



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Estudo do Desempenho Energético
de Módulos Fotovoltaicos
com Base na Redução de Temperatura**

Pedro Henrique Salles Arouck de Souza

Brasília, 19 de Maio de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Estudo do Desempenho Energético
de Módulos Fotovoltaicos
com Base na Redução de Temperatura**

Pedro Henrique Salles Arouck de Souza

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica como requisito parcial
para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Fernando Cardoso Melo, UnB/ENE
Orientador

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, UnB/ENE
Membro da Banca

Prof. Sérgio Batista da Silva, IFTM
Membro da Banca

Dedicatória

Ao meu avô Nilsinho

Pedro Henrique Salles Arouck de Souza

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer a todos que me acompanharam durante essa jornada.

Pedro Henrique Salles Arouck de Souza

RESUMO

Este trabalho realiza um estudo sobre o efeito da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos. Por meio de simulações, foram elaborados três modelos de usinas solares usando o módulo da Resun, modelo RS6E-150P, de 150Wp.

Para cada modelo simulado, métodos diferentes de resfriamento foram abordados. No caso base, a simulação foi feita sem se levar em consideração nenhum tipo de resfriamento. Nos casos com resfriamento, foi simulado um método de troca de calor passivo, como se o módulo fosse resfriado por aletas, e um método de troca de calor ativo, como se o módulo fosse resfriado por um fluxo de água. Para o caso do resfriamento com aletas, foi obtido um ganho de produção de cerca de 3% e para o resfriamento por um fluxo de água, obteve-se 5% de ganho.

Estimadas as reduções de temperaturas, a produção de energia em cada sistema e a temperatura de operação dos módulos para cada caso foram obtidas. Esses valores foram utilizados para calcular o ganho em eficiência de cada modelo de resfriamento nas usinas propostas. Os resultados poderão contribuir para que o uso da tecnologia fotovoltaica seja cada vez mais acessível e presente no Brasil, país com grande potencial nessa área.

Palavras-chave: *Energia solar, usinas solares flutuantes, resfriamento de módulos fotovoltaicos, eficiência de módulos fotovoltaicos, sustentabilidade*

ABSTRACT

This work carries out a study on the effect of the operating temperature of photovoltaic modules. Through simulations, three models of solar plants were developed using the Resun module, model RS6E-150P, of 150Wp.

For each simulated model, different cooling methods were addressed. In the base case, the simulation was carried out without taking into account any type of cooling. In cases with cooling, a passive heat exchange method was simulated, as if the module was cooled by fins, and an active heat exchange method, as if the module was cooled by a flow of water. For the case of cooling with fins, a production gain of about 3% was obtained and for cooling by a flow of water, a gain of 5% was obtained.

After temperature reductions were estimated, the energy production in each system and the operating temperature of the modules for each case were obtained. These values were used to obtain the efficiency gain of each cooling model in the proposed plants. The results may contribute to make the use of photovoltaic technology increasingly accessible and present in Brazil, a country with great potential in this area.

Keywords: *Solar energy, floating solar plants, cooling of photovoltaic modules, efficiency of photovoltaic modules, sustainability*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	1
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	3
2.1.1	AQUECIMENTO GLOBAL	3
2.1.2	CAUSAS DO AQUECIMENTO GLOBAL	5
2.1.3	PRODUÇÃO DE CO ₂ NA GERAÇÃO DE ENERGIA	7
2.1.4	ENERGIA PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	9
2.2	A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR	10
2.2.1	RECURSO SOLAR E GERAÇÃO DE ENERGIA	11
2.2.2	MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	13
2.2.3	PERSPECTIVAS DO SETOR	13
2.3	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	15
2.3.1	INFLUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA NO COMPORTAMENTO DA CURVA I-V	16
2.3.2	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO DA CURVA I-V	17
2.4	SOLUÇÕES PARA O RESFRIAMENTO DE MÓDULOS SOLARES	19
2.4.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR ALETAS	20
2.4.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA ÁGUA	22
2.4.3	RESULTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA	23
2.5	USINAS SOLARES FLUTUANTES	24
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	METODOLOGIA	28
3.2	BOMBA D'ÁGUA E LOCALIZAÇÃO	29
3.3	MÓDULO RESUN RS6E-150P	29
3.4	INVERSOR ABB MICRO-0.25-I-OUTD	30
3.5	SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM)	31
3.5.1	MODELAGEM DO SISTEMA NO SYSTEM ADVISOR MODEL	31
3.5.2	SIMULAÇÃO DE SISTEMAS COM DIFERENTES TEMPERATURAS	38
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	PREMISSAS INICIAIS	42
4.2	RESULTADOS OBTIDOS	43

4.2.1	MODELO DE BASE	45
4.2.2	MANIPULAÇÃO DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO.....	47
4.2.3	MODELOS COM SISTEMA DE RESFRIAMENTO	47
4.2.4	DISCUSSÃO	49
4.2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	50
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	51
5.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

LISTA DE FIGURAS

2.1	Temperatura e Atividade Solar	4
2.2	Média global da temperatura combinada do oceano e da superfície	5
2.3	Média global de concentração de gases de efeito estufa	6
2.4	Energia primaria - consumo mundial	8
2.5	Custo e aumento de capacidade de geração para energias solar e eólica.....	9
2.6	Crescimento da capacidade de potência renovável instalada	11
2.7	Áreas aptas para a instalação de usinas fotovoltaicas	12
2.8	Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	13
2.9	Evolução esperada da expansão (centralizada) da solar FV	14
2.10	Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C.....	16
2.11	Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V	17
2.12	Curvas I-V exemplificadas no datasheet do produto	18
2.13	Uso de aletas para melhorar a transferência de calor em uma parede plana. (a) Superfície sem aletas. (b) Superfície aletada	20
2.14	Balanco de energia em uma superfície estendida	21
2.15	Processos de transferência de calor por convecção. (a) Convecção forçada. (b) Convecção natural. (c) Ebulição. (d) Condensação	23
2.16	Representação esquemática de uma usina fotovoltaica flutuante	25
3.1	Menu de criação de um novo projeto no SAM	32
3.2	Tela de configuração do arquivo de Clima no SAM	33
3.3	Especificações do módulo	34
3.4	Busca pelo inversor	34
3.5	Especificações do inversor	35
3.6	Configurações do arranjo	36
3.7	Possível local para instalação do arranjo fotovoltaico	37
3.8	Perdas consideradas pelo SAM	38
3.9	Resultados matemáticos obtidos para diferentes métodos de resfriamento.....	41
4.1	Comportamento esperado para redução de temperatura	43
4.2	Menu para obtenção de dados referentes à produção de energia.....	44
4.3	Menu para criação de gráficos referentes à produção de energia	44
4.4	Menu para obtenção do perfil anual da temperatura de operação dos módulos	45
4.5	Resultados obtidos para o caso base	46
4.6	Resultados obtidos para o caso base	47
4.7	Resultados obtidos para o caso com resfriamento ativo.....	48

LISTA DE TABELAS

2.1	Valores obtidos na folha de dados técnicos para os coeficientes de temperatura.....	18
2.2	Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção	23
3.1	Valores obtidos na folha de dados técnicos para a bomba FL-3203.....	29
3.2	Valores obtidos na folha de dados técnicos para os coeficientes de temperatura.....	30
3.3	Valores obtidos na folha de dados técnicos.....	30
4.1	Valores obtidos no modelo base	46
4.2	Valores obtidos no modelo com resfriamento passivo.....	48
4.3	Valores obtidos no modelo com resfriamento ativo	49
4.4	Compilado de Resultados.....	50

1 INTRODUÇÃO

Em 2015, como resultado de uma reunião da Assembleia Geral da ONU, foram estabelecidos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), através da resolução 70/1 "Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável", mais comumente conhecida como Agenda 2030 (ASSEMBLÉIA GERAL DA ONU, 2015).

A ODS 7, relacionada a energia, limpa e renovável, propõe aos países membros das Nações Unidas ações propositivas voltadas não apenas à geração e distribuição de energia, mas a geração, distribuição e acesso a energia que seja, desde sua fonte de produção renovável, com impacto ambiental reduzido, custo financeiro e social também diminuído e que atinja ao maior número de pessoas no globo terrestre.(SREDOJA; SOCORRO, 2018)

Portanto, o estudo de aumento na eficiência dos módulos fotovoltaicos se mostra um tópico relevante e atual, no qual os resultados encontrados podem representar, além do aumento do retorno financeiro do investimento realizado, um passo adiante no sentido de zelo ao meio ambiente e em direção ao fim das desigualdades econômico-sociais, sendo esse último o objetivo maior almejado pela ONU com a proposta dos ODS.

Os resultados obtidos por meio dos experimentos poderão servir como base para que, em oportunidades futuras, a pesquisa e o uso da tecnologia fotovoltaica seja cada vez mais acessível e presente no cotidiano das universidades, empresas e domicílios brasileiros.

O Brasil tem um grande potencial de produção de energia fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014). Pesquisas e testes de laboratório visando a melhoria da eficiência dos módulos fotovoltaicos por meio de resfriamento e redução de custos representam um estímulo para o maior desenvolvimento dessa tecnologia.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo proposto neste trabalho busca aumentar a eficiência de geração de energia de módulos fotovoltaicos, na expectativa de que novas técnicas de produção possam surgir e se popularizar.

Ao analisar o impacto da temperatura do módulo na sua produtividade, é possível calcular as eventuais perdas e relacionar com os custos para se produzir um equipamento capaz de manter o arranjo em uma temperatura que promova a extração da máxima potência, com ganho de eficiência. Avaliando, assim, o impacto da temperatura de operação no potencial de geração de energia fotovoltaica de um módulo e participar na expansão do uso e da pesquisa de tecnologias fotovoltaicas.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Especificamente, o objetivo é estudar do aumento da eficiência do módulo fotovoltaico com base em métodos de resfriamentos encontrados na literatura (RODRIGRES et al., 2015) e simular modelos referentes a umas usina solar resfriada e comparar com uma equivalente sem o respectivo sistema de resfriamento.

Com os resultados obtidos, é possível elaborar uma base teórica para a implementação das usinas simuladas na prática. E, com os valores de ganho na produção de eficiência, realizar estudos referentes aos custos de integração dos módulos ao sistema de resfriamento, à escalabilidade do projeto e à sustentabilidade da geração de energia fotovoltaica ao agregar nos módulos o sistema de resfriamento, comparado com o método tradicional.

Assim como a obtenção dos resultados, é igualmente importante realizar um levantamento bibliográfico para que seja possível alcançar plenamente o objetivo do trabalho. No próximo capítulo é feito uma revisão de literatura abordando problemas ambientais que podem ser mitigados com o avanço de tecnologias de geração de energia renovável, bem como a importância da energia solar entre esse rol de energias renováveis. Por fim, é apresentado resultados importantes de pesquisas que tem como objetivo o aumento da eficiência de módulos solares com o controle da temperatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo explica o contexto em que o trabalho está inserido. Apresenta o panorama global e local, tratando do aquecimento global e da redução de emissões de gases efeito estufa, bem como da importância da geração de energia solar e do aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos. No final é feito estudo de casos, incluindo de usinas solares flutuantes.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

2.1.1 Aquecimento Global

O clima da Terra sempre variou ao longo da história. Nos últimos 650 mil anos ocorreram sete ciclos de glaciação (eras do gelo), sendo que a última ocorreu cerca de 11 mil anos atrás, marcando o começo da era moderna do clima e da civilização humana. A maioria dessas mudanças climáticas se deram por pequenas variações na órbita terrestre que alteraram a quantidade de energia solar recebida pelo planeta.

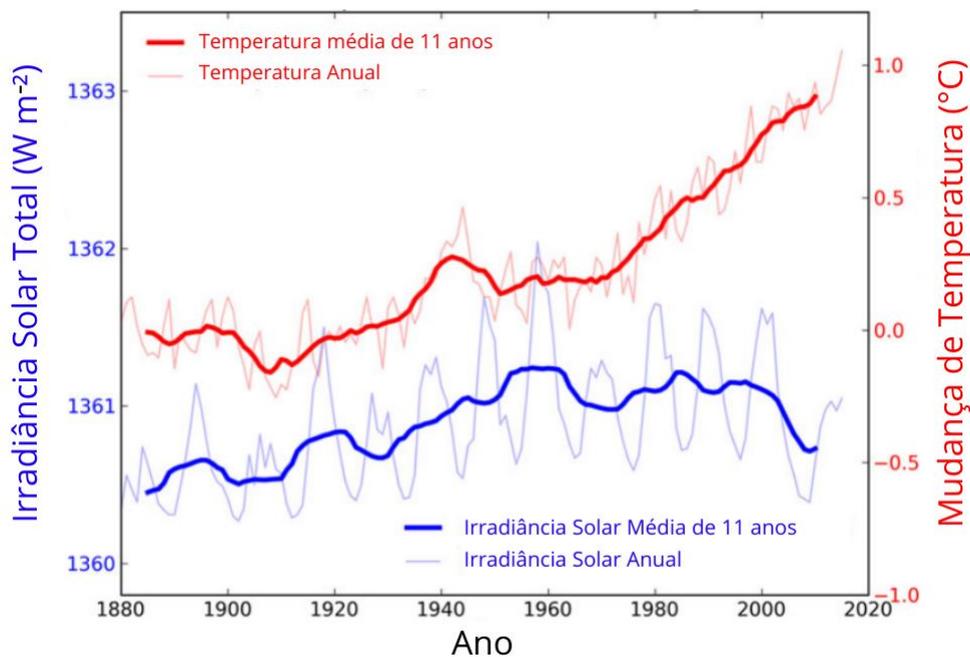
É razoável supor que mudanças na produção de energia do Sol causariam mudanças no clima, uma vez que o Sol é a fonte fundamental de energia que move nosso sistema climático, mas várias linhas de evidência mostram que o aquecimento global atual não pode ser explicado por mudanças na energia do Sol :

- Desde 1750, a quantidade média de energia proveniente do Sol permaneceu constante ou aumentou ligeiramente;
- Se o aquecimento fosse causado por um Sol mais ativo, os cientistas esperariam ver temperaturas mais altas em todas as camadas da atmosfera. Em vez disso, eles observaram um resfriamento na alta atmosfera e um aquecimento na superfície e nas partes mais baixas da atmosfera. Isso porque os gases do efeito estufa estão prendendo o calor na baixa atmosfera;
- Os modelos climáticos que incluem mudanças de irradiância solar não podem reproduzir a tendência de temperatura observada no último século ou mais sem incluir um aumento nos gases de efeito estufa.

O gráfico da Figura 2.1, elaborado por pesquisadores da NASA em parceria com o Laboratório de Propulsão a Jato do Instituto de Tecnologia da Califórnia, compara as mudanças de temperatura

da superfície global (linha vermelha) e a energia do Sol que a Terra recebe (linha amarela) em watts por metro quadrado desde 1880. As linhas mais claras e finas mostram os níveis anuais, enquanto as linhas mais pesadas e grossas mostram as tendências médias de 11 anos. Médias de onze anos são usadas para reduzir equívocos naturais ano a ano nos dados. A quantidade de energia solar que a Terra recebe segue o ciclo natural do Sol de 11 anos de pequenos altos e baixos, sem aumento líquido desde a década de 1950. No mesmo período, a temperatura global aumentou acentuadamente. Portanto, é extremamente improvável que o Sol tenha causado a tendência de aquecimento global observada na última metade do século passado. (NASA-JPL/CALTECH, 2020)

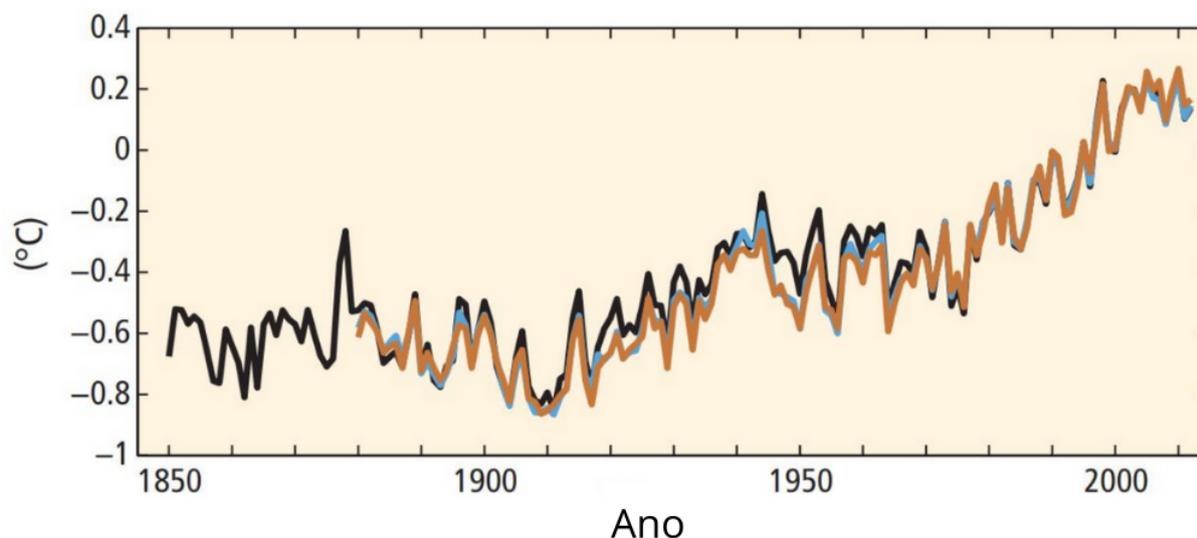
Figura 2.1: Temperatura e Atividade Solar



Fonte: NASA-JPL/CALTECH

A tendência atual de aquecimento é significativa, uma vez que é extremamente provável que se trate do resultado da atividade humana desde o meio do século 20, aumentando em uma taxa sem precedentes ao longo das décadas (SANTER et al., 1996). Cada uma das últimas três décadas foi, sucessivamente, o período mais quente do que a década anterior desde 1850, sendo que, o período entre 1983 e 2012, foi o mais quente dos últimos 1400 anos (IPCC, 2014). A Figura 2.2 a seguir mostra a média global da temperatura combinada do oceano e da superfície, onde as cores indicam diferentes conjuntos de dados.

Figura 2.2: Média global da temperatura combinada do oceano e da superfície



Fonte: Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers

Avanços tecnológicos permitiram que os cientistas coletassem diferentes tipos de informações sobre nosso planeta e sobre as mudanças que o clima sofreu. Satélites modernos possibilitam a obtenção de informações em escala global, núcleos de gelo retirados da Antártica e de montanhas mostram níveis de gás de efeito estufa de tempos passados. Evidências comprovam que a quantidade de dióxido de carbono cresce 250 vezes mais rápido quando comparado à última era do gelo (GAFFNEY; STEFFEN, 2017). É sabido, desde o século 19, que o dióxido de carbono possui uma natureza retentora de calor¹.

2.1.2 Causas do Aquecimento Global

O aquecimento global observado desde meados do século 20 é atribuído, por cientistas, à expansão provocada por humanos de gases de efeito estufa (ORESQUES, 2004). Vapor d'água, metano, óxido nitroso, clorofluorcarboneto (CFC) e dióxido de carbono são gases que impedem o calor de escapar pela atmosfera, sendo que o último é o mais relevante, já que a atividade humana aumentou a sua concentração na atmosfera em 47% desde a revolução industrial, principalmente pela queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. (IPCC, 2014)

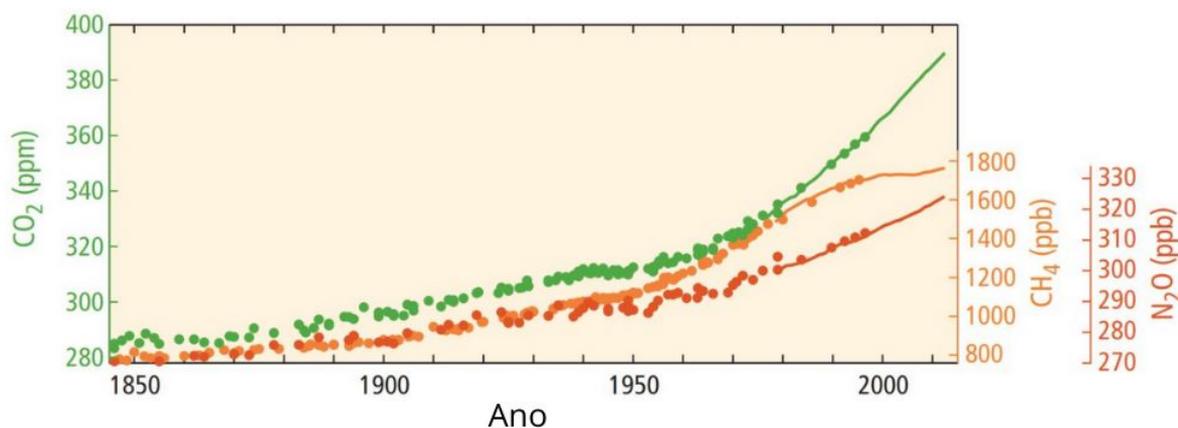
¹Em 1824, Joseph Fourier calculou que um planeta do tamanho da Terra, à mesma distância do Sol, deveria ser muito mais frio. Ele sugeriu que algo na atmosfera poderia estar agindo como um cobertor isolante. Em 1856, Eunice Foote descobriu o motivo, mostrando que o dióxido de carbono e o vapor de água na atmosfera da Terra escapavam da radiação infravermelha (calor).

Na década de 1860, o físico John Tyndall reconheceu o efeito estufa natural da Terra e sugeriu que pequenas mudanças na composição atmosférica tenderiam a causar variações climáticas. Em 1896, um artigo inovador do cientista sueco Svante Arrhenius previu pela primeira vez que as mudanças nos níveis de dióxido de carbono atmosférico poderiam alterar substancialmente a temperatura da superfície por meio do efeito estufa.

Em 1938, Guy Callendar conectou os aumentos de dióxido de carbono na atmosfera da Terra ao aquecimento global. Em 1941, Milutin Milankovic vinculou as idades do gelo às características orbitais da Terra. Gilbert Plass formulou a Teoria do Dióxido de Carbono das Mudanças Climáticas em 1956.

A Figura 2.3 mostra a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera nos últimos anos, sendo o dióxido de carbono em verde, o metano em laranja e o óxido nitroso em vermelho. As linhas representam medidas atmosféricas diretas e os pontos representam dados obtidos em núcleos de gelo. É notável que cerca de metade das emissões de dióxido de carbono ocorreram nos últimos 40 anos.

Figura 2.3: Média global de concentração de gases de efeito estufa



Fonte: Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers

Caso as emissões de gases do efeito estufa continuem crescendo às atuais taxas ao longo dos próximos anos, a temperatura do planeta poderá aumentar, o que poderá resultar em uma elevação no nível do mar (quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC, na sigla em inglês, da Organização das Nações Unidas - ONU). Em todos os cenários, é alta a probabilidade de que a taxa de elevação dos oceanos durante este século exceda a observada no passado. As principais causas seriam a expansão térmica resultante do aumento da temperatura e o derretimento das geleiras.

O texto, a mais recente atualização dos estudos de milhares de cientistas do mundo todo sobre o aquecimento global, confirmou que o homem é responsável pela atual situação do planeta. A versão final de 2014 alerta que muitos aspectos da mudança climática vão persistir durante muitos séculos, mesmo se as emissões de gases-estufa cessarem, diminuir ou permanecerem constantes.

Na avaliação do IPCC, conforme o oceano esquenta, ele perde a capacidade de absorver dióxido de carbono CO_2 da atmosfera. Se a emissão atual for mantida, poderá haver uma aceleração nas concentrações desse gás na atmosfera. É apontado com 90% de certeza que mais de 20% do CO_2 emitido permanecerá na atmosfera por mais de mil anos após as emissões cessarem. A região do Ártico é a que vai aquecer mais fortemente.

Ao analisar as mudanças já ocorridas até o momento, os cientistas do IPCC afirmam que cada uma das três últimas décadas, em relação ao ano 2010, foram sucessivamente as mais quentes quando comparado com qualquer década anteriores desde 1850. A primeira década do século 21

foi a mais quente de todas. As concentrações de CO_2 na atmosfera já aumentaram mais de 20% desde 1958, quando medições sistemáticas começaram a ser feitas, e cerca de 40% desde 1750. O aumento é resultado da atividade humana, principalmente da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento, havendo uma pequena participação da indústria cimenteira.

Para os estudiosos, há uma “confiança muito alta” (nove chances em dez) de que as taxas médias de CO_2 , metano e óxido nitroso do último século sejam as mais altas dos últimos 22 mil anos. É “extremamente provável” (95% de certeza) de que a influência humana sobre o clima causou mais da metade do aumento da temperatura observado entre 1951 e 2010.

Já o Relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais e respectivas trajetórias de emissão de gases de efeito estufa, publicado em 2018, traz subsídios para formuladores de políticas no contexto do fortalecimento da resposta global à ameaça da mudança do clima, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza.

As medidas potenciais e as já existentes de Remoção de Dióxido de Carbono poderiam ter impactos significativos, fortalecendo a resposta global no contexto da sustentabilidade e dos esforços para redução das desigualdades. Isso implica transições de sistemas que podem ser viabilizadas por um aumento de investimentos em adaptação e mitigação, aceleração da inovação tecnológica e mudanças de comportamento.

Os impactos e respostas à mudança do clima estão intimamente vinculados ao desenvolvimento sustentável, que equilibra o bem estar social, a prosperidade econômica e a proteção ambiental. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS), adotados em 2015, proporcionam uma estrutura estabelecida para avaliar os vínculos entre o aquecimento global de 1,5°C ou 2°C e as metas de desenvolvimento que incluem erradicação da pobreza, redução de desigualdades e ação climática.

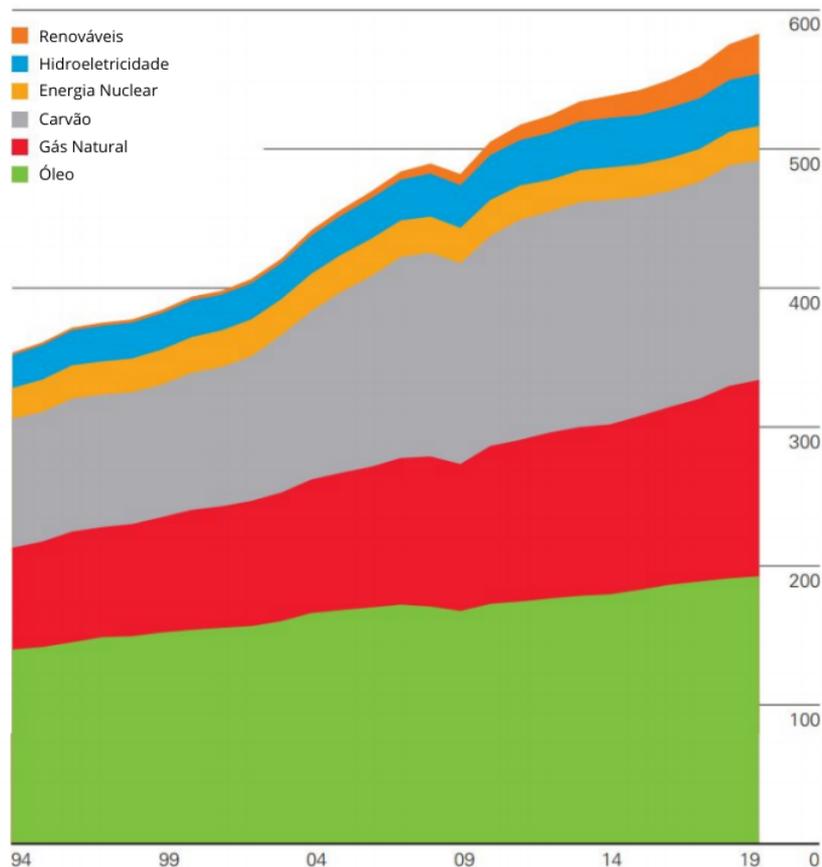
As metas acordadas pelos países da ONU visam colocar o mundo em um caminho mais sustentável até 2030. A geração de energia acessível e limpa (ODS 7), um dos grandes desafios para alcançar esse desenvolvimento sustentável, tem como foco atender às necessidades da economia e proteger o meio ambiente. Reflete a preocupação com a população de baixa renda, com áreas não atendidas por serviços de energia e inclui a estabilidade do seu fornecimento. Contrapõe as energias modernas atuais às antigas, que precisam ser substituídas, como lenha, carvão e petróleo, uma vez que as novas energias renováveis provocam menor impacto no meio ambiente e menor emissão de gases de efeito estufa. Por meio dos ODS, a ONU busca engajar todos os países na construção de um futuro melhor e aposta na transição de fontes poluidoras para fontes limpas. (ONU, 2021)

2.1.3 Produção de CO_2 na geração de energia

Uma das principais contribuições para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, em especial o dióxido de carbono, é o uso de combustíveis fósseis para produção

de energia. O consumo de combustível para geração de energia primária, mostrado na Figura 2.4 deixa clara a participação das fontes de energia fósseis, como carvão, gás natural e petróleo, que continuam compondo mais de 80% do total da energia gerada. O uso indiscriminado desse tipo de combustível causa aumento, ano após ano, de emissão de CO₂ na atmosfera. (BP, 2020)

Figura 2.4: Energia primaria - consumo mundial



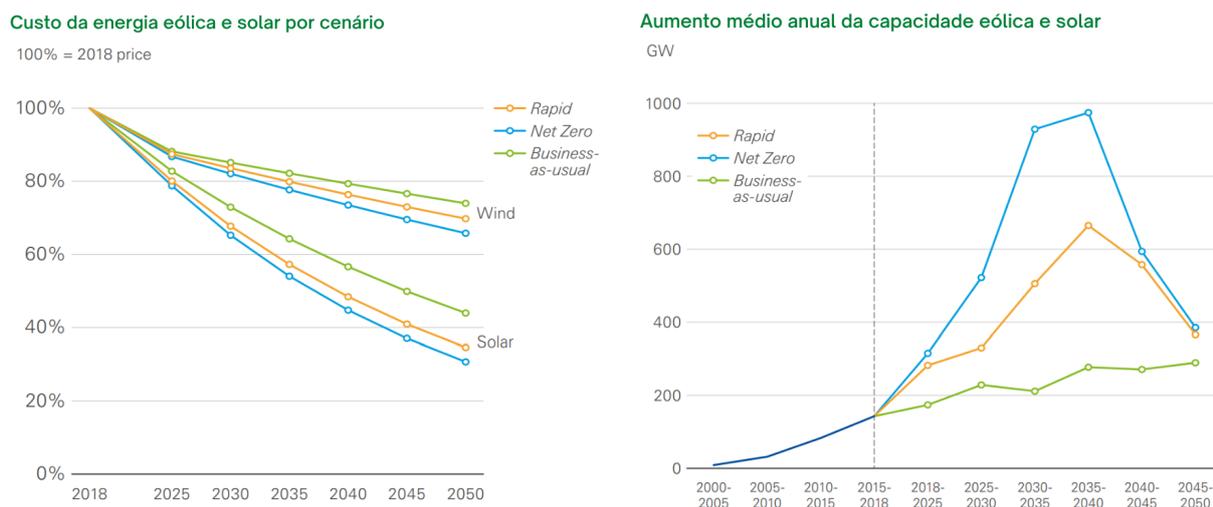
Fonte: Statistical Review of World Energy 2020 | 69th edition

A consumo global de energia cresce e continuará crescendo. Mas espera-se que a forma como a energia é produzida mude com o tempo, levando ao declínio dos combustíveis fósseis, compensado por uma parcela cada vez maior de uso de energia renovável e um papel crescente para a eletricidade, principalmente proveniente do sol e do vento.

A transição para um sistema de energia com baixa transmissão de carbono conduzirá um reestruturação fundamental no sistema de energia global. Haverá uma oferta mais diversa de energia, o que levará a mercados mais localizados e integrados. Isso aumentará a concorrência e a competição no setor, gerando um aumento no poder de escolha do consumidor. Na matriz energética, as energias renováveis, lideradas pelo sol e pelo vento, serão as de maior crescimento nos próximos 30 anos, graças ao aumento no investimento e no desenvolvimento no aumento da capacidade de energia solar e eólica. (BP, 2020)

É notável o crescimento das energias renováveis, que chegou a um valor recorde, com 5% de participação no uso de combustíveis para geração de energia primária, ultrapassando a energia nuclear. O grande aumento no uso de energias renováveis revela a existência de um mercado em potencial. É prevista a expansão do uso de energias sustentáveis, associadas à redução de custos da energia solar e eólica, podendo representar entre 45% e 60% da matriz energética de 2050. A Figura 2.5 a seguir mostra a previsão do custo de produção e do aumento anual da capacidade instalada da energia solar e da eólica, conforme cada cenário criado pelo estudo. (BP, 2020)

Figura 2.5: Custo e aumento de capacidade de geração para energias solar e eólica



Fonte: BP Energy Outlook: 2020 edition

O mundo está em um caminho insustentável. Uma queda rápida nas emissões de carbono provavelmente exigirá uma série de medidas, reforçadas por mudanças nos comportamentos e preferências da sociedade.

2.1.4 Energia para um desenvolvimento sustentável

Em 2015, a Assembleia Geral da ONU adotou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, que busca fortalecer a paz universal. O plano indica 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, ODS, e 169 metas, para erradicar a pobreza e promover vida digna para todos, dentro dos limites do planeta. (ASSEMBLÉIA GERAL DA ONU, 2015)

Entre os objetivos, existe um específico para a energia. O ODS 7 trata de energia limpa e acessível e pretende assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. Esse objetivo traça metas focadas na transição energética, de fontes não renováveis e poluidoras, para fontes renováveis limpas, com especial atenção às necessidades das pessoas e países em situação de maior vulnerabilidade.

Com o rápido crescimento do uso de renováveis para a produção de energia e com diversos

cenários indicando que esse uso irá continuar, o momento presente é o ideal para aproveitar o potencial energético brasileiro e contribuir para o surgimento de novas tecnologias envolvidas na cadeia de produção de energia.

Em suma, destaca-se o seguinte objetivo como diretamente relacionado ao tema:

- Objetivo 7: assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos.

Além desse objetivo, outros dois objetivos mencionam explicitamente problemas relacionados com energia em seus indicadores e alvos. São eles:

- Objetivo 4: assegurar a educação inclusiva e equitativa de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos;
- Objetivo 12: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.

Apesar de que, em um primeiro momento, o desenvolvimento e a concepção de energia solar fotovoltaica sejam relacionados apenas ao objetivo 7, os impactos socioambientais gerados também são importantes para o cumprimento dos tópicos supracitados e, mesmo que não sejam explicitamente citados, serviços de energia e tecnologias associadas contribuem para que todos os 17 ODS propostos sejam realizados, por facilitar ou permitir meios para o desenvolvimento necessário (MCCOLLUM et al., 2018).

2.2 A IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR

O Sol sempre foi a principal fonte de energia da Terra. Desde os primórdios da humanidade, essa energia é usada para nos desenvolver. Não por menos que, atualmente, exista uma busca por explorar esse recurso renovável ao máximo possível. A geração de energia elétrica fotovoltaica faz parte desse contexto. Desde Charles Fritts, que criou a primeira célula solar em 1883, passando pelos três cientistas do Bell Labs que tornaram as células eficientes em 1954 (BELLIS, 2019), vive-se em um momento de destaque dessa tecnologia.

A energia solar é vista como uma das bases do futuro da geração de energia no mundo, uma vez que o acesso a energia limpa é uma prioridade, considerado um dos 14 objetivos da agenda 2030 da ONU (PNUD, 2018). Não apenas por questões de infraestrutura, mas porque a economia gerada pela indústria sustentável de energia solar é tida como um alicerce para a reestruturação do mundo pós pandemia (CAETANO, 2020) (MEYER; OTHER, 2020) (BELACHE et al., 2020).

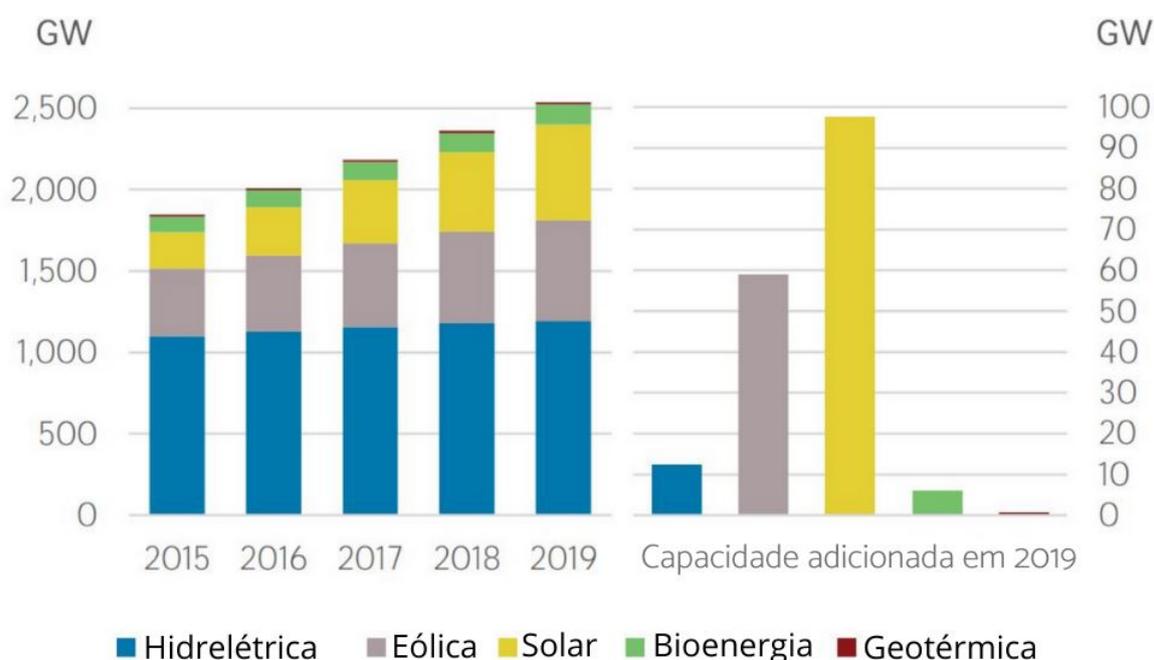
Já tendo, junto com a energia eólica, capacidade instalada superior ao das hidrelétricas (VILLI, 2020), a energia solar conta, ainda, com os esforços de pesquisadores ao redor do mundo em aumentar a eficiência dos módulos encontrados no mercado e elaborar novas tecnologias

cada vez melhores. No eixo de aperfeiçoar o desempenho por meio de controle de temperatura, encontram-se diversos resultados sobre métodos de resfriamento usando aletas (EGAB et al., 2020) (LUO et al., 2019) e sobre resfriamento usando água (MEHROTRA et al., 2014) (MOHARRAM et al., 2013).

2.2.1 Recurso solar e Geração de energia

Graças à redução de preços, à capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa no setor energético, à ajuda na conservação dos recursos naturais, à maior segurança para o fornecimento de eletricidade com menos riscos de blecautes e ao vasto potencial tecnológico em funcionamento, os sistemas de energia solar têm crescido exponencialmente nos últimos anos. É uma das fontes com maior incremento de capacidade instalada anualmente no mundo, como pode ser visto na Figura 2.6.

Figura 2.6: Crescimento da capacidade de potência renovável instalada



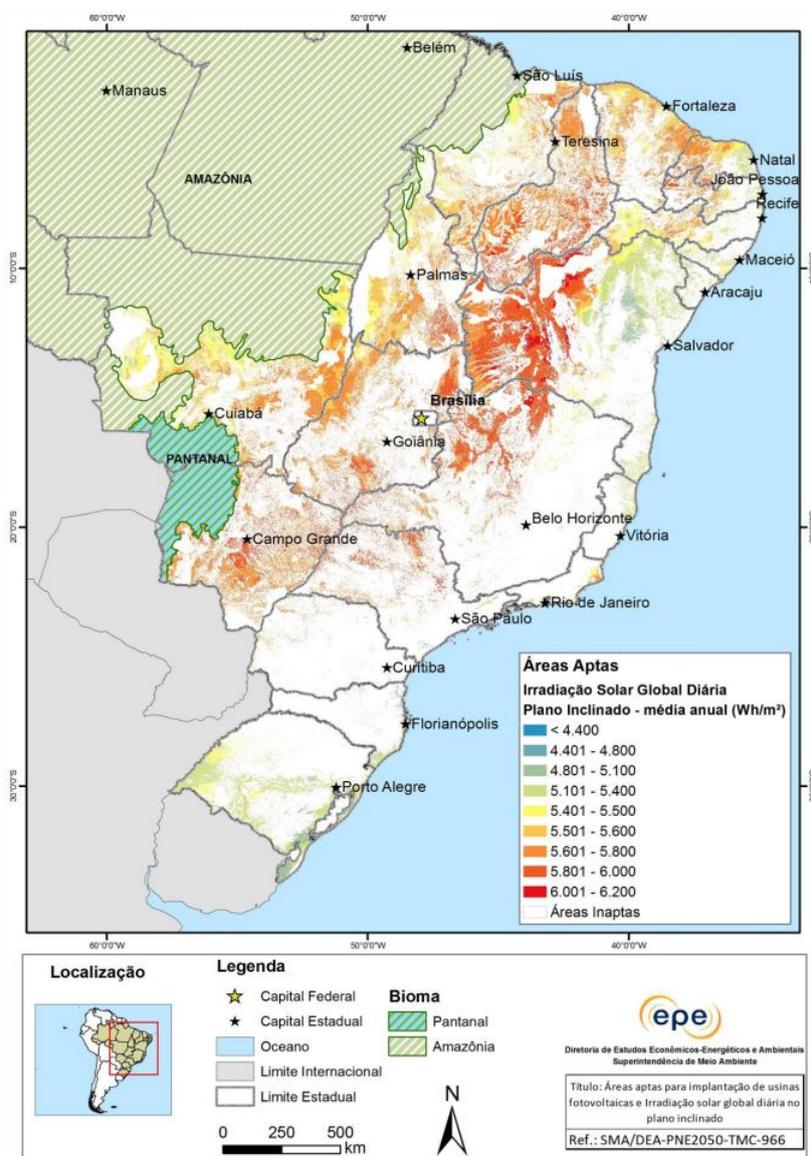
Fonte: Renewable capacity highlights - IRENA

No Brasil não é diferente. Um dos motivos do crescimento da capacidade instalada no País se deve a seus níveis de irradiação solar superiores aos de países onde projetos de aproveitamento de energia solar são explorados em larga escala. O território brasileiro, como um todo, possui altos índices para captação de irradiação solar, em qualquer de suas regiões. Apesar das variações regionais, é pequena a diferença entre os índices de irradiação registrados nas cinco diferentes regiões brasileiras. O cenário atual é de expansão, e o Brasil tem dado sinais de sua preparação não apenas tecnológica, mas também jurídica e tributária, o que pode acarretar em custos menores

e maior competitividade do setor. (MME/EPE, 2020c)

O Brasil está situado quase que totalmente na região limitada pelos Trópicos de Câncer e de Capricórnio, de incidência mais vertical dos raios solares. Esta condição favorece elevados índices de incidência da irradiação solar em quase todo o território nacional, inclusive durante o inverno, o que confere ao país condições vantajosas para o aproveitamento energético do recurso solar. O potencial técnico de conversão fotovoltaica foi estimado excluindo-se unidades de conservação, terras indígenas, comunidades quilombolas, áreas de Mata Atlântica com vegetação nativa, áreas urbanas, reserva legal e área de preservação permanente. Foram consideradas apenas áreas com declividade inferior a 3%, e área superior a 0,5 km², obtendo-se o mapa de potencial apresentado na Figura 2.7. (TOLMASQUIM, 2016)

Figura 2.7: Áreas aptas para a instalação de usinas fotovoltaicas

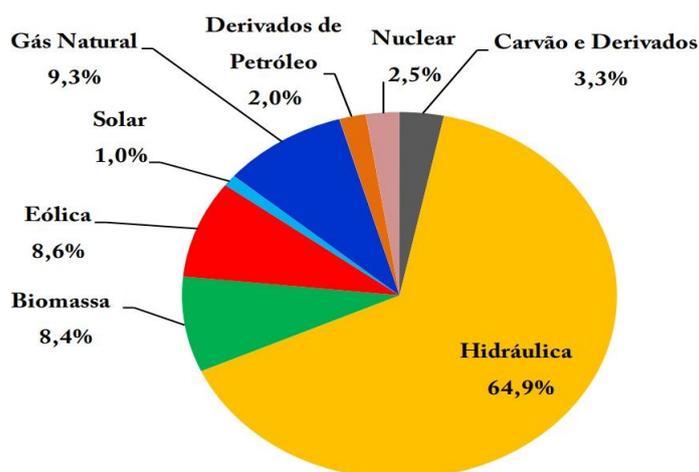


Fonte: TOLMASQUIM

2.2.2 Matriz Elétrica Brasileira

A matriz elétrica do Brasil é muito diferente da mundial. O país dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 64,9% da oferta interna. As fontes renováveis representam 83,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. (EPE, 2020). A Figura 2.8 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2019.

Figura 2.8: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019

A porção referente ao uso de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira é significativa. Ao se associar o bom histórico nacional de uso de eletricidade sustentável com a movimentação nacional e internacional para que se tenha energia cada vez mais limpa e em adição ao potencial de conversão fotovoltaica, o país assegura uma política receptiva às novas tecnologias e inovações na área de energia solar. A geração fotovoltaica de energia elétrica tem um grande potencial no Brasil. Mesmo no local menos ensolarado, é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo. (PEREIRA et al., 2017)

2.2.3 Perspectivas do Setor

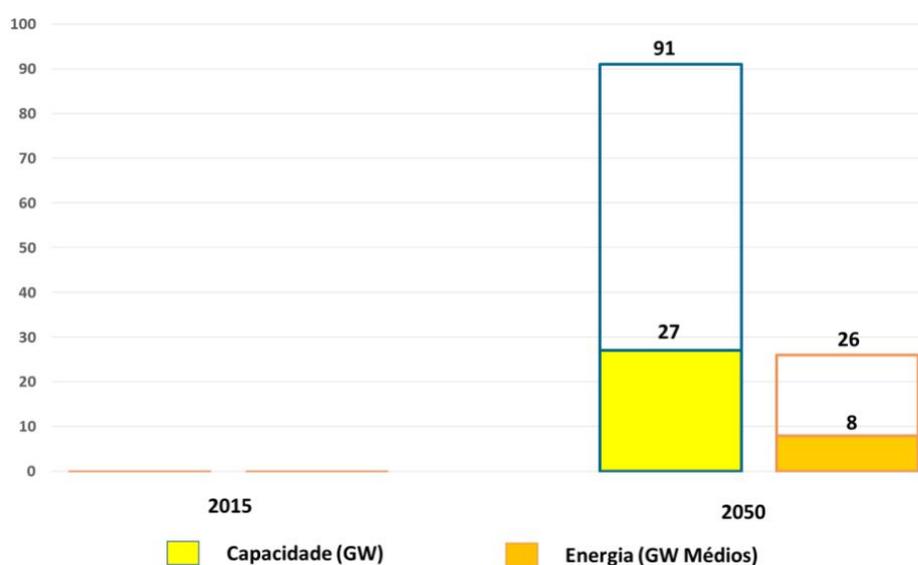
O Brasil adotou, nos últimos anos, diversas políticas de incentivo à fonte solar. Para os empreendimentos de geração centralizada, desde 2014, há leilões de compra de energia específicos para a fonte solar, o estabelecimento de descontos nas tarifas de uso de até 80% para os empreendimentos e a possibilidade de comercialização direta de energia junto aos consumidores com carga acima de 500 kW.

A utilização da fonte solar para gerar energia elétrica proporciona diversos benefícios tanto do ponto de vista elétrico como ambiental e socioeconômico.

Do ponto de vista elétrico, contribui para diversificação da matriz, aumento da segurança no fornecimento, redução de perdas e alívio de transformadores e alimentadores. Sob o aspecto ambiental, há a redução da emissão de gases do efeito estufa, da emissão de materiais particulados e do uso de água para geração de energia elétrica. Com relação aos benefícios socioeconômicos, a geração de energia solar fotovoltaica contribui com a geração de empregos locais, o aumento da arrecadação e o aumento de investimentos. (NASCIMENTO, 2017)

Assim, espera-se uma expansão significativa da fonte solar fotovoltaica por conta da perspectiva de evolução de sua competitividade. Cenários apontam que a fonte solar fotovoltaica atinge, aproximadamente, entre 27 a 90 GW em termos de capacidade instalada e entre 8 a 26 GW médios em termos de energia em 2050 conforme a Figura 2.9 abaixo, denotando sua crescente importância na matriz elétrica no horizonte. (MME/EPE, 2020c)

Figura 2.9: Evolução esperada da expansão (centralizada) da solar FV



Fonte: Plano Nacional de Energia 2050

A relação do consumidor com a energia vem se alterando nos últimos anos. O aumento do poder de escolha tem se materializado no setor de eletricidade através da popularização das tecnologias de micro e minigeração distribuída. O consumidor, ao gerar sua própria energia, evolui de uma posição passiva para ativa no setor elétrico. Dentre as tecnologias de geração distribuída de pequeno porte, destaca-se a baseada no aproveitamento solar fotovoltaico. Essa tecnologia se apresenta com maior potencial de penetração no horizonte decenal, em razão da sua modularidade e custo decrescente. (MME/EPE, 2017)

Existem algumas diferenças entre geração centralizada e geração distribuída. No primeiro modelo, grandes usinas concentram uma alta potência de geração, e distribuem isso para uma quantidade alta de pessoas. Geração distribuída é aquela geração de energia localizada próxima ao consumidor final, cuja instalação objetiva atendimento prioritário a este, podendo ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para além das instalações do consumidor final.

A geração centralizada solar fotovoltaica, composta por projetos de usinas de grande porte tem se consolidado cada vez mais como uma fonte renovável de geração de energia elétrica. De acordo com levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica já são mais de 2.000 megawatts em usinas de geração centralizada solar fotovoltaica em operação no Brasil. A grande vantagem desse tipo de geração é a otimização de custos na geração e simplicidade de gestão administrativo, visto que tudo é concentrado somente em um lugar.

A geração distribuída se apresenta como uma possível, e bem próxima, alternativa ao atual modelo de planejamento da expansão do sistema energético brasileiro, uma alternativa de uso mais eficiente de recursos energéticos, econômico-financeiros e ambientais.

Como a geração fotovoltaica possui grande flexibilidade locacional, assim como facilidade de instalação, dado o curto tempo necessário para execução dos projetos, é possível a implementação de sistemas isolados. Nesse tipo de sistema, a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é direcionada à alimentação dos aparelhos elétricos da propriedade e armazenada em baterias, o que possibilita ter energia disponível quando o sistema não está gerando nenhuma energia. Por ser autônomo e independente da rede, não existe regulamentação específica para o sistema isolado, não havendo necessidade de um pedido formal de autorização. (ALVES, 2019)

Portanto, os sistemas isolados podem ser utilizados em regiões remotas, carentes de rede de distribuição elétrica ou que possuam um abastecimento precário de energia elétrica. Exemplos de aplicação desses sistemas são as zonas rurais, fazendas, sítios, estacionamentos e praias.

2.3 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

A eficiência de energia fotovoltaica está vinculada à temperatura. Assim, dois sistemas de mesma capacidade poderão produzir valores de energia diferentes se colocados em diferentes países, por exemplo. O Brasil tem níveis de irradiação mais altos do que diversos países que já produzem esse tipo de energia há muito tempo. Apesar desse privilégio da grande incidência, as regiões muito quentes podem sofrer uma redução de eficiência do sistema devido ao calor, já que a temperatura não é um fator crucial para a instalação do sistema e sim, a incidência de luz solar nos módulos. (PINHO; GALDINO, 2014)

Apesar dos fabricantes realizarem testes nas condições de teste padrão (em inglês, STC) utilizando uma temperatura constante de 25°C, no dia a dia, a célula fotovoltaica não opera constantemente a temperatura padrão, mas entre 20° C a 40°C, maior que a temperatura ambiente. Os fabricantes informam a temperatura que o painel solar chegou no laboratório, a Temperatura Nominal de Operação da Célula (em inglês, NOCT). Erros podem ocorrer caso projetistas não atentem para a temperatura, o que levaria a queda de rendimento, pode representar, por exemplo, 0,5% por grau Celsius acima da STC para os módulos de silício cristalino. Como os módulos solares perdem eficiência quando aquecem, os projetistas devem se empenhar para potencializar o desempenho da planta fotovoltaica. (STAMBUK, 2017)

Sendo assim, a irradiância e a temperatura são parâmetros fundamentais na análise de eficiência de módulos fotovoltaicos. A relação destes com o comportamento elétrico de um módulo é fator importante para avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico, gerando perdas e redução de eficiência elétrica das células e módulos fotovoltaicos com o aumento da temperatura de operação.

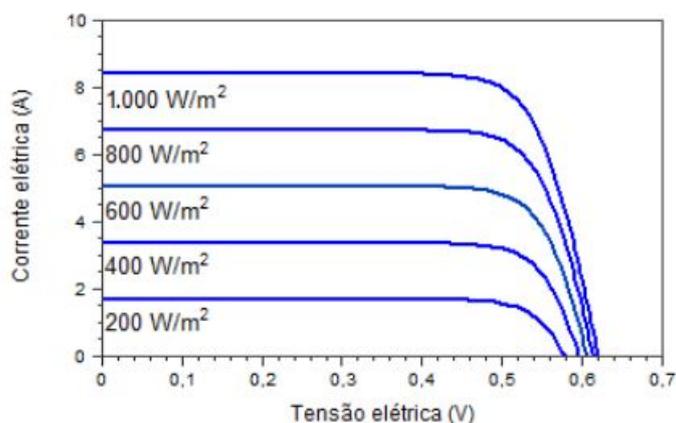
Embora demais fatores de perdas, como, por exemplo, sujeira, degradação e sombreamento também sejam relevantes, a temperatura de operação ganha destaque à medida que os locais de maior potencial solar no país apresentam temperaturas médias elevadas ao longo do ano. (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009)

O efeito da temperatura de operação na eficiência elétrica real consiste em um dos fatores de perda o qual influencia a eficiência durante a operação. Portanto, a temperatura de operação é uma das variáveis necessárias para qualquer modelo de eficiência elétrica. (SIMIONI, 2017)

2.3.1 Influência da Irradiância no Comportamento da Curva I-V

O aumento da irradiância incidente causa um aumento linear da corrente elétrica gerada pela célula, enquanto que a tensão aumenta de forma logarítmica, desde que mantida temperatura constante (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 2.10 abaixo mostra como a irradiância afeta a curva I-V de determinada célula fotovoltaica.

Figura 2.10: Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.

A I_{SC} pode ser relacionada à irradiância incidente pela equação a seguir:

$$I_{SC} = I_{SC-STC} \frac{G}{1000} \quad (2.1)$$

em que I_{SC} é a corrente de curto-circuito do módulo, I_{SC-STC} é a corrente de curto circuito do módulo nas STC e G é irradiância nas STC. Já a tensão de circuito aberto é relacionado pela

equação a seguir:

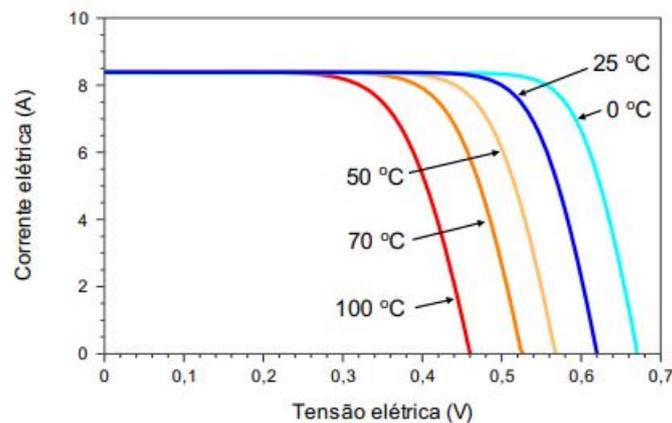
$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.2)$$

em que V_{OC} é a tensão de circuito aberto, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta, I_L é a corrente elétrica fotogerada e I_0 é a corrente de saturação.

2.3.2 Influência da Temperatura no Comportamento da Curva I-V

O aumento da temperatura ambiente é traduzido em um aumento da temperatura na célula fotovoltaica e isto tende a reduzir seu desempenho, graças ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com um aumento de temperatura (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 2.11 a seguir mostra curvas I-V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica, com irradiância de 1000 W/m^2 .

Figura 2.11: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.

Para representar o efeito da temperatura dos módulos, utilizam-se os coeficientes de temperaturas definidos a seguir (PINHO; GALDINO, 2014):

- Coeficiente (β) de variação da tensão de circuito aberto (V_{oc}) com a temperatura:

$$\beta = \frac{\Delta V_{OC}}{\Delta T} \quad (2.3)$$

em que ΔV_{OC} é a variação da tensão de circuito aberto para uma variação de temperatura de célula ΔT .

- Coeficiente (α) de variação da corrente de curto-circuito com a temperatura:

$$\alpha = \frac{\Delta I_{SC}}{\Delta T} \quad (2.4)$$

em que ΔI_{SC} é a variação da corrente de curto-circuito para uma variação de temperatura de célula ΔT .

- Coeficiente (γ) de variação da potência máxima (potência de pico) do módulo com a temperatura:

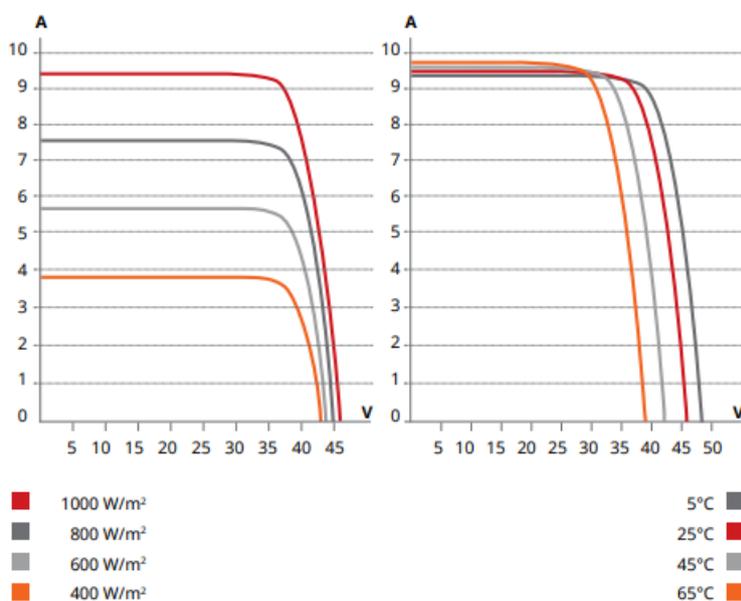
$$\gamma = \frac{\Delta P_{MP}}{\Delta T} \quad (2.5)$$

em que ΔP_{MP} é a variação da potência máxima do módulo para uma variação de temperatura de célula ΔT .

Os valores desses coeficientes variam de acordo com a tecnologia da célula. As folhas de dados técnicos costumam fornecer alguma referência a respeito desses coeficientes e conhecê-los permite que se determine o comportamento do módulo fotovoltaico em diferentes temperaturas.

Para exemplificar, ao se consultar a folha de dado técnico do módulo fotovoltaico Canadian CSI CS6U-330p de 330 Wp, escolhido a título de exemplo, encontra-se todos os dados necessários para conhecer as capacidades do módulo, incluindo as curvas I-V, apresentada na Figura 2.12 e os coeficientes de temperatura, apresentados na Tabela 2.1 abaixo.

Figura 2.12: Curvas I-V exemplificadas no datasheet do produto



Fonte: Folha de dados técnico da Canadian Solar inc para MAXPOWER CS6U-325 | 330 | 335 | 340P

Tabela 2.1: Valores obtidos na folha de dados técnicos para os coeficientes de temperatura.

Especificação	Dados
Coeficiente de Temperatura γ	-0,31 % / °C
Coeficiente de Temperatura β	-0,41 % / °C
Coeficiente de Temperatura α	0,05 % / °C

Fonte: Folha de dados técnicos da Canadian Solar inc para MAXPOWER CS6U-325 | 330 | 335 | 340P

Portanto, os coeficientes α , β e γ atuam sobre as variáveis de saída dos módulos fotovoltaicos:

I_{SC} , V_{OC} , P_{MP} . O coeficiente α mostra a variação da corrente de curto-circuito (I_{SC}) do módulo com a temperatura. Esse coeficiente é muito pequeno e positivo. O fato de ser positivo indica que a corrente do módulo aumenta com a temperatura. Mas como esse coeficiente é muito pequeno, ele tem pouca influência sobre os resultados práticos dos módulos fotovoltaicos.

O coeficiente β mostra a variação da tensão de circuito aberto (V_{OC}) do módulo com a temperatura. Esse coeficiente é sempre um número negativo, o que indica que a tensão de saída do módulo diminui com o aumento da temperatura.

O coeficiente γ mostra a variação da potência de pico (P_{MP}) do módulo com a temperatura. Esse coeficiente também é um número negativo, o que significa que a potência diminui quando a temperatura aumenta. Isso revela um problema prático que afeta o resultado obtido com módulos fotovoltaicos. Em temperaturas altas alguns módulos podem sofrer uma redução maior ou menor de potência dependendo do valor desse coeficiente, sendo um bom coeficiente para servir como meio de comparação entre módulos de diferentes modelos e diferentes fabricantes. Quanto menor o coeficiente, menor será a influência da temperatura sobre o desempenho do módulo fotovoltaico.

2.4 SOLUÇÕES PARA O RESFRIAMENTO DE MÓDULOS SOLARES

Como visto, a eficiência de um sistema fotovoltaico é afetada negativamente pelo aumento da temperatura de operação. Portanto, é possível observar que a potência de saída de um sistema implementado varia significativamente e que, via de regra, esses sistemas operam em uma temperatura maior do que a calculada em seu projeto. Por isso muitas relações empíricas foram estabelecidas para determinar a temperatura da célula ou do módulo ou diretamente a potência de saída do sistema nas condições externas. Os parâmetros normalmente considerados são o nível de irradiação, a velocidade do vento e a temperatura ambiente.

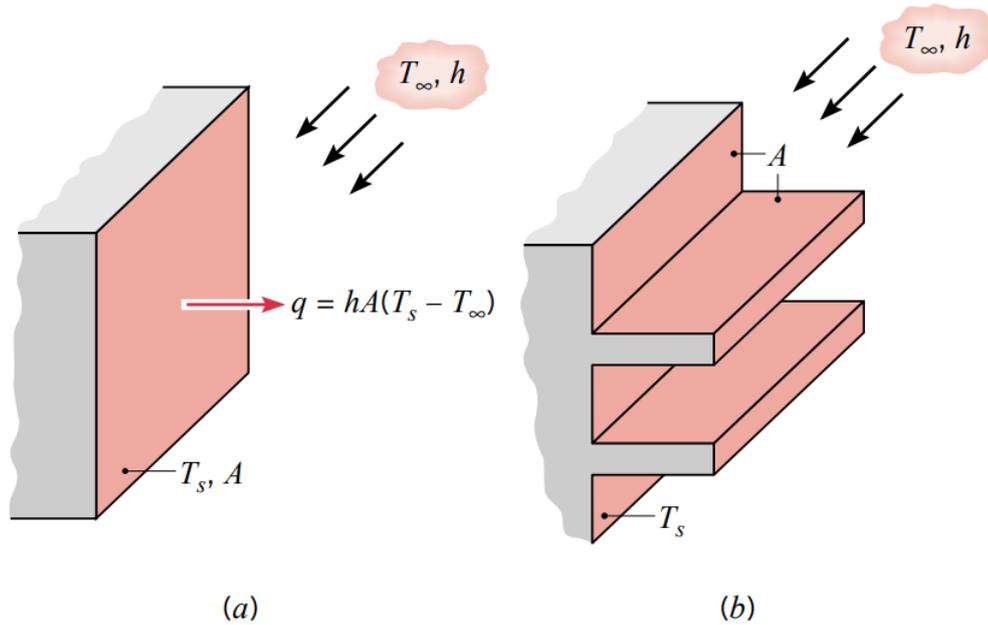
A fim de reduzir a temperatura de operação dos dispositivos fotovoltaicos, a maior parte da literatura relata métodos para remover o calor gerado neles. Alguns trabalhos estudam o uso de sistemas de resfriamento (passivos ou ativos), enquanto outros discutem o projeto de componentes com altas condutividades térmicas e formas para reduzir a temperatura de operação para aumentar a eficiência. (DUPRÉ, 2015)

Para um resfriamento passivo, é possível instalar superfícies estendidas no módulo. Essas superfícies estendidas, ou aletas, auxiliam na troca de calor na área do módulo com o meio em que está inserido. Já para um resfriamento ativo, pode-se fazer com que um líquido, como a água, circule pela superfície do módulo, removendo o calor por convecção. Esses métodos serão abordados nos próximos tópicos.

2.4.1 Transferência de Calor por Aletas

As aletas são superfícies estendidas e têm como principal função aumentar a área da superfície de troca de calor por condução em um sólido e convexão da fronteira deste sólido, melhorando a taxa de transferência de calor, conforme esquematizado na Figura 2.13. Isto proporciona uma construção mais compacta dos trocadores, reduzindo seu custo e aumentando significativamente sua eficiência (INCROPERA et al., 2011)

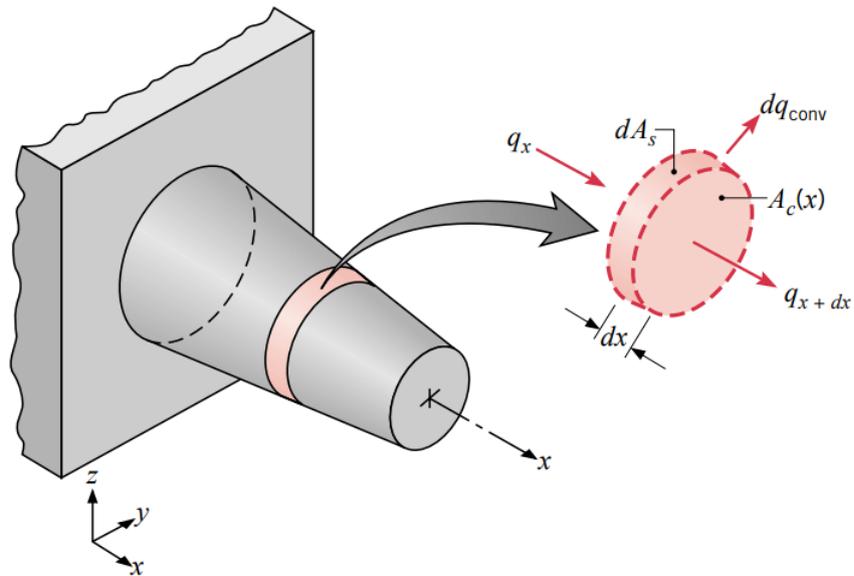
Figura 2.13: Uso de aletas para melhorar a transferência de calor em uma parede plana. (a) Superfície sem aletas. (b) Superfície aletada



Fonte: Fundamentos de transferência de calor e de massa

Para determinar a taxa de transferência de calor associada com a aleta, é preciso obter primeiro a distribuição de temperatura ao longo da aleta, de acordo com o balanço de energias esquematizado na Figura 2.14 abaixo.

Figura 2.14: Balanço de energia em uma superfície estendida



Fonte: Fundamentos de transferência de calor e de massa

A exigência de conservação de energia vem da primeira lei da termodinâmica, que diz que a energia total de um sistema é conservada e a única forma na qual a quantidade de energia em um sistema pode cruzar a fronteira de um sistema é pelo trabalho realizado no sistema e pela transferência de calor através da fronteira. Ou seja:

$$\Delta E = Q - W \quad (2.6)$$

em que ΔE é a variação da energia total acumulada no sistema, Q é o valor líquido do calor transferido para o sistema e W é o valor líquido do trabalho efetuado pelo sistema.

Com base na exigência de conservação de energia, ocasionada pela primeira lei da termodinâmica, aplicada no elemento diferencial da Figura 2.14, obtém-se

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv} \quad (2.7)$$

Da lei de Fourier, tem-se que:

$$q_x = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

em que A_c é a seção transversal da aleta. Como a taxa de condução de calor em $x + dx$ pode ser expressa como:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (2.9)$$

segue:

$$q_{x+dx} = -kA_c \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) dx \quad (2.10)$$

A taxa de transferência de calor sendo expressa como:

$$dq_{\text{conv}} = h dA_s (T - T_\infty) \quad (2.11)$$

em que dA_s é a área da superfície do elemento diferencial da aleta. Substituindo os termos deduzidos nas equações 2.8, 2.10 e 2.11 em 2.7, tem-se:

$$\frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) - \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} (T - T_\infty) = 0 \quad (2.12)$$

que pode ser escrito como:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (2.13)$$

Este resultado fornece uma forma geral da equação da energia para uma superfície estendida. Sua solução, com condições de contorno apropriadas, fornece a distribuição de temperaturas, que pode ser usada com a Equação 2.8 para calcular a taxa de condução em qualquer x . (INCROPERA et al., 2011).

2.4.2 Transferência de Calor pela Água

O uso de água corrente que passa na superfície do módulo com o auxílio de bombas para resfriar os módulos pode ser descrito como um modo de transferência de calor por convecção. Na Figura 2.15 abaixo, pode-se ver os tipos de transferência de calor por convecção. Como o mecanismo de transporte do calor é gerado por uma fonte externa (a bomba, no caso), tem-se um exemplo de convecção forçada (INCROPERA et al., 2011).

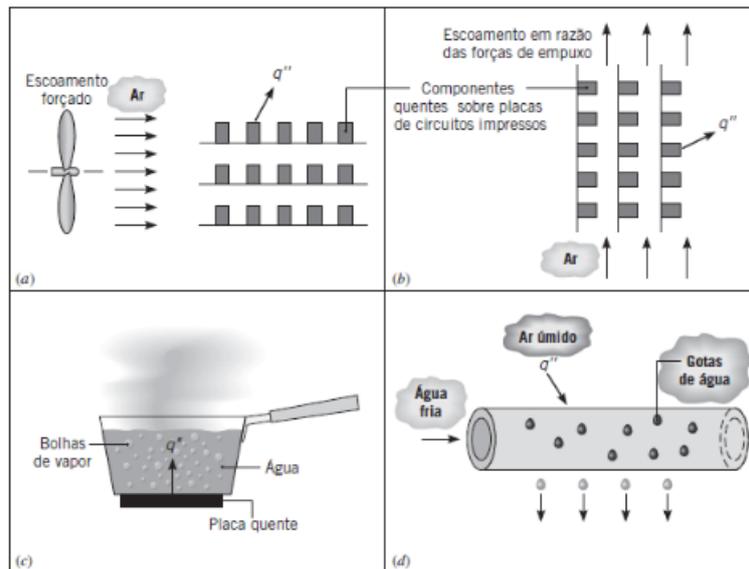
Independente da natureza particular da convecção, a equação para a taxa de transferência de calor é dada por:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.14)$$

Essa expressão também é conhecida como Lei de Newton do resfriamento, em que q'' é o fluxo de calor por convecção e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, que depende das condições na camada limite. Tais condições são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido (INCROPERA et al., 2011).

O estudo de convecção se baseia em encontrar procedimentos para determinar o h . A Tabela 2.2, a seguir, mostra valores típicos para a variável.

Figura 2.15: Processos de transferência de calor por convecção. (a) Convecção forçada. (b) Convecção natural. (c) Ebulição. (d) Condensação



Fonte: Fundamentos de transferência de calor e de massa

Tabela 2.2: Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Processo	h
Convecção natural	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convecção forçada	
Gases	25-250
Líquidos	100-20000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2500-100000

Fonte: Fundamentos de transferência de calor e de massa

2.4.3 Resultados Encontrados na Literatura

É notável os esforços de pesquisadores ao redor do mundo em aumentar a eficiência dos módulos encontrados no mercado e elaborar novas tecnologias. No eixo de aperfeiçoar o desempenho elétrico por meio de controle de temperatura, encontram-se diversos resultados satisfatórios. A seguir, alguns deles:

SHEIKH et al. apresentou um sistema de resfriamento forçado à base de água, leve e minimamente invasivo, em formato de serpentina. Foi demonstrado um ganho de cerca de 14% na potência de saída quando comparado com as condições padrão de teste.

MILIND et al. elaborou um sistema que permite fluxo livre e constante de água no módulo

solar e conseguiu obter, experimentalmente, um ganho médio de potência de cerca de 14%

O trabalho de ODEH; BEHNIA consistiu em um sistema que irrigava o módulo fotovoltaico e obteve um ganho médio anual simulado de potência de saída de 5%, chegando a obter 15% de ganho nos momentos de picos de irradiação.

ELBREKI et al. estudou como usar aletas para reduzir a temperatura do módulo com ganho de eficiência, na qual obteve um aumento, passando de 9,81% para 11,2%.

AMBER et al. testou experimentalmente o ganho de eficiência e diminuição de temperatura de módulos com aletas retangulares ou circulares, concluindo que a primeira obteve um rendimento melhor, gerando potência 10% maior com uma temperatura 15% mais baixa, quando comparado com o módulo de referência.

EGAB et al. conseguiu reduzir, em modelos numéricos, com o uso de aletas, a temperatura do painel em até 50%, quando comparado àqueles sem aletas

ALENCAR FILHO comparou experimentalmente um módulo fotovoltaico flutuante e outro sobre o solo, encontrando um ganho médio de 5% de energia elétrica.

KAMUYU et al. elaborou um modelo matemático que mostrou que usinas solares flutuantes geram um incremento na produção de energia de mais de 10% quando comparadas com sistemas terrestres.

2.5 USINAS SOLARES FLUTUANTES

Ainda, a um estudo de usinas fotovoltaicas flutuantes, que podem fornecer ganho de produtividade e serem instaladas em áreas de reservatórios de hidrelétricas, por exemplo, aumentando-se o aproveitamento energético, conforme já experimentado em alguns países. (BILLON, 2019)

A evolução tecnológica e a redução e custos dos módulos fotovoltaicos ao longo dos últimos anos permitiram um crescimento exponencial da fonte solar fotovoltaica no mundo. Estudos indicam um maior potencial de penetração da energia fotovoltaica em relação a outros métodos de geração nos próximos anos. (MME/EPE, 2020b)

Nesse cenário, a instalação de sistemas fotovoltaicos em espelhos d'água aparece como mais uma alternativa de aplicação, com potenciais ganhos de eficiência. Os recentes projetos-pilotos nacionais com uso de tecnologia solar fotovoltaica flutuante associados as usinas hidrelétricas vêm ganhando visibilidade e seus resultados serão importantes para acurar os benefícios desta tecnologia. (MME/EPE, 2020a)

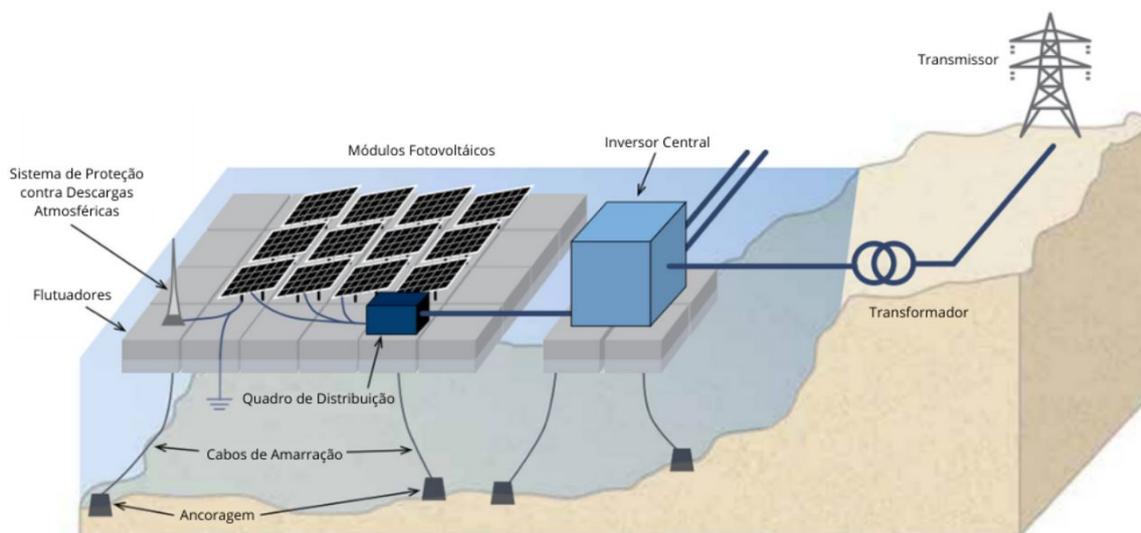
Já existem empresários que estão gerando resultados positivos na prática, como aqueles alcançados na França pela Sunbooster (BELLINI, 2020) ou então pela Tractebel, no Brasil, que desenvolveu uma planta solar fotovoltaica flutuante, na barragem de Batalha, no estado de Goiás, onde será aproveitada a área disponível da própria barragem. Nela, os módulos permanecerão

mais limpos e com temperaturas menores do que se estivessem em regiões convencionais, já que estarão próximos à água, sendo assim possível ter a capacidade de até 30 MW de potência instalada, dependendo da área e do investimento disponíveis. (PORTAL SOLAR, 2020).

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) começou a testar módulos flutuantes fotovoltaicos na barragem de Sobradinho. No Chile, a mineradora Anglo American completou a instalação de 84 kW em uma mina de cobre na região de Valparaíso. Na Colômbia, as Empresas Públicas de Medellín (EPM) anunciaram a intenção de implementar a primeira estrutura flutovoltaica no reservatório de Peño- Guatapé. Esses projetos iniciais na América Latina mostram como a tendência de otimizar e melhorar as estruturas de geração já existentes é crescente na região.

O projeto geral de um sistema fotovoltaico flutuante é semelhante ao de um sistema fotovoltaico terrestre, exceto pelo fato de que os arranjos fotovoltaicos e, muitas vezes, os inversores são montados em uma plataforma flutuante. A corrente contínua gerada por módulos fotovoltaicos é coletada por quadros de distribuição e convertida em corrente alternada por inversores. Para plantas flutuantes de pequena escala, próximas da costa, é possível colocar os inversores em terra, a uma curta distância do dispositivo. A plataforma, junto com seu sistema de ancoragem e amarração, é parte integrante de qualquer instalação fotovoltaica flutuante. A Figura 2.16 mostra uma representação de usina fotovoltaica flutuante com os inversores montados em uma plataforma flutuante e com a ancoragem feita ao fundo do corpo d'água.

Figura 2.16: Representação esquemática de uma usina fotovoltaica flutuante



Fonte: Solar Energy Research Institute of Singapore.

À medida que as tecnologias amadurecem, a implantação de energia solar flutuante acelera, abrindo uma nova fronteira na expansão global da energia renovável. Traz, ainda, mais oportunidades para uma ampla gama de países e mercados. Com um potencial global de, pelo menos, 400 GW, a energia fotovoltaica flutuante poderia dobrar a capacidade instalada existente, com a vantagem de não necessitar de terreno para instalações montadas no solo. Em algumas grandes

usinas hidrelétricas, cobrindo apenas de 3 a 4% da superfície das águas com módulos fotovoltaicos, a capacidade instalada de geração solar do planeta dobraria. A capacidade de geração global instalada de "flutovoltaicas", sistema que alia benefícios das energias solar e hidráulica, cresceu de 10 MWp em 2016 para cerca de 1,1 GWp ao fim de 2018. (BANCO MUNDIAL, 2018)

Outras vantagens potenciais da energia fotovoltaica flutuante incluem a reduzida evaporação de reservatórios de água, uma vez que os módulos FV fornecem sombra e limitam os efeitos evaporativos do vento; melhorias na qualidade da água, por meio da diminuição no crescimento de algas; redução ou eliminação do sombreamento dos módulos por seus arredores; a eliminação da necessidade de preparação do local, tais como nivelamento ou lançamento de fundações, necessários para instalações terrestres e a facilidade de instalação e de implantação em lugares com requisitos baixos de ancoragem e amarração, levando a instalações mais rápidas. (ACHARYA; DEVRAJ, 2019)

Instalações solares fotovoltaicas flutuantes abrem novas oportunidades para aumentar a capacidade de geração solar, especialmente em países com grande densidade populacional e usos competitivos da terra disponível. Elas têm certas vantagens sobre os sistemas baseados em terra, incluindo a utilização da infraestrutura de transmissão de eletricidade existente em usinas hidrelétricas, estarem perto dos centros de demanda (no caso de reservatórios de abastecimento de água), e apresentarem melhor rendimento de energia graças aos efeitos de resfriamento da água e diminuição da presença de poeira. A magnitude exata dessas vantagens de desempenho ainda não foi confirmada nos casos de instalações maiores, ou em múltiplas geografias e ao longo do tempo, mas em muitos casos podem superar qualquer aumento no custo de capital.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Gerar energia de forma sustentável se torna um tema cada vez mais importante para o mundo em que vivemos. Por isso, trazer inovação para sistemas de energia fotovoltaica causa efeitos diretos na sociedade contemporânea. Esse ponto rege o estudo elaborado, a fim de que os resultados obtidos possam ser não apenas satisfatórios, mas também alinhados com a sustentabilidade.

Através de uma análise nos processos envolvidos na geração de energia fotovoltaica, foi identificado que a temperatura tem impacto direto na eficiência operacional do módulo. Então, incluir um sistema de resfriamento pode trazer ganhos substanciais na geração de energia.

O comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos depende principalmente da irradiância e da temperatura. Portanto, ao analisar essa relação, é possível observar como esses parâmetros se comportam e propor soluções para aumentar o desempenho do sistema. Tendo como foco o resfriamento das instalações, pode-se fazer o uso de aletas que estendem a superfície de contato, aumentando a dissipação de calor, quando comparado com uma superfície não aletada. Também é possível realizar o resfriamento do módulo através de água corrente, onde a transferência de calor ocorre por convecção forçada, uma vez que o transporte de calor é gerado por uma força

externa, no caso, a água.

Por fim, será possível analisar a aplicabilidade em cada caso de sistemas de resfriamento de módulos fotovoltaicos, com o objetivo de elaborar, então, novas possibilidades para que a geração de energia fotovoltaica seja feita de uma forma mais eficiente e acessível.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho e explica como elaborar as simulações usando o System Advisor Model, simulador criado pelo National Renewable Energy Laboratory. Mostra, ainda, como realizar as simulações utilizando as temperaturas dos módulos resfriados. Os sistemas foram projetados pensando na possibilidade de execução em laboratório.

Este trabalho consiste em simular, computacionalmente, a produção de energia elétrica de módulos fotovoltaicos em diferentes temperaturas. Os resultados obtidos poderão ser usados como base de conhecimento para trabalhos futuros sobre o tema, como por exemplo, a montagem de pequenas usinas resfriadas com a circulação de água ou com a instalação de aletas nos módulos. Os casos de resfriamento são representados por uma simulação em que a temperatura de operação dos módulos é reduzida, em relação ao modelo sem resfriamento, sendo possível estimar a redução de temperatura de cada método de resfriamento com base em resultados encontrados na literatura.

3.1 METODOLOGIA

Para estimar o ganho energético ligado ao resfriamento dos módulos, é necessário que se saiba a quantidade de eletricidade produzida por um sistema não resfriado ao longo de um período de tempo, que servirá como valor de referência, e a quantidade produzida pelos sistemas com os diferentes métodos de troca de calor. O aumento da produção se dá pela comparação dos valores encontrados com o valor de referência durante o período estabelecido.

Portanto, será simulado, para o intervalo de um ano, um sistema com dois módulos de 150Wp, ligados em série, que será o caso base. Este modelo é o suficiente para manter o funcionamento de uma pequena bomba durante a geração de energia pelo sistema, ligada por cerca de 6 horas diárias. Para os sistemas resfriados, a simulação do caso base será repetida, alterando apenas a temperatura do módulo, sendo possível comparar os resultados obtidos. É possível projetar esse sistema para que a energia gerada excedente seja armazenada em uma bateria ou passe por um inversor e seja entregue à rede. Portanto, para as simulações, será inserido um inversor no sistema.

3.2 BOMBA D'ÁGUA E LOCALIZAÇÃO

Conforme disposto acima, uma sugestão para compor um sistema de resfriamento é a passagem de água pelo módulo fotovoltaico. Porém, o simulador utilizado não suporta a inserção de uma carga no sistema, sempre entregando como resultado a produção total de energia. Por esse motivo, a bomba d'água sugerida para a montagem do sistema é a bomba solar Singflo FL-3203. De acordo com as informações contidas na Tabela 3.1, o fabricante garante o correto funcionamento da bomba para o uso.

Tabela 3.1: Valores obtidos na folha de dados técnicos para a bomba FL-3203.

Vazão (L/h)	Pressão (PSI)	Corrente (A)	Configuração Mínima
300	0	1,7	1 painel de 90Wp
264	10	1,8	
246	20	2,3	
228	30	2,4	
204	40	2,7	
192	50	3	
180	60	3,4	
177	70	3,6	1 painel de 155Wp
174	80	4	
168	90	4,2	
164	100	4,6	

Fonte: Folha de dados técnicos da bomba FL-3203

Esses valores informados pela fabricante referem-se ao caso de 5 horas de Sol pleno por dia, uma unidade de medida da irradiação solar, definida como a energia por unidade de área (metros quadrados) que seria recebida com uma hipotética irradiação solar constante (watts), de 1000 W/m²/dia ou HSP/dia – o HSP/dia não significa a quantidade de horas de sol em um dia e, sim, o equivalente a uma hora padrão de 1000 W/m². De acordo com o programa do CRESESB, SunData, em Brasília, o valor de horas de sol pleno é de 5,5 horas.

3.3 MÓDULO RESUN RS6E-150P

O módulo RS6E-150P da fabricante chinesa Resun foi usado como padrão para as simulações efetuadas ao longo do trabalho. Trata-se de um módulo fotovoltaico com 36 células, com boa eficiência de conversão e revestimento anti-reflexivo e hidrofóbico, podendo ser usado em ambientes com a natureza mais presente, como áreas costeiras e regiões com muita areia e poeira.

Algumas especificações técnicas, testados nas condição padrão de teste (STC), sendo, irradiação de 1.000 W/m², espectro de massa de ar 1,5 e temperatura de célula de 25°C estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores obtidos na folha de dados técnicos para os coeficientes de temperatura.

Potência do Pannel	150 Wp
Eficiência	15,29 %
Tensão de Máxima Potência	17,91 V
Corrente de Máxima Potência	8,38 A
Tensão em Aberto	22,3 V
Corrente de Curto Circuito	8,82 A
Temperatura Nominal da Célula	45 ± 2 °C
Coefficiente de Temperatura da Tensão	-0,32 %/°C
Coefficiente de Temperatura da Corrente	0,05 %/°C
Coefficiente de Temperatura da Potência	-0,39 %/°C
Dimensões do Pannel	1487 x 666 x 35 mm
Número de Células	36
Tipo de Célula	Silício Policristalino

Fonte: Folha de dados técnicos para o módulo

3.4 INVERSOR ABB MICRO-0.25-I-OUTD

O microinversor MICRO-0.25-I-OUTD, da fabricante suíça ABB, foi usado como padrão para as simulações efetuadas ao longo do trabalho. O microinversor permite controle individual sobre os módulos, oferecendo flexibilidade e modularidade. Isso possibilita que se instale painéis de forma individual e em diferentes orientações, por exemplo. Algumas especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3: Valores obtidos na folha de dados técnicos.

Dados de Entrada em Corrente Contínua	
Máx. Potência de Entrada:	265Wp
Tensão de Entrada	12 ~60 V
Faixa de MPPT	25 ~50 V
Tensão de Partida	25V
Corrente de Entrada	10,5 A
Dados de Saída em Corrente Alternada - CA	
Potência Nominal	250 W
Corrente Máxima	1,3 A
Tensão de Saída	230 V
Frequência	50 Hz / 60 Hz
Eficiência	96,50%

Fonte: folha de dados técnicos para o inversor

3.5 SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM)

O System Advisor Model (SAM) é um programa de computador de modelagem técnica e econômica gratuito que auxilia a tomada de decisão daqueles na indústria da energia renovável, originalmente desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável, em colaboração com o Laboratório Nacional de Sandia em 2005, e inicialmente usado internamente pelo Programa de Tecnologias de Energia Solar do Departamento de Energia dos EUA para análise baseada em sistemas acerca de oportunidades de melhoria da tecnologia solar dentro do programa.

A primeira versão pública foi lançada em agosto de 2007 como Solar Advisor Model Version 1, possibilitando aos profissionais de energia solar analisar sistemas fotovoltaicos e concentrar poder solar parabólico por meio de sistemas de energia solar na mesma plataforma de modelagem usando suposições financeiras consistentes. Desde 2007, duas novas versões são lançadas a cada ano, agregando novas tecnologias e opções de financiamento. Em 2010, o nome mudou para "System Advisor Model" para refletir a adição de tecnologias não solares, é possível simular sistemas de produção de energia oriundo do vento, das marés, das ondas e do calor da terra. No outono de 2013, o NREL começou a lançar uma nova versão por ano com atualizações periódicas conforme necessário.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos, o NREL e o Laboratório Sandia continuam a usar o modelo para o planejamento do programa e em programas de subsídios. Desde o primeiro lançamento ao público, mais de 35.000 pessoas representando fabricantes, desenvolvedores de projetos, pesquisadores acadêmicos e formuladores de políticas baixaram o software. Os fabricantes estão usando o modelo para avaliar o impacto das melhorias de eficiência ou reduções de custos em seus produtos no custo da energia dos sistemas instalados. Os desenvolvedores de projetos usam o SAM para avaliar as diferentes configurações do sistema para maximizar os ganhos das vendas de eletricidade. Os formuladores de políticas e designers usam o modelo para experimentar diferentes estruturas de incentivos.

Portanto, o SAM se faz útil para a realização do trabalho, uma vez que permite modelar detalhadamente plantas fotovoltaicas. Na parte do programa dedicada à energia solar, é possível obter a quantidade de energia gerada ao se inserir os dados técnicos do módulo e do inversor utilizado e os dados climatológicos da região. O SAM também calcula as perdas provenientes do efeito da temperatura na performance do módulo, sendo, então, adequado para calcular a produção de energia de um mesmo sistema para diferentes temperaturas, uma vez que o SAM permite edição nos dados inseridos nas simulações.

3.5.1 Modelagem do sistema no System Advisor Model

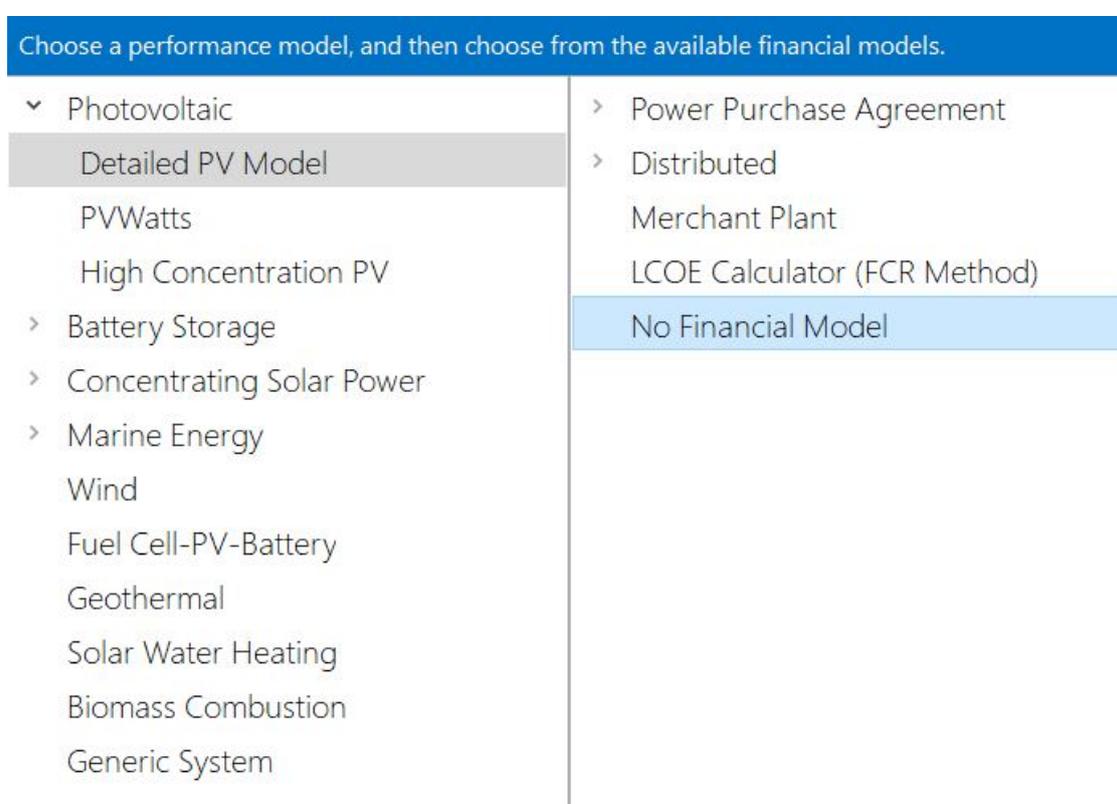
O SAM permite obter resultados simulados referentes à produção de energia renovável ao se inserir os dados meteorológicos, as especificações e as perdas do sistema. Para um sistema fotovoltaico, é necessário escolher um modelo de desempenho, para calcular a potência gerada e

um modelo financeiro, responsável por calcular a economia gerada pelo sistema. Então, é preciso informar para o programa as seguintes informações:

- Dados meteorológicos;
- Dados sobre o módulo e o inversor;
- Definição do projeto do sistema;
- Parâmetros financeiros e custos.

Os próximos tópicos abordam com mais detalhes cada etapa para a criação e simulação de um modelo fotovoltaico pormenorizado e sem modelo financeiro, conforme indicado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Menu de criação de um novo projeto no SAM



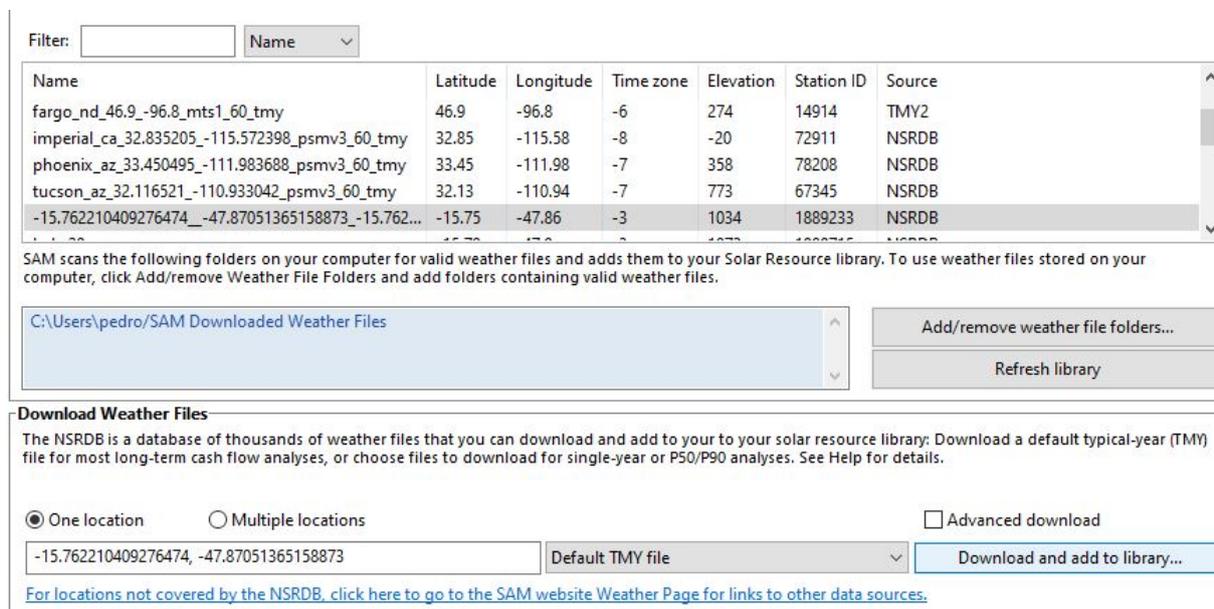
Fonte: Próprio autor

3.5.1.1 Localidade e Recursos

Ao se começar um novo projeto, a primeira informação a ser fornecida é em relação aos dados climáticos da região escolhida pelo usuário. O SAM utiliza, de forma nativa, o banco de dados da *National Solar Radiation Database*, cuja abrangência de dados cobre todo o território brasileiro. Portanto, para o caso de Brasília, basta pesquisar pelo nome da localidade, endereço ou latitude

e longitude em graus decimais no campo *Download Weather Files* e, ao clicar em *Download and add to library...*, o programa irá buscar a cidade na base de dados e a disponibilizará para uso no campo superior, junto com as outras cidades prontas para serem usadas, conforme a Figura 3.2, onde estão inseridas as coordenadas da Faculdade de Tecnologia da UnB (-15.76203841358126, -47.8704916784998), supondo a instalação em algum dos telhados do prédio.

Figura 3.2: Tela de configuração do arquivo de Clima no SAM



Fonte: Próprio autor

Também é possível baixar da internet ou criar arquivos com dados particulares, nos formatos TMY3 (extensão .csv), TMY2 (.tm2) ou EPW (.epw). Pode-se, inclusive, ter acesso aos dados obtidos nativamente pelo SAM e alterá-los conforme a necessidade.

3.5.1.2 Módulo e Inversor Fotovoltaico

O segundo e o terceiro menu são referentes ao módulo e ao inversor fotovoltaico utilizado no projeto. O software contempla informações de diversos equipamentos de variados fabricantes. O programa, contudo, supõe que o arranjo fotovoltaico seja composto por módulos idênticos.

Caso não se tenha informações dos equipamentos no banco de dados do SAM, é possível inserir os dados técnicos fornecidos pelo fabricante do equipamento. A opção *CEC Performance Model with User Entered Specifications* permite que o usuário entre com as informações de um módulo fotovoltaico. A Figura 3.3 mostra os parâmetros inseridos para o caso do módulo RESUN RS6E-150P, que não consta no banco de dados do programa.

Figura 3.3: Especificações do módulo

CEC Performance Model with User Entered Specifications ▾

General Information

Module name: RESUN RS6E-150P

Cell type: multiSi

Module area: 0.99 m²

Nominal operating cell temperature: 45 °C

Electrical Specifications

Maximum power point voltage (Vmp): 17.91 V

Maximum power point current (Imp): 8.38 A

Open circuit voltage (Voc): 22.3 V

Short circuit current (Isc): 8.82 A

Temperature coefficient of Voc: -0.32 %/°C

Temperature coefficient of Isc: 0.05 %/°C

Temperature coefficient of max. power point: -0.39 %/°C

Number of cells in series: 36

The model assumes a reference bandgap voltage $E_{g_ref} = 1.121$ eV, and temperature coefficient for bandgap of -0.0002677 eV/K.

Fonte:Elaborado pelo autor

No caso do inversor, é possível proceder de forma similar no menu *Inverter Datasheet*, se não estiver disponível no banco de dados. Porém, não houve necessidade, uma vez que foi escolhido o inversor da ABB MICRO-0.25-I-OUTD, que consta no banco de dados do programa, na aba *Inverter CEC Database*, conforme indicado na Figura 3.4. O SAM também indica as características do inversor, de acordo com a Figura 3.5.

Figura 3.4: Busca pelo inversor

Inverter CEC Database ▾

Filter: Name ▾

Name

WSTECH GmbH: APS1600-ES-2-440-5 [440V]

WSTECH GmbH: APS800-ES-1-440-5 [440V]

ABB: MICRO-0.25-I-OUTD-US-208 [208V]

ABB: MICRO-0.25-I-OUTD-US-240 [240V]

ABB: MICRO-0.3-I-OUTD-US-208 [208V]

<

Fonte:Elaborado pelo autor

Figura 3.5: Especificações do inversor

Number of MPPT inputs	<input type="text" value="1"/>	CEC weighted efficiency	<input type="text" value="95.760"/>	%
		European weighted efficiency	<input type="text" value="94.983"/>	%
-Datasheet Parameters-				
Maximum AC power	<input type="text" value="250"/>	Wac		
Maximum DC power	<input type="text" value="259.589"/>	Wdc		
Power use during operation	<input type="text" value="2.08961"/>	Wdc		
Power use at night	<input type="text" value="0.075"/>	Wac		
Nominal AC voltage	<input type="text" value="208"/>	Vac		
Maximum DC voltage	<input type="text" value="50"/>	Vdc		
Maximum DC current	<input type="text" value="6.48972"/>	Adc		
Minimum MPPT DC voltage	<input type="text" value="30"/>	Vdc		
Nominal DC voltage	<input type="text" value="40"/>	Vdc		
Maximum MPPT DC voltage	<input type="text" value="50"/>	Vdc		
-Sandia Coefficients-				
		C0	<input type="text" value="-4.1e-05"/>	1/Wac
		C1	<input type="text" value="-9.1e-05"/>	1/Vdc
		C2	<input type="text" value="0.000494"/>	1/Vdc
		C3	<input type="text" value="-0.013171"/>	1/Vdc

Fonte:Elaborado pelo autor

3.5.1.3 Dimensionamento do Sistema

Após a escolha dos equipamentos e a definição dos dados meteorológicos na localização, deve-se informar a respeito do dimensionamento do sistema. O software tem duas opções: o sistema pode ser dimensionado automaticamente pelo SAM, em um sub-arranjo, ou manualmente pelo usuário, em até quatro sub-arranjos. Nesta parte, também é necessário informar a orientação na qual os arranjos estão instalados. Para o caso do projeto, foi feito de forma que se tenha 1 sub-arranjo, com dois módulos em série. Para a orientação da instalação dos módulos, foi considerada uma inclinação de 20° e um desvio azimutal de 180°. A Figura 3.6 mostra a configuração do arranjo no SAM.

Figura 3.6: Configurações do arranjo

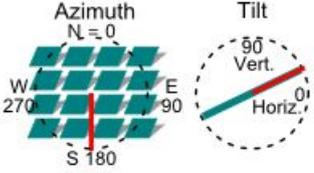
Subarray 1

Electrical Configuration

(always enabled)

Modules per string in subarray	2
Strings in parallel in subarray	1
Number of modules in subarray	2
String Voc at reference conditions (V)	44,6
String Vmp at reference conditions (V)	35,8

Tracking & Orientation



Fixed

1 Axis

2 Axis

Azimuth Axis

Seasonal Tilt

Tilt=latitude

Tilt (deg)	20
Azimuth (deg)	180
Ground coverage ratio (GCR)	0,3
Tracker rotation limit (deg)	45

Backtracking Enable

Fonte:Elaborado pelo autor

3.5.1.4 Sombreamento

O programa permite fazer o estudo de sombreamento do arranjo fotovoltaico, seja externo, causado por objetos e/ou edifícios no entorno da instalação, ou auto-sombreamento, causado pelas séries de módulos da própria instalação, umas sobre as outras. Como o interesse maior nas simulações envolve a diferença da produção de energia ao se variar a temperatura, é possível considerar que não há sombreamento em nenhum caso.

No caso da elaboração prática da simulação, como o projeto a ser desenvolvido é pequeno e com boa portabilidade, é possível a instalação em locais sem obstáculos que possam gerar sombra, como, por exemplo, no telhado de algum prédio da Universidade de Brasília que não receba sombras das redondezas. A Figura 3.7 é uma imagem por satélite do prédio da Faculdade de Tecnologia, um local viável para a instalação dos módulos.

Figura 3.7: Possível local para instalação do arranjo fotovoltaico



Fonte:Google Maps

3.5.1.5 Perdas

O programa leva em consideração alguns tipos de perdas, dados em porcentagem, sendo que todos os tipos já possuem valores sugeridos, que podem ser alterados conforme a necessidade do usuário. Para as simulações, foram usados os valores considerados padrão pelo SAM para um microinversor, conforme mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8: Perdas consideradas pelo SAM

DC Losses

DC losses apply to the electrical output of each subarray and account for losses not calculated by the module performance model.

Module mismatch (%)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Diodes and connections (%)	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.5"/>
DC wiring (%)	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>
Tracking error (%)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Nameplate (%)	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
DC power optimizer loss (%)	<input type="text" value="0"/>	All four subarrays are subject to the same DC power optimizer loss.		
Total DC power loss (%)	<input type="text" value="2.490"/>	<input type="text" value="2.490"/>	<input type="text" value="2.490"/>	<input type="text" value="2.490"/>

Total DC power loss = 100% * [1 - the product of (1 - loss/100%)]

Default DC Losses

Apply default losses to replace DC losses for all subarrays with default values.

Apply default losses for: Central inverters Microinverters DC optimizers

Fonte: Próprio autor

As perdas que o software leva em consideração são:

- Perdas por redução constante na irradiância;
 - Correspondem aos efeitos que poderão ser causados por sombreamentos temporários, como poeira e pequenos objetos que caem sobre o arranjo.
- Perdas CC;
 - Diz respeito às perdas no lado CC do sistema fotovoltaico, que não são calculadas pelo modelo de desempenho do módulo, como as perdas elétricas nos cabos que conectam os módulos do arranjo. Para o caso do sistema a ser simulado, há uma perda de 2,4% nessa parte.
- Perdas CA;
 - Referem-se às perdas elétricas no lado CA do sistema, que não são consideradas pelo modelo do inversor.
- Perdas no transformador e na transmissão;
 - Relacionadas a modelo desenvolvido para distribuição em grandes sistemas fotovoltaicos.

3.5.2 Simulação de sistemas com diferentes temperaturas

As etapas anteriores mostraram como simular um sistema fotovoltaico em que o módulo não conte com nenhum tipo de resfriamento. Para os sistemas com resfriamento, é preciso alterar os dados relacionados à temperatura ambiente. Os tópicos a seguir abordam a configuração do SAM para reproduzir as diferentes temperaturas obtidas em cada tipo de resfriamento.

3.5.2.1 Obtenção dos valores referentes à redução de temperatura

Primeiramente, é preciso saber quanto cada método de resfriamento tem a capacidade de afetar a temperatura final dos módulos fotovoltaicos. No capítulo anterior, foram apresentados diversos trabalhos, práticos e teóricos, com a proposta de aumentar a eficiência dos módulos fotovoltaicos com a redução de temperatura. Os resultados de diminuição de temperatura obtidos pelos autores desses trabalhos serão usados como parâmetro para os sistemas resfriados por passagem de água e resfriados por aletas, métodos de redução de temperatura de interesse deste trabalho.

3.5.2.2 Dados referentes à temperatura do módulo

Uma das informações fornecidas pelo SAM, após a simulação, é a respeito da temperatura do módulo. O programa utiliza o modelo de Duffie e Beckman para estimar os valores de temperatura. (GILMAN, 2015) Nesse modelo, conforme a Equação 3.1 abaixo, T_{amb} é a temperatura ambiente, G_t é a irradiância medida, G_{tnoct} é a irradiância padrão de medição de 800 W/m^2 , V_w é a velocidade do vento que foi utilizado 1 m/s que é a condição padrão para determinação das características do módulo, T_{cnoct} é a temperatura de operação do módulo nas condições padrão, T_{anoct} é a temperatura ambiente da condição padrão e tem seu valor de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e por fim η_m é eficiência do módulo. (DUFFIE; BECKMAN, 2013)

$$T_c = T_{amb} + \left[\left(\frac{G_t}{G_{tnoct}} \right) \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,8V_w} \right) (T_{cnoct} - T_{anoct}) (1 - \eta_m) \right] \quad (3.1)$$

É possível obter uma tabela de valores da temperatura do módulo em intervalos de uma hora. Com esses valores, obtém-se a temperatura média do módulo e assim, utilizando os valores de redução de temperatura obtidos na literatura, obtém-se o valor da temperatura do módulo resfriado.

3.5.2.3 Dados referentes à temperatura do ambiente

De acordo com a Equação 3.1, uma mudança no valor de T_{amb} acarreta em uma mudança de mesma magnitude no valor de T_c . Sabe-se também que a média aritmética é influenciada pelas alterações sofridas pelos valores da série. Ficará diminuída da quantidade que for subtraída a todos os valores da série.

Então, ao se subtrair, do valor de T_{amb} , a diferença entre a temperatura média dos módulos não resfriados com a temperatura média dos módulos resfriados, será encontrado o valor da temperatura do módulo resfriado.

Portanto, para simular com os valores de temperatura de um módulo resfriado, é necessário subtrair o valor da diferença entre a temperatura média dos módulos não resfriados com a temperatura média dos módulos resfriados de todos os valores de temperatura ambiente utilizados para a simulação.

Para isto, é preciso modificar o arquivo de clima utilizado na primeira etapa da configuração da simulação. Após a edição do arquivo, basta refazer a simulação utilizando os mesmos parâmetros utilizados para o caso base e comparar os resultados finais obtidos de geração de temperatura.

3.5.2.4 Valores utilizados na redução de temperatura

No trabalho de RODRIGRES et al. realizou-se elaborou uma análise computacional comparativa entre três das possíveis estratégias para reduzir a temperatura de operação de painéis fotovoltaicos. Por meio de modelagem matemática, o pesquisador conseguiu calcular o comportamento da temperatura dos módulos ao longo de um dia. Essa estimativa de diferença de temperatura entre o módulo base e o resfriado será usado nas simulações.

No trabalho, o pesquisador, usou como modelo de referência o balanço de energia proposto por Fuentes, que propões que o módulo fotovoltaico como sendo um único aglomerado sólido a uma temperatura uniforme. A equação proposta para o balanço é:

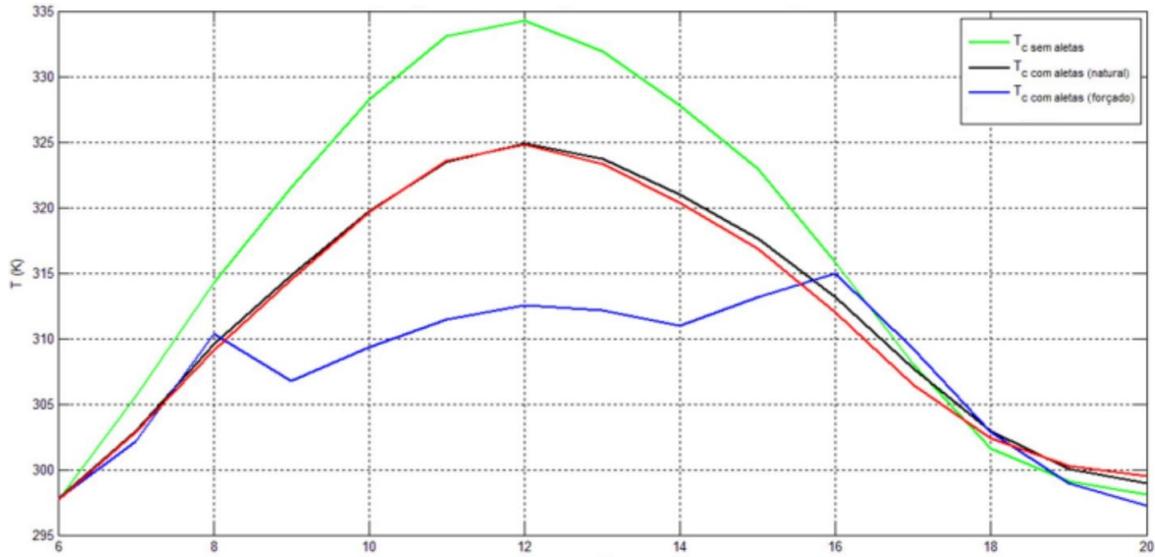
$$h_c (T_c - T_a) + \epsilon\sigma (T_c^4 - T_s^4) + (T_c^4 - T_g^4) - \alpha S + mc \frac{dT_c}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

em que (T_c , T_a , T_s e T_g são as temperaturas (em kelvin), respectivamente, da célula, do ambiente, do céu e do solo (ou do teto) circundando a célula, enquanto que m e c referem-se, respectivamente, à massa por unidade de área superficial (em kg/m^2) e ao calor específico global (em $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$) do módulo. O coeficiente global convectivo, h_c , é a soma dos coeficientes convectivos das faces superior e inferior do módulo.

A partir do balanço térmico apresentado na equação 3.2, RODRIGUES elaborou um modelo para calcular a temperatura de módulos quando resfriados por método ativo, passivo e de módulos híbridos. Os dois primeiros métodos são de interesse das simulações que virão. Na publicação "Estratégias para redução da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos" é explicado como o autor chega nas equações finais. (RODRIGRES et al., 2015)

Ao rodar as modelos feitos, o pesquisador inseriu os resultados obtidos no Figura 3.9 a seguir. De acordo com o gráfico obtido, em que a linha verde é o modelo base, a linha preta é o resfriamento passivo e a linha azul é referente ao resfriamento ativo, percebe-se que a diferença de temperatura é maior nos momentos mais quentes do dia e menor para quando a temperatura ambiente está mais amena. Este comportamento será reproduzido no ajuste de temperatura das simulações. No caso desses resultados, o resfriamento ativo só funciona nos períodos mais quentes, para reduzir os gastos energéticos do sistema.

Figura 3.9: Resultados matemáticos obtidos para diferentes métodos de resfriamento



Fonte: Adaptado de: (RODRIGRES et al., 2015)

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O SAM se mostra uma ferramenta poderosa, que possibilita alterar os parâmetros adequados, para que se possa comparar corretamente os resultados obtidos. Por ser um programa de código aberto e bem documentado, é possível saber o que acontece quando se altera qualquer variável.

Como se pode acompanhar tudo o que ocorre, observa-se o uso do modelo de Duffie e Beckman para cálculo da temperatura dos módulos. Ainda, a flexibilidade no uso de informações meteorológicas possibilitou alterar os dados utilizados pelo programa. Essa maleabilidade, em conjunto com os valores de redução de temperatura encontrados na literatura, favoreceram adaptações e a geração de resultados satisfatórios e coerentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações. Foram feitas três simulações, uma para um caso base, sem sistema de resfriamento e duas simulações com sistema de resfriamento, sendo uma referente a um sistema de resfriamento ativo (circulação de água) e outra referente a um sistema de resfriamento passivo (uso de aletas). Ao final, há uma discussão acerca dos resultados obtidos.

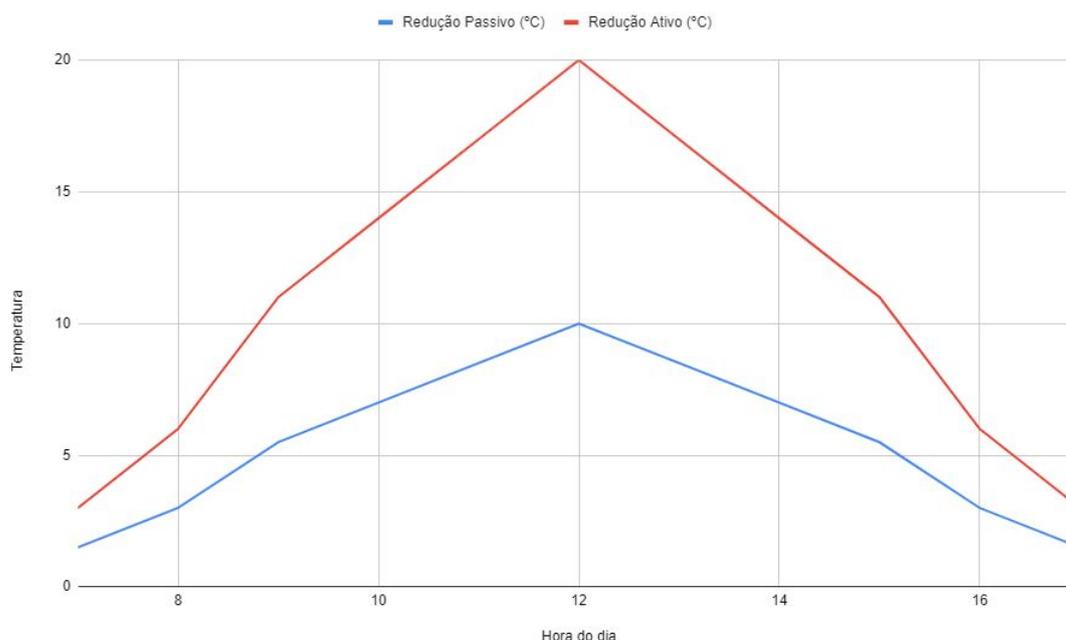
A irradiância e a temperatura são parâmetros fundamentais na análise de eficiência de módulos fotovoltaicos. A relação destes com o comportamento elétrico de um módulo é fator importante para avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico. O aumento da temperatura ambiente é traduzido em um aumento da temperatura na célula fotovoltaica e isto tende a reduzir seu desempenho. Uma alternativa para melhorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos em condições ambientais é aumentar a dissipação de calor dos módulos, reduzindo sua temperatura de operação e, conseqüentemente, elevando sua eficiência.

4.1 PREMISSAS INICIAIS

Os resultados teóricos mostraram que o uso de sistema de resfriamento passivo reduziu a temperatura máxima de operação em cerca de 10°C. O desempenho obtido por um sistema de resfriamento ativo obteve melhores resultados, promovendo uma redução de cerca de 22°C na temperatura máxima do módulo. (SANTOS et al., 2018)

A Figura 3.9 mostra o comportamento em que é preciso reproduzir nas simulações, para isso, foi considerado um redução linear de temperatura até alcançar a diferença máxima entre temperatura do caso base para a temperatura dos modelos com resfriamento. Portanto, a Figura 4.1 abaixo mostra o comportamento assumido da redução de temperatura em cada caso estudado.

Figura 4.1: Comportamento esperado para redução de temperatura



Fonte: Próprio autor

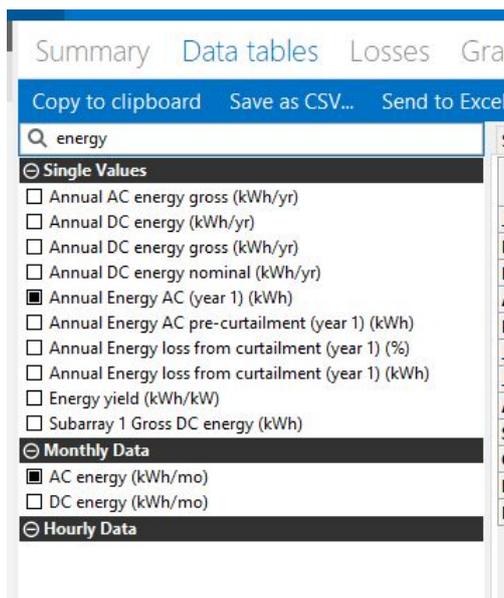
4.2 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados que serão apresentados a seguir foram obtidos por meio de simulação, usando o programa SAM. Em cada caso, as mesmas condições para a geração de energia foram mantidas, alterando-se apenas a temperatura de operação dos módulos, para que, assim, fosse possível a comparação dos valores obtidos com base apenas nas temperaturas.

O SAM disponibiliza diversas informações acerca do sistema simulado. Logo que a simulação é feita, o programa apresenta os principais resultados obtidos. São apresentados: a produção anual de energia, a produção mensal de energia, o fator de capacidade da instalação e as perdas da instalação. Para outras informações, é necessário navegar pelas abas disponíveis na área de resultados obtidos.

Neste trabalho, são analisados a produção anual de energia, a produção mensal de energia, o perfil anual da temperatura de operação e a temperatura média máxima de operação dos módulos fotovoltaicos. Para obter os valores referentes à produção de energia, é necessário navegar até *Data tables* e selecionar os campos *Annual Energy AC*, na sessão *Single Values*, para a produção anual de energia e *AC energy*, na sessão *Monthly Data*, para a produção mensal de energia, conforme ilustrado na Figura 4.2.

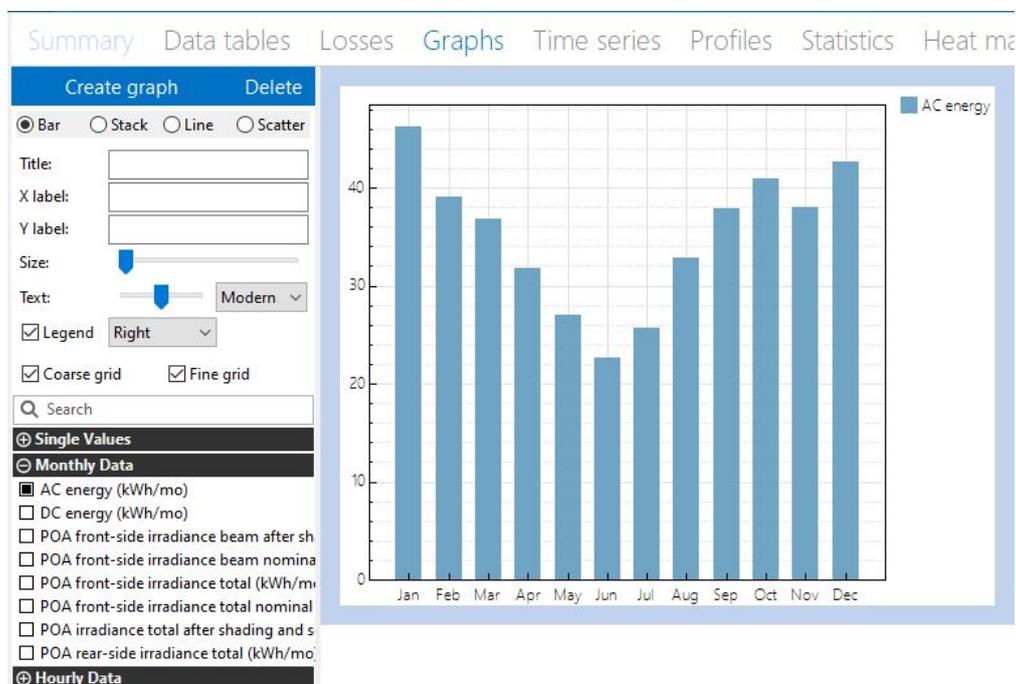
Figura 4.2: Menu para obtenção de dados referentes à produção de energia



Fonte: Próprio autor

Para a criação do gráfico com a produção de energia por mês, é preciso ir na aba de *Graphs*, em seguida clicar em *Create graph* e selecionar os dados desejados, no caso, *AC energy*, na sessão *Monthly Data*. A Figura 4.3 mostra todos os campos preenchidos para a obtenção do gráfico.

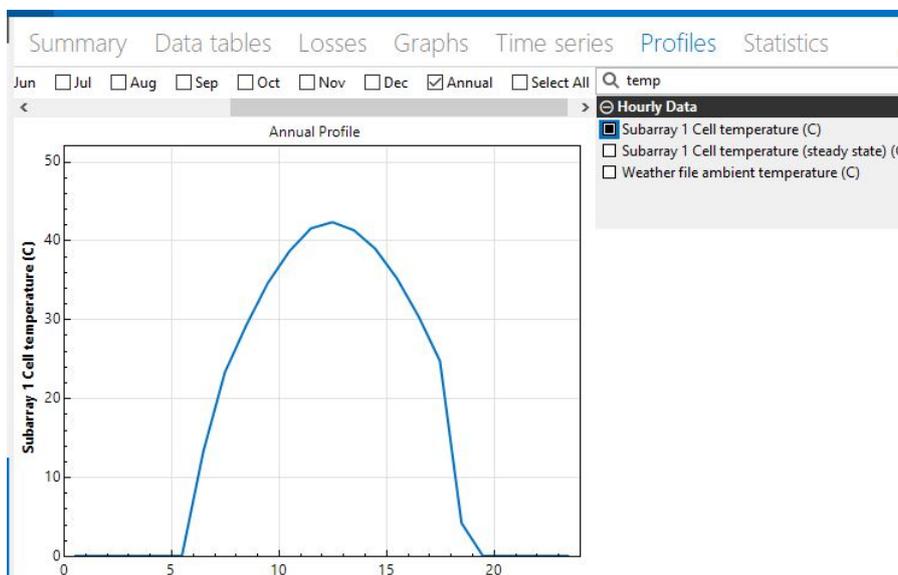
Figura 4.3: Menu para criação de gráficos referentes à produção de energia



Fonte: Próprio autor

Para a obtenção do perfil anual da temperatura de operação, é necessário ir até a aba *Profiles* e marcar a opção *Annual*, para que o programa mostre as informações agregadas de todo o ano simulado e em seguida marcar *Subarray 1 Cell temperature*. Esta opção informa apenas as temperaturas em que o módulo encontra-se operante, informando temperatura zero para quando o módulo está desligado. A Figura 4.4 mostra a obtenção da curva do perfil desejado.

Figura 4.4: Menu para obtenção do perfil anual da temperatura de operação dos módulos



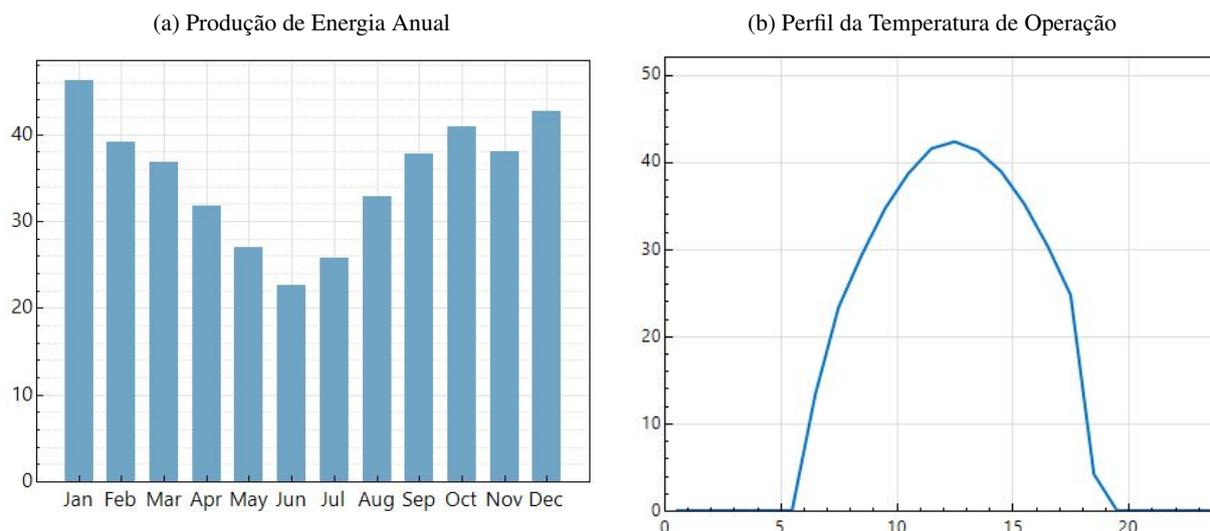
Fonte: Próprio autor

Por fim, a aba *Statistics* possui diversas informações acerca do sistema simulado. Dentre essas informações, há a temperatura de operação do módulo, de onde podemos obter os valores médios, os mínimos, os máximos, os médios mínimos e os médios máximos. Sendo assim, a seguir, os resultados obtidos nas simulações para o modelo sem resfriamento e para os modelos com resfriamento são apresentados.

4.2.1 Modelo de base

O modelo base é aquele sem nenhum sistema de resfriamento. Dentre os valores possíveis de se obter através do programa, é de maior interesse a produção anual de energia e a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos. O sistema sem resfriamento produziu 445kWh em um ano de operação, conforme a Figura 4.5a mostra, operando em uma temperatura máxima média de 44°C. A Figura 4.5b mostra o perfil anual da temperatura de operação no período em que a usina produz energia.

Figura 4.5: Resultados obtidos para o caso base



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.5a mostra a soma da produção de energia em cada mês. Os valores para o caso base estão apresentados na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1: Valores obtidos no modelo base

	Sistema Base
Temp. máx. média	44°C
Produção de energia (kWh)	
Anual	445
Janeiro	48,72
Fevereiro	41,24
Março	38,88
Abril	33,62
Maio	28,65
Junho	24,17
Julho	27,36
Agosto	34,71
Setembro	39,95
Outubro	43,16
Novembro	40,14
Dezembro	45,05

Fonte: Próprio Autor

Já a Figura 4.5b mostra o comportamento da temperatura de operação do módulo ao longo do dia. O programa faz a média de todos os valores obtidos para determinada hora do dia e informa o valor graficamente, quando a célula não está em operação, o valor da temperatura é zero. É possível observar que, em média, o módulo opera entre as 6 horas da manhã e as 6 horas da tarde e que a temperatura máxima de 44° é obtida por volta de meio-dia.

4.2.2 Manipulação da temperatura de operação

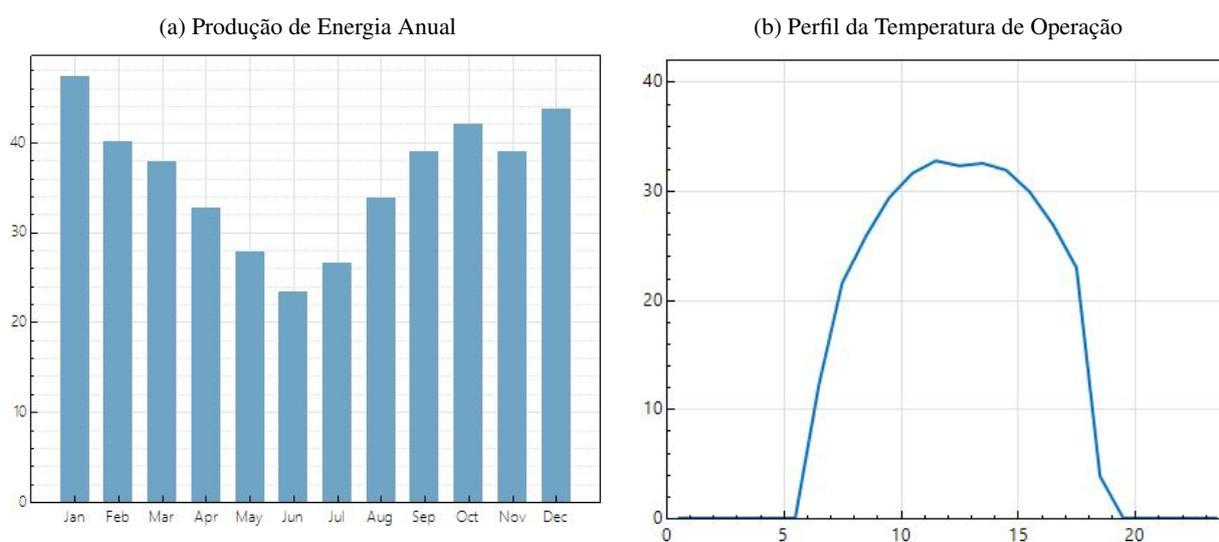
Para que seja possível simular uma usina com sistema de resfriamento, é necessário fazer o ajuste de temperatura nas informações inseridas no programa. De acordo com a Equação 3.1, uma mudança na temperatura ambiente equivale a uma igual mudança na temperatura de operação do módulo.

Portanto, para gerar o efeito esperado, basta modificar a temperatura ambiente no arquivo de clima que é inserido no começo da simulação de acordo com o comportamento estudado no trabalho de RODRIGRES et al.

4.2.3 Modelos com sistema de resfriamento

Trabalhou-se com dois modelos com sistema de resfriamento. Foi simulado um sistema com resfriamento ativo e outro com resfriamento passivo. O sistema com resfriamento passivo produziu 459kWh em um ano de operação. A Figura 4.6a mostra a produção mensal. Ao longo do ano simulado, operou em uma temperatura máxima média de 35°C. A Figura 4.6b mostra o perfil anual da temperatura de operação no período em que a usina produz energia.

Figura 4.6: Resultados obtidos para o caso base



Fonte:Elaborado pelo autor

A Figura 4.6a mostra a soma da produção de energia em cada mês, os valores para o caso base estão apresentados na Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2: Valores obtidos no modelo com resfriamento passivo

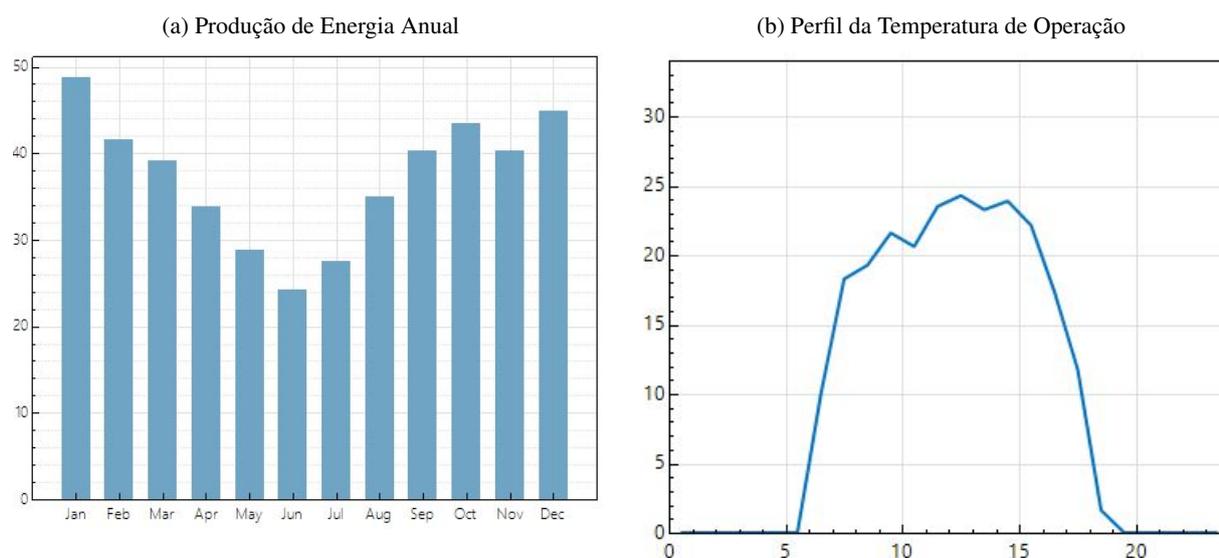
	Sistema com Aleta
Temp. máx. média	35°C
Produção de energia (kWh)	
Anual	459
Janeiro	50,07
Fevereiro	42,41
Março	40
Abril	34,62
Maio	29,53
Junho	24,92
Julho	28,21
Agosto	35,76
Setembro	41,16
Outubro	44,4
Novembro	41,27
Dezembro	46,29

Fonte: Próprio Autor

Já a Figura 4.6b mostra o comportamento da temperatura de operação do módulo ao longo do dia. É possível observar que, em média, o módulo opera entre as 6 horas da manhã e as 6 horas da tarde e que a temperatura máxima de 35° é obtido por volta de meio-dia.

O modelo sistema com resfriamento ativo produziu 471kWh em um ano de operação, A Figura 4.7a mostra a produção mensal da usina. Ao longo do ano simulado, operou em uma temperatura máxima média de 27°C. A Figura 4.7b mostra o perfil anual da temperatura de operação no período em que a usina produz energia.

Figura 4.7: Resultados obtidos para o caso com resfriamento ativo



Fonte:Elaborado pelo autor

A Figura 4.7a mostra a soma da produção de energia em cada mês, os valores para o caso base estão apresentados na Tabela 4.3 abaixo.

Tabela 4.3: Valores obtidos no modelo com resfriamento ativo

	Sistema com Aleta
Temp. máx. média	27°C
Produção de energia (kWh)	
Anual	471
Janeiro	51,41
Fevereiro	43,57
Março	41,09
Abril	35,61
Maio	30,40
Junho	25,66
Julho	29,05
Agosto	36,80
Setembro	42,34
Outubro	45,63
Novembro	42,39
Dezembro	47,51

Fonte: Próprio Autor

Já a Figura 4.7b mostra o comportamento da temperatura de operação do módulo ao longo do dia. É possível observar que, em média, o módulo opera entre as 6 horas da manhã e as 6 horas da tarde e que a temperatura máxima de 27° é obtido por volta de meio-dia.

4.2.4 Discussão

É notável a relação da temperatura de operação dos módulos com a produção de energia. Quanto maior o resfriamento, melhor é a produção de energia nos módulos, sem que haja mudança no perfil de produção. A Tabela 4.4 abaixo apresenta os resultados obtidos de forma compilada e os ganhos de cada método com relação ao caso base.

Pela análise dos resultados obtidos, o comportamento ocorreu conforme o esperado, uma vez que o método de resfriamento utilizando sistema ativo, que retira mais calor dos módulos, fez com que o aumento de produção de energia fosse o mais significativo, chegando a produzir 5% mais energia. O sistema de resfriamento passivo produziu cerca de 3% mais energia quando comparado com o sistema base.

Como o sistema passivo é mais fácil e barato de implementar, já que o uso de aletas é uma das formas mais comuns de se melhorar a troca de calor em materiais e como é necessário averiguar o balanço energético, para determinar se a energia gasta com a bomba d'água¹ compensa os ganhos com a menor temperatura, o sistema com aletas se torna o mais promissor dentre as duas

¹A fabricante da bomba Singflo FL-3203 informa um consumo entre 20Wh e 55Wh, operando 6 horas por dia e durante o mês, o consumo seria entre 3,6kWh e 9,9kWh no mês

Tabela 4.4: Compilado de Resultados.

	Sistema Base	Aletas	Ganho (%)	Fluxo d' água	Ganho(%)
Temp. máx. média	44°C	35°C	20	27°C	40
Produção de energia (kWh)					
Anual	445	459	3,00	471	5,39
Janeiro	48,72	50,07	2,70	51,41	5,23
Fevereiro	41,24	42,41	2,76	43,57	5,35
Março	38,88	40	2,80	41,09	5,38
Abril	33,62	34,62	2,89	35,61	5,59
Maiο	28,65	29,53	2,98	30,40	5,76
Junho	24,17	24,92	3,01	25,66	5,81
Julho	27,36	28,21	3,01	29,05	5,82
Agosto	34,71	35,76	2,94	36,80	5,68
Setembro	39,95	41,16	2,94	42,34	5,64
Outubro	43,16	44,4	2,79	45,63	5,41
Novembro	40,14	41,27	2,74	42,39	5,31
Dezembro	45,05	46,29	2,68	47,51	5,18

Fonte: Próprio Autor

estratégias abordadas. Trata-se de um método simples e eficiente.

4.2.5 Considerações Finais do Capítulo

O ambiente de simulação do SAM se mostra versátil e promissor, sendo possível obter diversos resultados e trabalhar livremente com os valores obtidos. Com base nos valores de diferença de temperatura obtidos na literatura, foi possível estimar os ganhos na produção de energia dos módulos fotovoltaicos de cada método de resfriamento. Com a apresentação dos resultados, a fácil aplicação de um sistema passivo de resfriamento, seja na elaboração como na execução, se torna um candidato promissor para as simulações realizada, provavelmente, em maiores escalas, métodos ativos de resfriamento possuam maior custo-benefício.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esse estudo teve como objetivo central avaliar a variação da produção de energia de módulos fotovoltaicos com base na temperatura de operação. Para tal, modelos de sistemas de resfriamento foram propostos e os resultados foram obtidos por meio de simulações usando o SAM. Os resultados encontrados permitem concluir que o resfriamento de módulos fotovoltaicos podem ter um papel fundamental para a otimização da geração fotovoltaica.

Constatou-se que existem várias técnicas conhecidas que podem limitar a elevação de temperatura de módulos fotovoltaicos. O calor pode ser dissipado de maneira passiva, utilizando-se da convecção natural do ar sobre as superfícies dos módulos fotovoltaicos, embora técnica se limite pela baixa taxa de remoção de calor. Já as técnicas ativas, apesar de apresentarem um melhor potencial, são processos que requerem o uso de energia adicional.

Duas técnicas foram reproduzidas neste trabalho, foi simulado um cenário em que o módulo estivesse sendo resfriado por aleta e outro cenário em que o módulo estivesse sendo resfriado por um fluxo de água. Em ambos os casos, houve uma queda na temperatura e um consequente ganho de produção de energia. O módulo resfriado por aleta obteve um ganho de cerca de 3% e o módulo resfriado por água gerou 5% mais energia.

Essa energia gerada a mais no método ativo não necessariamente é sinônimo de um sistema melhor, uma vez que para fazer circular a água pelo sistema é preciso utilizar parte da energia produzida para alimentar uma bomba, isso pode fazer com que a energia produzida disponível seja menor em relação a outros métodos.

Por isso que as aletas, para o sistema proposto, apresentam um bom custo-benefício. A simplicidade e facilidade na implementação de projetos usando aletas, uma vez que se trata de uma forma comum de melhorar a troca de calor com o ambiente e a eficiência do método faz com que o método de resfriamento passivo seja mais promissor para o sistema proposto nas simulações.

A análise da eficiência energética com base na redução da temperatura de módulos fotovoltaicos permite a oportunidade de contribuir para o avanço de uma tecnologia que não representa uma novidade, mas que é relevante como alternativa ao modelo vigente, além de também contribuir para a expansão do setor de energias renováveis, que possui perspectivas de crescimento muito boas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Sabendo disso, propõe-se, para trabalhos futuros, a elaboração prática de sistemas de resfriamento estudadas nos capítulos anteriores e a confecção de uma usina solar resfriada, para a obtenção prática dos resultados obtidos teoricamente e a viabilidade prática e econômica da

escalabilidade do projeto. Ou seja, um módulo com sistema de resfriamento ativo, que irá bombear água para ser usado no resfriamento. Outro módulo será modificado com aletas para ter um sistema de resfriamento passivo. E também módulos sem nenhuma modificação para fins de comparação de resultados.

Também propõe-se a concepção de usinas solares fotovoltaicas flutuantes. Com base em estudos de casos de sucesso já aplicados ao redor do mundo, este trabalho pode servir como referencial teórico para a elaboração de uma pequena usina solar flutuante nas regiões adjacentes à Universidade de Brasília, como, por exemplo, o Lago Paranoá. A iniciativa tornaria possível dimensionar os ganhos práticos de se ter um sistema flutuante, indo além dos ganhos na geração de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, M.; DEVRAJ, S. Floating solar photovoltaic (fspv): A third pillar to solar pv sector ?, Nova Déli, 2019.
- ALENCAR FILHO, A. Avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante. Fortaleza, 2018.
- ALVES, M. d. O. L. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. João Monlevade, 2019.
- AMBER, K. P.; AKRAM, W.; BASHIR, M. A.; KHAN, M. S.; KOUSAR, A. Experimental performance analysis of two different passive cooling techniques for solar photovoltaic installations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 143, n. 3, p. 2355–2366, fev. 2021.
- ASSEMBLÉIA GERAL DA ONU. Resolução 70/1. ag index: A/res/70/1. 25 de setembro de 2015. Disponível em: <<https://undocs.org/en/A/RES/70/1>>. Acesso em: 11 mai. 2021.
- BANCO MUNDIAL. Where sun meets water : Floating solar market report - executive summary. Washington, D.C., 2018.
- BELACHE, A. et al. A energia solar, o coronavírus e a recuperação econômica. *Empresas & Negócios*, 03 de junho de 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/a-energia-solar-o-coronavirus-e-a-recuperacao-economica.html>>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- BELLINI, E. Resfriar os painéis fotovoltaicos com água. *pv magazine*, 03 de abril de 2020. Disponível em: <<https://www.pv-magazine-latam.com/brasil-noticias/resfriar-os-paineis-fotovoltaicos-com-agua/>>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- BELLIS, M. History and definition of a solar cell. ThoughtCo, 03 de julho de 2019. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/history-of-solar-cells-19924355>>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- BILLON, V. L. Le solaire flottant émerge en france. *Les Echos*, 14 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/le-solaire-flottant-emerge-en-france-373383>>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- BP. Statistical review of world energy 2020. 2020.
- CAETANO, R. Energia solar cresce na pandemia e gera 37 mil empregos. *exame invest*, 25 de junho de 2020. Disponível em: <<https://exame.com/economia/energia-solar-cresce-na-pandemia-e-gera-37-mil-empregos/>>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes: Duffie/Solar Engineering 4e*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- DUPRÉ, O. *Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices*. Tese (Doutorado) — INSA Lyon, out. 2015.
- EGAB, K.; OKAB, A.; DYWAN, H. S.; OUDAH, S. K. Enhancing a solar panel cooling system using an air heat sink with different fin configurations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 671, jan. 2020.

- ELBREKI, A.; SOPIAN, K.; FAZLIZAN, A.; IBRAHIM, A. An innovative technique of passive cooling PV module using lapping fins and planner reflector. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 19, jun. 2020.
- EPE. Balanço energético nacional 2020: Ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020.
- GAFFNEY, O.; STEFFEN, W. The Anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, v. 4, n. 1, abr. 2017.
- GILMAN, P. Sam fotovoltaic model technical reference. Denver, 2015.
- INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genebra, Suíça: IPCC, 2014.
- KAMUYU, W. C. L.; LIM, J.; WON, C.; AHN, H. Prediction Model of Photovoltaic Module Temperature for Power Performance of Floating PVs. *Energies*, v. 11, n. 2, fev. 2018.
- LUO, Q. et al. Experimental investigation on the heat dissipation performance of flared-fin heat sinks for concentration photovoltaic modules. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 157, 2019.
- MCCOLLUM, D. L. et al. Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages. *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, v. 13, n. 3, 2018.
- MEHROTRA, S. et al. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, Environment and Technology*, v. 3, n. 3, 2014.
- MEYER, R.; OTHER. A força da energia em tempos de pandemia. Revista FotoVolt, 06 de agosto de 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/a-forca-da-energia-solar-em-tempos-de-pandemia.html>>. Acesso em: 16 ago. 2020.
- MILIND, N. et al. Enhancing the Efficiency of Solar Panel Using Cooling Systems. *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 07, n. 03, mar. 2017.
- MME/EPE. Plano decenal de expansão de energia 2026. 2017.
- MME/EPE. Expansão da geração solar fotovoltaica flutuante aspectos tecnológicos e ambientais elevantes ao planejamento. 2020.
- MME/EPE. Plano decenal de expansão de energia 2029. 2020.
- MME/EPE. Plano nacional de energia 2050. 2020.
- MOHARRAM, K. A. et al. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, Elsevier, v. 4, n. 4, 2013.
- NASA-JPL/CALTECH. *Graphic: Temperature vs Solar Activity*. 2020. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/climate_resources/189/graphic-temperature-vs-solar-activity>.
- NASCIMENTO, R. L. Energia solar no brasil: Situação e perspectivas. Brasília, março 2017.
- ODEH, S.; BEHNIA, M. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling. *Heat Transfer Engineering*, v. 30, n. 6, maio 2009.
- ONU. *SDG Indicators*. 2021. Disponível em: <<https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/goal-07/>>.

ORESQUES, N. The Scientific Consensus on Climate Change. *Science*, v. 306, n. 5702, p. 1686–1686, dez. 2004.

PEREIRA, E. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição*. [S.l.: s.n.], 2017. ISBN 978-85-17-00089-8.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, 2014.

PNUD. *Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7*. [S.l.]: ONU, 2018.

PORTAL SOLAR. Energia solar fotovoltaica flutuante será instalada em hidrelétrica em goiás. 26 de fevereiro de 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/uncategorized/energia-solar-fotovoltaica-flutuante-sera-instalada-em-hidreletrica-em-goias.html>>. Acesso em: 16 ago. 2020.

RODRIGRES, V. et al. Estratégias para redução da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos. In: *Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*. Costa do Sauípe: [s.n.], 2015.

SANTER, B. D. et al. A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere. *Nature*, v. 382, n. 6586, p. 39–46, jul. 1996.

SANTOS, I. et al. OmparaçãO experimental de estratégias para redução da temperatura de operação de módulos fotovoltaicos. In: *Anais CBENS 2018*. Gramado: [s.n.], 2018.

SHEIKH, Y. A. et al. An improved cooling system design to enhance energy efficiency of floating photovoltaic systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 12, n. 5, set. 2020.

SIMIONI, T. O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do brasil. Rio de Janeiro, 2017.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, v. 34, n. 1, jan. 2009.

SREDOJA, P.; SOCORRO, A. C. D. Ods 7 – energia limpa e acessível e as metas do conselho nacional de justiça. 2018.

STAMBUK, R. H. Influência da temperatura no desempenho de sistemas fotovoltaicos. Curitiba, 2017.

TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro: EPE, 2016. ISBN 978-85-60025-06-0.

VIALLI, A. Energia solar e eólica, juntas, ultrapassam hidrelétricas em capacidade instalada no mundo. Biomassa & Bioenergia, 14 de abril de 2020. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2020/4/15/energia-solar-e-eolica-juntas-ultrapassam-hidreletricas-em-capacidade-instalada-no-mundo.html>>. Acesso em: 16 ago. 2020.