Lucas Matos de Mello

**Análise da capacidade de conversão
fotovoltaica de três tecnologias de módulos
fotovoltaicos sob diferentes condições
solarimétricas e de sombreamento**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador : Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-Orientador: Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

Agradecimentos

À minha família, pelo apoio e amor incondicional, e aos meus amigos.

Aos professores orientadores Carlos Roberto Hall Barbosa e Maurício Nogueira Frota pelo apoio, atenção e confiança passados durante o projeto.

À *Light Serviços de Eletricidade SA* pelo acesso à usina do Museu Light da Energia e sua base de dados.

Resumo

Análise da capacidade de conversão fotovoltaica de três tecnologias de módulos fotovoltaicos sob diferentes condições solarimétricas e de sombreamento

Com o crescente aumento da demanda por energia elétrica, a opção pelo uso de energias alternativas ganha atratividade, dentre elas a tecnologia fotovoltaica (conversão da radiação solar em eletricidade). A exemplo das experiências bem sucedidas na Europa, Ásia e Estados Unidos, o uso da conversão fotovoltaica tem crescido na América do Sul. O Brasil, em particular pela sua posição geográfica, oferece excelentes condições solarimétricas favorecendo a aplicação dessa tecnologia alternativa limpa, sustentável e renovável.

Este trabalho desenvolve uma análise comparativa de três tecnologias de módulos fotovoltaicos (substratos amorfo, mono e policristalino) que integram uma usina fotovoltaica instalada por pesquisadores da PUC-Rio no telhado do Museu Light da Energia pertencente à concessionária Light Serviços de Eletricidade SA. Beneficiando-se de um sistema inteligente de conversores CC-CC, a usina permite acesso remoto individualizado a cada módulo fotovoltaico, assim, permitindo conveniente acesso aos parâmetros elétricos e meteorológicos da instalação. Como o sistema atualmente opera em condições adversas (painéis fotovoltaicos voltados para o sul geográfico e expostos a indesejáveis sombreamentos), o estudo compara o desempenho dessas três tecnologias na condição adversa hoje instalada e simula o ganho de conversão fotovoltaica que resultaria se os painéis estivessem instalados em condições ótimas de operação.

Palavras-chave

energia solar; tecnologia fotovoltaica; sustentabilidade; módulos fotovoltaicos; sombreamento.

Abstract

Analysis of three different photovoltaic technologies under different solar conditions and shading

With the increasing demand for electricity, photovoltaic energy takes a big step in the alternative energy industry. After the success in Europe, Asia and United States, the market in South America is in an exponential growth. Brazil has excellent solar conditions for this clean, sustainable and renewable energy.

In the present work, a comparative analysis of three different types of photovoltaic technology (Thin Film, Monocrystalline and Polycrystalline) was performed. The installation is located in the Energy Museum, part of the Light Serviços de Eletricidade S.A., Rio de Janeiro, Brazil. The installation is equipped with DC-DC converter, by Tigo Energy, which provides online access to the database of each module individually.

The system is now operating under non ideal conditions, such as shading and wrong azimuth angle. The proposal of this work is to analyze the performance of this solar system and estimate its performance in ideal conditions.

Keywords

solar energy; photovoltaic technologies; sustainability; photovoltaic panels; shading.

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Objetivo	10
1.2	Metodologia	10
1.3	Organização do texto	10
2	Revisão bibliográfica	12
3	O recurso solar	13
3.1	Influência geográfica e sazonal	13
3.2	Influência do sombreamento	20
4	Efeito Fotovoltaico e Tecnologias	22
4.1	Monocristalino	23
4.2	Policristalino	24
4.3	Filme Fino - Silício Amorfo	25
5	Conversores CC-CC	27
6	Produção energética - Museu da Light, RJ	29
6.1	Produção energética arranjo monocristalino	34
6.2	Produção energética arranjo policristalino	34
6.3	Produção energética arranjo silício amorfo	34
6.4	Comparação da produção das três tecnologias	36
7	Produção sob condições ideais - Museu da Light, RJ	38
8	Conclusões	45

Lista de figuras

3.1	Movimento de rotação e translação da Terra	14
3.2	Quanto maior o ângulo zenital, maior a massa de ar que os raios solares percorrem.[Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	15
3.3	Declinação solar. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	16
3.4	Altura solar. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	16
3.5	Ângulo azimutal. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	17
3.6	Exemplo de um módulo fotovoltaico com a face orientada para o leste. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	18
3.7	Exemplo de um módulo fotovoltaico com a face orientada para o norte. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	19
3.8	Inclinação com ângulo ótimo. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]	19
3.9	Não há estrangulamento de corrente	21
3.10	Há estrangulamento de corrente	21
4.1	O efeito fotovoltaico. [Fonte: CRESESB]	23
4.2	Lingote de silício monocristalino. [Fonte: Portal Solar]	24
4.3	Célula de silício monocristalino. [Fonte: Portal Solar]	24
4.4	Exemplo de célula policristalina	25
4.5	Camadas de um módulo fotovoltaico mono ou policristalino	25
4.6	Exemplo de módulo de filme fino. [Fonte: Portal Solar]	26
5.1	Exemplo de como a tecnologia da Tigo Energy pode ajudar a prevenir e monitorar o sistema. [Fonte: Adaptado de Tigo Energy]	27
5.2	Exemplo de funcionamento da tecnologia Tigo Energy. [Fonte: Adaptado de Tigo Energy]	28
6.1	Irradiação no Museu da Energia da Light, Centro, Rio de Janeiro. [Fonte: SWERA]	29
6.2	Acompanhamento em tempo real da produção. Nesta imagem, observa-se a produção de 14,45 kW no dia 25/11/2016, 12:00. [Fonte: Adaptado de Tigo Energy]	30
6.3	De baixo para cima: solstício de verão, equinócio de outono, solstício de inverno e equinócio de primavera. [Fonte: SunSurveyor]	31
6.4	Fontes de sombreamento que afetam o arranjo fotovoltaico.	31
6.5	Conversão fotovoltaica: 5,21 kW; 8 h 18 min; 27/11/2016	32
6.6	Conversão fotovoltaica: 14,58 kW; 12 h 52 min; 27/11/2016	32
6.7	Conversão fotovoltaica: 13,38 kW; 13 h 40 min; 27/11/2016	33
6.8	Conversão fotovoltaica: 10,76 kW; 14 h 45 min; 27/11/2016	33
6.9	Trajetória solar no dia 27/11/2016. [Fonte: SunSurveyor]	33
6.10	Produção energética dos módulos de silício monocristalino.	34

6.11	Produção energética dos módulos de silício policristalino.	35
6.12	Produção energética dos módulos de filme fino de silício amorfo.	35
6.13	Conversão fotovoltaica geral em escala de cores. Quanto mais intensa a tonalidade de verde, maior a conversão. [Fonte: adaptado Tigo Energy]	35
6.14	Produção energética das três tecnologias no período de dezembro/2015 a novembro/2016	36
6.15	Comparação real das três tecnologias considerando todas com a mesma potência instalada	37
7.1	Produção energética do arranjo de silício amorfo com ganho devido à orientação dos módulos.	40
7.2	Produção energética do arranjo policristalino com ganho devido à orientação dos módulos.	41
7.3	Produção energética do arranjo monocristalino com ganho devido a orientação dos módulos.	41
7.4	Produção em um cenário ideal otimizado do arranjo de silício amorfo.	42
7.5	Produção em um cenário ideal otimizado do arranjo de silício policristalino.	43
7.6	Produção em um cenário ideal otimizado do arranjo de silício monocristalino.	44

Lista de tabelas

4.1	Dados médios dos três tipos de tecnologia utilizados no experimento	26
6.1	Irradiação Mensal Museu da Energia - Light, RJ [Fonte: SWERA]	30
7.1	Potência real gerada em kWh no dia 28/11/2016	39
7.2	Potência gerada com ausência de sombreamento em kWh no dia 28/11/2016	39
7.3	Ganho em irradiação [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$] devido à orientação mais indicada, com azimute = -20° .	40
7.4	Produção ideal filme fino com o ganho pela orientação e ausência de sombreamento.	42
7.5	Produção ideal policristalino com o ganho pela orientação e ausência de sombreamento	43
7.6	Produção ideal monocristalino com o ganho pela orientação e ausência de sombreamento	44

1

Introdução

Em 2015, a energia solar fotovoltaica quebrou diversos recordes e ainda continua sua expansão. Após o crescimento limitado em 2014, o mercado entrou de volta nos trilhos de maneira global, com quase todos os continentes contribuindo com essa fonte de energia que é a mais promissora para o desenvolvimento e futuro do planeta. Graças à contínua queda do valor para se obter um sistema solar fotovoltaico e também às políticas reguladoras, a tecnologia vem ganhando cada vez mais espaço.

Segundo dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em outubro de 2016 foi alcançada a marca de 6017 conexões acumuladas de geração distribuída, sendo que, deste valor, 5929 são de fonte solar fotovoltaica. Somente entre 2015 e 2016 houve um aumento de 300% no números de conexões.

A geração distribuída conectada à rede de energia elétrica é uma boa opção para diversificação da matriz energética brasileira, a qual é predominantemente hídrica e térmica. Uma vantagem é o fato da geração de energia ser diretamente no ponto de consumo, evitando perdas de carga que são comuns ao se fazer a energia percorrer grandes distâncias do ponto de geração até a unidade consumidora.

A COP21 (Conferencia das Nações Unidas sobre Mudança Climática), que ocorreu no final de 2015, buscou alcançar um novo acordo internacional sobre o clima, com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo dos 2 °C. Neste contexto, e mesmo fora dele, as fontes de energia alternativas, limpas e renováveis são muito bem vindas.

Em face a essa grande mudança na matriz energética atualmente em curso, pode-se observar a tecnologia fotovoltaica em constante evolução, visando a uma melhor eficiência de maneira geral. Atualmente, as três principais tecnologias de módulos fotovoltaicos comerciais, cada uma possuindo vantagens e desvantagens, são:

- Monocristalino: como o nome sugere, são feitas a partir de um só cristal de silício e alcançam eficiências de 15 a 18%;
- Policristalino: possui mais de um cristal em sua composição e alcança eficiência de 13 a 15%, ligeiramente mais baixa quando comparada ao monocristalino;

- Filme Fino: tecnologia mais recente, surgiu após a estabilização dos módulos cristalinos. Consomem menos matéria prima, logo, são mais baratas e alcançam uma eficiência de 5 a 8% (silício amorfo).

Independente do tipo de tecnologia utilizada, é necessário conhecer alguns detalhes na hora que for feita uma instalação para que se possa obter uma melhor eficiência do arranjo fotovoltaico. Por exemplo a orientação mais indicada, qual inclinação dos módulos e como o sombreamento afeta o sistema.

1.1

Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver a análise crítica do desempenho do sistema fotovoltaico instalado no Museu da Energia da Light, Centro/RJ. A instalação conta com três tecnologias distintas de módulos (filme fino amorfo, monocristalino e policristalino), hoje instalado em condições adversas de operação (orientação não ideal voltada para o sul geográfico, exposta a sombreamento parcial), entretanto assistidos por uma tecnologia inovadora que faz uso de conversores CC-CC, que permitem a operação do Sistema em condições próximas à de potência máxima, assim minimizando perdas por sombreamento nos módulos. A análise inclui, também, uma avaliação da capacidade de conversão fotovoltaica caso o sistema tivesse sido instalado em observância às recomendações ideais de operação.

1.2

Metodologia

Fazendo uso do acesso remoto convenientemente permitido pelo Sistema inteligente disponível, dados foram coletados em tempo real, em diferentes horários associados a distintas condições de operação (variação da intensidade da incidência de radiação e para diferentes graus de sombreamento). Os dados da conversão fotovoltaica para cada painel foram comparados com dados meteorológicos igualmente disponíveis remotamente por meio de um supervisor específico que compartilha dados de radiação solarimétrica, velocidade de vento, temperatura e pressão ambiente. Na ausência de uma câmara externa, o mapeamento do sombreamento imposto por edificações e árvores que circundam a instalação foi realizado *in loco* ao longo do dia.

1.3

Organização do texto

O presente texto compreende, além desta breve introdução, uma revisão bibliográfica focada na análise do comportamento de cada painel fotovoltaico,

conforme discutido no capítulo 2. O capítulo 3 descreve as condições solari-métricas incidentes no Brasil. A apresentação dos tipos e características dos módulos fotovoltaicos presentes no experimento constitui objeto do capítulo 4. O capítulo 5 apresenta os conversores CC-CC, responsáveis por monitorar e otimizar o sistema. A quantidade de energia, que resulta da conversão fotovoltaica, produzida pela usina instalada no Museu da Energia da Light é apresentada no capítulo 6. O capítulo 7 concentra-se na estimativa da conversão fotovoltaica que resultaria do Sistema caso este operasse sob condições ideais. Por fim, o capítulo 8 apresenta as principais conclusões que resultam deste trabalho.

2

Revisão bibliográfica

A energia solar fotovoltaica é sem dúvida a energia do futuro. Por ser uma fonte de energia relativamente nova (porém já muito utilizada globalmente), a tecnologia a ela associada está em constante evolução, tanto no que concerne aos equipamentos utilizados, componentes e materiais em si, quanto à adequação às normas nacionais e internacionais aplicáveis, bem como na observância aos cuidados que se fazem necessários para proteger o meio ambiente.

Colonia (2015) realizou um estudo sobre o uso de conversores CC-CC (corrente contínua - corrente contínua) para avaliar o ganho de eficiência que resulta da conversão fotovoltaica e a influência do sombreamento, trabalho que se beneficiou da usina-laboratório instalada no Museu Light da Energia. Para isso, desenvolveu uma modelagem matemática com o intuito de avaliar o desempenho das diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos em uso (monocristalino, policristalino e filme fino) sob as condições adversas de operação (exposição ao sombreamento parcial).

Sharma et al. (2013) compararam o desempenho de três tecnologias distintas de módulos fotovoltaicos sob as mesmas condições solarimétricas no Centro de Energia Solar, Gurgaon, Índia: HIT (Heterojunção de Silício), silício amorfo e silício policristalino. Dentre os resultados obtidos, concluiu que o arranjo de silício amorfo teve um desempenho melhor que o de silício policristalino, intensificando a conversão fotovoltaica no período de verão e reduzindo no de inverno.

Um estudo similar foi realizado em Málaga, Espanha, por Cañete et al. (2013). Nesse trabalho foram utilizadas tecnologias de silício amorfo e policristalino, dentre outras. O resultado observado foi o mesmo que Sharma et al. (2013). Observou-se uma variação sazonal no desempenho dos módulos de silício amorfo, não observada para no caso do silício policristalino. Ikisawa et al. (1998) discutem que os resultados obtidos são em função de dois aspectos relevantes: mudança da temperatura dos módulos e mudança observada no espectro dos raios solares incidentes durante o ano.

3

O recurso solar

O Sol é a principal fonte de energia do planeta Terra e pode-se usá-lo para produzir eletricidade através do efeito fotovoltaico, que consiste na conversão direta da luz solar em energia elétrica.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), se todo o potencial de geração de energia solar nas residências e comércios brasileiros fosse aproveitado com sistemas fotovoltaicos, o país produziria cerca de 283,5 milhões de MWh por ano. Atualmente, o consumo doméstico de eletricidade é aproximadamente 124,8 milhões de MWh por ano, ou seja, a energia solar fotovoltaica seria capaz de atender a duas vezes o atual consumo. Porém, atualmente a energia solar corresponde a apenas 0,02% da matriz energética nacional.

3.1

Influência geográfica e sazonal

A quantidade de energia que um sistema solar fotovoltaico é capaz de produzir, através da conversão fotovoltaica, depende da insolação do local onde é instalado. As regiões Nordeste e Centro-Oeste são as que apresentam melhores condições no país, entretanto, as demais regiões não ficam muito atrás. Por exemplo, o potencial de conversão fotovoltaica no Brasil é tão grande que o pior cenário de conversão no Brasil é melhor que o melhor cenário de conversão na Alemanha, país onde a tecnologia é amplamente disseminada.

A conversão fotovoltaica é fortemente influenciada pela localização geográfica e pelas estações do ano devido aos movimentos da Terra, declinação e altura solar, massa de ar e inclinação dos módulos fotovoltaicos, entre outros, fatores esses que estão interligados entre si e serão apresentados a seguir.

3.1.1

Movimentos da Terra

A Terra descreve uma trajetória elíptica em torno do Sol, conhecida como translação, sendo que um trajeto completo tem duração de 365 dias e 6 horas. Além da translação, há também o movimento de rotação, que é o giro em torno do próprio eixo, sendo que uma rotação completa dura 24 horas. O eixo de rotação, que é o eixo dos polos norte e sul geográficos, possui uma inclinação de aproximadamente 23,5° em relação ao eixo do movimento de translação.

Os movimentos citados influenciam na conversão fotovoltaica, pois dão origem às estações do ano. Levando em consideração em que ponto do globo terrestre se está localizado, o Sol estará mais próximo ou afastado, e, também, a duração do dia pode ser maior (no verão) ou menor (no inverno). A duração dos dias e as diferentes massas de ar percorridas pelos raios solares são fatores que influenciam consideravelmente a geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico, pois eles afetam a quantidade de energia solar recebida em cada região do planeta.

Figura 3.1: Movimento de rotação e translação da Terra

3.1.2

Massa de Ar

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar sofre diversas alterações. A espessura da camada de ar e a composição da atmosfera, incluindo o ar e elementos flutuantes, influenciam na característica da radiação solar que chega ao solo.

A espessura da camada de ar que os raios solares devem atravessar até chegar ao solo depende do ângulo zenital do Sol, que é o ângulo formado entre uma linha imaginária perpendicular ao solo (zênite) e o Sol. A referida espessura muda a cada dia e hora do ano. Por este motivo, a distribuição do espectro de radiação solar depende da localização geográfica, hora do dia, dia do ano, condições climáticas, composição da atmosfera, altitude, dentre outros fatores, afetando a quantidade de energia solar recebida para conversão fotovoltaica.

Figura 3.2: Quanto maior o ângulo zenital, maior a massa de ar que os raios solares percorrem.[Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

3.1.3 Declinação e Altura Solar

O ângulo formado entre os raios solares e o plano do equador é conhecido como declinação solar. Ele é fruto da inclinação do eixo de rotação e varia ao longo do ano segundo a posição do Sol. Nos solstícios o ângulo de declinação é máximo e nos equinócios, mínimo (zero), o que significa que os raios solares incidem paralelamente ao plano do equador.

Em virtude da existência do ângulo de declinação, o Sol nasce e se põe em diversos pontos do céu e percorre um curso com inclinação diferente a cada dia do ano. Um espectador que mira para o norte observa uma trajetória circular do Sol no céu. A altura do Sol no céu é maior nos dias de verão, ou seja, nessa época os raios solares incidem sobre o espectador com um ângulo zenital reduzido, cruzando uma massa de ar menor. No inverno a altura solar é menor, assim, o espectador observa o Sol mais próximo à linha do horizonte. Neste caso, o ângulo zenital e a massa de ar percorrida são maiores. Esses fatores também afetam a quantidade de energia solar recebida, o que influencia a conversão fotovoltaica em um determinado ponto terrestre.

Figura 3.3: Declinação solar. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

Figura 3.4: Altura solar. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

3.1.4 Orientação e Inclinação

Todos os fatores até então apresentados são levados em consideração ao se definir uma orientação e inclinação para os módulos fotovoltaicos, de modo a maximizar a conversão fotovoltaica e consequentemente produzir mais energia elétrica.

Para compreender a influência desses dois fatores (orientação e inclinação), deve-se ter em mente que os raios solares são ondas eletromagnéticas paralelas entre si e que chegam a Terra em linha reta. Em cada ponto do globo terrestre a radiação incide no solo com uma inclinação diferente que varia ao longo do ano.

O ângulo azimutal é o ângulo compreendido entre o norte geográfico e os raios solares. Um espectador localizado no hemisfério sul, abaixo da linha do equador, e olhando para o norte geográfico, pode observar diferentes ângulos azimutais do Sol, ao nascer no lado direito (leste) até se pôr no lado esquerdo (oeste). Vale ressaltar que para observadores no hemisfério sul, o ângulo azimutal é medido em relação ao norte geográfico, ao contrário de um observador localizado no hemisfério norte, onde o azimuth é medido em relação ao sul geográfico. Isso ocorre devido aos fatores anteriormente apresentados, como inclinação e movimento da Terra.

Figura 3.5: Ângulo azimutal. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

Para se obter um melhor aproveitamento da irradiação incidente, deve-se levar em consideração o movimento diário do Sol. Um módulo com sua face voltada para o leste aproveitaria bem o Sol da manhã, porém produziria muito pouco no período da tarde, o contrário servindo para o caso da face voltada para o oeste.

Figura 3.6: Exemplo de um módulo fotovoltaico com a face orientada para o leste. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

O cenário ideal é conseguir fazer com que os raios solares incidam no módulo fotovoltaico perpendicularmente durante todo o período solar, o que é possível com um sistema de rastreamento solar (conhecido como *Tracker*). Porém o foco do presente trabalho é em sistemas fixos. No caso de arranjos fotovoltaicos fixos, deve-se posicionar os módulos com sua face voltada para o norte geográfico (caso esteja localizado no hemisfério sul), a fim de se conseguir um melhor aproveitamento diário das horas de sol, pois assim, durante todo o tempo os módulos terão raios solares incidindo sobre sua superfície.

Além disso, o modo como os raios solares incidem sobre a superfície terrestre varia ao longo do ano conforme a posição do Sol muda no céu nas diferentes estações do ano. Logo, deve ser feita a escolha ideal da inclinação dos módulos para que também seja obtido um melhor aproveitamento. A escolha incorreta da inclinação implica em uma redução da captação dos raios solares e da conversão fotovoltaica. Quanto mais horizontalmente o módulo for fixado, melhor será o aproveitamento nos meses de verão e pior no inverno. Quanto mais na vertical, o contrário. Isso ocorre porque no verão a altura solar é maior e no inverno menor. O ideal é conseguir um ângulo ótimo que favoreça uma conversão fotovoltaica média anual maior. Uma regra simples para se escolher o ângulo de instalação, a qual é adotada por muitos fabricantes, é por meio de uma tabela que leva em consideração a latitude do local. Porém, quando a instalação for feita em uma residência, por questões estruturais o ideal é seguir a inclinação do telhado no qual o arranjo fotovoltaico será instalado.

Figura 3.7: Exemplo de um módulo fotovoltaico com a face orientada para o norte. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

Figura 3.8: Inclinação com ângulo ótimo. [Fonte: Adaptado de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações]

3.2

Influência do sombreamento

O sombreamento pode afetar a eficiência da conversão solar fotovoltaica de diferentes modos, seja o sombreamento parcial, total ou causado por nuvens. As nuvens afetam a produção de energia por conversão fotovoltaica porque, dos raios solares que passam por elas, uma parcela é refletida e a outra é dispersada, ou seja, uma quantidade menor de radiação chega ao solo.

Um módulo fotovoltaico sujeito a um sombreamento causado por um objeto pode deixar de produzir energia mesmo se apenas uma das células estiver recebendo pouca luz, já que a intensidade da corrente elétrica de uma célula é proporcional à quantidade de radiação que incide sobre ela.

Como nos módulos as células estão conectadas em série, elas dependem uma das outras para produzir corrente. O efeito do sombreamento em uma célula impede a passagem de corrente das outras. O mesmo ocorre com os módulos quando estão conectados em série, se um dos módulos do arranjo estiver recebendo menos luz que os demais, a corrente elétrica de todo o arranjo é reduzida. Este empecilho foi solucionado pela tecnologia inovadora da Tigo Energy e será apresentada no capítulo 5.

A orientação dos módulos (posição retrato ou paisagem) também influencia quando há a presença de sombreamento parcial. Lazaroiu et al (2013) compararam diferentes casos de sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos. Seu experimento observou os efeitos do sombreamento vertical e horizontal em módulos orientados verticalmente. Foi concluído que, em módulos posicionados verticalmente, a sombra parcial vertical percorrendo o módulo horizontalmente é menos prejudicial que a uma sombra parcial horizontal que percorre o módulo verticalmente. Isso ocorre porque no primeiro caso não há o estrangulamento do fluxo de corrente no módulo, o que ocorre no segundo caso.

Figura 3.9: Não há estrangulamento de corrente

Figura 3.10: Há estrangulamento de corrente

4

Efeito Fotovoltaico e Tecnologias

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839, e confundido com o efeito fotoelétrico. O efeito fotoelétrico foi confirmado por Heinrich Hertz em 1887 e posteriormente explicado por Albert Einstein em 1905.

O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto à radiação eletromagnética de frequência alta o suficiente para que os fótons energizem os elétrons do material. A frequência exata para a liberação dos elétrons depende do material.

Já o efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão da luz em eletricidade. Entre dois extremos de uma célula fotovoltaica composta por materiais semicondutores ocorre o surgimento de uma tensão elétrica quando exposta a luz visível. Os dois efeitos estão relacionados, porém, são processos distintos.

Uma célula fotovoltaica é composta comumente pela junção de duas camadas de material semicondutor dopado, uma do tipo P, que apresenta falta de elétrons, e outra do tipo N, que possui excesso de elétrons. Devido à desigualdade na concentração de elétrons nas duas camadas, quando elas são postas em contato uma com a outra, formando a chamada Junção PN, os elétrons da camada N fluem para a camada P afim de ocuparem os espaços vazios em sua estrutura atômica, formando um campo elétrico no interior da estrutura da célula, também chamada de barreira de potencial, o que faz com que os elétrons não consigam mais fluir de uma camada para outra enquanto a célula não é iluminada. O contato com a luz promove energia suficiente para fazer com que os elétrons vençam a barreira de potencial e saltem da camada N para a camada P. Ao se conectar as duas camadas externamente, a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para a outra é aproveitada.

Figura 4.1: O efeito fotovoltaico. [Fonte: CRESESB]

Existem atualmente diversas tecnologias para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. Basicamente o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica é o mesmo. A seguir serão apresentados detalhes específicos de cada uma das três tecnologias de módulos para conversão fotovoltaica presentes na usina laboratório do Museu Light da Energia da concessionária de energia Light Serviços de Eletricidade S/A.

4.1

Monocristalino

Para a fabricação de células monocristalinas, blocos de silício ultrapuro (extraído do quartzo) passam pelo processo de Czochralski. Esse método consiste em derreter o silício em elevadas temperaturas, em torno de 1420 °C, e depois orientar sua solidificação para se formar um único cristal de silício com estrutura molecular homogênea.

Após a formação do monocristal, ele é fatiado dando origem a finas lâminas de silício puro chamadas de *wafers*. Essas lâminas possuem espessura de aproximadamente 0,3 mm e ainda não apresentam as propriedades de uma célula fotovoltaica. São tratadas quimicamente originando as camadas P e N, que constituem a base de seu funcionamento, e em seguida é adicionada uma camada de material antirreflexivo e contatos frontais e traseiros.

As células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas comercialmente. Sua eficiência varia entre 15 e 18%, porém, o seu custo de fabricação é mais elevado quando comparado as outras tecnologias.

Figura 4.2: Lingote de silício monocristalino. [Fonte: Portal Solar]

Figura 4.3: Célula de silício monocristalino. [Fonte: Portal Solar]

4.2 Policristalino

O processo de fabricação das células policristalinas é semelhante ao descrito anteriormente para o caso das células monocristalinas. Por não haver a preocupação da formação de um único cristal com uma só orientação, torna-se um processo mais barato, mas consequentemente o resultado são células com uma menor eficiência, a qual varia entre 13 e 15%.

O bloco de silício policristalino, ou seja, que possui mais de um cristal, é fatiado em finas lâminas (*wafers*), posteriormente tratadas quimicamente para adquirirem as propriedades fotovoltaicas. Por fim, são adicionadas as camadas antirreflexivas e os contatos frontais e traseiros.

Figura 4.4: Exemplo de célula policristalina

Figura 4.5: Camadas de um módulo fotovoltaico mono ou policristalino

4.3

Filme Fino - Silício Amorfo

A tecnologia de filme fino é mais recente e surgiu após a tecnologia cristalina ter se estabelecido no mercado. Utiliza muito menos matéria prima e energia no processo de fabricação e não possui restrições de tamanho e forma. É fabricada por meio da deposição de finas camadas de materiais sobre uma base que pode ser rígida ou flexível. Assim, não há distinção entre célula e módulo fotovoltaico no caso da tecnologia de filme fino, pois eles funcionam como uma grande e única célula que é fabricada na dimensão do módulo.

Apesar do baixo custo de produção, é necessária uma maior área para se conseguir a mesma conversão fotovoltaica que os módulos cristalinos são capazes.

Outro aspecto interessante com relação a esse tipo de tecnologia é que ela sofre menos com as perdas causadas pelo sombreamento parcial, por se tratar de uma única célula e não uma união de células em série (caso das tecnologias mono e policristalinas), e também devido ao seu coeficiente de perda por temperatura ser menor. A eficiência dos módulos fotovoltaicos de silício amorfo varia entre 5 e 8%.

Figura 4.6: Exemplo de módulo de filme fino. [Fonte: Portal Solar]

A seguir apresentam-se alguns valores típicos das diferentes tecnologias para conversão fotovoltaica que foram apresentadas:

Tabela 4.1: Dados médios dos três tipos de tecnologia utilizados no experimento

	Monocristalino	Policristalino	Filme Fino
Eficiência do módulo	14%	13%	7,9%
Coef. Temp. P_{max} [%/°C]	-0,49	-0,45	-0,32
Coef. Temp. V_{oc} [%/°C]	-0,35	-0,33	-0,31
Coef. Temp. I_{sc} [%/°C]	0,04	0,06	0,06

Fonte: SunEdison MEMC Silvantis; Yingli Green Energy; DuPont Apollo C Series

Como se pode observar, os módulos fotovoltaicos com a tecnologia de filme fino sofrem menos perdas com a influência da temperatura.

5

Conversores CC-CC

A tecnologia da Tigo Energy está presente em sete continentes, sendo uma tecnologia inovadora que é responsável por otimizar a potência de saída de um módulo fotovoltaico, minimizando perdas por sombreamento e células fotovoltaicas defeituosas, aumentando a eficiência da conversão fotovoltaica e produção de energia elétrica do sistema e também prevenindo acidentes como incêndios causados por *Hot Spot*.

Inovações na indústria fotovoltaica nos últimos anos fizeram dessa tecnologia uma solução viável para economia de energia e redução dos impactos ambientais. No entanto, ainda existem problemas que comprometem a conversão fotovoltaica de maneira ideal. Condições de irradiação ou características diferentes nos módulos podem causar perda de potência na produção de energia em um sistema fotovoltaico. A Tigo Energy desenvolveu uma tecnologia capaz de solucionar esses problemas.

Ao invés de se obterem dados apenas do desempenho total do sistema através dos inversores, a tecnologia da Tigo Energy permite acessar informações em tempo real de cada módulo do arranjo fotovoltaico, o que permite um monitoramento melhor e mais seguro.

Figura 5.1: Exemplo de como a tecnologia da Tigo Energy pode ajudar a prevenir e monitorar o sistema. [Fonte: Adaptado de Tigo Energy]

Para melhor compreensão de como os conversores CC-CC atuam, pode-se pensar nos módulos como tubos. Módulos perfeitos, ou seja, que estão realizando a conversão fotovoltaica sem problemas, são tubos com diâmetro maior. Módulos com problemas de conversão são tubos com diâmetro menor.

Quando o fluido (corrente elétrica) encontra o tubo menor, o escoamento fica comprometido. A tecnologia da Tigo Energy atua como um *bypass* que permite que o escoamento contorne o tubo menor e siga adiante. Desse modo, a produção não fica comprometida pelo módulo defeituoso e também sofre menos perdas por sombreamento.

Figura 5.2: Exemplo de funcionamento da tecnologia Tigo Energy. [Fonte: Adaptado de Tigo Energy]

6

Produção energética - Museu da Light, RJ

Até outubro de 2016, o estado do Rio de Janeiro possuía 473 unidades consumidoras com geração distribuída, sendo 302 na área de concessão da LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A., totalizando 1764,61 kW de potência [Fonte: Aneel].

O sistema fotovoltaico instalado no Museu da Light (latitude: 2254'6,39"S e longitude: 4311'14,69"O) do Centro Cultural Light, localizado na Av. Marechal Floriano n. 168, Centro, na cidade do Rio de Janeiro, é composto por 102 módulos fotovoltaicos, sendo 48 desses módulos da tecnologia de silício amorfo com 142 W de potência (total de 6816 W), 27 de silício policristalino com 245 W de potência (total de 6615 W) e 27 de silício monocristalino com 250 W de potência (total de 6750 W).

Faz-se o uso de três inversores do fabricante Fronius, sendo, um inversor Fronius IG Plus 60 V-1 para o arranjo amorfo conectado em 16 grupos de 3 módulos cada, dois inversores Fronius IG Plus 30 V-1 para o arranjo policristalino conectado em dois grupos de 13 e 14 módulos cada e dois inversores Fronius IG Plus 30 V-1 para o arranjo monocristalino conectado em dois grupos de 13 e 14 módulos cada.

O telhado do Museu da Energia da concessionária de energia Light Serviços de Eletricidade SA, Rio de Janeiro, onde se encontram os painéis fotovoltaicos, possui uma inclinação de 25°, azimute de 160° e sombreamento parcial causado por árvores e edificações nas proximidades do local. A irradiação horizontal média foi obtida através do SWERA utilizando o banco de dados do INPE com resolução alta.

Figura 6.1: Irradiação no Museu da Energia da Light, Centro, Rio de Janeiro. [Fonte: SWERA]

Tabela 6.1: Irradiação Mensal Museu da Energia - Light, RJ [Fonte: SWERA]

Mês	Irradiação [kWh/m ² /dia]	Irradiação Corrigida [kWh/m ² /dia]	Variação [%]
Janeiro	7,092	6,77	4,54
Fevereiro	5,805	5,30	8,70
Março	5,161	4,31	16,49
Abril	4,851	3,49	28,06
Maio	3,853	2,49	35,38
Junho	3,501	2,12	39,45
Julho	3,910	2,31	40,92
Agosto	4,136	2,93	29,16
Setembro	4,534	3,66	19,28
Outubro	5,836	5,13	12,10
Novembro	5,639	5,43	3,71
Dezembro	6,412	6,39	0,34
Média	5,061	4,194	-

Os valores de irradiação para cada mês, corrigidos pela inclinação (25°) e orientação (azimute 160°) dos módulos fotovoltaicos, foram obtidos com o auxílio da ferramenta *RadiaSol*, desenvolvida pela UFRGS.

Pode-se observar que no período do verão a irradiação não se altera tanto quanto no inverno, atingindo a marca máxima de 8,7% no verão e 40,92% no inverno. Isso ocorre devido à trajetória da Terra, que faz variar a altura e proximidade solar.

O uso da tecnologia da Tigo Energy, além de aumentar a eficiência, possibilita o acesso remoto em tempo real, módulo a módulo, do sistema. Por meio dos dados obtidos remotamente foi feita uma análise da produção energética pela conversão fotovoltaica nos módulos.

Figura 6.2: Acompanhamento em tempo real da produção. Nesta imagem, observa-se a produção de 14,45 kW no dia 25/11/2016, 12:00. [Fonte: Adaptado de Tigo Energy]

Ao longo do dia no decorrer do ano, com o movimento da Terra, o Sol passa por diferentes posições no céu, e com isso os módulos são dispostos a diversas condições solarimétricas. No verão a altura solar é maior, ou seja, o Sol se encontra em uma posição mais elevada no céu. No inverno essa altura é menor. Desse modo, ao longo do ano, os módulos fotovoltaicos sofrem mais, ou menos, perdas por sombreamento devido às edificações no entorno do local onde o arranjo está instalado no Museu Light da Energia. Na figura a seguir pode-se observar a trajetória solar em cada estação do ano, como também a orientação para o sul geográfico, a qual não é aconselhável para uma instalação a fim de otimizar a conversão fotovoltaica do sistema.

Figura 6.3: De baixo para cima: solstício de verão, equinócio de outono, solstício de inverno e equinócio de primavera. [Fonte: SunSurveyor]

Figura 6.4: Fontes de sombreamento que afetam o arranjo fotovoltaico.

Ao se fazer uma análise dos dados obtidos com auxílio da plataforma da Tigo Energy, pode ser observada a influência do sombreamento no sistema fotovoltaico instalado. Nas imagens a seguir, são apresentadas diferentes situações durante o dia 27/11/2016 sem presença de nuvens no local. Primeiramente, nota-se o sombreamento causado pela edificação presente à direita do arranjo (sudeste) às 8 h 18 min (Figura 6.5). Em seguida, às 12 h 52 min (Figura 6.6), o sistema atinge o seu máximo em conversão fotovoltaica, produzindo 14,48 kW de energia elétrica. Mais adiante, às 13 h 40 min do mesmo dia (Figura 6.7), os arranjos de tecnologia mono e policristalino começam a ter uma perda de conversão causada pelo sombreamento das árvores à esquerda do sistema (oeste) e às 14 h 35 min (Figura 6.8) o arranjo de módulos de silício amorfo também é afetado. Deste ponto em diante, conforme o Sol continua sua trajetória, a inclinação e o sombreamento aumentam e o sistema converte cada vez menos luz solar em energia elétrica.

Figura 6.5: Conversão fotovoltaica: 5,21 kW; 8 h 18 min; 27/11/2016

Figura 6.6: Conversão fotovoltaica: 14,58 kW; 12 h 52 min; 27/11/2016

Figura 6.7: Conversão fotovoltaica: 13,38 kW; 13 h 40 min; 27/11/2016

Figura 6.8: Conversão fotovoltaica: 10,76 kW; 14 h 45 min; 27/11/2016

Figura 6.9: Trajetória solar no dia 27/11/2016. [Fonte: SunSurveyor]

6.1

Produção energética arranjo monocristalino

Conforme descrito anteriormente, o arranjo de módulos de silício monocristalino é composto por 27 módulos de 250 W do fabricante Tecnometal DYA Energia Solar, Modelo SV250D20M, totalizando 6750 W de potência de pico, com duas strings de 13 e 14 módulos cada, dois inversores Fronius IG Plus 30 V-1 e maximizadores de potência da Tigo Energy para cada par de módulos (MM-2ES50). [Figura 6.10]

6.2

Produção energética arranjo policristalino

O arranjo de módulos de silício policristalino é composto por 27 módulos de 245 W do fabricante Yingli Energia, Modelo YL245P-29b, totalizando 6615 W de potência de pico, com duas strings de 13 e 14 módulos cada, dois inversores Fronius IG Plus 30 V-1 e maximizadores de potência da Tigo Energy para cada par de módulos (MM-2ES50). [Figura 6.11]

6.3

Produção energética arranjo silício amorfo

O arranjo de módulos de silício amorfo é composto por 48 módulos de 142 W do fabricante DuPont Apollo, Modelo DA142-C1, totalizando 6816 W de potência de pico, com 16 strings de 3 módulos cada, um inversores Fronius IG Plus 60 V-1 e maximizadores de potência da Tigo Energy para cada módulo (MM-ES170). [Figura 6.12]

Figura 6.10: Produção energética dos módulos de silício monocristalino.

Figura 6.11: Produção energética dos módulos de silício policristalino.

Figura 6.12: Produção energética dos módulos de filme fino de silício amorfo.

Figura 6.13: Conversão fotovoltaica geral em escala de cores. Quanto mais intensa a tonalidade de verde, maior a conversão. [Fonte: adaptado Tigo Energy]

6.4

Comparação da produção das três tecnologias

Sabendo que o arranjo fotovoltaico de silício amorfo possui um coeficiente de perda por temperatura menor que as demais tecnologias presentes no experimento, foi analisado que, no verão, quando as temperaturas são mais elevadas, ele tem uma capacidade de conversão maior quando comparada as outras tecnologias presentes. A tecnologia monocristalina, por apresentar um coeficiente de perda por temperatura mais elevado, tem uma capacidade de conversão menor que as demais.

Além disso, outro fator que contribui para o melhor desempenho dos módulos de silício amorfo, neste caso onde a instalação sofre com frequente rotina de sombreamento, é o fato dos módulos serem feitos de uma única célula, o que minimiza as perdas quando comparadas às tecnologias de silício mono e policristalino, as quais apresentam um conjunto de células fotovoltaicas conectadas em série. No inverno, quando a temperatura é mais amena, os módulos cristalinos não sofrem muito com perdas por temperatura e neste caso a conversão fotovoltaica das três tecnologias é equivalente, com uma pequena superioridade dos módulos cristalinos.

Figura 6.14: Produção energética das três tecnologias no período de dezembro/2015 a novembro/2016

No entanto, a capacidade instalada não é igual para todas as tecnologias, sendo igual a 6816, 6750 e 6615 W para as tecnologias de filme fino, monocristalino e policristalino, respectivamente.

Comparando as três tecnologias considerando a uma mesma potência instalada (6615 W), observa-se que a tecnologia de filme fino de silício amorfo

de fato apresenta uma superioridade na conversão fotovoltaica sob maiores temperaturas, por apresentar um coeficiente de perda menor.

Figura 6.15: Comparação real das três tecnologias considerando todas com a mesma potência instalada

Produção sob condições ideais - Museu da Light, RJ

Para analisar a capacidade de conversão fotovoltaica do sistema instalado no Museu Light da Energia e otimizado pela tecnologia da Tigo Energy, sob condições ideais que favorecessem a conversão, foi utilizado o banco de dados que pode ser acessado remotamente através da plataforma da Tigo e a ferramenta do RadiaSol.

O cálculo do ganho na conversão foi realizado adotando o dia no qual foi obtida a maior e mais uniforme taxa de conversão e consequentemente a maior energia gerada pelo sistema, tendo tal evento ocorrido no dia 28/11/2016, quando o sistema gerou 101,19 kWh de energia, salvando 53,09 kg de CO_2 .

Para desconsiderar o efeito do sombreamento nos módulos do sistema foi feita uma análise, minuto a minuto, durante as horas em que o sistema foi mais afetado pelo sombreamento causado pelas edificações e árvores ao redor do telhado onde estão dispostos os módulos fotovoltaicos. Os valores de potência dos módulos sombreados foram substituídos pela mediana dos valores ótimos referentes a outros módulos localizados na mesma string e de mesma tecnologia. Os intervalos selecionados para a análise foram de 8 h às 8 h 59 min, 13 h à 13 h 59 min, 14 h às 14 h 59 min, 15h às 15 h 59 min e 16 h às 16 h 59 min, pois são nesses períodos de tempo em que o sistema sofre mais com o efeito do sombreamento parcial.

A hipótese de quanto o sistema produziria de energia elétrica se não houvesse o sombreamento e o mesmo fosse orientado para o norte geográfico ao invés de para o sul, ou seja, se o sistema fosse instalado na água oposta do telhado (azimute -20°) visando a uma melhor eficiência na conversão fotovoltaica e não a estética exigida pela Light Serviços de Eletricidade SA, foi feita através do ganho obtido na irradiância quando são comparadas as duas orientações.

Unindo os dois tipos de ganho no sistema pode-se fazer uma estimativa de quanto seria possível converter em energia elétrica em um cenário mais adequado como o que foi avaliado.

Tabela 7.1: Potência real gerada em kWh no dia 28/11/2016

Hora	Filme Fino	Policristalino	Monocristalino	Soma
06:00	0,13	0,13	0,15	0,41
07:00	0,88	0,40	0,37	1,66
08:00	3,27	2,61	1,58	7,45
09:00	4,12	4,16	4,24	12,51
10:00	4,59	4,53	4,66	13,78
11:00	4,82	4,67	4,82	14,31
12:00	4,74	4,59	4,73	14,06
13:00	4,19	4,06	4,14	12,39
14:00	3,55	3,54	3,53	10,63
15:00	2,65	2,38	2,29	7,32
16:00	1,60	1,41	1,37	4,38
17:00	0,55	0,59	0,53	1,67
18:00	0,18	0,19	0,22	0,59
19:00	0,01	0,01	0,01	0,03
Total	35,29	33,26	32,65	101,20

Tabela 7.2: Potência gerada com ausência de sombreamento em kWh no dia 28/11/2016

Hora	Filme Fino	Policristalino	Monocristalino	Soma
06:00	0,13	0,13	0,15	0,41
07:00	0,88	0,40	0,37	1,66
08:00	3,27	3,04	1,93	8,24
09:00	4,12	4,16	4,24	12,51
10:00	4,59	4,53	4,66	13,78
11:00	4,82	4,67	4,82	14,31
12:00	4,74	4,59	4,73	14,06
13:00	4,19	4,18	4,25	12,62
14:00	3,94	3,92	3,99	11,85
15:00	3,04	3,19	3,22	9,45
16:00	2,12	2,24	2,25	6,61
17:00	0,55	0,59	0,53	1,67
18:00	0,18	0,19	0,22	0,59
19:00	0,01	0,01	0,01	0,03
Total	36,59	35,84	35,37	107,80
Ganho	3,69%	7,75%	8,33%	6,52%

Como se pode observar, e como era previsto, o ganho devido à ausência do sombreamento é mais elevado nos módulos de tecnologia silício poli e monocristalina.

Tabela 7.3: Ganho em irradiação [$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$] devido à orientação mais indicada, com azimute = -20° .

Mês	Azimute 160°	Azimute -20°	Ganho
Janeiro	6,77	6,4	-5,5%
Fevereiro	5,3	5,7	7,5%
Março	4,31	5,42	25,8%
Abril	3,49	5,6	60,5%
Maio	2,49	4,74	90,4%
Junho	2,12	4,51	112,7%
Julho	2,31	4,97	115,2%
Agosto	2,93	4,88	66,6%
Setembro	3,66	4,96	35,5%
Outubro	5,13	5,87	14,4%
Novembro	5,43	5,31	-2,2%
Dezembro	6,39	5,76	-9,9%

Figura 7.1: Produção energética do arranjo de silício amorfo com ganho devido à orientação dos módulos.

Figura 7.2: Produção energética do arranjo policristalino com ganho devido à orientação dos módulos.

Figura 7.3: Produção energética do arranjo monocristalino com ganho devido a orientação dos módulos.

Tabela 7.4: Produção ideal filme fino com o ganho pela orientação e ausência de sombreamento.

Mês	Produção Média [kWh]	Ganho Total	Produção Ideal [kWh]
Dez/15	29,48	0,9802	28,90
Jan/16	25,54	1,1151	28,48
Fev/16	28,49	1,3039	37,15
Mar/16	19,70	1,6637	32,77
Abr/16	12,72	1,9738	25,10
Mai/16	7,80	2,2058	17,21
Jun/16	6,22	2,2308	13,88
Jul/16	6,00	1,7269	10,36
Ago/16	10,09	1,4051	14,18
Set/16	14,28	1,1864	16,94
Out/16	19,07	1,0139	19,33
Nov/16	23,85	0,9346	22,29

Figura 7.4: Produção em um cenário ideal otimizado do arranjo de silício amorfo.

Tabela 7.5: Produção ideal policristalino com o ganho pela orientação e ausência de sombreamento

Mês	Produção Média [kWh]	Ganho Total	Produção Ideal [kWh]
Dez/15	27,41	1,0186	27,92
Jan/16	24,14	1,1588	27,97
Fev/16	27,21	1,3550	36,87
Mar/16	19,94	1,7289	34,48
Abr/16	13,56	2,0511	27,80
Mai/16	8,47	2,2922	19,42
Jun/16	6,74	2,3182	15,61
Jul/16	6,61	1,7946	11,87
Ago/16	11,14	1,4602	16,27
Set/16	15,14	1,2329	18,67
Out/16	19,50	1,0537	20,55
Nov/16	23,36	0,9712	22,69

Figura 7.5: Produção em um cenário ideal otimizado do arranjo de silício policristalino.

Tabela 7.6: Produção ideal monocristalino com o ganho pela orientação e ausência de sombreamento

Mês	Produção Média [kWh]	Ganho Total	Produção Ideal [kWh]
Dez/15	24,61	1,0241	25,21
Jan/16	20,96	1,1650	24,42
Fev/16	23,70	1,3622	32,29
Mar/16	17,73	1,7382	30,82
Abr/16	13,05	2,0621	26,91
Mai/16	8,70	2,3045	20,06
Jun/16	6,87	2,3306	16,02
Jul/16	6,87	1,8042	12,40
Ago/16	11,65	1,4680	17,10
Set/16	15,50	1,2395	19,22
Out/16	19,74	1,0593	20,91
Nov/16	23,33	0,9765	22,78

Figura 7.6: Produção em um cenário ideal otimizado do arranjo de silício monocristalino.

8

Conclusões

Com o avanço da tecnologia, cada vez mais os módulos fotovoltaicos terão características e peculiaridades diferentes que serão aconselháveis para determinadas situações.

A partir do experimento realizado, foi observado que os módulos fotovoltaicos de silício amorfo são mais indicados para sistemas com muita presença de sombreamento e onde há elevadas temperaturas, pois sofrem menos perdas devido a esses fatores. Entretanto, é necessário um número maior de módulos para converter a mesma quantidade de energia solar em eletricidade quando comparando com a tecnologia de silício mono ou policristalino.

Como o período amostral do experimento foi de um ano (12/2015 a 11/2016), conseguiu-se observar o comportamento das três tecnologias nas quatro estações do ano. Foi concluído que, principalmente no inverno, o ganho obtido com a orientação mais adequada, ou seja, para o norte geográfico, é significativamente relevante. Isso ocorre porque, como a trajetória do Sol no céu é mais baixa nessa época do ano, ao se colocarem os módulos voltados para o sul geográfico a perda de incidência dos raios solares é alta.

A partir dos gráficos e dados que foram apresentados, nota-se que a orientação dos módulos influencia mais na conversão fotovoltaica de um sistema solar fotovoltaico do que a presença do sombreamento parcial.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, fazer uso de uma ferramenta mais precisa para análise e também incorporar dados meteorológicos do local específico onde a usina laboratório está instalada para uma análise mais exata da conversão e influência de sombreamento.

Referências Bibliográficas

- [1] Surichaqui, Roberto Carlos Colonia, Avaliação teórica e experimental do uso de conversores CC-CC na eficiência da conversão fotovoltaica em condições adversas de operação
- [2] Alberto Dolara, George Cristian Lazaroiu, Sonia Leva, Giampaolo Manzolini, Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules, *Energy*, 2013, vol. 55, issue C, pages 466-475. DOI: 10.1016/j.energy.2013.04.009
- [3] Cristina Cañete, Jesús Carretero, Mariano Sidrach-de-Cardona, Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions. DOI: 10.1016/j.energy.2013.12.013
- [4] Vikrant Sharma, Arun Kumar, O.S. Sastry, S.S. Chandel, Performance assessment of different solar photovoltaic technologies under similar outdoor conditions. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.068>
- [5] Bhubaneswari Parida, S. Iniyanb, Ranko Goic, A review of solar photovoltaic technologies. DOI:10.1016/j.rser.2010.11.032
- [6] ABINEE, Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira, Junho, 2012
- [7] Caderno FGV Energia, Energias Renováveis Complementares, dezembro 2015, ano 2, nº 4, ISSN 2358-5277
- [8] Caderno FGV Energia, Recursos Energéticos Distribuídos, maio 2016, ano 3, nº 7, ISSN 2358-5277
- [9] IEA, A Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2015, ISBN 978-3-906042-42-8
- [10] EPE, Série Recursos Energéticos, NOTA TÉCNICA DEA 19/14, Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil, Condicionantes e Impactos