potência instantânea em c.a na saída do inversor;

P mp (W) – potência instantânea máxima no painel fotovoltaico em condições de temperatura e irradiância vigentes;

N conv(%) – eficiência de conversão do inversor, o que inclui as perdas nos circuitos, transformador, componentes de chaveamento, entre outras perdas;

N spmp(%) – eficiência do inversor no seguimento do ponto de máxima potência;

N tot(%) – eficiência total do inversor;

Estas eficiências podem atingir cerca 98% para circuitos sem transformador e 94% para inversores com transformador, ambos os dados são cedidos pelo fabricante.

→ Medidor Bi Direcional:

É um componente responsável por registrar a energia recebida da distribuidora e a energia solar injetada na rede elétrica. Seu funcionamento se baseia em medir continuamente o consumo de energia elétrica, pois quando o sistema de energia solar produz mais energia do que a demanda necessita, o ponteiro literalmente gira no sentido anti-horário. Só assim é possível garantir a compensação dos créditos na conta de energia.

→ Quadro de Distribuição:

Dentro deste componente deverão se encontrar os seguintes componentes de proteção (PRODIST,2012):

-Chave seccionadora visível e acessível, que acessada garante a desconexão central geradora durante uma manutenção no sistema;

-Elemento de interrupção automático acionada por proteção, para microgeradores e destruidores e por comando e ou proteção;

-Não é necessário relé de proteção específico, mas um sistema eletro-eletrônico que detecte tais anomalias e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção;

-O acessante deve apresentar certificados nacionais ou internacionais, declaração do fabricante de que os equipamentos foram restritamente ensaiados conforme ABNT exige;

6.3 Pontos importantes do Normativo n°482/15

Esta norma possibilitou a regulamentação, permitindo que os produtores de energia elétrica por uso de sistemas conectados à rede pudessem realizar a troca de energia por créditos, como também:

“Art. 2º, III – (ANEEL, 2015) - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Parágrafo único. Para a fonte hídrica, o limite da potência instalada para a minigeração distribuída é 3 MW.”

“Art.4º, §1º-(ANEEL, 2015)- A potência instalada dos participantes do sistema de compensação de energia elétrica fica limitada à carga instalada, no caso de unidade consumidora do grupo B, ou à máxima demanda contratada, para unidade consumidora do grupo”.

“Art.4º, §2º-(ANEEL, 2015)- Caso o consumidor deseje instalar central geradora com potência superior ao limite estabelecido no §1º, deve solicitar aumento da carga instalada, no caso de unidade consumidora do grupo B, ou aumento da demanda contratada, no caso de unidade consumidora do grupo A”.

“Art. 7º, I - (ANEEL, 2015) - deverá ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B, ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A, conforme o caso”.

“Art. 7º, I - (ANEEL, 2015) - II - o consumo de energia elétrica ativa a ser faturado é a energia consumida no mês, deduzidas a energia injetada no mês e eventual excedente de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores, por posto tarifário, quando for o caso”.

“Art. 7º, I - (ANEEL, 2015) - II a – caso a energia injetada seja superior à consumida, o excedente de energia será igual à diferença entre o montante de energia injetada e o montante de energia consumida”.

“Art. 7º, I - (ANEEL, 2015) - II b – quando o excedente de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores for utilizado para compensar o consumo no mês corrente, não se deve debitar do saldo atual o montante de energia equivalente ao custo de disponibilidade, para consumidores do grupo B”.

“Art. 7º, IV - (ANEEL, 2015) - os montantes de energia ativa injetada que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão ser utilizados para compensar o consumo de outras unidades previamente cadastradas para esse fim e atendidas pela mesma distribuidora, cujo titular seja o mesmo da unidade com

sistema de compensação de energia elétrica, ou em unidades consumidoras localizadas em áreas contíguas.”

Outras normas e regulamentos:

Lei nº 9.427/96: Institui a Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica. (http://www.plnalto.gov.br/ccivil_03/leis/L927compliada.htm)

Resolução ANEEL nº 281/99: Estabelece as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. (<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres1999281.pdf>)

Resolução ANEEL nº 371/99: Contratação e comercialização de reserva de capacidade por autoprodutor ou PIE. (<http://www,aneel.gov.br/cedoc/res1999371.pdf>)

Resolução ANEEL nº 248/02: Atualiza procedimentos para cálculos dos limites de repasse dos preços de compra de energia elétrica par tarifas de fornecimento; Fim dos valores normativos diferenciados tornando valor único (VN) representativo de fonte competitiva; O VN poderá ser revisto anualmente ou a critério da ANEEL na ocorrência de mudanças estruturais relevantes na cadeia de produção de energia elétrica devendo considerar aspectos como: (1) Projetos em desenvolvimento, (2) As expansões previstas do parque gerador, (3) a atualização dos custos dos empreendimentos, (4) os contratos bilaterais firmados entre os agentes e por ultimo (5) as politicas e diretrizes do Governo Federal. (<http://www,aneel.gov.br/cedoc/res2002248.pdf>)

Resolução ANEEL nº 248/02: Regulamentação da energia proveniente de empreendimentos de geração distribuída para fins de atendimento as concessionarias, permissionárias ou autorizadas de distribuição. (<http://www,aneel.gov.br/cedoc/bren2005167.pdf>)

Resolução ANEEL n° 248/02: Condições para comercialização de fontes incentivadas no mercado livre com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW; Ser oriunda de PCH's de produção independente ou autoprodução, empreendimentos com potencia menor ou igual a 1000 kW; empreendimentos com base em fontes solar, eólica e biomassa com potencia instalada menor ou igual a 30000 kW; Lastro de até 49% de outras fontes; Contrato de Compra de Energia Incentivada – CCEI; 180 dias de aviso a concessionaria; Livre de acesso respectivos contratos com desconto. (<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006247.pdf>)

Resolução ANEEL n ° 286/07: Aprovação das Regras de Comercialização de Energia Elétrica aplicáveis a fontes incentivadas e consumidores especiais; (<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2007286.pdc>)

6.4 Tarifação e Inflação

Pode-se afirmar que a tarifa de energia é uma variável possível de ser medida em R\$/kWh, onde o preço do kWh varia em função da distribuidora de energia local, do tipo de cliente (Grupo A ou B), e da bandeira de tarifação, também podendo variar de acordo com a inflação.

De maneira geral, a taxa de inflação energética é o aumento no nível de preços da tarifa de energia elétrica em um determinado período.

Em determinadas épocas do ano, onde não há chuva, as usinas hidrelétricas sofrem com a falta d'água, neste momento são postas em ação as usinas termelétricas, o que gera custo elevado para o país, por essa razão entram em vigor as bandeiras tarifárias.

7 Estudo de Caso

Neste tópico será estudado um caso de sistema de geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos interligados à rede. Este estudo é baseado em uma proposta técnica da empresa “Solar Work” Energia Solar, implantando o sistema na edificação “Conveniência Bom Rodar LTDA – ME, localizada em Taubaté, SP.

Figura 28 - Localização e Coordenadas do estabelecimento



Fonte: (Google Earth,2018)

Para análise, são observados os dados da conta de luz, consumo médio mensal e consumos ativos de cada mês, no período de novembro de 2017 até novembro de 2018. A partir disto é possível obter a quantidade de arranjos necessários.

Figura 29 – Tabela demonstrativa de histórico de consumo

Historico de Consumo		
Mês/Ano	Consumo ativo	Valor Total
nov/18	3520	2753,55
out/18	3009	2151,61
set/18	3252	2577,37
ago/18	2525	1960,16
jul/18	2830	2041,04
jun/18	3249	2205,05
mai/18	4291	2844,42
abr/18	4295	2857,08
mar/18	4028	2518,32
fev/18	3722	2529,55
jan/18	4312	2975,91
nov/17	4003	2541,4

Fonte: EDP Bandeirantes (2018)

Figura 30 – Consumo médio

Consumo medio mês/kWh
3620

Fonte: EDP Bandeirantes (2018)

Figura 31 – Consumo médio diário

Consumo medio kWh/ Dias do mês
120,6666667

Fonte: EDP Bandeirantes (2018)

Modulo fotovoltaico: conforme o consumo médio diário, pode-se calcular a potência do microgerador que compõe o sistema, e é expressada matematicamente pela equação 7.

Fórmula da potência do minigerador (Creseb, 2018)

$$P_{FV}(W_p) = \frac{(E / TD)}{HSP_{MA}}$$

Onde:

$P_{FV}(W_p)$ - Potência de pico do painel FV;

E (Wh/dia) - Consumo diário médio anual da edificação ou fração deste;

HSP_{MA} (h) - Média diária anual das HSP incidente no plano do painel FV;

TD (adimensional) - Taxa de desempenho.

7

A taxa de desempenho no Brasil, considerando a ventilação e o não sombreamento é de 70 a 80 % (CRESEB). E a HSP_{MA} (Horas de sol Pleno em media anual) é fornecida por softwares computacionais como SUNDATA, entre outros. Este modelo possui características técnicas próprias, conforme figura 32.

Figura 32 – Características técnicas do Módulo Fotovoltaico

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PAINEL SOLAR CANADIAN 330Wp	
Maxima potencia (Pm)	330Watts
Voltagem Maxima de Potencia (Vm)	37,2 Vcc
Corrente Maxima de Potencia(I _m)	8,88 A
Eficiencia do Painel	16,97%

Fonte: (CANADIAN,2018).

Com estes dados podemos considerar:

$$E(\text{Wh/dia}) = 1200 \text{ Wh/dia}$$

$$HSP_{ma}(h) = 5.5 \text{ horas}$$

$$TD = 70\%$$

Fórmula matemática para cálculo dos painéis

$$P_{FT} = \frac{(1200/0,70)}{5.5} \approx 311 \text{ Wtp}$$

8

Para esta potência podem-se instalar painéis de, no mínimo 311 W_{tp}, no entanto, para este projeto foram fornecidos 95 painéis da marca Canadian de 330w, somando um total para geração do arranjo de 31,35 kW_p, quase zerando a conta média mensal apresentada na Figura 30.

Para o dimensionamento do inversor, deve-se levar em consideração a potência do gerador fotovoltaico e as características do local instalado, como por exemplo: inversor central, inversor descentralizado, micro-inversor, instalação interna ou externa entre outras.

Devido à redução de potência com o aumento da temperatura ou sombreamento, costuma-se dimensionar o gerador FV com potência nominal superior a do inversor. Contudo, para alguns inversores em situações onde a potência gerada pelo painel FV ultrapassa a potência máxima de entrada do equipamento, é possível o ajuste do SPPM para limitar a potência de entrada desprezando o restante. Seu dimensionamento pode ser representado matematicamente pela equação abaixo, que é a Representação Matemática do Dimensionamento do Inversor:

$$FDI = \frac{P_{Nca}(W)}{P_{FV}(Wp)}$$

onde:

FDI (adimensional) - Fator de dimensionamento do inversor;

P_{Nca} (W) - Potência nominal em corrente alternada do inversor ;

P_{FV} (W_p) - Potência pico do painel fotovoltaico.

Para este caso, o inversor proposto pela empresa foi do modelo Fronius Eco 27,380v, com transformador para tensão desejada no estabelecimento de seguintes características, conforme demonstra Figura 33.

Figura 33 - Dados de entrada e saída sobre o inversor Fronius

DADOS DE ENTRADA	
Tensão máxima de entrada	1000 Vcc
Faixa de tensão do MPP	420 Vcc a 800Vcc
Tensão mínima de entrada	580 Vcc
DADOS DE SAIDA	
Potencia nominal de saída	27000W
Max. Corrente de Saída	39 A
Frequência de saída	: 50 Hz / 60 HZ (45 - 65 Hz)

Fonte: (FRONIUS, 2018)

Então, conforme a equação abaixo, podemos considerar:

$P_{Nca}(W)$: 27000

$P_{FT}(Wp)$:330

$$FDI = \frac{27000}{330} \approx 81,82$$

10

Resulta um total de 81,82% estando dentro da faixa que os fabricantes instaladores permitem (CRESESB). Além destes componentes, possui alguns itens para fixação mecânica, tais como:

- Estrutura em alumínio para telhado inclinado;
- Material para fixação dos painéis não oxidáveis;

E também matérias de interligações elétricas:

- Cabos elétricos de 0,6/1kV para interligação de módulos para módulos, e também módulos para entrada do inversor;
- String Box e equipamentos de proteção elétrica;

7.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados foram baseados nos dados fornecidos por uma conta de energia elétrica de um estabelecimento comercial da cidade de Taubaté.

Foi simulado por meio de um software online, chamado de américa solar e obteve-se uma estimativa do potencial total do sistema, assim como da área de ocupação dos módulos solares:

Figura 34 - Características dos módulos fotovoltaicos

Características do Sistema Fotovoltaico		?
Capacidade do seu sistema (Potência)		27,0 kWp
Área ocupada pelo seu sistema*		de 186 a 229 m ²
Inclinação aproximada dos módulos		24°
Rendimento anual		1.398 kWh/kWp
Emissões de CO ₂ evitadas		11.040 kg/a
Como seria seu consumo elétrico anual		
Consumo Total		43,04 MWh
Seu consumo da rede elétrica		6,59 MWh
Sua geração fotovoltaica		37,76 MWh

Fonte: (America solar, 2018)

Figura 35 - Local da possível instalação do sistema.

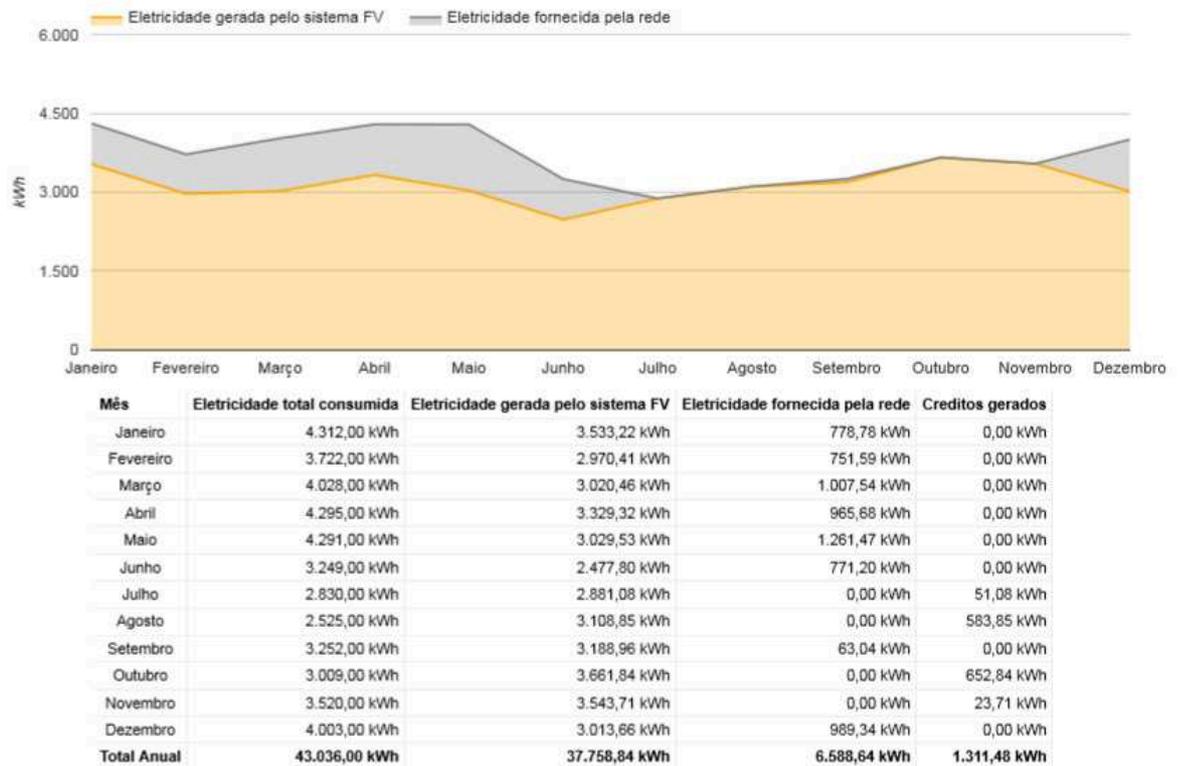


Fonte: google maps (2018)

O gráfico abaixo simula o consumo elétrico com um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, enquanto a área amarela mostra o quanto seria gerado pelo seu sistema fotovoltaico.

A soma das áreas cinza e amarela corresponde ao total consumido, conforme os valores obtidos pela conta de energia elétrica. A geração solar é estimada segundo a radiação média mensal da cidade de Taubaté e o tamanho do sistema simulado.

Figura 36 - Consumo elétrico detalhado



Fonte:

8 CONCLUSÃO

Por meio da pesquisa feita ao longo do trabalho, obtém-se uma visão do conjunto das informações teóricas sobre o funcionamento e as características da energia solar, assim como sistemas fotovoltaicos mais utilizados atualmente. Este trabalho proporciona a disseminação dos benefícios da energia solar como um fator sócio econômico de benefícios para população em geral e para o meio ambiente.

Os resultados das simulações obtidas por meio do software online “América do Sol” demonstraram uma estimativa de valores aproximados, possibilitando a sua comparação com uma proposta emitida por uma empresa do ramo de energia solar e apresentando resultados positivos.

Visto que os componentes do sistema ainda tendem a melhorar, tanto em eficiência, como em economia, seus preços ainda são elevados, tendo em vista que a matéria prima ainda precisa ser importada.

No entanto, a utilização deste sistema, por tratar-se de energia limpa e um meio de investimento, pode-se considerar uma ajuda direta ao meio ambiente. Por sua vez, seu uso possibilitará a diminuição considerável da demanda de energia das concessionárias. Se cada cidadão pensar no futuro e decidir pelo uso racional da energia, tem-se uma conta de energia elétrica relativamente baixa, sem bandeiras tarifárias, diminuindo-se o uso de usinas termoelétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CRESESB – Centro de Referência para energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia solar- Princípios e aplicação.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2011.

ELECTRÓNICA. **Instalação: Sistemas Solares Fotovoltaicos.** Disponível em: < <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/273/204/>>. Acesso em: 11 jan. 2012.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. **Handbook of photovoltaic science and engineering.** Instituto de Energía Solar, Universidade Politécnica de Madri. Madri: Wiley, 2. ed., 2011.

SOLARTERRA. **Energias alternativas.**
Disponível em: <<http://www.solarterra.com.br>>. Acesso em: 2 dez. 2010.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres.** Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 32, 2000.

Energyshop. **Inversor Fronius**
Disponível em <<https://www.energyshop.com.br/inversor-fronius-eco-27-0-3-s-27-000w-380v>>

<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-330wp-canadian-csi-cs6u-330wp.html>

ANEXO A – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Autorizo a cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem a prévia autorização específica do autor.

Taubaté, Dezembro de 2018.

Matheus dos Santos Machado