

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Lucas Almeida de Jesus

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
RELACIONANDO SUA TEMPERATURA E VARIAÇÕES DA ESTRUTURA
DE FIXAÇÃO NA REGIÃO CENTRO-OESTE DE MINAS GERAIS

Divinópolis
2019

Lucas Almeida de Jesus

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
RELACIONANDO SUA TEMPERATURA E VARIAÇÕES DA ESTRUTURA
DE FIXAÇÃO NA REGIÃO CENTRO-OESTE DE MINAS GERAIS

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.

Áreas de integração: Elétrica e Termodinâmica.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Gomes dos Santos

Divinópolis
2019

Lucas Almeida de Jesus

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
RELACIONANDO SUA TEMPERATURA E VARIAÇÕES DA ESTRUTURA
DE FIXAÇÃO NA REGIÃO CENTRO-OESTE DE MINAS GERAIS

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.
Áreas de integração: Elétrica e Termodinâmica.

Comissão Avaliadora:

Prof. Dr. Cláudio H. G. dos Santos
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Dr. João Carlos de Oliveira
CEFET/MG *Campus V*

Prof. M. Márcio Alves de Aguiar
CEFET/MG *Campus V*

Divinópolis
2019

Resumo

Com a necessidade de novas fontes energéticas, o mundo se abre para fontes limpas e renováveis. Vindo em uma crescente, a energia solar apresenta exatamente isso para os usuários. Entretanto como a implementação ainda é relativamente de alto custo, tem-se buscado alternativas para ampliar a eficiência útil dessa energia, sempre tentando melhorar a potência dos módulos sem aumentar suas dimensões e também com estudos visando diminuir as perdas de energia durante o processo. O seguinte trabalho tem como objetivo apresentar um estudo da geração em módulos fotovoltaicos relatando a influência da temperatura dos próprios módulos na eficiência do sistema, e buscar resultados de geração de acordo com o tipo de estrutura onde os painéis são fixados. Verificando o desempenho em módulos cuja fixação possibilita uma melhor ventilação e transferência de calor para o ambiente, e também naqueles que não tem uma fixação que possibilite um arrefecimento natural.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Acrônimos e Notação	x
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema	3
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos do Trabalho	4
1.3.1 Objetivo Geral	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Organização do Documento	5
1.5 Estado da Arte	5
2 Fundamentos	8
2.1 Revisão Bibliográfica	8
2.1.1 História da geração solar fotovoltaica	8
2.2 Metodologia	12
2.3 Fundamentação Teórica	13
2.3.1 Potencial e importância da energia fotovoltaica	13
2.3.2 Matriz elétrica no Brasil e a expansão da energia solar FV	14
2.3.3 Radiação Solar	16
2.3.4 Módulo fotovoltaico	17
2.3.5 Perdas no Sistema devido a temperatura	18
2.4 Transferência de Calor	20
2.4.1 Condução	20
2.4.2 Convecção	21
2.4.3 Radiação	22
3 Dados do Sistema	24
3.1 Características das Plantas	24
3.1.1 Módulos	25
3.1.2 Inversores	25
3.2 Simulações via software PVsol	26

4	Desenvolvimento	29
4.1	Modelagem de operação térmica do módulo solar	29
4.1.1	Balço de Energia em um módulo solar	29
4.1.2	Irradiância Solar	31
4.1.3	Transferência de calor por convecção	31
4.1.4	Transferência de calor por radiação	32
4.1.5	Eficiência de conversão do módulo	33
4.1.6	Aumento da energia interna do modelo	34
4.1.7	Equação geral para o balanço de energia no módulo	34
5	Análises e Resultados	35
5.1	Equação geral e seus termos	35
5.2	Dados captados a partir das plantas	36
5.3	Ganho real em geração	37
5.3.1	Plantas A e B	37
5.3.2	Planta C	39
5.4	Plantas simuladas no PVsol	40
5.4.1	Plantas A e B	40
5.4.2	Planta C	40
5.5	Retorno financeiro do Sistema	41
5.5.1	Plantas A e B	41
5.5.2	Planta C	41
6	Considerações Finais	43
6.1	Conclusões	43
6.1.1	Proposta de Continuidade	44
	Referências	45

Lista de Figuras

1.1	Relação $V \times I$ com a temperatura 'CanadianSolar'	3
1.2	Evolução na eficiência de células fotovoltaicas NREL (2016)	6
2.1	Telescópio Hubble utilizando painéis solares	9
2.2	Linha do Tempo representando o desenvolvimento da energia fotovoltaica (PINHO; GALDINO (2014))	11
2.3	Representação de um telhado com módulos fixados com e sem espaçamento do telhado	12
2.4	Oferta de recursos energéticos renováveis e seu potencial explorável (DGS, 2014)	13
2.5	Matriz energética brasileira (ABSOLAR, 2019)	14
2.6	Matriz energética brasileira em 2040. Modificado de CELA (2016)	15
2.7	Componentes da radiação solar (GULIN; VAŠAK; BAOTIC, 2013)	16
2.8	Radiação Anual Global (SOLARGIS, 2019)	17
2.9	Imagem esquemática de uma célula, um módulo e um arranjo fotovoltaico, modificado de BEATRIZ <i>et al.</i> (2011)	17
2.10	Estrutura do painel fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014)	18
2.11	Relação I-V em módulos com temperaturas diferentes e irradiância de 1000 W/m^2 . Modificado de SAPVIA (2017)	19
2.12	Aumento na temperatura e redução no índice yield de acordo com o modo de instalação do módulo fotovoltaico. Modificado de DGS (2014)	19
2.13	Transferência de calor por condução. (IFSC, 2016)	20
2.14	Transferência de calor por convecção natural. (SOLIDWORKS, 2019)	22
2.15	Espectro da Radiação Eletromagnética COIMBRA (2018)	23
3.1	Relação entre temperatura e perda de eficiência em porcentagem. Modificado de CANADIANSOLAR (2018)	25
3.2	Inversor Renovigi 5k Plus. (Renovigi, 2019)	25
3.3	Sistema Instalado com estruturas fixas sobre o telhado - Planta A	26
3.4	Sistema Instalado com estruturas espaçadas do telhado - Planta B	26
3.5	Sistema simulado com estrutura fixa ao telhado - Planta A	27
3.6	Sistema simulado com estrutura elevada em relação ao telhado - Planta B	27
3.7	Sistema simulado com estrutura elevada em relação ao telhado - Planta C inversor 1	28
3.8	Sistema simulado com estrutura fixa ao telhado - Planta C inversor 2	28

4.1	Balço de Energia em um m3dulo fotovoltaico. Adaptado: MAZ3N-HERN3NDEZ <i>et al.</i> (2013)	30
5.1	Curvas relacionando as temperaturas do m3dulo	37
5.2	Compara33o di3ria no m3s de outubro entre as plantas A e B em kWh	38
5.3	Comparativo mensal entre os inversores da planta C	39

Lista de Tabelas

2.1	Valores de condutividade térmica para alguns materiais a 300 K, modificada de INCROPERA; DEWITT; BERGMAN (2000)	21
2.2	Valores típicos para o coeficiente de transferência de calor, h. Modificada de INCROPERA; DEWITT; BERGMAN (2000).	22
2.3	Valores emissividade de algumas superfícies a 300 K, modificada de INCROPERA; DEWITT; BERGMAN (2000).	23
5.1	Geração diária no mês de outubro nas plantas A e B em kWh	38
5.2	Comparativo das gerações nas plantas A e B em kWh	38
5.3	Geração mensal na planta C em kWh	39
5.4	Comparativo das gerações na planta C	39
5.5	Comparação entre gerações das plantas A e B	40
5.6	Comparação entre gerações dos inversores na Planta C	40
5.7	Retorno financeiro em meses do sistema com espaçamento da planta B . .	41
5.8	Retorno financeiro em meses do sistema com espaçamento da planta C . .	41

Lista de Acrônimos e Notação

A	Área de transferência de calor perpendicular ao fluxo de calor [m^2]
A_{sup}	Área da Superfície [m^2]
c_p	Calor específico [kJ/kgK]
F_1, F_2	Fatores de forma
$G_{t,i}$	Irradiação solar total referente a direção normal ao plano inclinado [$W/m^2.K$]
\bar{h}	coeficiente convectivo médio [$W/m^2.K$]
k	Coefficiente de condutividade térmica [$W/m.K$]
L	Comprimento característico [m]
m	Massa [kg]
\overline{Nu}_L	Número de Nusselt
\dot{P}_e	Potência elétrica de saída do módulo [W]
Pr	Número de Prandtl
\dot{Q}_c	Perda para a vizinhança por convecção [W]
\dot{Q}_r	Perda para a vizinhança por irradiação [W]
\dot{Q}_s	Irradiação total [W]
Ra_L	Número de Rayleigh
T_{atm}	Temperatura da atmosfera [$^{\circ}C$]
T_c	Temperatura de operação da célula [$^{\circ}C$]
T_{ref}	Temperatura de referência [$^{\circ}C$]
T_s	Temperatura da superfície [$^{\circ}C$]
T_{solo}	Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]
T_{∞}	Temperatura do fluido que envolve a superfície [$^{\circ}C$]
\dot{U}_{sist}	Energia interna do módulo [J]
β	Ângulo de inclinação do módulo [$^{\circ}$]
β_{ref}	Coefficiente de temperatura [C^{-1}]
ΔT	Variação da temperatura [$^{\circ}C$]
ε	Emissividade
γ_{ref}	Coefficiente de radiação solar para eficiência da célula
η_c	Eficiência de conversão do módulo
η_{ref}	Eficiência nominal da célula na temperatura de referência
σ	Constante de Stefan Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$]
$\tau\alpha$	Eficiência óptica

Introdução

Com o aumento dos danos ambientais e conseqüentemente o aquecimento global, alternativas energéticas limpas e renováveis conseguem cada vez mais espaço e investimento para pesquisas. Com um expressivo aumento de usuários nos últimos anos, como descrito por NASCIMENTO (2017), a energia solar se mostra uma solução cada vez mais comum para a crise energética que já existe em determinadas localidades.

Estudos de LUQUE; HEGEDUS (2011) demonstram que a radiação solar recebida pela Terra em uma hora é dez mil vezes maior do que toda a energia utilizada em todo planeta no mesmo período de tempo. Junto a isso, como citado por TIBA *et al.* (2000), o expressivo crescimento da energia solar visa amenizar as mudanças climáticas devido a poluição e desmatamento, por se tratar de uma energia limpa e praticamente inesgotável, a utilização de tal fonte energética se torna cada vez mais atrativa.

No Brasil o número de usuários de energia fotovoltaica vem crescendo, principalmente após a publicação da resolução 482 por parte da ANEEL, MOREIRA (2012), a qual determina as condições gerais para a mini e micro-geração em todo território nacional. Com a regulamentação da ANEEL, vieram diversos facilitadores que incentivam e aumentam os interesses de poder gerar sua própria energia. Entre atrativos para a instalação de sistemas fotovoltaicos, estão descritos na resolução a possibilidade de repassar os kWh gerados em excesso para outras instalações que sejam do mesmo titular. A opção de armazenar créditos junto a concessionária de energia por até 60 meses, com isso, meses em que a geração for menor que o consumo, o valor excedente será abatido dos créditos acumulados anteriormente.

Outra possibilidade aberta foi a de instalação do sistema gerador em endereço diferente da instalação consumidora, ou seja, empresas ou até mesmo residências que tem um

consumo elevado e pretendem instalar o sistema porém o telhado não tem área suficiente, podem realizar a instalação em outro endereço onde há espaço, dentro do mesmo estado e desde que a rede elétrica suporte, sendo essa transferência de kWh de um endereço pra outro isenta de tarifas.

Mais fatores responsáveis pela expansão do seguimento foi a segurança e padronização das instalações, graças a diversas publicações da ABNT. E também os incentivos fiscais, por parte do governo, sendo isenções de tarifas, entre elas o ICMS sobre a energia gerada, isenções de taxas de importação de materiais necessários, principalmente de módulos solares. E o incentivo financeiro por instituições públicas e privadas, com abertura de linhas de crédito exclusivas para instalação de energia fotovoltaica, com taxas muito atrativas.

Contudo, por mais que os materiais necessários para fabricação e instalação de painéis fotovoltaicos se tornem acessíveis, a evolução das células para melhorar sua eficiência é primordial para superar outra barreira, que é a área necessária para a instalação de um sistema. A evolução dos módulos é constante e cada vez mais rápida. Hoje comercialmente são encontrados painéis com eficiência entre 17,84% e 18,65% segundo dados da fabricante CANADIANSOLAR (2018).

Com isso métodos para ampliar a eficiência de de geração dos sistemas fotovoltaicos são temas constantes em variados em estudos, sendo através de rastreadores solares, implementação de sistemas híbridos, resfriamento dos módulos, estudo da reflexão de raios e estudos térmicos.

Sabe-se que a potência dos módulos fotovoltaicos está relacionada a temperatura de operação dos mesmos. Pode-se observar na Figura 1.1 (a), que demonstra dados da fabricante CANADIANSOLAR (2018), que a irradiância influencia diretamente na corrente do módulo, onde quanto maior da irradiância, maior a corrente. Na Figura 1.1 (b) temos a relação da temperatura com a tensão e corrente, onde pode-se observar uma pequena alteração na corrente conforme o aumento da temperatura, e uma considerável queda de tensão conforme a temperatura se eleva.

Conseqüentemente podemos analisar, que uma maior temperatura diminui a diferença de potencial estabelecida na junção semicondutora, e como resultado obtém-se uma menor potencia alcançada pela célula solar. Pelo lado térmico, temos que toda a radiação solar absorvida pelo módulo que não é convertida em energia elétrica, necessariamente é convertida em calor, sendo essa energia térmica dissipada ou permanecendo no sistema

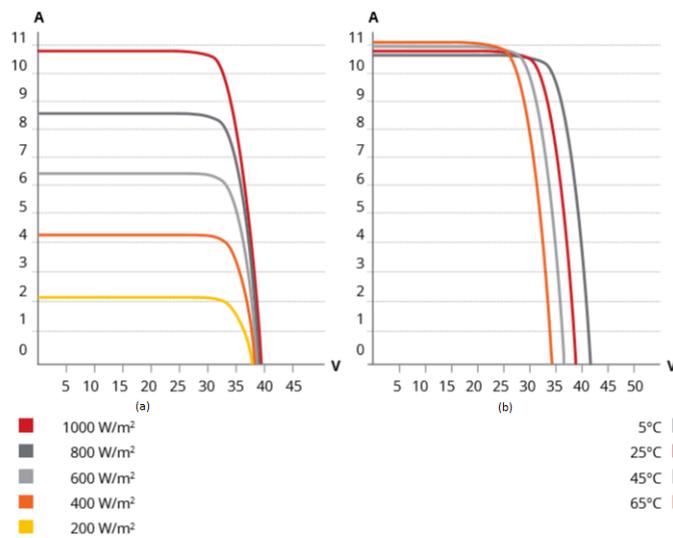


Figura 1.1: Relação $V \times I$ com a temperatura 'CanadianSolar'

aquecendo-o. Como observado na Figura 1.1 (b) e estudado por Bodnár; Koós (2018) a eficiência de um módulo é beneficiada por temperaturas menores. Este trabalho apresentará um estudo e monitoramento de um sistema de resfriamento passivo, que não afeta o custo de instalação ou manutenção, cujo sistema pode ser beneficiado por correntes de ar naturais pelo fato da alteração na altura dos módulos com relação ao telhado ou estrutura onde foi fixado, assim obtendo uma redução na temperatura e conseqüentemente um ganho de potência.

1.1 Definição do Problema

A tecnologia fotovoltaica é marcada por sua baixa eficiência de conversão. Atualmente em módulos comerciais, valores próximos de 20% do fluxo solar que é captado do painel, é convertido efetivamente em eletricidade, com isso parte dessa energia não convertida é transformada em calor, que aquece o módulo e causa uma indesejável queda em sua eficiência.

Existem algumas formas alternativas de evitar um excessivo aumento na temperatura do módulo e possivelmente trazer um melhor aproveitamento do fluxo solar. O fato de proporcionar um melhor arrefecimento natural aos mesmos pode trazer benefícios e por isso a distancia da estrutura de fixação dos módulos e o telhado acaba influenciando na troca de calor dos módulos com o ambiente.

1.2 Motivação

A energia solar é um campo em pleno crescimento no mundo, e particularmente no Brasil vem tendo uma grande aceitação nos últimos anos. Todos os estudos na área são de extrema importância para tornar o sistema cada vez mais acessível e seu funcionamento cada vez mais difundido na sociedade.

Sistemas de geração solar tem papel fundamental nos rumos que a sociedade vai tomar nas próximas décadas. Sua utilização em massa pode causar grandes mudanças da forma de viver das pessoas, pois além de ser um sistema que não impacta o meio ambiente, é uma fonte geradora que pode ser instalada em locais com pequena área disponível.

Este estudo pode ajudar a entender melhor a capacidade de geração de módulos conforme sua instalação e possibilidade de dissipar calor, expondo resultados capazes de beneficiar sistemas em sua eficiência.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

Estudar, avaliar e determinar através de cálculos e experimentos a influência da temperatura e da estrutura de fixação no desempenho de módulos fotovoltaicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisão de Trabalhos que tratam da questão térmica em módulos fotovoltaicos;
- Realizar revisão nos tipos de fixação em telhado e inclinações para módulos disponíveis comercialmente;
- Revisão da termodinâmica e de modelos térmicos de sistemas similares;
- Cálculo analítico termodinâmico e correlação com o desempenho de módulos fotovoltaicos;
- Montagem experimental, aplicar variações de posicionamento na estrutura e coleta de dados;
- Análise de resultados e conclusões.

1.4 Organização do Documento

O presente trabalho é dividido em 4 capítulos para uma melhor compreensão do leitor sobre o estudo realizado.

O capítulo 1 é destinado a introdução sobre o tema de forma geral, demonstrando o principio da tecnologia, e a busca por sua evolução em estudos.

No capítulo 2, temos um breve histórico sobre a tecnologia fotovoltaica, seu potencial de aplicação, juntamente com os benefícios que ela pode trazer ao planeta como uma fonte limpa. Ainda no capítulo 2 estão presente estudos e dados sobre aplicação da energia fotovoltaica no Brasil, sobre o funcionamento dos módulos e uma abordagem sobre o efeito da temperatura e transferência de calor na eficiência dos sistemas.

O Capítulo 3 apresenta o estudo da modelagem de operação térmica do módulo solar, onde está presente diversas equações da literatura que representam o balanço térmico de um sistema fotovoltaico, representando a transferência de calor, energia do sistema e a potência elétrica.

No capítulo 4 uma conclusão parcial sobre o trabalho, tendo em vista que o mesmo ainda deve ser finalizado no TCC 2, e um cronograma demonstrando o que foi realizado e o que ainda deve ser realizado para complementar o estudo.

1.5 Estado da Arte

Na última década o mundo tem seguido uma tendência de obter novas fontes de energia, principalmente fontes chamadas 'limpas', as quais não causam danos ambientais. A energia fotovoltaica tem evoluído e tem se tornado cada vez mais comum em residências e empresas. Segundo IBOPE (2014) cerca de 77% da população tem interesse de gerar sua própria energia, demonstrando que a ideia de geração própria está bem difundida na sociedade brasileira, portanto o principal foco das empresas é aplicar melhorias de eficiência no sistema de geração e torna-lo mais acessível, para então atingir os mais variados setores da sociedade.

Com todo este mercado em expansão vem sendo realizados vários estudos afim de obter melhoras na eficiência de geração. Entre estes pode-se citar a busca por melhorias no desempenho de células fotovoltaicas.

Na figura 1.2 podemos observar de forma cronológica a evolução da eficiência de dife-

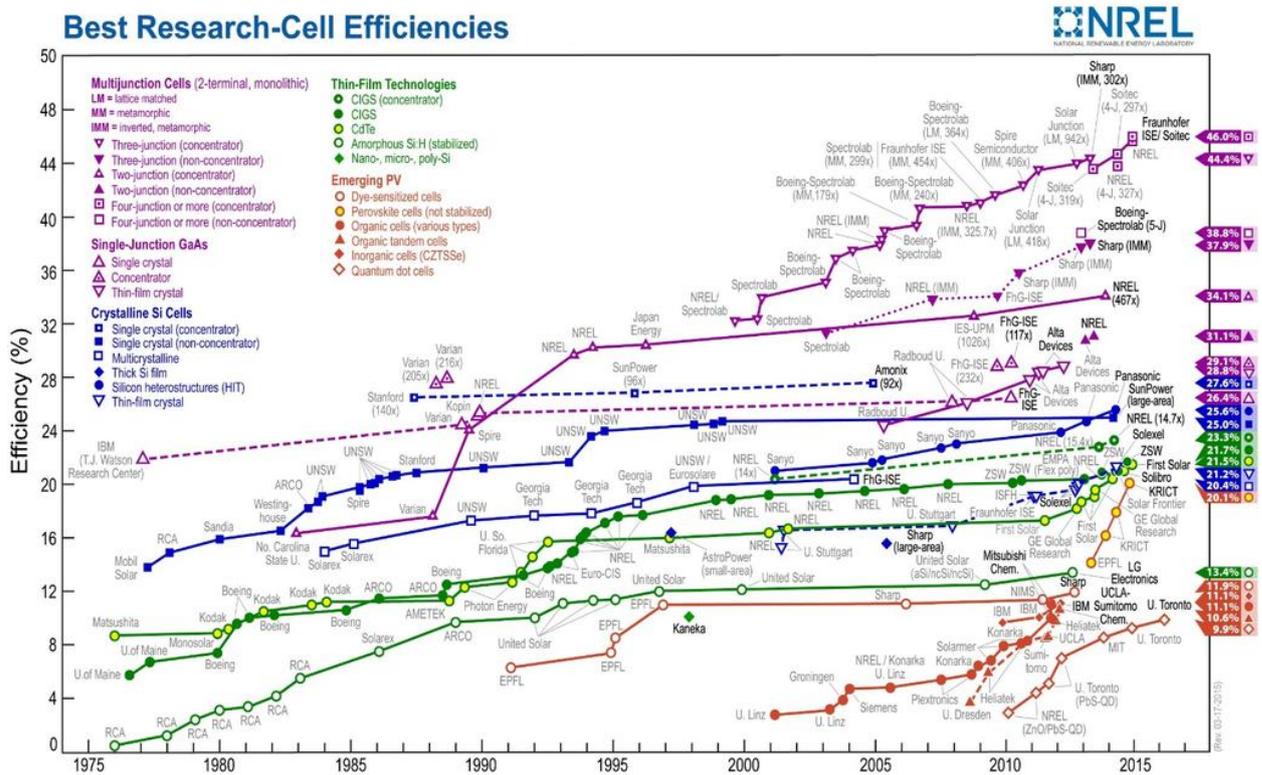


Figura 1.2: Evolução na eficiência de células fotovoltaicas NREL (2016)

rentes tecnologias das células nas últimas décadas até o ano de 2015, podendo observar especificamente uma considerável evolução células monocristalinas. Estas representam mais de 90% do comércio ao público, onde na década de 80 não tinham eficiência maior que 15% e nos dias atuais é possível obter eficiência próxima à 25% NREL (2016).

Paralelamente aos estudos na evolução tecnológica dos módulos, estão vários estudos para evitar perdas no sistema e consequentemente obter uma maior eficiência, segundo DGS (2014) as perdas em instalações fotovoltaicas podem ocorrer por aumento na temperatura, sombreamento parcial, problemas com a fiação, sujeira nos módulos, incompatibilidade entre módulos, entre outros.

A partir da perda energética devido ao aumento na temperatura, estudos na área de transferência de calor vêm sendo realizados nos últimos anos com a finalidade de manter a temperatura das células o mais baixo possível e assim maximizar sua eficiência. Atualmente em sistemas instalados, aproximadamente só 15% da radiação solar é convertida em energia elétrica, a outra fração é dissipada termicamente, refletida ou irradiada.

Para contornar essa situação, técnicas de resfriamento estão sendo utilizadas para manter a temperatura de operação das células o mais baixo possível, como por exemplo

a utilização de ar ou água (TIWARI; MISHRA; SOLANKI, 2011).

A perspectiva para a utilização da energia elétrica de fonte solar é de uma adesão crescente por parte da população. Apesar de ainda não ser acessível a todos as classes sociais por conta dos preços das células fotovoltaicas quando comparada as outras formas de produção de energia, os preços vem caindo significativamente ao longo dos anos e atualmente custa menos de 1 dólar o kW/h produzido (BNEF, 2014).

Desta forma, a constante busca por um melhor custo benefício serve de motivação para realizar o estudo sobre perdas na energia solar afim de tornar possível a sua adesão a todos que tiverem interesse em gerar sua própria energia.

Fundamentos

2.1 Revisão Bibliográfica

Na presente seção temos de forma sucinta a evolução da tecnologia de energia solar, desde sua origem, seguindo pelas pesquisas para sua evolução, até alcançar os dias atuais onde já é presente na vida de diversas pessoas, mostrando o quão importante são os estudos na área.

2.1.1 História da geração solar fotovoltaica

A Energia fotovoltaica teve sua primeira menção no ano de 1839, quando observada por Edmond Becquerel (1820 - 1891), porém somente no século seguinte a tecnologia começou realmente ser estudada e empregada em centros de estudo e algumas indústrias (PINHO; GALDINO, 2014). Os avanços da tecnologia se deram principalmente a partir dos estudos de Albert Einstein (1879 -1955) que explicou o efeito foto-elétrico a partir da física dos elementos semi-condutores e quando outras pesquisas de outros cientistas foram concluídas. A partir daí surgiam as primeiras idealizações da aplicação a energia solar como fonte de energia elétrica.

Na década de 1950, Calvin Fuller (1902 - 1994) que era um químico da empresa *Bell Laboratories* produziu a primeira célula solar, em que uma barra de silício foi dopada com gálio obtendo uma camada de cargas móveis tipo p. Posteriormente deu-lhe um banho de lítio, criando assim, uma zona de elétrons livres chamada de silício tipo n. Foi então que o físico Gerald Pearson, que trabalhava com Fuller, verificou que tal célula era capaz de produzir corrente elétrica quando exposta a fontes de luz. Na mesma década, em 1956 foi dado início a produção industrial, seguindo a tendência do crescimento na área eletrônica



Figura 2.1: Telescópio Hubble utilizando painéis solares
Fonte: Nasa/BBC

(VALLÊRA; BRITO, 2006).

No começo da tecnologia a “corrida espacial” foi quem impulsionou para uma melhora rápida na eficiência dos módulos. Durante a competição para ir ao espaço, a NASA e o programa espacial soviético buscavam fontes de energia de longa duração capazes de alimentar equipamentos com uma confiabilidade maior do que as pilhas químicas que eram usadas até então (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Podemos observar na figura 2.1 uma aplicação real dos módulos no espaço, presentes no telescópio Hubble, hoje a tecnologia é amplamente utilizada em satélites e telescópios.

Nas décadas de 80 e 90, motivados pela consciência climática, os investimentos foram intensificados e deram-se início a programas para implementação em maior escala de sistemas fotovoltaicos. Como exemplo, temos a instalação da primeira usina de grande porte do mundo, na Califórnia em 1982, com 1MW de potência de pico, e os programas de incentivo denominados “telhados verdes” iniciados na Alemanha e Japão na década de 90. Foi também na década de 90 que através de estudos financiados pela Comissão Europeia, chamado de “MUSIC FM”, ficou provado que utilizando a tecnologia existente, melhorada apenas por resultados previsíveis, seria possível criar módulos fotovoltaicos acessíveis e competitivos a energia convencional, apenas com o aumento de produção, partindo do princípio que, quanto mais células forem fabricadas menor é o custo unitário (BRUTON;

WOODOCK, 1997).

A partir desse ponto, no século XXI a tecnologia continuou a evoluir, e com os crescentes investimentos, pesquisas e produção em larga escala deu-se maior acessibilidade a tal forma de geração de energia.

Os sistemas se tornaram melhores como um todo, e nos dias atuais é possível obter células monocristalinas com eficiência superior a 20% destinadas ao público geral (NREL, 2016), tornando o que antes era extremamente caro e trabalhoso, comum em escala global, representando em 2017 mais de 345 GW de capacidade energética (SAUAIA, 2018).

Podemos observar de forma esquemática os principais acontecimentos associados a evolução da energia fotovoltaica na figura 2.2.



Figura 2.2: Linha do Tempo representando o desenvolvimento da energia fotovoltaica (PINHO; GALDINO (2014))

2.2 Metodologia

Para um melhor desempenho no desenvolvimento do trabalho inicialmente será realizado um estudo teórico sobre o tema, em livros, artigos, teses e datasheets de fabricantes, e com isso obter informações concretas e precisas sobre áreas envolvidas.

Para dar sequência ao trabalho, os componentes a serem definidos serão os módulos fotovoltaicos a serem utilizados, definindo sua potência e dimensões. Em seguida deverá ser realizado o estudo a respeito dos módulos fotovoltaicos comerciais, bem como sua estrutura, materiais comumente utilizados e eficiência, e com isso obter parâmetros para iniciar os estudos térmicos das células. Com as características definidas será realizada a modelagem do sistema térmico do arranjo de forma analítica afim de obter dados relacionados a capacidade de geração dos módulos, bem como perdas por um aumento de temperatura em sua superfície e a capacidade de dissipar calor de forma passiva.

Posteriormente será montado experimentalmente em local adequado um sistema com módulos fotovoltaicos para a obtenção de dados térmicos e elétricos a partir de variações de ângulo e altura entre os módulos e o telhado.

Na figura 2.3 podemos observar um exemplo de módulos sobre um trilho com espaçamento e outro sem espaçamento do telhado.

Com uma maior distância entre os módulos e o telhado espera-se possibilitar uma corrente de ar natural, que possivelmente beneficiará o arranjo com uma redução na temperatura e um possível ganho de potência, que será monitorado através de um circuito eletrônico para aquisições de curva I-V.



Figura 2.3: Representação de um telhado com módulos fixados com e sem espaçamento do telhado

2.3 Fundamentação Teórica

2.3.1 Potencial e importância da energia fotovoltaica

Se tratando de fonte de energia, o Sol é fonte primária e inesgotável na escala terrestre de tempo, sendo ele responsável de forma direta ou indireta na origem das outras fontes energéticas no planeta.

Na figura 2.4 podemos observar os recursos energéticos da Terra representados por cubos. Nos cubos representados por cores sólidas temos as fontes não renováveis, e nos transparentes as fontes renováveis, sendo o cubo externo a energia disponível no período de um ano, e no cubo interno a quantidade aproveitada desses recursos, em forma de eletricidade, calor ou energia química (PINHO; GALDINO, 2014).

Demonstrado na figura 2.4, fica evidente o potencial inexplorado da energia solar, sendo ela a mais abundante fonte energética presente na Terra.

Além da ampla capacidade energética vinda do sol, temos diversos fatores que incentivam a sua utilização, para GARCIA (2008) reduzir perdas e eliminar desperdícios é atualmente, uma questão crucial para a humanidade, pois as atuais fontes de energia disponíveis são insustentáveis para os padrões de uso de uma sociedade consumista, de forma que a eficiência energética crescente, pautada em fontes renováveis, pode contribuir para amenizar os efeitos decorrentes do uso compulsivo e despreocupado historicamente empregado ao uso da energia pela sociedade desde o início da era industrial.

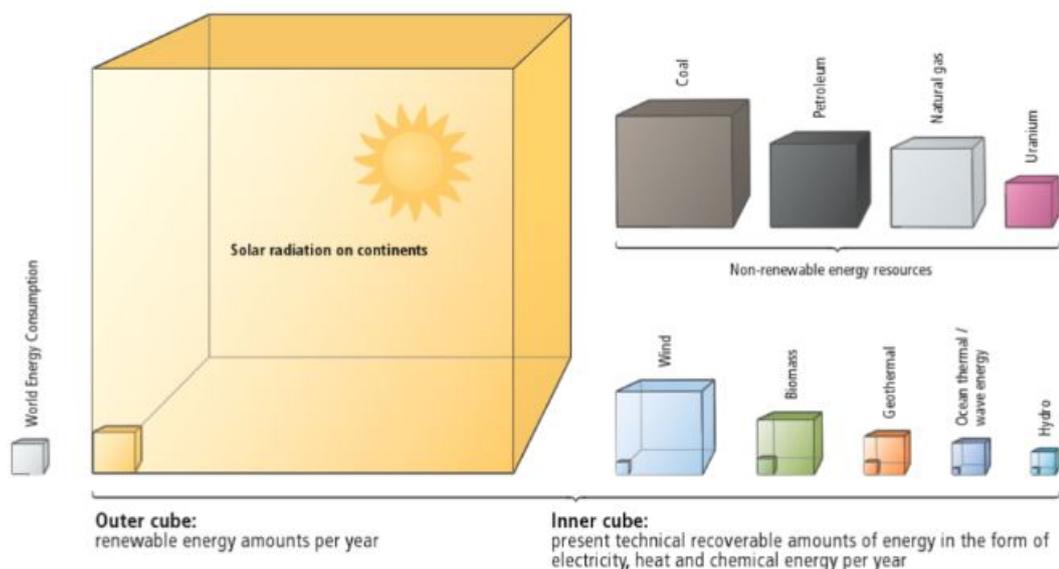


Figura 2.4: Oferta de recursos energéticos renováveis e seu potencial explorável (DGS, 2014)

A energia solar é livre de carbono e, portanto, contribui para a redução de emissões de CO₂ na natureza, pelo uso de energia (MME, 2017), para ABIKO A.K.; ABUKATER (2010), é necessário tratar a questão energética com urgência, para evitar maiores consequências ambientais e sociais decorrentes dos anos de utilização desenfreada de fontes fósseis de energia. Deve-se incentivar e explorar fontes renováveis, aumentar suas cotas na matriz energética mundial e consequentemente vem o potencial de gerar novos empregos e riquezas.

2.3.2 Matriz elétrica no Brasil e a expansão da energia solar FV

A matriz energética brasileira atualmente é em sua grande parte proveniente de hidroelétricas, como podemos observar na figura 2.5, esta é uma fonte que historicamente vem proporcionando auto-suficiência na geração de energia elétrica ao Brasil a baixos custos.

Para a ANEEL (2008), a realidade de se sustentar em hidroelétricas está chagando ao seu limite. Nas regiões mais desenvolvidas, boa parte do potencial hidráulico já foi aproveitado e para MME (2017) é estimado um crescimento de 4% no consumo de energia ao ano até 2030, o que tornaria impossível o país ainda se sustentar em fontes hídricas sem explorar os recursos presentes na bacia do Amazonas. Porém, para JUNK; MELLO (1990) uma exploração de recursos hídricos na maior floresta tropical do mundo, deve ser evitado, pois explorar tais recursos causaria danos ambientais irreparáveis, prejudicando não só a região, mas o planeta como um todo.

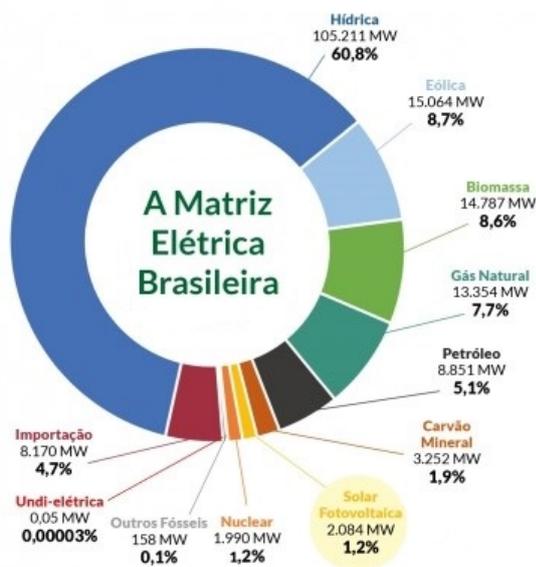


Figura 2.5: Matriz energética brasileira (ABSOLAR, 2019)

Com o anteriormente citado aumento anual no consumo de energia, há consequentemente um aumento no valor do kWh cobrado pelas concessionárias, fazendo com que empresas e pessoas busquem alternativas mais vantajosas em termos financeiros para sua geração, e indiretamente acabam ajudando a equilibrar a matriz elétrica no país.

Devido a diversos incentivos financeiros e em pesquisas, a fonte de energia solar fotovoltaica está ampliando seus números de forma bem expressiva, considerando que em 2015 representava apenas 0,015% de toda energia gerada no país (ABSOLAR, 2019), e no primeiro semestre de 2019 já ultrapassou a energia nuclear na matriz elétrica brasileira (figura 2.5) com 1,2%.

Esses números já expressivos são somente o início de uma nova tendência para o brasileiro, segundo SAUAIA (2018) o potencial solar do país supera em muito as outras fontes, citando como exemplo a capacidade de geração hídrica que é limitada a 172GW, enquanto a solar é de 28.519GW.

A partir de estudos, CELA (2016) demonstra que são esperados nas próximas duas décadas 96 GW contabilizando somente pequenos sistemas solares a serem implementados no país, e já em 2040 seria a principal fonte de energia do Brasil com 125GW instalados, como pode-se observar na figura 2.6.

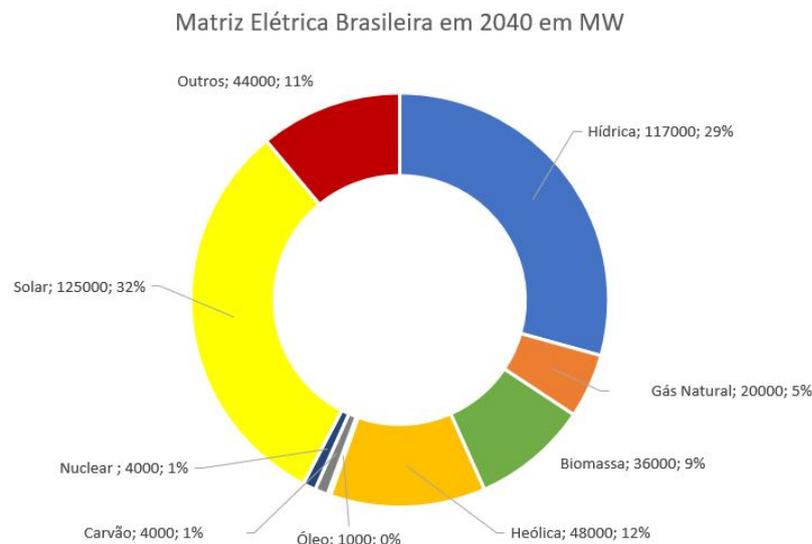


Figura 2.6: Matriz energética brasileira em 2040. Modificado de CELA (2016)

2.3.3 Radiação Solar

A radiação solar que chega à superfície terrestre é composta de radiação direta, difusa e refletida como pode-se observar na figura 2.7. A radiação direta é aquela que não sofre desvios quando entra na atmosfera, é também a responsável por causar sombras visíveis. A radiação difusa por sua vez é influenciada pela presença de nuvens, poeira e gases tendo sua direção original alterada. A radiação refletida é a componente literalmente refletida pela superfície para diferentes direções, podendo retornar para o espaço ou ser direcionada para outra área superficial.

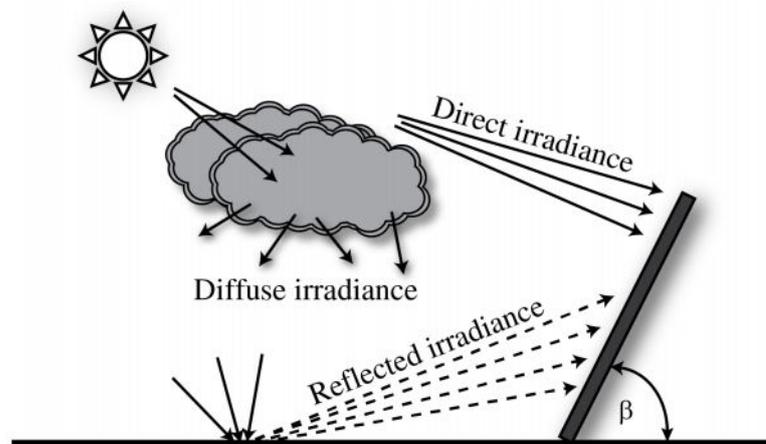


Figura 2.7: Componentes da radiação solar (GULIN; VAŠAK; BAOTIC, 2013)

Em PINHO; GALDINO (2014) temos que a irradiância solar que atinge a camada atmosférica de forma perpendicular a superfície terrestre, tem o valor aproximado de 1.367 W/m^2 este valor é conhecido como constante solar. Porém o valor que realmente chega a superfície terrestre é menor, devido a perdas na atmosfera por reflexão, absorção e espelhamento. Portanto o nível de irradiância que chega à superfície utilizada como condição padrão de ensaio, é de 1.000 W/m^2 .

No globo devido a diversas características que variam de acordo com a região, o índice de incidência solar é muito variável, podemos observar na figura 2.8, como regiões tropicais e desérticas tem uma capacidade de geração elevada comparada ao resto do planeta, o que as tornam excelentes campos para exploração da energia fotovoltaica.

O Brasil graças a sua localização e clima, tem características favoráveis para o grande aproveitamento de energia solar durante o ano inteiro (PEREIRA; GONÇALVES, 2008), particularmente a região nordeste do país se destaca por sua capacidade de geração de energia a partir do sol. Devido ao seu clima mais seco, a presença de nuvens é menor

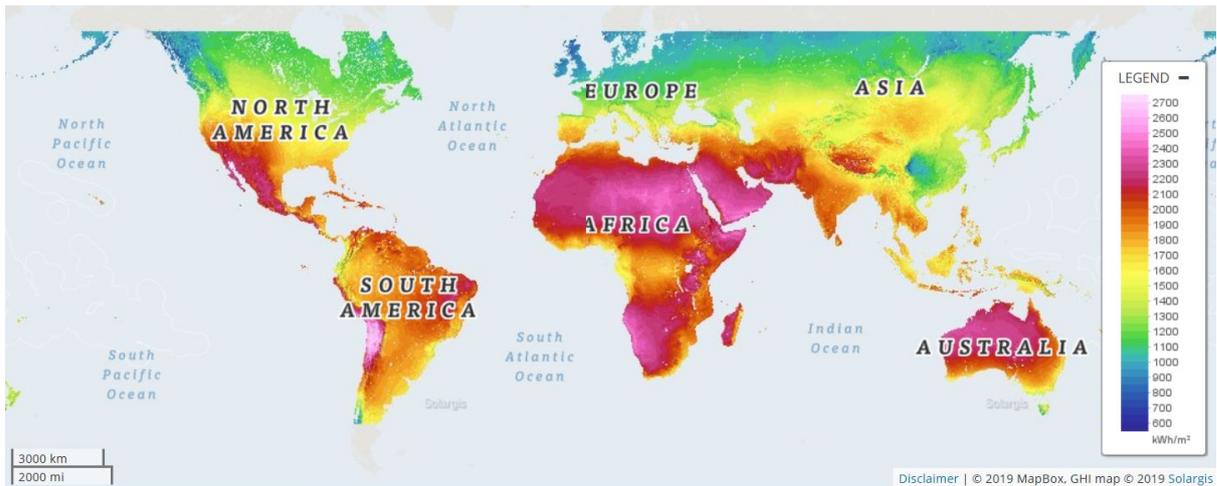


Figura 2.8: Radiação Anual Global (SOLARGIS, 2019)

favorecendo assim a incidência da radiação direta e diminuindo a presença da radiação difusa.

2.3.4 Módulo fotovoltaico

Na figura 2.9 temos um esquemático de uma célula, um módulo e um arranjo fotovoltaico.

As células fotovoltaicas de silício cristalino são as responsáveis por gerar tensão, aproximadamente 0,6 V, em circuito aberto quando estão expostas a luz solar (SAPVIA, 2017).

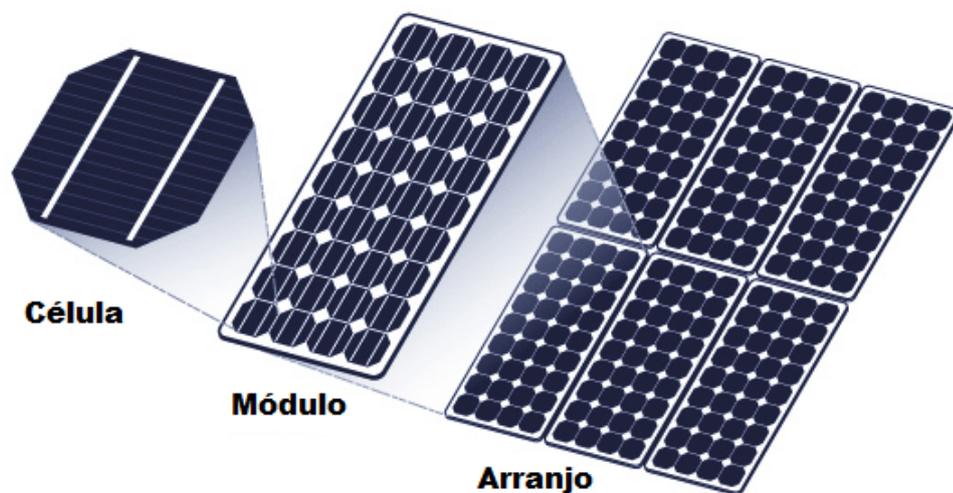


Figura 2.9: Imagem esquemática de uma célula, um módulo e um arranjo fotovoltaico, modificado de BEATRIZ *et al.* (2011)

Para se obter potências de saída mais elevadas e ser possível alimentar dispositivos elétricos, as células são conectadas em série ou paralelo, encapsuladas por camadas de vidro temperado, EVA estabilizado e filme isolante e emolduradas com alumínio tornando-as resistentes ao ambiente, como demonstrado na figura 2.10, e dando origem ao módulo fotovoltaico (VIANA *et al.*, 2012).

A interconexão dos módulos é denominado arranjo, onde obtém-se uma saída única de corrente elétrica contínua, tornando possível sistemas com grandes potências de saída, capazes de alimentar residências e indústrias após estarem conectados a inversores que convertem a CC em CA, injetando diretamente na rede, com o mesmo padrão de tensão, frequência e fase. (VIANA *et al.*, 2012).

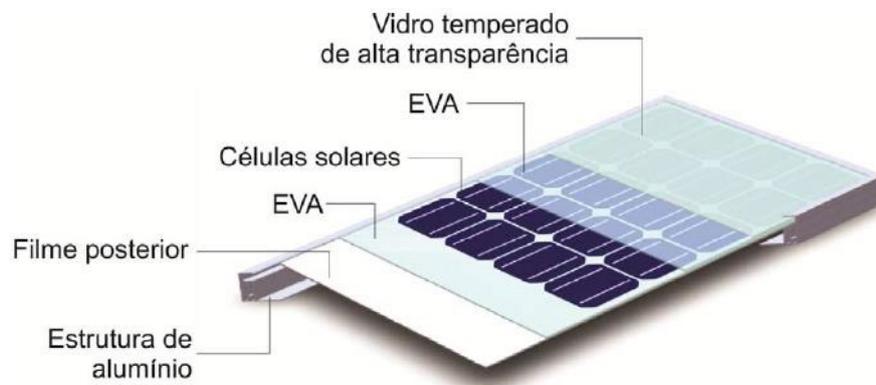


Figura 2.10: Estrutura do painel fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014)

2.3.5 Perdas no Sistema devido a temperatura

Para PINHO; GALDINO (2014) os módulos fotovoltaicos dificilmente trabalham em suas condições ideais, a variação da temperatura ambiente e a incidência de radiação solar implicam em uma variação nos parâmetros de saída das células que compõem os módulos. O aumento na temperatura é diretamente ligado a tensão, trazendo como consequência de uma elevação na temperatura, uma queda considerável na tensão como podemos observar na figura 2.11. A corrente entretanto é diretamente ligada à irradiância solar, sofrendo pequeno aumento conforme a irradiância é maior, porém, não é o suficiente para compensar a grande queda de tensão causado pela temperatura.

Segundos dados de DGS (2014), para minimizar perdas decorrentes da elevação na temperatura, os módulos fotovoltaicos devem ser instalados de forma que favoreça a dissipação de calor. A maneira como é realizado posicionamento dos módulos tem influência

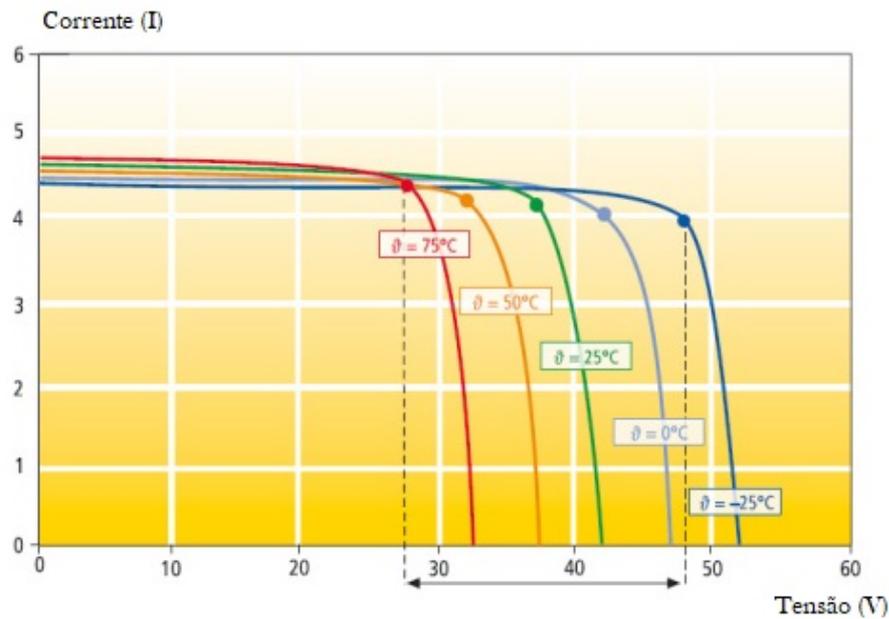


Figura 2.11: Relação I-V em módulos com temperaturas diferentes e irradiância de 1000 W/m^2 . Modificado de SAPVIA (2017)

direta à sua eficiência, conforme podemos observar na figura 2.12. Em um sistema com uma boa ventilação temos um menor acréscimo na temperatura, representado barra laranja, e conseqüentemente uma queda menor na produtividade do painel, representado pelo índice *yield* na barra azul. A demonstração deixa claro a grande diferença que um sistema pode sofrer, representando variações com aumento de mais de 30°C na temperatura, além de perdas na produtividade que podem chegar até 8,9%.

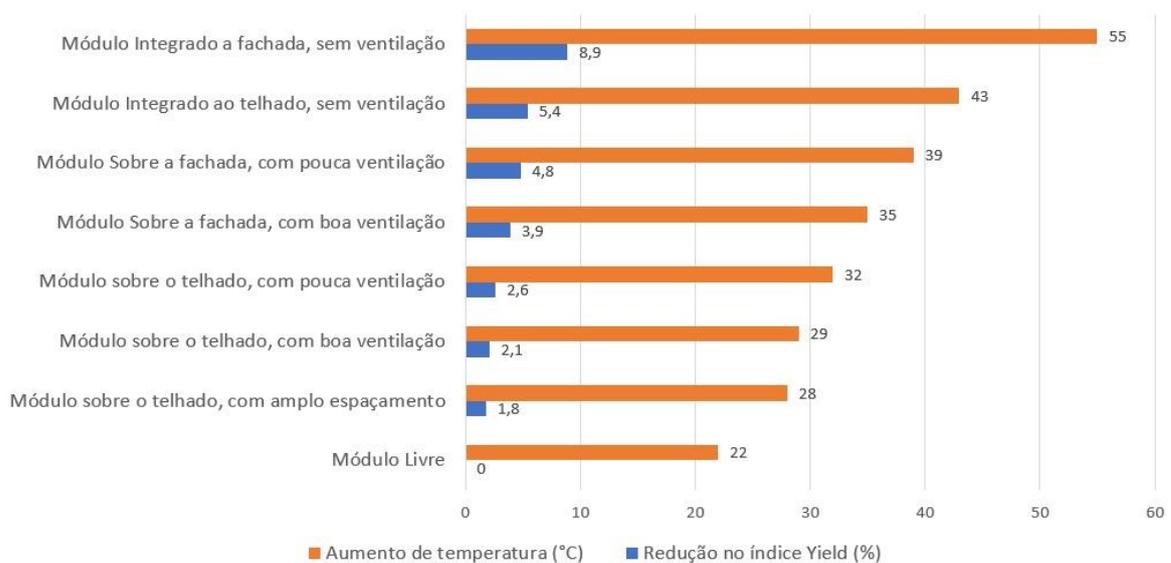


Figura 2.12: Aumento na temperatura e redução no índice yield de acordo com o modo de instalação do módulo fotovoltaico. Modificado de DGS (2014)

2.4 Transferência de Calor

A energia térmica é a fração da energia interna que a partir de uma diferença de temperatura pode ser transferida de um determinado corpo para outro. O processo denominado transferência de calor é de forma simples o fato que, se for colocado um corpo em um ambiente e estes estiverem em temperaturas distintas haverá uma troca de energia, comumente chamada de "calor". Segundo SHAPIRO *et al.* (2005), transferência de calor é energia em transito devido a uma diferença de temperatura.

Desta forma, sempre que houver diferença de temperatura entre meios, existirá troca de calor, tal transferência pode acontecer através da condução, convecção e/ou radiação variando conforme o ambiente e materiais, podendo ocorrer entre sólidos ou fluidos, sólidos separados por fluidos, fluidos separados por uma superfície sólida e também entre superfícies sólidas separadas pelo vácuo.

2.4.1 Condução

A transferência através da condução ocorre a partir da atividade atômica e molecular, onde há transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas com menor energia através do contato. Portanto a transferência por condução acontece do meio com maior temperatura para menor temperatura, como demonstrado na figura 2.13, podendo ocorrer em materiais sólidos, líquidos ou gasosos. A equação que descreve a taxa de transferência de calor por condução é conhecida como *Lei de Fourier*. (SHAPIRO *et al.*, 2005)

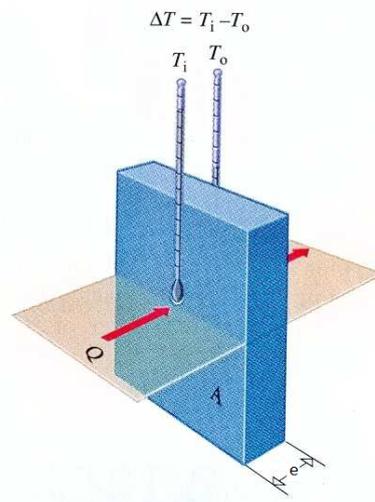


Figura 2.13: Transferência de calor por condução. (IFSC, 2016)

$$Q_{cond} = -\frac{kA\Delta T}{e} \quad (2.1)$$

e : espessura do material

k : condutividade térmica

A : área superficial

ΔT : diferença de temperatura entre as paredes do material

Tabela 2.1: Valores de condutividade térmica para alguns materiais a 300 K, modificada de INCROPERA; DEWITT; BERGMAN (2000)

Material	k(W/(m.K))
<i>Água</i>	0,61
<i>Ar</i>	0,026
<i>Cobre(Puro)</i>	401
<i>Diamante</i>	2300
<i>Ferro(Puro)</i>	80
<i>Madeira</i>	0.1 - 0.19
<i>Vidro</i>	0.78 - 1.4

2.4.2 Convecção

Transferência de calor por convecção é o nome dado ao tipo de transferência que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento desde que estejam em temperaturas diferentes. Tal modo de transferência de energia térmica ocorre através de dois mecanismos, sendo pela condução, devido ao movimento molecular aleatório, e também pelo movimento macroscópico do fluido, movimento este que favorece a transferência de calor, devido ao fato que uma grande quantidade de moléculas estão se movendo em um curto período de tempo. De forma simples, podemos citar a existência de convecção através do uso de ventoinhas, bombas centrifugas e também pela diferença de densidade decorrente do próprio aumento de temperatura do fluido, sendo as duas primeiras chamadas de convecção forçada, pois vem de meios externos, e a última conhecida como convecção natural. Pode-se explicar a convecção através da equação conhecida como *Lei do resfriamento de Newton*. (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000)

$$Q_{conv} = \bar{h}A_{sup}(T_s - T_{atm}) \quad (2.2)$$

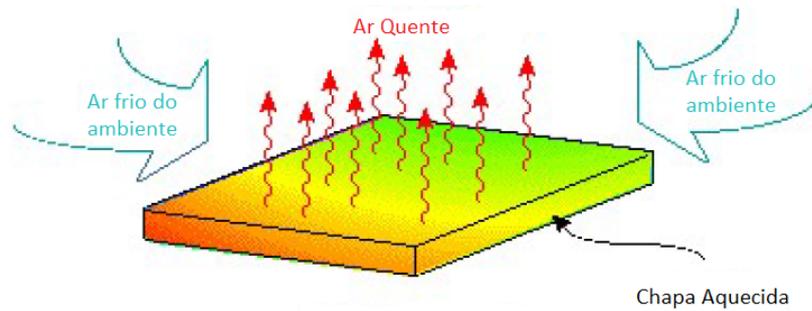


Figura 2.14: Transferência de calor por convecção natural. (SOLIDWORKS, 2019)

A_{sup} : Área da superfície

\bar{h} : coeficiente convectivo médio

T_s : Temperatura superficial

T_{atm} : Temperatura da atmosfera

Tabela 2.2: Valores típicos para o coeficiente de transferência de calor, h . Modificada de INCROPERA; DEWITT; BERGMAN (2000).

Tipo de Convecção	$h(W/(m^2.K))$
Forçada em Gases	15 - 250
Natural em Gases	2 - 15
Forçada em Líquidos	100 - 20000
Natural em Líquidos	50 - 1000
Mudança de fase (ebulição / condensação)	2500 - 100000

2.4.3 Radiação

É denominado radiação térmica, toda e qualquer energia emitida cujo o comprimento de onda varie entre 0,1 e 100 μm do espectro eletromagnético, como demonstrado na figura 2.1. A transferência de calor por radiação térmica ocorre através de sólidos e líquidos não opacos à radiação térmica, gases e também no vácuo.

A energia radiante que um corpo emite é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann. (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000)

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_s^4 \quad (2.3)$$

σ : Constante de Stefan Boltzmann

ε : Emissividade

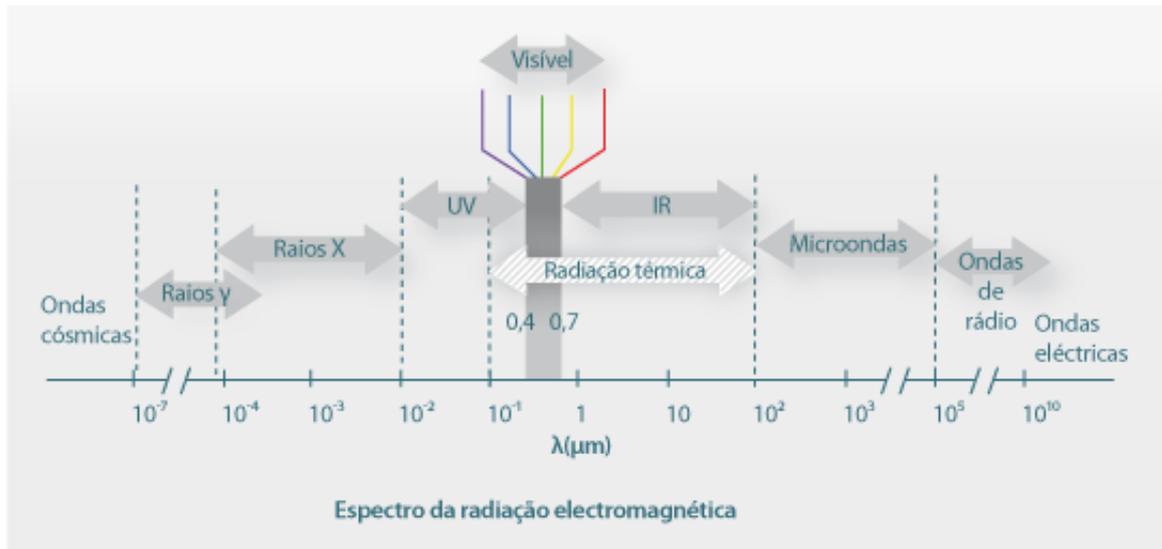


Figura 2.15: Espectro da Radiação Eletromagnética COIMBRA (2018)

T_s : temperatura da superfície

Tabela 2.3: Valores emissividade de algumas superfícies a 300 K, modificada de INCROPERA; DEWITT; BERGMAN (2000).

Materiais	Emissividade, ε
Aço Inox (polido)	0.17
Água, pele, vegetação e solo	0.92 - 0.96
Asfalto	0.85 - 0.93
Cobre, Prata ou Ouro (polidos)	0.018 - 0.035

Dados do Sistema

Os dados obtidos e analisados no presente trabalho foram adquiridos através de plantas reais que utilizam sistemas fotovoltaicos, sendo uma planta composta por 17 módulos fixados diretamente sobre o telhado, que será denominada daqui em diante como planta A (3.3), uma segunda planta também composta por 17 módulos, porém com sua instalação sobre suportes de inclinação, será denominada como planta B (3.4),

A terceira planta é composta por 42 módulos, sendo destes, 21 fixados diretamente sobre o telhado e 21 sobre estruturas de inclinação, este sistema será a planta C. As plantas A e B ocupam uma área de 34m^2 cada, enquanto a planta C ocupa 90m^2 .

3.1 Características das Plantas

- Os sistemas estão instalados sobre telhados situados na cidade de Oliveira MG, sendo as plantas A e B distantes de 800 metros uma em relação a outra.
- inclinação dos módulos de 10° em relação a horizontal.
- Temperatura dos dias de testes variando de 18°C a 33°C em ambiente aberto.
- Considera-se que a eficiência dos módulos fotovoltaicos é avaliada nas condições padrões de teste (STC) com irradiância solar de 1000 W/m^2 temperatura ambiente média de 25°C . (GUENOUNOU; MALEK; AILLERIE, 2016)
- Em situações críticas, módulos fotovoltaicos operam em altas temperaturas entre 50 e 100°C . (OLIVEIRA, 2018)

3.1.1 Módulos

Os testes foram realizados utilizando módulos Canadian Solar, com potência de 340W, compostos por 144 células. As características de funcionamento dos mesmos de acordo com a temperatura em sua superfície são descritas a partir da figura 3.1

Alteração das Características pela Temperatura	
Especificação	Dado
Coeficiente de Temperatura (Pmax)	-0,39% / °C
Coeficiente de Temperatura (Voc)	-0,29% / °C
Coeficiente de Temperatura (Isc)	0,05% / °C
Temperatura de Operação Nominal do módulo	43 ± 3 / °C

Figura 3.1: Relação entre temperatura e perda de eficiência em porcentagem. Modificado de CANADIANSOLAR (2018)

Como descrito na 3.1, a variação para cada grau Celsius da temperatura nominal do módulo causa variação em sua corrente e tensão, sendo a variação na tensão muito mais significativa. Onde para cada grau elevado acima de 43 °C temos uma perda de 0,29% de tensão em circuito aberto e 0,39% na potência do módulo, e apenas uma elevação de 0,05% na corrente de curto circuito.

3.1.2 Inversores

O inversor presente nos sistemas é o Renovigi 5k Plus, figura 3.2, através dele que foram captados os dados das plantas.



Figura 3.2: Inversor Renovigi 5k Plus. (Renovigi, 2019)

O inversor Renovigi 5k Plus tem como característica duas Mppt's (ponto rastreador potência máxima) e duas entradas para corrente contínua, nas quais temos 99,5% de eficiência de conversão para corrente alternada. Nas Plantas A e B (Anexo 1) os módulos estão ligados em um inversor, sendo uma Mppt com 9 e a outra com 8 módulos em série. Na plantas C (Anexo 2) temos dois inversores, cada um com 21 módulos e em ambos temos uma Mppt com 11 módulos e uma com 10, também em série.



Figura 3.3: Sistema Instalado com estruturas fixas sobre o telhado - Planta A



Figura 3.4: Sistema Instalado com estruturas espaçadas do telhado - Planta B

3.2 Simulações via software PVsol

Do mesmo modo das plantas reais, foram realizadas simulações no software PVsol, cujo em seu banco de dados detém informações climáticas da região, baseado na latitude e longitude, além de uma interface 3D onde é possível recriar as plantas de forma fiel, com informações de inclinação, tipo de telhado, espaçamento entre o módulo e o telhado

entre diversos outros parâmetros, e assim possibilitando realizar testes com dados muito próximos ao encontrado na realidade.

Na primeira planta da simulação temos 17 módulos fixados diretamente sobre um telhado de zinco, no mesmos moldes da planta A, (3.5). Na segunda simulação, temos a planta B que é composta pelos mesmos 17 módulos, porém com sua instalação sobre suportes de inclinação em um telhado de amianto (3.6).

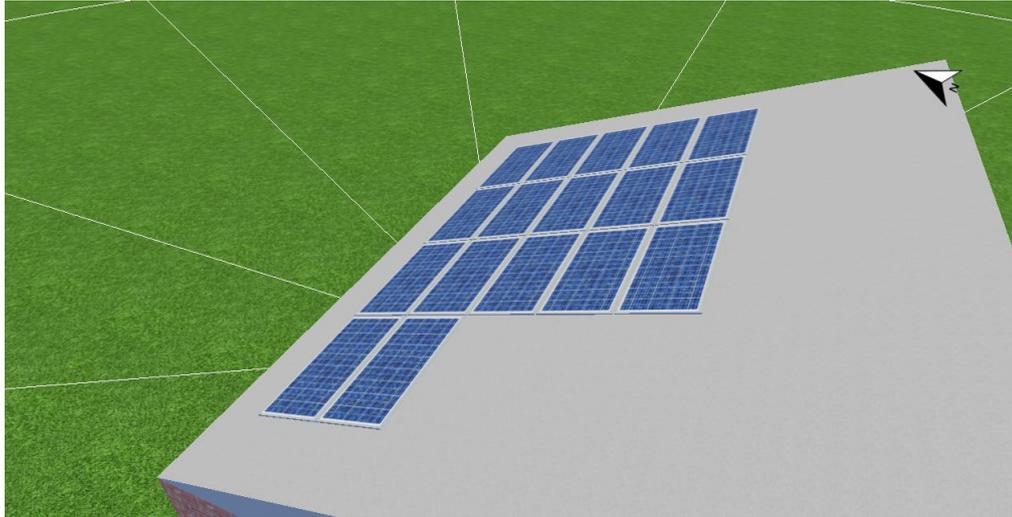


Figura 3.5: Sistema simulado com estrutura fixa ao telhado - Planta A

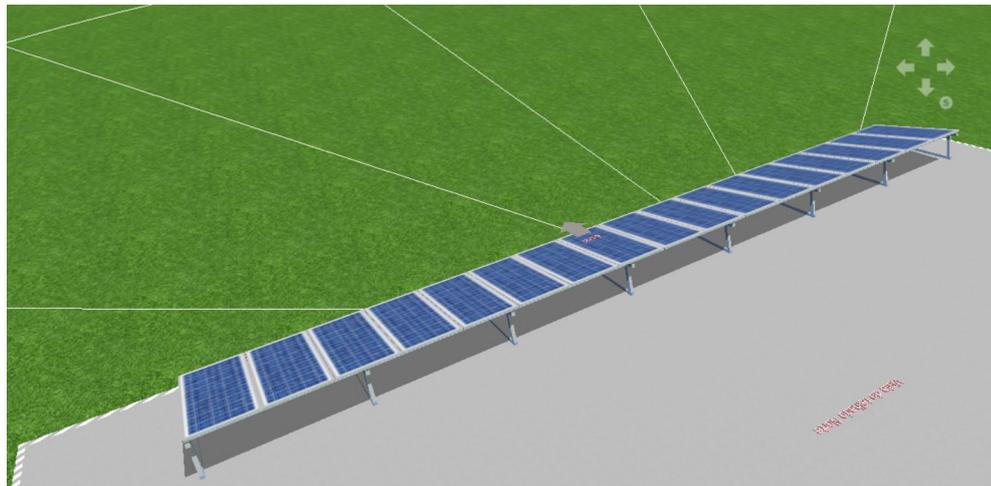


Figura 3.6: Sistema simulado com estrutura elevada em relação ao telhado - Planta B

A planta C, composta por 42 módulos, foi simulada em duas etapas, primeiramente sendo simulado o sistema do inversor 1, onde são 21 módulos fixos diretamente sobre o telhado. Posteriormente foi realizada a simulação do sistema ligado ao inversor 2, onde se tem 21 módulos sobre estrutura com espaçamento.

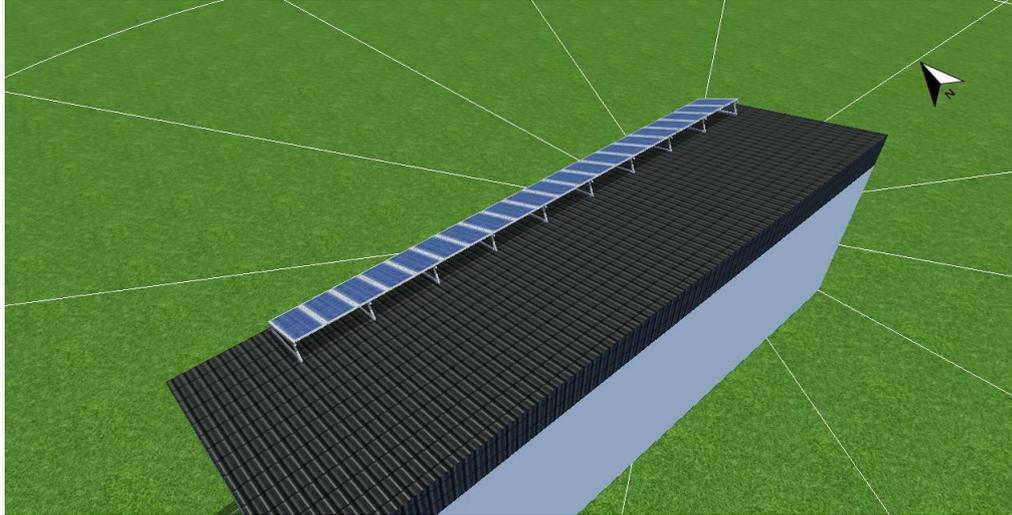


Figura 3.7: Sistema simulado com estrutura elevada em relação ao telhado - Planta C inversor 1

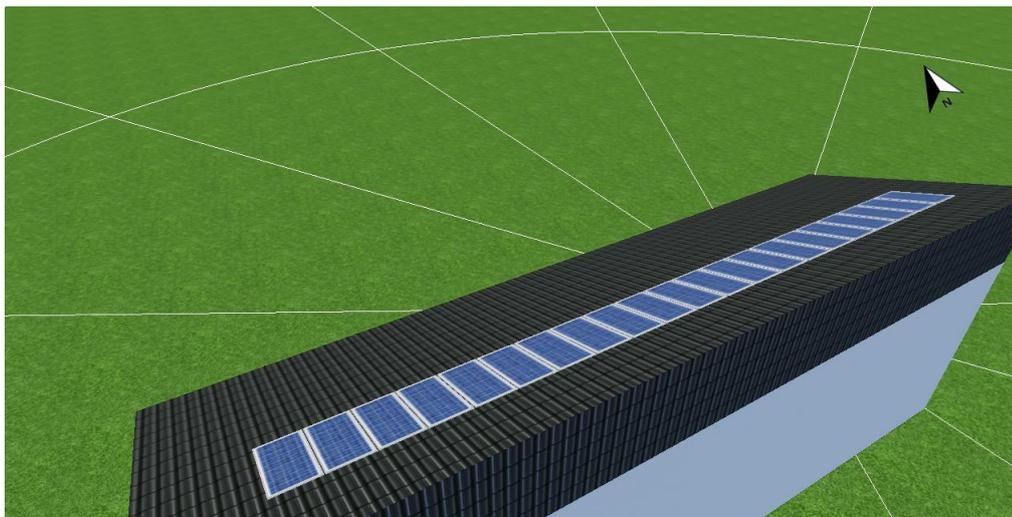


Figura 3.8: Sistema simulado com estrutura fixa ao telhado - Planta C inversor 2

Desenvolvimento

4.1 Modelagem de operação térmica do módulo solar

Diversos trabalhos abordando a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos já foram realizados, em AL TARABSHEH *et al.* (2013) o sistema de células fotovoltaicas é resfriado através do escoamento de um fluido no interior da tubulação. Já em Bodnár; Koós (2018) foram feitos testes aplicando resfriamento por aplicação de ar forçado através de tubulações na parte inferior dos módulos. Estudos com esta característica utilizam a temperatura nominal de operação da célula (NOCT) como ferramenta afim de obter uma estimativa real para a temperatura do módulo (MOHAMED; KHATIB, 2014). Entretanto com a grande variação da intensidade solar no planeta muitos modelos devem ser frequentemente calibrados de forma experimental e geralmente apresentam dados restritos a região onde foi realizado o estudo.

Desta forma, pode-se observar presente na literatura recomendações da utilização de modelos térmicos dinâmicos, baseados em balanço de energia transiente do processo, pois estes apresentam dados mais fieis a realidade com relação a modelos permanentes (JAKHRANI *et al.*, 2011).

4.1.1 Balanço de Energia em um módulo solar

Observa-se na figura 4.1 o balanço de energia aplicado à um módulo solar, onde temos a irradiação total recebida por ele, bem como as formas da transferência de calor presentes no sistema, a potência de energia gerada e também o aumento interno de energia.

Para este modelo assume-se que a irradiância recebida pelo módulo se distribui igualmente por toda sua extensão. A partir disso podemos observar que da irradiância total

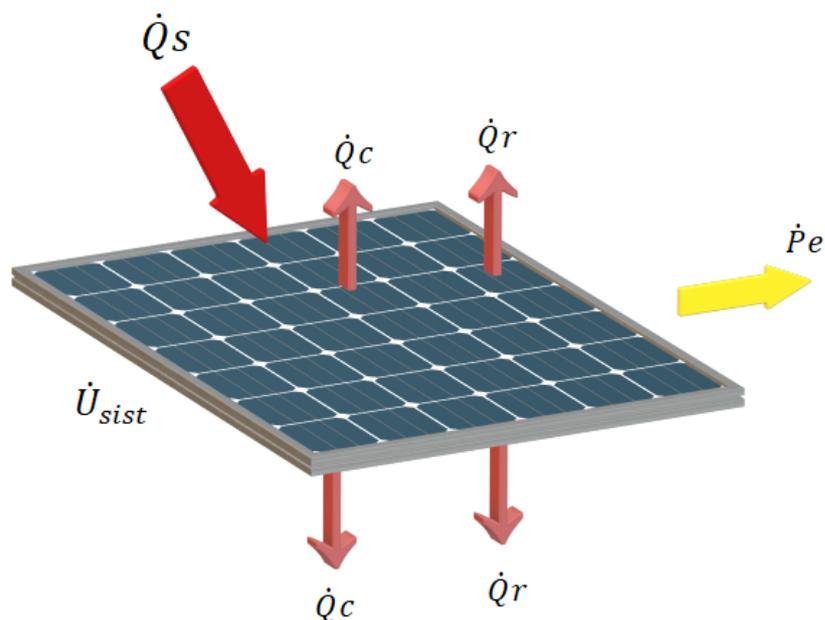


Figura 4.1: Balanço de Energia em um módulo fotovoltaico. Adaptado: MAZÓN-HERNÁNDEZ *et al.* (2013)

recebida por um módulo apenas uma parte efetivamente se converte em eletricidade, sendo o restante dissipado em forma de convecção e radiação, ou contribuindo para o aumento da energia interna do módulo, elevando sua temperatura.

No que se refere a este trabalho a equação 4.1 representa o balanço de energia no módulo. Nas sub-seções seguintes cada termo será explicado individualmente.

$$\dot{Q}_s - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{P}_e) = \dot{U}_{sist} \quad (4.1)$$

\dot{Q}_s : Irradiação total

\dot{Q}_c : Perda para a vizinhança por convecção

\dot{Q}_r : Perda para a vizinhança por irradiação

\dot{P}_e : Potência de saída

\dot{U}_{sist} : Aumento da energia interna do modelo (temperatura)

4.1.2 Irradiância Solar

Para FERREIRA (2018) irradiação total recebida pela célula, \dot{Q}_S , é apenas uma proporção da irradiância solar, $G_{t,i}$, que chega na direção normal ao plano de inclinação do módulo, sendo necessário compensar o efeito de atenuação causados pela superfície de vidro, chegando na equação 4.2. Para um melhor entendimento da equação, é necessário descrever que a eficiência óptica do sistema, $\tau\alpha$, é dependente da eficiência óptica dos materiais e também do angulo de incidência da radiação solar.

$$\dot{Q}_S = (\tau\alpha)G_{t,i}A_{sup} \quad (4.2)$$

$\tau\alpha$: Eficiência óptica

$G_{t,i}$: Irradiação solar total referente a direção normal ao plano inclinado (i)

A_{sup} : Área da superfície

4.1.3 Transferência de calor por convecção

Para o cálculo da dissipação de calor por convecção deve-se aplicar a Lei de Resfriamento de Newton, definida na equação 4.3 (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000). Entretanto a aplicação da Lei não é tão simples, para FERREIRA (2018) a maior dificuldade no cálculo da dissipação por convecção está em encontrar o coeficiente convectivo médio, \bar{h} .

$$\dot{Q}_C = \bar{h}A_{sup}(T_s - T_{atm}) \quad (4.3)$$

A_{sup} : Área da superfície

T_s : Temperatura superficial

T_{atm} : Temperatura da atmosfera

Por se tratar de módulo fotovoltaico, deve-se considerar que o processo convectivo acontece de forma distinta na parte frontal e posterior do mesmo. Dessa forma, a partir de estudos FERREIRA (2018) obteve o número de Nusselt médio para módulos fotovoltaicos em condições de convecção natural, representado na equação 4.4.

$$\overline{Nu}_L = \left[0,68 + \frac{0,67Ra_L^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \right]^2 \quad (4.4)$$

Ra_L : Número de Rayleigh

Pr : Número de Prandtl

A partir do valor obtido em 4.4 e utilizando a equação 4.5 (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000) é possível obter o valor do coeficiente convectivo médio.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (4.5)$$

\bar{h} : Coeficiente convectivo médio

L : Comprimento característico

k : Coeficiente de condutividade térmica

4.1.4 Transferência de calor por radiação

Da mesma forma que acontece na transferência por convecção, na radiação também temos valores distintos para a parte frontal e posterior do painel, já que a área frontal do painel emite para o céu e a parte posterior para o solo ou telhado. Sendo assim, as equações 4.6 e 4.7 representam a troca de calor para vizinhança através da radiação (FERREIRA, 2018).

$$\dot{Q}_r = \dot{Q}_{r,ceu} + \dot{Q}_{r,solo} \quad (4.6)$$

$$\dot{Q}_r = \sigma \varepsilon_{vidro} A_{sup} F_1 (T_s^4 - T_{ceu}^4) + \sigma \varepsilon_{base} A_{sup} F_2 (T_s^4 - T_{solo}^4) \quad (4.7)$$

F_1, F_2 : Fatores de forma

σ : Constante de Stefan Boltzmann

ε : Emissividade

T_{solo} : temperatura ambiente

Onde ε_{vidro} representa a emissividade do vidro da superfície e ε_{base} a emissividade do fluoreto de polivinil que está presente na parte posterior do módulo. Com relação às temperaturas, segundo BIWOLE; WOLOSZYN; POMPEO (2008) a temperatura do céu, T_{ceu} , é definida pela equação 4.8, já a temperatura do solo, T_{solo} , pode ser considerada

igual a temperatura ambiente.

$$T_{ceu}(C^o) = 0,037536^{1,5}(C^o) + 0,32_{atm}(C^o) \quad (4.8)$$

Os termos F_1, F_2 presentes na equação 4.7, representam os fatores de forma para os dois tipos de trocas por radiação existentes no sistema, seus valores dependem do ângulo de inclinação dos módulos e são calculados de acordo com as equações 4.9 e 4.10. (KANT *et al.*, 2016)

$$F_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta) \quad (4.9)$$

$$F_2 = \frac{1}{2}(1 - \cos(\pi - \beta)) \quad (4.10)$$

β : Ângulo de inclinação do módulo

Percebe-se após uma análise que os valores de F_1 e F_2 são iguais, portanto a equação 4.7 pode ser reescrita na forma:

$$\dot{Q}r = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\sigma A_{sup}[\varepsilon_{vidro}(T_s^4 - T_{ceu}^4) + \varepsilon_{base}(T_s^4 - T_{solo}^4)] \quad (4.11)$$

4.1.5 Eficiência de conversão do módulo

A potência de saída do módulo, $\dot{P}e$, é por definição a parcela da energia solar total incidente na superfície do mesmo, compensado por sua eficiência de conversão. Devido a isso, existem na literatura diversas aproximações e correlações afim de definir a relação entre o aumento de temperatura e a diminuição da eficiência nos módulos fotovoltaicos, uma das mais utilizadas é linear, representada na equação 4.12 (DUBEY; SARVAIYA; SESHADRI, 2013).

$$\eta_c = \eta_{ref}[\beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma_{ref}\log G(t)] \quad (4.12)$$

η_c : Eficiência de conversão do módulo

η_{ref} : Eficiência nominal da célula na temperatura de referência

β_{ref} : Coeficiente de temperatura (fornecido pelo fabricante)

γ_{ref} : Coeficiente de radiação solar (fornecido pelo fabricante)

T_c : Temperatura de operação da célula

T_{ref} : Temperatura de referência

4.1.6 Aumento da energia interna do modelo

Cada material tem uma característica, conseqüentemente cada tipo de matéria necessita de uma quantidade de energia pra o aumento de $1^{\circ}C$ em sua temperatura. A capacidade térmica de um corpo é dada pelo Calor Específico, C_p , da substância que o compõe e também por sua massa. De forma simples, podemos dizer que quanto menor o calor específico de uma substância, menor será a quantidade de calor necessária para elevar a sua temperatura. (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2006)

$$\dot{U}_{sist} = mc_p(\Delta T) \quad (4.13)$$

m: Massa

c_p : Calor específico

ΔT : Variação da temperatura

4.1.7 Equação geral para o balanço de energia no módulo

Aplicando a substituição dos termos das equações 4.2 à 4.13 na equação geral para o balanço de energia 4.1, obtemos a equação 4.14

$$mc_p(\Delta T) = (\tau\alpha - \eta_c)G_{t,i}A_{sup} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r) \quad (4.14)$$

Após todas as substituições nos termos, poderemos observar que a energia interna do módulo sofre a influência da temperatura, que está implícita nos termos de dissipação (\dot{Q}_c e \dot{Q}_r). No capítulo seguinte serão expostos resultados, análises teóricas e reais sobre as alterações que a temperatura do módulo pode causar na geração de um sistema fotovoltaico.

Análises e Resultados

As análises e resultados deste trabalho estão divididos em seções, onde são comparados dados das plantas, com aproximações realizadas matematicamente através da aplicação da equação geral para o balanço de energia no módulo (5.1), através destas, serão expostos valores e pareceres sobre as ações da temperatura nos módulos fotovoltaicos.

5.1 Equação geral e seus termos

Para realizar os cálculos afim de obter a perda de temperatura de um módulo, inicialmente foi necessário obter todos os parâmetros e aplica-los, para assim aproximar o resultado de forma satisfatória.

Dessa forma, podemos enumerar os itens necessários para realizar substituições e aplicar nas equações 4.2 a equação 4.14, da seguinte maneira:

$\tau\alpha$: 0.6 (FERREIRA, 2018)

$G_{t,i}$: 1.000 W/m² (CANADIANSOLAR, 2018)

A_{sup} : 2m² (CANADIANSOLAR, 2018)

T_s : Variável de 40 a 90 °C

L: 2 m (CANADIANSOLAR, 2018)

k: 0.02523

\overline{Nu}_L : 2.2 (OLIVEIRA, 2018)

σ : 5.67*10⁻⁸ (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000)

ε_{vidro} : 0.78 (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000)

ε_{base} : 0.93 (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000)

T_{solo} : 32 °C

β : 10°

η_c : 17.14% CANADIANSOLAR (2018)

m : 25 kg (CANADIANSOLAR, 2018)

c_p : 0.16(INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000)

Devido as dificuldades e pouca disponibilidade de valores precisos sobre valores de \overline{Nu}_L e seus parâmetros, foram realizadas aproximações para um dia claro, sem nuvens no horário de sol pleno da primavera, que para a região da pesquisa é de 11:00 as 14:00 horas.

O valor de \overline{Nu}_L foi encontrado na bibliografia (OLIVEIRA, 2018) calculado a partir de características similares ao utilizado nesse experimento (convecção natural em regime laminar para placa inclinada a 10°), pois seu valor não é fixo e sua variação acontece em tempo real. Como \overline{Nu}_L é dependente de vários outros termos, para seu calculo seria necessário a utilização de uma estação de estudo, para captação de dados climáticos constantemente, como inclinação do sol em relação aos módulos, velocidade e orientação do vento, intensidade de iluminação, entre outros.

Então, utilizando o software MatLAB, foi encontrado o valor da redução na temperatura em um módulo a partir dos parâmetros listados acima, e aplicados na equação 5.1, resultando em uma queda na temperatura média de 5.4 °C, representando numericamente um ganho em potência para o módulo de 2,1%.

$$T = \frac{(\tau\alpha - \eta_c)G_{t,i}A_{sup} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r)}{mc_p} \quad (5.1)$$

5.2 Dados captados a partir das plantas

Com o acompanhamento diário do funcionamento das plantas, foi possível realizar um levantamento, afim de relacionar os resultados teóricos, com os resultados práticos.

Então pôde-se observar através de medições, que os módulos nos quais existe um espaçamento para a passagem de ar, se mantém em temperaturas menores em relação aos módulos fixos no telhado. Porém essa redução na temperatura não é tão brusca como apresentada por meio da equação, se mantendo em uma diferença média inferior a 3 °C.

No gráfico 5.1, são comparadas as temperaturas das placas da Planta C, dos módulos suspensos (curva verde), não suspensos (curva vermelha) e também uma curva da tempe-

ratura do módulo com uma queda constante de 5.4°C , como calculado através da equação de perda de calor 5.1 (curva azul).

As medições foram realizadas no dia 27 de outubro de 2019 com intervalo de meia hora entre cada medição.

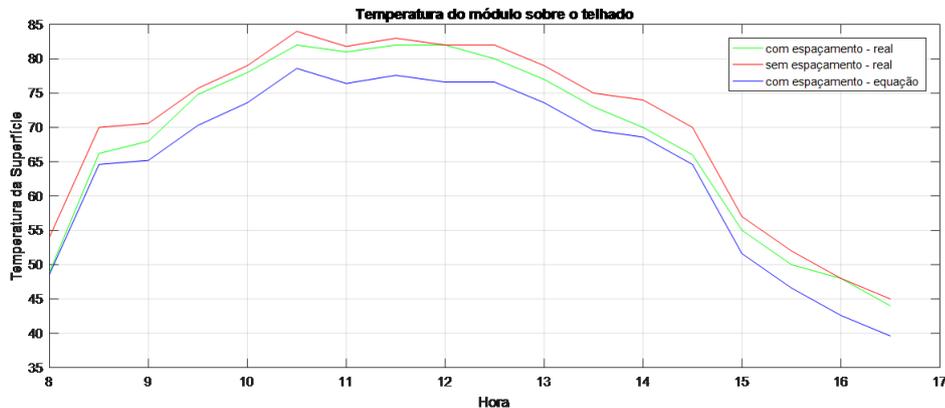


Figura 5.1: Curvas relacionando as temperaturas do módulo

Como é possível observar, de acordo com o cálculo numérico, demonstrado através da curva azul, a temperatura do módulo suspenso deveria ser bem inferior, ao que foi apresentado na realidade, curva verde, um dos motivos do ocorrido é o fato de acontecerem diversas aproximações nos cálculos, que prejudicam de forma considerável o resultado final, porém pode-se observar apesar das diferenças, que o sistema é sim beneficiado através de uma redução de temperatura proporcionada pela elevação dos módulos em relação ao telhado.

5.3 Ganho real em geração

5.3.1 Plantas A e B

Através de dados captados das plantas foi possível obter a diferença entre as gerações e o ganho em kWh que um sistema com menor temperatura, tem sobre o outro. Nas tabelas 5.1, 5.2 e no gráfico 5.2, temos explicitamente a diferença entre as gerações no mês de outubro, observando que em um mês o sistema da planta B obteve uma geração de 35,8 kWh maior em relação ao sistema da planta A, o que representa um ganho de 3.91%, que é um valor esperado pelo que se observa na bibliografia.

Dia	Planta A	Planta B	Dia	Planta A	Planta B
01/10/19	32	31,9	17/10/19	29,8	30,1
02/10/19	34,4	35,1	18/10/19	33,1	34,9
03/10/19	34,6	34,7	19/10/19	24,3	26,1
04/10/19	28,6	33,5	20/10/19	27,5	29
05/10/19	34	32,5	21/10/19	12,7	12,8
06/10/19	32,7	32,8	22/10/19	24,8	26,8
07/10/19	25,4	24,9	23/10/19	24,4	27
08/10/19	17,7	20,2	24/10/19	23,1	24,3
09/10/19	14,6	15,2	25/10/19	32	32,3
10/10/19	11,6	12,6	26/10/19	25,4	25,1
11/10/19	9,8	9,9	27/10/19	34,6	37,1
12/10/19	28,4	29,4	28/10/19	24,7	27,2
13/10/19	31	33,1	29/10/19	22,7	24,7
14/10/19	32,9	34,6	30/10/19	32,5	34,2
15/10/19	34,2	35,5	31/10/19	20,5	23
16/10/19	34,3	33,6			

Tabela 5.1: Geração diária no mês de outubro nas plantas A e B em kWh

Média	26,8	27,8
Total mensal	828,3	864,1
<i>Diferença no mês</i>	35,8	

Tabela 5.2: Comparativo das gerações nas plantas A e B em kWh

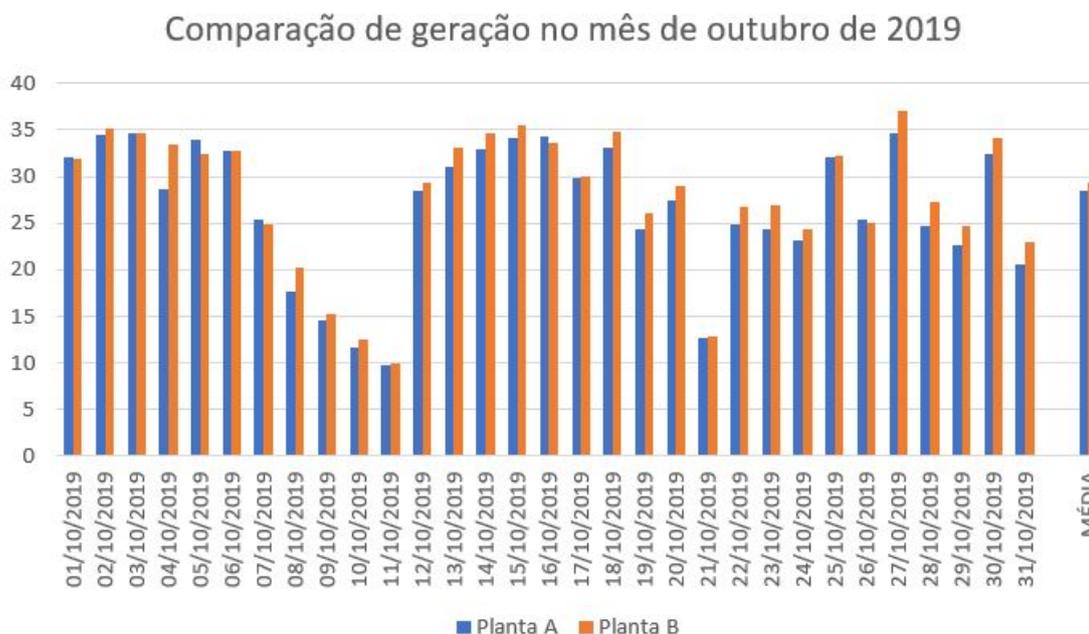


Figura 5.2: Comparação diária no mês de outubro entre as plantas A e B em kWh

5.3.2 Planta C

Os resultados obtidos na planta C, são similares aos encontrados nas plantas A e B, temos uma geração ligeiramente superior do sistema cujo os módulos encontram-se suspensos (inversor 1). Nas tabelas 5.3, 5.4 e no gráfico 5.3, observa-se as diferenças entre as gerações mês a mês no ano de 2019. Numericamente temos que sistema do inversor 1 obteve uma geração de 15,7 kWh em média mensal, maior que o inversor 2, representando um ganho de 1.96%, totalizando no ano até então um ganho de 78,6 kWh, o que também enquadra nos valores esperados e anteriormente observados na bibliografia.

Mês	Inversor 1	Inversor 2
Junho	675	658
Julho	670,4	657,8
Agosto	788,8	766,7
Setembro	875	852,1
Outubro	980	976

Tabela 5.3: Geração mensal na planta C em kWh

Média mensal	797,8	782,1
<i>Diferença média mensal</i>	15,7	
Total Gerado	3989,2	3910,6
<i>Diferença total</i>	78,6	

Tabela 5.4: Comparativo das gerações na planta C

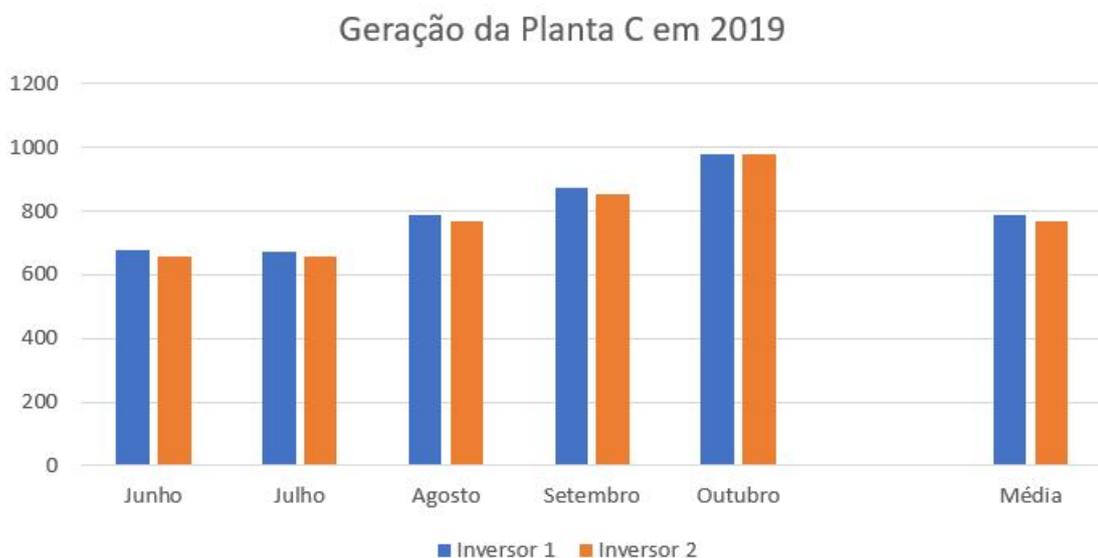


Figura 5.3: Comparativo mensal entre os inversores da planta C

5.4 Plantas simuladas no PVsol

5.4.1 Plantas A e B

Através da simulação das plantas A e B, foi possível obter a diferença entre as gerações e o ganho em kWh dos sistemas, baseado nas características da região, do telhado e também do espaçamento entre os módulos e as telhas.

Na tabela 5.5 temos numericamente a diferença entre as plantas no decorrer de um ano, observando que ambos os sistemas tem perda pelo excesso de temperatura no módulo, porém o sistema da planta B obtém uma perda menor em relação ao sistema da planta A, o que representa anual de 300,73 kWh na geração de energia.

	Planta A	Planta B
Perda anual (kWh)	873,51	572,78
Diferença anual (kWh)	300,73	
Média mensal (kWh)	25,1	

Tabela 5.5: Comparação entre gerações das plantas A e B

5.4.2 Planta C

A planta C, foi simulada em duas etapas, para assim obter a diferença entre as gerações e o ganho em kWh entre os inversores 1 e 2, baseado nas características da região, do telhado e também do espaçamento entre os módulos e as telhas.

Inicialmente foi simulado o sistema do inversor 1, cujos os módulos estão com espaçamento e posteriormente, do inversor 2, com os módulos fixos ao telhado de amianto.

A tabela 5.6 representa a perda de geração nos módulos pela temperatura, onde observa-se que ambos os sistemas tem perda pelo excesso de temperatura, porém o sistema do inversor 1 tem uma perda menor em relação ao sistema do inversor 2, representando uma diferença de 103,26 kWh na geração de energia em um ano.

Planta C	Inversor 1	Inversor 2
Perda anual (kWh)	695,2	798,46
Diferença anual (kWh)	103,26	
Média mensal (kWh)	8,61	

Tabela 5.6: Comparação entre gerações dos inversores na Planta C

5.5 Retorno financeiro do Sistema

5.5.1 Plantas A e B

Em valores financeiros, considerando que a região onde estudo foi realizado, o kWh cobrado pela concessionária é atualmente R\$0,986, temos na relação entre a planta A e B uma geração mensal de R\$35,30 a mais no sistema B. Porém para a instalação do sistema com espaçamento em relação ao telhado o custo efetivo do sistema aumenta, devido a aquisição de mais materiais e o trabalho de instalação, o custo por módulo é acrescido de R\$45,00.

Aumento do custo	R\$ 765,00
Economia mensal Média	R\$ 35,30
Tempo para o retorno financeiro	21,7 meses

Tabela 5.7: Retorno financeiro em meses do sistema com espaçamento da planta B

Se for considerado que o sistema da planta B, mantenha uma média de geração de 35,8kWh acima do que gera a planta A, e também desconsiderando os efeitos da inflação no valor do kWh, o custo total para realizar essa instalação será pago em aproximadamente 22 meses. Sendo todo o valor gerado a partir de então, lucro.

5.5.2 Planta C

O kWh cobrado pela concessionária na instalação em questão é atualmente R\$0,998, a relação entre os inversores 1 e 2 implicam em uma geração mensal de R\$15,67 a mais no do inversor 1. Mas, como citado anteriormente, para a instalação do sistema com espaçamento temos um custo maior, sendo acrescido ao custo por módulo os mesmos R\$45,00.

Aumento do custo	R\$ 945,00
Economia mensal Média	R\$ 15,67
Tempo para o retorno financeiro	60 meses

Tabela 5.8: Retorno financeiro em meses do sistema com espaçamento da planta C

Se for mantida a média de geração do inversor 1, 15,67kWh acima do inversor 2 mensalmente, também desconsiderando os efeitos da inflação no custo do kWh, o custo total

para realizar essa instalação será pago em aproximadamente 60 meses, como demonstrado na tabela 5.8.

Considerações Finais

6.1 Conclusões

No presente trabalho de conclusão de curso II, foram estudados diversos artigos de trabalhos acadêmicos que envolviam variados temas sobre energia solar e transferência de calor. Inicialmente foram realizadas buscas em bancos de artigos científicos, como IEEE *Explore*, Scielo, repositórios de universidades, e também em livros.

Após as pesquisas foi possível obter os parâmetros necessários para o desenvolvimento do trabalho, obtendo informações da radiação solar, do processo de conversão de energia através dos módulos solares e também do balanço de energia do sistema.

A melhoria na eficiência dos módulos se mostra como um grande passo para reduzir o custo de instalação de sistemas fotovoltaicos e, o estudo demonstrou a grande influência que a temperatura pode ocasionar para impedir o melhor funcionamento de conversão elétrica.

Como observado nos resultados é sim possível se beneficiar de um sistema com uma melhor refrigeração natural e, como o esperado, apesar de pequenos os ganhos são existentes. Foi possível observar que a diferença de geração entre as plantas A e B foi maior do que a apresentada na planta C, isso pode ser ocasionado pelo fato de estarem próximas, mas não exatamente no mesmo local, o que faz com que possam sofrer com diferenças pontuais de passagem de nuvens sobre um sistema e no outro não, além de uma pequena diferença na altitude o que pode influenciar na geração durante o nascer e o pôr do sol.

Por fim, é possível dizer que se for do interesse de quem pretende instalar a energia fotovoltaica, é viável obter um sistema com uma geração melhor, para isso deverá desembolsar uma quantia um pouco maior. E devido a isso o retorno financeiro certamente será

um pouco mais lento, mas por outro lado poderá usufruir de um sistema que aproveita melhor sua eficiência de forma vitalícia.

6.1.1 Proposta de Continuidade

Para trabalhos futuros fica a possibilidade de explorar de forma mais precisa os termos das equações de troca de calor, para assim obter mais dados, que serão muito úteis para comparar os resultados teóricos e práticos.

Fica também a questão de buscar outras formas de refrigeração para o módulo, podendo ser através de refrigeração forçada de ar, ou até mesmo a hipótese da criação de um sistema híbrido, que unifica a geração de energia elétrica com o aquecimento de água.

Referências

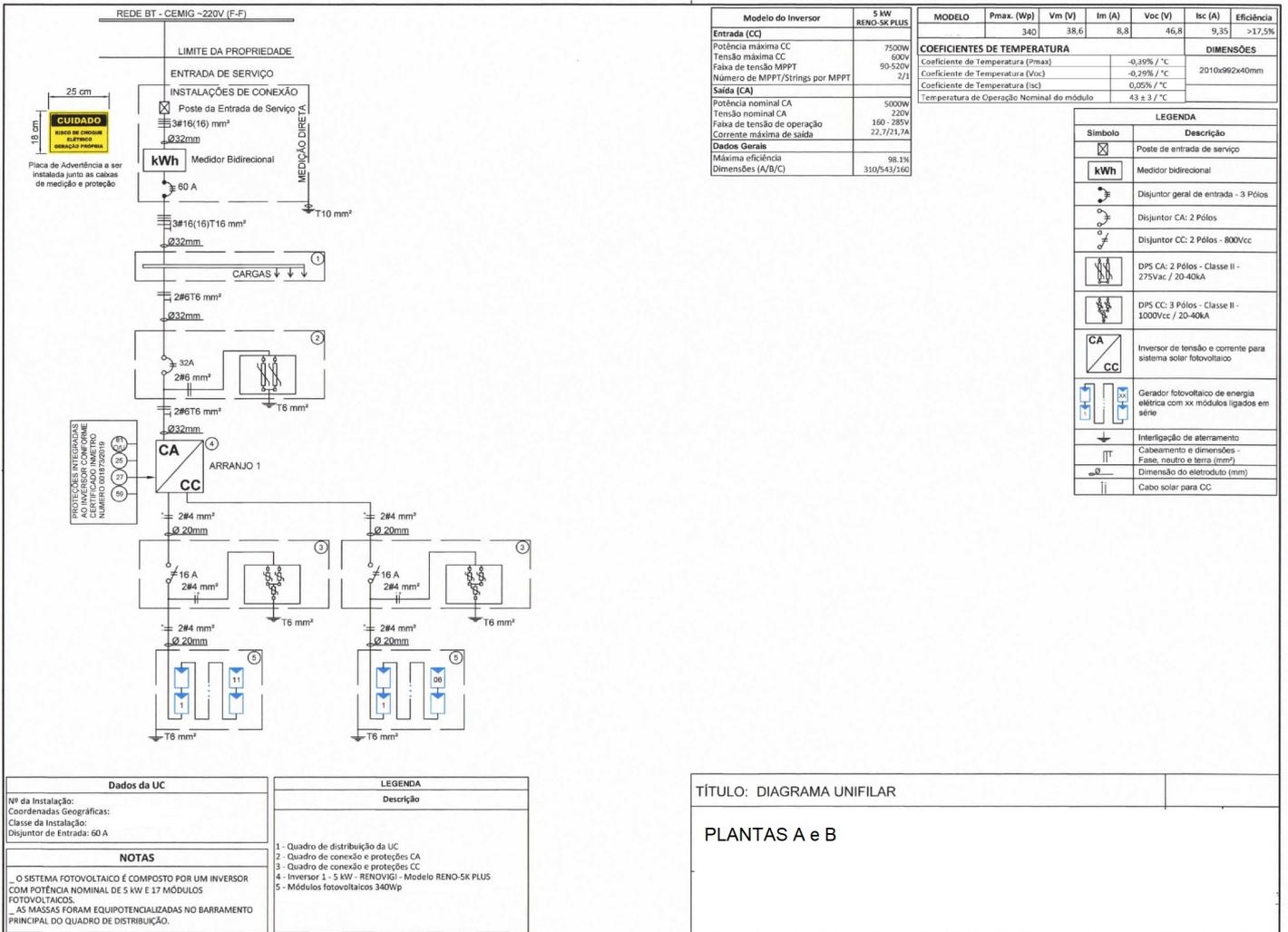
- ABIKO A.K.; ABUKATER, J. B. E. Eficiência Energética e Habitação de Interesse Social no Estado de São Paulo. , [S.l.], 2010.
- ABSOLAR. *Infográfico ABSOLAR*. Absolar.
- AL TARABSHEH, A. *et al.* Investigation of temperature effects in efficiency improvement of non-uniformly cooled photovoltaic cells. *Chemical Engineering Transactions*, [S.l.], v.35, 2013.
- ANEEL, A. d. E. E. d. B. Agência Nacional de Energia Elétrica. *ANEEL, Brasília, Brasil. 3ªEd*, [S.l.], 2008.
- BEATRIZ, P. *et al.* *Energia Solar*. [S.l.: s.n.], 2011.
- BIWOLE, P. H.; WOLOSZYN, M.; POMPEO, C. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy and Buildings*, [S.l.], v.40, n.8, p.1487–1497, 2008.
- Bodnár, I.; Koós, D. Determination of temperature coefficient and transient electrical characteristics of a cooled and non-cooled solar module. In: INTERNATIONAL CARPATHIAN CONTROL CONFERENCE (ICCC), 2018. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2018. p.570–573.
- BRUTON, T.; WOODOCK, J. Multi-megawatt upscaling of silicon and thin film solar cell and module manufacturing (MUSIC FM). *APAS RENA CT94*, [S.l.], v.8, 1997.
- CANADIANSOLAR. *Super High Power Poly Perc Module*. Painel Solar Canadian.
- CELA. *Congresso de GD: modelos de negócios*. CLEAN ENERGY LATIN AMERICA.

- COIMBRA, U. de. *Portal de Engenharia Universidade de Coimbra Transferência de Calor*. 2018.
- DGS. Planning and installing photovoltaic system: a guide for installers, architects and engineers. *International Journal of Environmental Studies*, [S.l.], v.71, 11 2014.
- DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy Procedia*, [S.l.], v.33, p.311–321, 2013.
- FERREIRA, R. A. M. Metodologia para avaliação do desempenho de painéis fotovoltaicos utilizando um modelo elétrico-térmico e termografia quantitativa. *Belo Horizonte - MG. TESE (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais—MG*, [S.l.], 2018.
- GARCIA, A. G. P. Leilão de eficiência energética no Brasil. *Rio de Janeiro-RJ. TESE (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro—RJ*, [S.l.], 2008.
- GUENOUNOU, A.; MALEK, A.; AILLERIE, M. Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: application to a coastal mediterranean region of algeria. *Energy Conversion and Management*, [S.l.], v.114, p.356–363, 2016.
- GULIN, M.; VAŠAK, M.; BAOTIC, M. Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL DRIVES AND POWER ELECTRONICS (EDPE 2013), 17. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2013. v.6, n.4, p.347–353.
- IBOPE. *Opinião Pública sobre energia elétrica*. Pesquisa IBOPE.
- IFSC. *Calor, energia e transferência de calor*. 2016.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L. *Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- JAKHRANI, A. *et al.* Comparison of solar photovoltaic module temperature models. *World Applied Sciences Journal*, [S.l.], v.14, n.3, p.1–8, 2011.

- JUNK, W. J.; MELLO, J. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. *Estudos avançados*, [S.l.], v.4, n.8, p.126–143, 1990.
- KANT, K. *et al.* Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy*, [S.l.], v.140, p.151–161, 2016.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- MAZÓN-HERNÁNDEZ, R. *et al.* Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, [S.l.], v.2013, 2013.
- MME. *Energia Solar no Brasil e Mundo*. Ministério de Minas e Energia.
- MOHAMED, A.; KHATIB, T. Correlation for estimating solar cell temperature based on a tropical field operation of a photovoltaic system. In: IEEE PES T&D CONFERENCE AND EXPOSITION, 2014. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2014. p.1–5.
- MOREIRA, N. J. H. *Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012*. [S.l.]: ANEEL, 2012.
- NASCIMENTO, R. L. Energia solar no Brasil: situação e perspectivas. , [S.l.], 2017.
- NREL. *National Center for Photovoltaics*. [S.l.]: NREL, 2016.
- OLIVEIRA, J. G. G. d. Convecção mista em painéis fotovoltaicos. , [S.l.], 2018.
- PEREIRA, O. L.; GONÇALVES, F. F. Dimensionamento de Inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de tubarão-sc. *Revista Brasileira de Energia*, [S.l.], v.14, n.1, p.25–45, 2008.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, [S.l.], v.1, p.47–499, 2014.
- SAPVIA, S. A. P. I. A. Solar PV Installation Guidelines. *Renewable Energy Hub*, [S.l.], 2017.
- SAUAIA, R. L. *Energia Solar Fotovoltaica: panorama, oportunidades e desafios*. Absolar.

-
- SHAPIRO, H. N. *et al.* Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. *Rio de Janeiro, RJ: LTC*, [S.l.], 2005.
- SOLARGIS. *Mapa de radiação solar Horizontal global*. SolarAtlas.
- SOLIDWORKS. *Análise térmica*. 2019.
- TIBA, C. *et al.* Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. *Recife: Editora Universitária da UFPE*, [S.l.], p.32, 2000.
- TIWARI, G.; MISHRA, R.; SOLANKI, S. Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modelling. *Applied energy*, [S.l.], v.88, n.7, p.2287–2304, 2011.
- VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. *Gazeta de Física*, [S.l.], v.29, p.1–2, 2006.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. [S.l.]: Edgard Blucher, 2006.
- VIANA, T. d. S. *et al.* Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil. , [S.l.], 2012.

ANEXO 1



Modelo do Inversor	5 kW RENO-SK PLUS
Entrada (CC)	
Potência máxima CC	7500W
Tensão máxima CC	600V
Faixa de tensão MPPT	90-520V
Número de MPPT/Strings por MPPT	2/1
Saída (CA)	
Potência nominal CA	5000W
Tensão nominal CA	220V
Faixa de tensão de operação	160 - 285V
Corrente máxima de saída	22,7/21,7A
Dados Gerais	
Máxima eficiência	98,1%
Dimensões (A/B/C)	310/543/160

MODELO	Pmax. (Wp)	Vm (V)	Im (A)	Voc (V)	Isc (A)	Eficiência
	340	38,6	8,8	46,8	9,35	>17,5%

COEFICIENTES DE TEMPERATURA		DIMENSÕES	
Coefficiente de Temperatura (Pmax)	-0,35% / °C	2010x962x40mm	
Coefficiente de Temperatura (Voc)	-0,25% / °C		
Coefficiente de Temperatura (Isc)	0,05% / °C		
Temperatura de Operação Nominal do módulo	43 ± 3 / °C		

LEGENDA	
	Poste de entrada de serviço
	Medidor bidirecional
	Disjuntor geral de entrada - 3 Pólos
	Disjuntor CA: 2 Pólos
	Disjuntor CC: 2 Pólos - 800Vcc
	DPS CA: 2 Pólos - Classe II - 275Vac / 20-40kA
	DPS CC: 3 Pólos - Classe II - 1000Vcc / 20-40kA
	Inversor de tensão e corrente para sistema solar fotovoltaico
	Gerador fotovoltaico de energia elétrica com xx módulos ligados em série
	Interligação de aterramento
	Cabeamento e dimensões - Fase, neutro e terra (mm²)
	Dimensão do eletroduto (mm)
	Cabo solar para CC

Dados da UC
Nº da Instalação:
Coordenadas Geográficas:
Classe da Instalação:
Disjuntor de Entrada: 60 A

NOTAS
_ O SISTEMA FOTOVOLTAICO É COMPOSTO POR UM INVERSOR COM POTÊNCIA NOMINAL DE 5 kW E 17 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.
_ AS MASSAS FORAM EQUIPOTENCIALIZADAS NO BARRAMENTO PRINCIPAL DO QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO.

LEGENDA
Descrição
1 - Quadro de distribuição da UC
2 - Quadro de conexão e proteções CA
3 - Quadro de conexão e proteções CC
4 - Inversor 1 - 5 kW - RENO-VGI - Modelo RENO-SK PLUS
5 - Módulos fotovoltaicos 340Wp

TÍTULO: DIAGRAMA UNIFILAR
PLANTAS A e B


```

ta = 0.6; %Eficiencia optica
G = 1000 ; %Irradiação solar
Asup = 2; %Area da Superficie
Qs = (ta)*G*Asup % Irradiancia Solar
%%
Nul = 2.2; %numero de Nusselt
k= 0.02523; %coeficiente de condutividade térmica
L = 2; %Comprimento caracteristico
h = Nul*k/L; % coeficiente convectivo medio
Ts = (40:10:90) % Temperatura superficial
Tatm = 35; %Temp Atmosfera
for (i=1:1:5)
Qc(i) = h*Asup*(Ts(i)-Tatm) %Transferencia de Calor por convecção
end
Nul = [0.68+(0.67*Ra^(1/4))/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(4/9)]^2
Tsolo = 32; %Temp Solo %Temp Superficie
Tceu= 0.037536*Tatm^(1.5)+0.32*Tatm;
B=10;
sigma= 5.67*10^(-8); %constante de Stefan-Boltzmann
Evidro=0.78;
Ebase=0.93;
for (i=1:1:5)
Qr(i)=1/2*(1+cos(B))*sigma*Asup*[Evidro*(Ts(i)^4 - Tceu^4)+Ebase*(Ts(i)^4-Tsolo^4)]
%Transferencia de calor por radiacao
end
%%
n= 0.1714 %Eficiencia de conversao do modulo
%%
m= 25; % massa
cp=0.16; %Calor Especifico vidro
T1=-[(ta-n)*G*Asup-(Qc+Qr)]/m*cp

```