

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

**Artur Corrêa Gardone Junior**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO:**  
Melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor

Juiz de Fora

2019

**Artur Corrêa Gardone Junior**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO:**

Melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Martins Borges

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Gardone Junior, Artur Correa.

Desenvolvimento de produto: Melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor / Artur Correa Gardone Junior. -- 2019.

80 f. : il.

Orientador: Marcos Martins Borges

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído, 2019.

1. Painel fotovoltaico. 2. Dissipador de calor. 3. Eficiência energética. I. Borges, Marcos Martins, orient. II. Título.

**Artur Corrêa Gardone Junior**

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO:**

**Melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

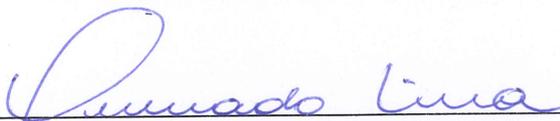
Aprovada em 19 de setembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Dr. Marcos M. Borges - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Dra. Eugênia Cristina Muller Giancoli Jabour  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por ter sempre estado a frente de todas as decisões e realizações em minha vida. Meu pai Artur pelo apoio incondicional, a minha mãe Luciana por todo amor e por me cobrir em suas orações. Meus queridos irmãos Danielle e Daniel pelo carinho e apoio. Minha noiva Laura, por toda paciência, apoio e companheirismo nesse período. E a minha grande amiga Mariana que me deu apoio e suporte nesse período.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter sempre estado a frente de todas as decisões e realizações em minha vida.

Agradeço ao meu Orientador, Marcos Martins Borges, por sua contribuição e apoio nesse período. Seu conhecimento, sabedoria, conselhos e sugestões foram de grande importância para que tal etapa pudesse ser concluída.

Agradeço aos professores, Eugênia Cristina Muller Giancoli Jabour e Fernando Tadeu de Araújo Lima, pela disponibilidade em participar da banca avaliadora contribuindo para o engrandecimento desse trabalho.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio concedido nesse período, o qual, foi de grande ajuda para o desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Federal de Juiz de Fora e ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído pela oportunidade a mim concedida de realização do curso de mestrado. E também aos técnicos administrativos do PROAC, Lília e Fabiano por todo suporte dado nesse período.

Às pessoas que tive o prazer de conhecer nesse período, e aqueles amigos que tive a sorte de fazer dentro do programa de mestrado. Mariana e Rafael, espero poder levar essa amizade por toda a vida.

Por fim, agradeço de coração toda minha família. Meus pais, irmãos, avôs, tios e tias, a Laura meu grande amor, meus queridos cunhados e sobrinhos. Vocês são a base em tudo que eu faço, e sei que por mais difícil que pareça ser, vocês vão estar sempre comigo na caminhada. Amo vocês. Muito obrigado.

“A eficiência pode permitir o crescimento econômico, reduzir as emissões e melhorar a segurança energética. As políticas corretas de eficiência podem permitir que o mundo alcance mais de 40% dos cortes de emissões necessários para alcançar suas metas climáticas sem novas tecnologias. (Fatih Birol, diretor executivo da International Energy Agency IEA - )”

## RESUMO

O consumo de energia no mundo tem crescido vertiginosamente e com ele a preocupação e a busca por soluções alternativas de geração de energia capazes de oferecer menor impacto ambiental em seu processo. Nota-se também maior interesse por soluções em eficiência energética tanto na produção e projeto de novos produtos, quanto daqueles que já estão em uso no mercado. O crescimento das atividades econômicas tem contribuído para o aumento no uso de energia, inclusive no Brasil, onde a porcentagem chegou aos 73% entre os anos de 2000 e 2017, conforme dados do relatório Energy Efficiency de 2018. O Brasil destaca-se como uma das economias menos intensivas em carbono no mundo devido à sua característica de geração elétrica dada por sua extensão territorial continental e às características climáticas que se fazem extremamente favoráveis. Ainda assim, sabe-se que atualmente, há no mercado uma grande variedade em potencial que pode e deve ser melhor explorado, trata-se da geração de energia por fontes limpas, as quais destacam-se aqui o meio eólico e o solar. Essa pesquisa tem como objetivo principal, o desenvolvimento de um trocador de calor capaz de melhorar a eficiência em painéis fotovoltaicos através da redução da temperatura de operação. Com a revisão de literatura sobre os temas e conceitos relacionados à pesquisa como, energia solar, eficiência energética, energia limpa, painéis fotovoltaicos e outros, identificou-se que o painel pode perder até 20% de sua eficiência energética quando submetido à elevadas temperaturas de trabalho. Desta forma, contando com o auxílio do software de CAD 3D SolidWorks, foram construídos e testados alguns modelos de dissipadores obtidos através de perfis de alumínio, os quais podem ser facilmente encontrados no mercado para as fases de teste e elaboração do dissipador de calor. A pesquisa está estruturada na metodologia de desenvolvimento conhecida como Design Science Research (DSR) e como resultado será apresentado um modelo de perfil diferente dos que estão disponíveis no mercado, mas que apresente melhores resultados na dissipação do calor, tendo como base para tomada de decisão os resultados obtidos através das simulações realizadas com os perfis conhecidos.

**Palavras-chave:** Painel fotovoltaico. Dissipador de Calor. Eficiência energética.

## **ABSTRACT**

Energy consumption in the world has grown dramatically and with it the concern and the search for alternative energy generation solutions that can have less environmental impact in its process. There is also greater interest in energy efficiency solutions both in the production and design of new products and those already in use in the market. The growth of economic activities has contributed to the increase in energy use, including in Brazil, where the percentage reached 73% between 2000 and 2017, according to data from the Energy Efficiency report of 2018. Brazil stands out as a of the least carbon intensive economies in the world due to their characteristic of electric generation given by its its great extent and the extremely favorable climatic characteristics. Even so, it is known that today there is a great variety of potential on the market that can and should be better exploited, it is the generation of energy from clean sources, which stand out here the wind and solar. The main objective of this research is the development of a heat exchanger capable of improving the efficiency in photovoltaic panels by reducing the operating temperature. By reviewing the literature on research-related topics and concepts such as solar energy, energy efficiency, clean energy, photovoltaic panels and others, it was found that the panel can lose up to 20% of its energy efficiency when subjected to high temperatures. job. In this way, with the aid of the Solid Works 3D CAD software, some models of heatsinks obtained through aluminum frame were built and tested, which can be easily found in the market for the temperature exchanger test and elaboration phases. The research is structured in the development methodology known as Design Science Research (DSR) and as a result will be presented a profile model different from those available in the market, but which presents better results in heat dissipation, based on decision making. the results obtained through simulations performed with the known frame.

**Keywords:** Solar Panel. Heat Sink. Energy Efficiency

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do método de condução de pesquisa .....	20
Figura 2: Total diário da irradiação global horizontal no Brasil – Média anual.....	24
Figura 3: Total diário da irradiação global horizontal nos Países Europeus .....	25
Figura 4: Efeito fotovoltaico .....	28
Figura 5: Componentes que forma o módulo fotovoltaico .....	29
Figura 6: Esquema de célula, módulo e painel.....	30
Figura 7: Influencia da temperatura sobre a corrente e tensão nos painéis fotovoltaicos .....	32
Figura 8: Linha do tempo com a evolução das ferramentas de CAD .....	35
Figura 9: Evolução dos sistemas de CAD .....	37
Figura 10: Painéis SX 120 U – LABSOLAR/UFJF.....	48
Figura 11: Perfil 1 de alumínio.....	51
Figura 12: Perfil 2 de alumínio.....	52
Figura 13: Perfil 3 de alumínio.....	52
Figura 14: Dissipador perfil 1 de alumínio .....	54
Figura 15: Dissipador perfil 2 de alumínio .....	54
Figura 16: Dissipador perfil 3 de alumínio .....	55
Figura 17: Montagem painel e dissipador perfil 1 de alumínio .....	56
Figura 18: Montagem simplificada com perfil 1 .....	57
Figura 19: Montagem simplificada com perfil 2 .....	58
Figura 20: Montagem simplificada com perfil 3 .....	58
Figura 21: Resultado simulações – Temperatura mínima .....	59
Figura 22: Resultado simulação Perfil 3 – Condição de Temp. 4.....	60
Figura 23: Perfil 10 de alumínio.....	63
Figura 24: Resultado simulação Perfil 10 – Condição de Temp. 4.....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Objetivos gerais e específicos .....	17
Quadro 2: Incentivos fiscais e regulatórios para geração de energia solar fotovoltaica no Brasil .....	26
Quadro 3: Descrição dos componentes que formam o módulo fotovoltaico.....	29
Quadro 4: Demanda inicial, problema e solução proposta .....	43
Quadro 5: Requisitos do projeto e classificação quanto a importância .....	45
Quadro 6: Características do painel BP Solar SX 120 U.....	48
Quadro 7: Condutividade térmica.....	49
Quadro 8: Comparação Alumínio x Aço .....	50
Quadro 9: Componentes para montagem de painel e dissipador .....	55
Quadro 10: Componentes para montagem de painel e dissipador simplificado.....	57
Quadro 11: Resultado simulações – Temperatura mínima e máxima.....	59
Quadro 12: Resultado simulações – Temperatura mínima e percentual de redução	61
Quadro 13: Resultado simulações – Temperatura mínima para perfis hipotéticos ...	62
Quadro 14: Comparativo – Painel sem aletas, perfil 3 e perfil 10.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAD	Computer Aided Design
DS	Science of Design
DSR	Design Science Research
EVA	Etileno acetato de vinilo
Fil	Filosofia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LABSOLAR	Laboratório Solar Fotovoltaico da Universidade Federal de Juiz de Fora
QFD	Ferramentas de Desdobramento da Qualidade

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. DESIGN SCIENCE RESEARCH .....</b>	<b>18</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. ENERGIA SOLAR E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.1. EFEITO FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.2. CÉLULAS FOTOVOLTAICA.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.2.1. CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINOS E MULTICRISTALINOS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1.3. EFICIÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2. TROCADORES DE CALOR .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3. CAD E MODELAGEM PARAMÉTRICA .....</b>	<b>34</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. A <i>DESIGN SCIENCE RESEARCH</i> (DSR) COMO CONDUÇÃO DA PESQUISA .</b>	<b>39</b>
<b>3.1.1. ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2. ETAPA DE SUGESTÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3. ETAPA DE DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.4. ETAPA DE AVALIAÇÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.5. ETAPA DE CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. PRIMEIRA ETAPA – CONSCIENTIZAÇÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. SEGUNDA ETAPA – SUGESTÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3. TERCEIRA ETAPA – DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.1. DETERMINAÇÃO DO MODELO DE PAINEL DO ESTUDO.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.2. DETERMINAÇÃO DO MATERIAL .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.3. DETERMINAÇÃO DOS PERFIS.....</b>	<b>51</b>
<b>4.4. QUARTA ETAPA – ETAPA DE AVALIAÇÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5. QUINTA ETAPA – ETAPA DE CONCLUSÃO .....</b>	<b>61</b>

**5.CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA PARA DESENVOLVIMENTOS**

**FUTUROS..... 65**

**ANEXO A..... 70**

# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as considerações gerais, justificativas, objetivos, metodologia e condições de contorno da pesquisa.

## 1.1. Justificativa e caracterização do problema

O crescente aumento no consumo de energia no mundo levanta inúmeras discussões sobre os tipos de geração de energia, eficiência energética e consumo consciente. Busca-se cada vez mais desenvolver projetos para uso de energias renováveis e que ofereçam menor impacto ao meio ambiente.

Entre os anos 2000 e 2017 o uso de energia no Brasil teria aumentado cerca de 73% devido, principalmente, ao crescimento das atividades econômicas. Iniciativas realizadas em prol da eficiência energética no país, nesse mesmo período, permitiram economizar 5% da energia gasta em 2017. Os setores industrial e de serviço foram os que mais contribuíram para essa economia (ENERGY EFFICIENCY, 2018).

Quando falamos em geração de energia o Brasil é uma das economias menos intensivas em carbono do mundo devido ao uso de hidrelétricas para eletricidade e biocombustíveis nos transportes (ENERGY EFFICIENCY, 2018). Ainda assim existe muito ao que se buscar quando se pensa em energia renovável e geração de energia. Um país com extensão territorial continental e que possui características climáticas favoráveis às diversas formas de produção energética, como o Brasil, pode aproveitar ainda mais de outros processos de geração de energia, tais como o eólico e solar.

O cenário da utilização de energia solar no Brasil começou a mudar em 2012 a partir da Normativa nº482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), onde foi regulamentado a troca de energia entre o consumidor e o distribuidor permitindo que o excedente da energia gerada seja injetado novamente na rede e convertido em créditos

para o consumidor. Dentre os benefícios deste novo cenário estão a queda dos preços das placas fotovoltaicas e, conseqüentemente, o aumento da demanda pelas iniciativas.

Esta dissertação procura apresentar o processo de desenvolvimento de um produto tido como trocador de calor, para ser adaptado em placas fotovoltaicas, promovendo a melhoria da eficiência dessas placas na geração de energia. Levando em consideração também a sustentabilidade, busca-se determinar materiais de fabricação que possam ser reaproveitados e/ou reciclados.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo central deste estudo é o desenvolvimento de um trocador de calor, para melhorar a eficiência em placas fotovoltaicas através da redução da temperatura de operação. Sua justificativa está pautada no aumento do consumo de energia dos últimos anos e da demanda por novas formas de geração de energia assim como a difusão e melhora na eficiência energética das já existentes.

Sabe-se que a temperatura do ambiente tem influência direta no desempenho de placas fotovoltaicas, portanto, busca-se a proposição de um trocador de calor que seja capaz de resfriar tais placas sem a utilização de energia, apenas trocando calor com o ambiente através do ar.

Para atingir tal objetivo torna-se necessário a realização de revisão de literatura de alguns temas como: painéis fotovoltaicos, trocadores de calor, modelagem paramétrica e simulação. A revisão permite a aplicação da metodologia de desenvolvimento de produto, a fim de obter alternativas de projeto e, através de simulação de protótipo em ambiente virtual, escolher pelo melhor modelo capaz de promover a dissipação de calor do painel fotovoltaico. O quadro 1 descreve resumidamente os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

Quadro 1: Objetivos gerais e específicos

OBJETIVOS	
GERAIS	ESPECÍFICOS
Desenvolver trocador de calor capaz de resfriar placas fotovoltaicas sem a utilização de energia.	Revisar literatura sobre os temas: painéis fotovoltaicos, trocadores de calor, modelagem paramétrica e simulação.
	Aplicar metodologia de desenvolvimento de produto para projetar algumas alternativas de trocador de calor.
	Construir e testar em ambiente virtual protótipos de trocadores de calor, avaliando a melhor solução através de simulações.

Fonte: Elaborado pelo autor

### 1.3. Fundamentação Metodológica

Esta pesquisa é um procedimento racional e sistêmico que busca responder problemas que são propostos, onde, as razões que motivam a realização de uma pesquisa, segundo Gil (2007) podem ser tanto de ordem intelectual quanto de ordem prática.

Conforme Dresch (2013), a definição do método de pesquisa é fundamental e sua principal função é auxiliar o pesquisador a realizar sua investigação no sentido de responder seu problema de pesquisa. Prodanov e Freitas (2013) dividem a pesquisa em duas partes distintas, sendo elas pesquisa de natureza básica exploratória e a pesquisa aplicada descritiva.

A pesquisa básica exploratória tem como objetivo principal garantir o progresso científico sem necessariamente se preocupar com a utilização do conhecimento gerado na prática. As pesquisas aplicadas descritivas são aquelas de ordem prática, têm como interesse principal a utilização de seus resultados na prática (MARCONI; LAKATOS, 2009). Apesar desta divisão é possível aplicar estes dois tipos de pesquisa simultaneamente, a fim de aumentar a confiabilidade e embasamento do trabalho com resultados seguros. Os métodos de pesquisa consistem em um conjunto de regras e procedimentos, aceitos pela comunidade acadêmica, para a construção do conhecimento científico (ANDERY, MARIA AMÁLIA, 2004).

Em primeiro plano, neste trabalho, será adotada a pesquisa de natureza básica exploratória, em que não se tem a necessidade de aplicação prática e sim, o

levantamento bibliográfico procurando agregar conhecimento sobre os assuntos estudados. Em seguida, inicia-se a parte aplicada da pesquisa, com o intuito de desenvolver o produto.

Buscando complementar a pesquisa e torna-la mais concisa, encontra-se a necessidade da associação e aplicação de uma metodologia que contribua para a concepção de um produto voltado a solução de um problema real, como apresentado no início deste trabalho, como sendo o problema desta pesquisa. A DSR (*Design Science Research*) atende essa demanda de estruturação do projeto, pois “*ao projeto interessa o que e como as coisas devem ser, a concepção de artefatos que realizem objetivos*” (SIMON, 1996, p. 198, *apud DRESCH, 2013, p. 84*).

Dresch (2013) ainda afirma que “*A Design Science tem como finalidade conceber e não somente aplicar um conhecimento*” (DRESCH, 2013, p. 85). Logo, pode-se afirmar que a *Design Science Research* é um método de pesquisa orientado à solução de problemas (MARCH; STOREY, 2008).

#### **1.4. Design Science Research**

Bax (2013) considera a DSR como uma metateoria, cujo o objetivo de auxiliar o pesquisador na criação de conhecimento teórico durante processos de concepção de artefatos, justificando assim como tais processos podem constituir uma pesquisa com caráter científico. A DSR permite ao pesquisador munir-se de métodos que exploram os aspectos teóricos e práticos do seu problema de pesquisa, dessa forma não se produz apenas *design*, ou seja, projeto, e sim uma base científica estruturada que permite a sustentação e a qualidade dos resultados obtidos. Cabe ressaltar que, através da DSR busca-se obter resultados satisfatórios para o problema apresentado, considerando o contexto em que se encontra, ao contrário de outras áreas de pesquisa em que o interesse está somente em uma solução ótima (SIMON, 1996).

Para entender a ideia de estruturação da DSR é preciso conhecer melhor os principais elementos que compõe essa metodologia, são eles: classe de problemas e artefatos. Segundo Simon (1996), foi um dos primeiros autores a tratar a DSR ainda chamada de *Science of Design* ou DS, onde buscava-se diferenciar o que era artificial do natural, considerando tudo o que fosse produzido ou alterado de alguma forma por

influência do homem, como algo artificial. Não se tinha ainda bem definido o que era a classe de problemas, mas já tratava de forma organizada a natureza dos artefatos.

O termo solução de problema pode se tornar algo muito amplo e complexo, onde, uma simples alteração no contexto pode acarretar diferentes soluções. Assim, surge a necessidade de generalização das prescrições, com isso Van Aken (2004) propõem a generalização através da “classe de problemas”, seguindo o mesmo sentido discutido por Dresh, Lacerda e Antunes Junior (2013; 2015), definem essa classe de problemas como a organização de um conjunto de problemas, os quais podem ser práticos ou teóricos, e que contenham artefatos que sejam úteis para a ação nas organizações. Com isso a solução obtida na pesquisa pode ser aplicada em mais um tipo de problema.

Definida a classe de problemas torna-se necessário a caracterização dos artefatos, Simon (1996) aponta os artefatos como objetos artificiais caracterizados em termos dos objetivos, funções e adaptações e suas atribuições são discutidas durante todo processo de concepção, sendo responsável pela ligação entre um ambiente interno com os objetivos de determinado meio externo.

March e Smith (1995), afirmam que os artefatos podem existir em quatro tipos: **constructos ou conceito**, os quais constituem uma conceituação utilizada para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar soluções; **modelos**, que é um conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos, podem ser vistos como uma representação de como as coisas são; **métodos**, que são conjuntos de passos (algoritmo ou orientação) usados para executar uma tarefa, podem estar ligados a modelos como também podem traduzir um modelo ou representação; e as **instanciações**, que são a concretização do artefato em seu ambiente, elas operacionalizam constructos, modelos e métodos e mostram a eficácia dos modelos e métodos que a contemplam.

Desta forma entendendo as classes de problemas e os tipos de artefatos é possível avançar na execução e condução da *Design Science Research*.

#### **1.4.1. Aplicação da *Design Science Research* na Pesquisa**

Desde a década de 1990 diversos autores propuseram métodos relacionados ao Design Research no intuito de formalizar essa metodologia para a condução de

pesquisas. Esses métodos receberam diversas nomenclaturas, porém alguns pontos eram recorrentes entre eles.

Dentre os métodos de condução de pesquisa destaca-se o proposto por Takeda et al. (1990), que permite a condução da pesquisa baseada em Design Science, esse método é composto por cinco etapas principais, como mostra a figura 1.

Figura 1: Etapas do método de condução de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019, adaptado de Takeda; Veerkamp; Yoshikawa, et. al., 1990

Takeda; Veerkamp; Yoshikawa, (1990) definem a primeira etapa de seu método como a **conscientização do problema**, onde o objetivo é encontrar um problema através da comparação do objeto de estudo com suas especificações, definindo a formalização do problema e considerando suas fronteiras e soluções necessárias, como satisfatórias. A segunda etapa é a de **sugestão**, nela busca-se propor conceitos chave que, de alguma forma auxiliem o pesquisador na resolução do problema estudado.

Após as duas primeiras partes, tem-se a etapa de **desenvolvimento** onde, segundo Takeda et al. (1990) o pesquisador deve usar dos conceitos-chave, previamente definidos na etapa anterior como suporte para desenvolver possíveis soluções para o problema. Dresh, Lacerda e Antunes Junior (2013, 2015) citam a utilização de ferramentas de auxílio de projeto que podem ser usadas nesta etapa como algoritmos computacionais, representações gráficas, protótipos, maquetes em escala, com o intuito de produzir o artefato em estado funcional.

A quarta etapa é a **avaliação**, com o objetivo de analisar criticamente o artefato produzido na etapa anterior. Conforme dito anteriormente a busca não é por uma solução ótima, mas por uma solução que atenda satisfatoriamente a necessidade dentro do contexto onde se encontra inserido, esta avaliação pode ser feita através de simulações, testes de protótipos e análises para matriz de decisão. Van Aken (2011) propõe que na análise da solução proposta para o problema, também seja levado em consideração questões como custo-benefício da solução, caso a solução atenda às particularidades do contexto onde está aplicada e se as necessidades dos interessados foram atendidas.

E, por fim, a quinta etapa, chamada de **conclusão**, onde o pesquisador determina o desenvolvimento que obteve melhor resultado diante do problema apresentado inicialmente e o processo é, então, formalizado e comunicado aos devidos fins (TAKEDA et al. 1990).

## **2. Fundamentação Teórica**

Nesse capítulo serão abordados os principais temas que compõe esse trabalho, buscando a ampliação do conhecimento para um significativo desenvolvimento da pesquisa.

### **2.1. Energia Solar e Painéis Fotovoltaicos**

Desde as civilizações mais antigas a energia solar sempre esteve presente, de uma forma ou de outra, nas atividades cotidianas do homem e, com o passar do tempo foram surgindo novas estratégias e ferramentas para melhor aproveitamento desta fonte de energia (FARIAS; SELLITTO, 2011).

A dependência e necessidade energética, no mundo, estão sempre em constantes transformações em busca da evolução, assim como novas tecnologias e dispositivos que procuram trazer conforto e praticidade. Nesta perspectiva surge a necessidade de desenvolver novos meios e alternativas de geração de energia, os quais sejam capazes de promover um menor impacto ambiental, se tornando assim mais sustentável.

Ao longo das últimas décadas, a produção de energia elétrica se diversificou intensamente, como resposta ao aumento dos níveis de consumo. Dentre as diferentes matrizes de geração de energia, cabe destacar, nesta dissertação, a transformação de energia a partir da energia solar.

A energia solar é uma fonte de energia considerada limpa e com elevado potencial à ser explorado, no Brasil. Tal potencial aqui, é consideravelmente maior quando se comparado com outros países conhecidos como líderes no uso dessa fonte de energia (SILVA, 2015).

De acordo com a ANEEL (2005), existem diferentes formas de aproveitamento da energia solar, seja no aquecimento de fluídos, diretamente na iluminação e aquecimento de ambientes e geração de energia mecânica ou elétrica. Para aquecer fluidos podem ser utilizados coletores de calor, capazes de concentrar e trocar calor com a água por exemplo. Esse método já é amplamente difundido para o consumo residencial, comercial

e industrial. O uso da energia solar como fonte de iluminação e aquecimento de ambientes pode ser explorada com auxílio de técnicas de arquitetura e construção que permitam a penetração e absorção da energia solar na edificação.

Para a geração de energia mecânica existem os concentradores solar, os quais BANDEIRA (2012) define como grandes áreas espelhadas que concentram a luz solar em um ponto específico. O direcionamento da luz solar permite a elevação da temperatura e com isso torna-se possível aplicar na produção de vapor que, produzido por esses concentradores são associados à turbinas e adquirem a capacidade de produzir energia mecânica e, além disto, se acoplado a um gerador, é capaz de transformar essa energia mecânica em energia elétrica.

É possível, também, a obtenção direta de energia elétrica, a partir da energia solar. Para esse tipo de geração existem dois sistemas o termoelétrico, que produz energia através de dois metais em condições específicas com a capacidade de gerar uma diferença de potencial e o sistema fotovoltaico, o qual será abordado nessa pesquisa, como forma de comprovar uma melhor eficiência na geração de energia elétrica.

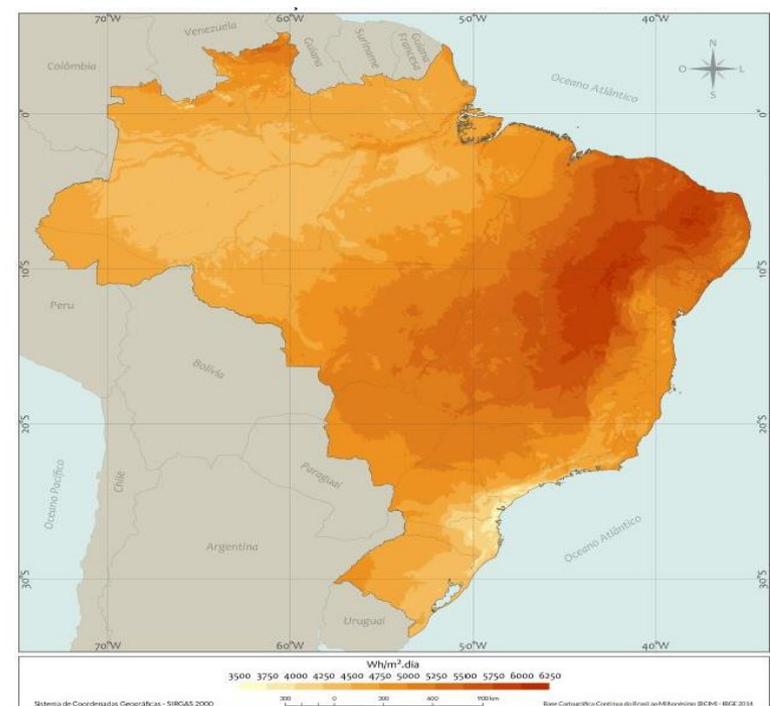
A fim de combater o aquecimento global tem-se notado o constante aumento em incentivos para as fontes de energia consideradas sustentáveis e limpas. Acarretando no aumento de pesquisas e incrementos direcionados ao desenvolvimento das placas fotovoltaicas, no intuito de reduzir cada vez mais a dependência da geração de energia por matrizes poluentes e não renováveis, como as que se utilizam dos combustíveis fósseis, por exemplo. Neste contexto, a China se destaca como o país que mais desenvolve estudos voltados para a tecnologia na indústria fotovoltaica, sendo a maior fabricante destas placas, no mundo (ESPOSITO; FUCHS, 2013).

Segundo International Energy Agency (IEA) (2018), os preços dos novos sistemas de geração fotovoltaica de grande porte caíram cerca de 70% em 2018 se comparado aos valores de 2010. O crescimento estimado na geração de energia solar fotovoltaica em 2017 superou os 40%, chegando a 460TWh, valor que representa 2% da geração de eletricidade no mundo. Destaca-se nesse crescimento, de 2017, a rápida implantação de 53 GW pela China, a participação deste país na demanda global passou dos 10% em 2010, para 55% em 2017.

Quando comparada as condições de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil com países da Europa, por exemplo, verifica-se que o valor de radiação solar global

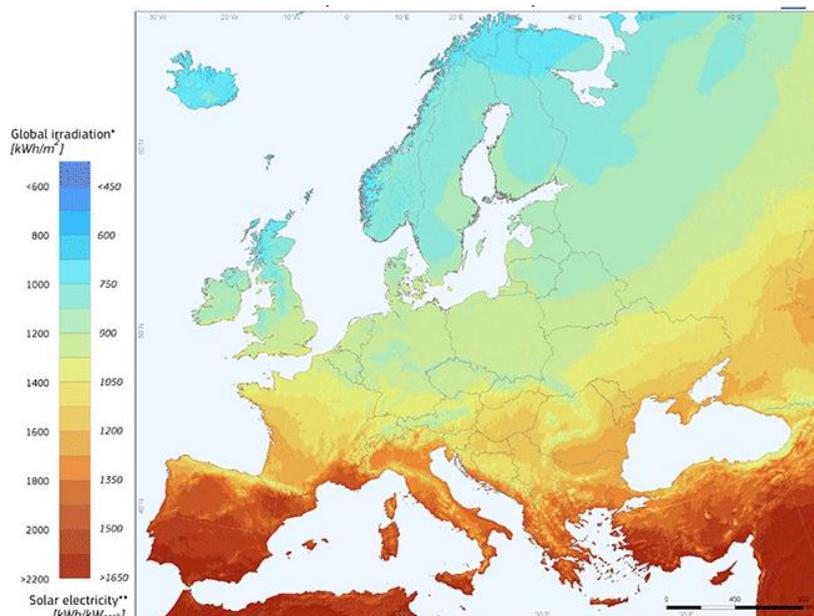
de qualquer região do Brasil é superior a maioria dos países da Europa, como Alemanha, Noruega e Espanha, os quais são países que se destacam nesse tipo de geração de energia. Segundo Pereira; Martins; Abreu; Ruther, (2006) todo o território brasileiro apresenta altos índices de radiação solar global mantendo assim, uma alta média anual. As figuras 2 e 3 mostram as médias anuais dos níveis de irradiação solar no Brasil e na Europa.

Figura 2: Total diário da irradiação global horizontal no Brasil – Média anual



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª ed., 2017.

Figura 3: Total diário da irradiação global horizontal nos Países Europeus



Fonte: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – European Commission, 2012.

No Brasil, os estudos e incentivos voltados à geração de energia, a partir do uso das placas fotovoltaicas, vêm crescendo, entretanto, a característica predominante de geração de energia através da implantação de redes de hidrelétricas, fonte também considerada limpa e de baixo custo, porém com ocupação de grandes áreas territoriais, faz com que o uso da energia através de material fotovoltaico tenha um crescimento em ritmo menor que outros países onde as matrizes energéticas predominantes são mais agressivas ao meio ambiente.

Destaca-se o aumento da utilização dos painéis fotovoltaicos no país, nos últimos anos, em virtude de incentivos financeiros oferecidos pelo governo, principalmente federal e estadual, aos consumidores estimulando a adoção deste tipo de geração de energia. O quadro 2 representa alguns destes incentivos:

Quadro 2: Incentivos fiscais e regulatórios para geração de energia solar fotovoltaica no Brasil

INCENTIVOS FISCAIS E REGULATÓRIOS	DESCRIÇÃO
REN. 482/2012 - Resolução Normativa 482 ANEEL	Marco inicial para o uso da energia solar fotovoltaica em geração distribuída. Esta resolução regulamentou o net-metering, um sistema de compensação que permite que a energia produzida por painéis fotovoltaicos em uma unidade consumidora possa ser injetada na rede gerando créditos. Esses créditos podem ser utilizados para abater no consumo de energia da unidade consumidora nos horários em que não estiver produzindo.
REN. 687/215 - Resolução Normativa 687 ANEEL	Resolução com intuito de atualizar a REN. 482/2012. Destaca-se nessa resolução a criação da modalidade do autoconsumo remoto que é caracterizado por unidades consumidoras de energia que tem seus consumos compensados por uma energia gerada em uma outra unidade consumidora. Desde que as unidades consumidoras sejam atendidas pela mesma concessionária de energia e que as contas de luz estejam no nome da mesma pessoa.
CONFAZ - Convênio ICMS 101/97	Esse convênio concede isenção do ICMS nas operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica. O convênio isenta o ICMS dos módulos fotovoltaicos e dos geradores fotovoltaicos (os equipamentos como inversores, cabos, conectores, estruturas e outros, somente possuem isenção se vendidos em conjunto, configurando-se, assim, um gerador fotovoltaico).
CONFAZ - ICMS 16/2015	Esse convênio autoriza a isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Esse convênio corrigiu um desequilíbrio provocado pelo Convênio nº 06/2013, que determinava o consumo bruto de energia como base de cálculo do ICMS. Dessa forma, para os estados adeptos do convênio nº 16, o ICMS passou a ser calculado apenas para a energia consumida, já descontada a energia gerada.

<p style="text-align: center;">PL 8322/2014</p>	<p>O PL 8322/2014 prevê a isenção de IPI (Imposto sobre Produto Industrializado), II (Imposto de Importação), PIS (Contribuição para o Programa de Integração Social), PASEP (Contribuição para o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público) e COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) para uma série de produtos relacionados à produção de energia solar fotovoltaica, entre eles os módulos fotovoltaicos, caso não exista produto nacional similar. Projeto ainda em tramitação no Senado.</p>
---	---

Elaborado pelo autor, 2019. Fonte de dados: [solar.engie.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/](http://solar.engie.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/).

Tais medidas incentivadoras, apresentadas acima, permitiram um avanço significativo no uso dessa matriz energética no Brasil e, sabe-se ainda existem outros projetos em andamento como por exemplo a criação de linhas de financiamento facilitado para investimento nesse mercado.

### 2.1.1. Efeito Fotovoltaico

Em 1839, Edmond Becquerel verificou a presença de uma pequena diferença de potencial quando se mergulhava placas metálicas de prata ou platina em eletrólitos e essas eram expostas à luz, surgia então o efeito fotovoltaico. Alguns anos depois dois inventores americanos W. G. Adams e R.E. Day desenvolveram o primeiro dispositivo sólido capaz de produzir eletricidade quando expostos a luz, tal feito foi possível através das propriedades foto condutoras presentes no selênio. Cientistas da Bell Labs desenvolveram em 1954 a primeira célula solar a base de silício, esta possuía eficiência de 6% (VARELLA; GOMES; JANUZZI, 2009).

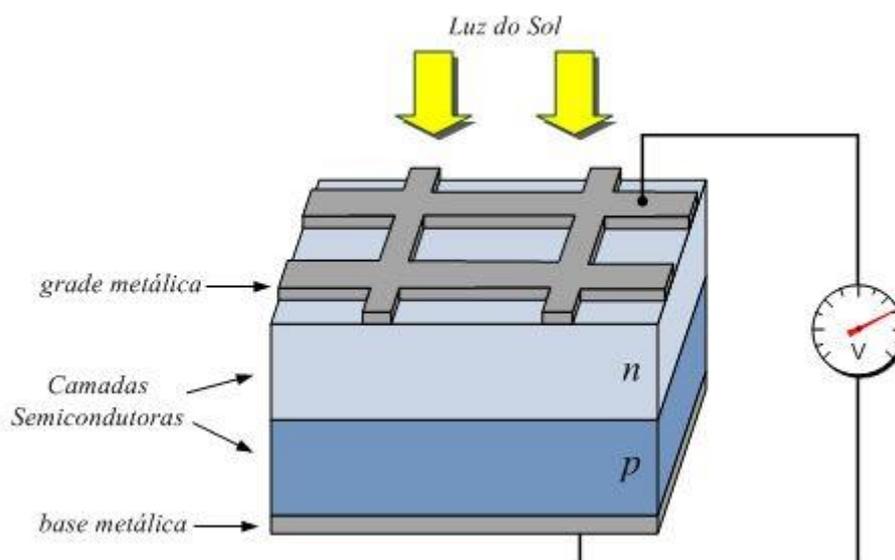
Aproximadamente 92% das placas fotovoltaicas são produzidas a partir do silício encontrado na forma de areia sílica, que a partir de alguns processos é possível obter o silício de forma pura, porém quando nessa forma, o cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, não é um bom condutor elétrico. Torna-se necessário a realização de um processo conhecido como dopagem onde são acrescentadas porcentagens de boro e fósforo (COGEN, 2012).

O efeito fotovoltaico acontece a partir da absorção da energia solar pelos materiais semicondutores. Para que aconteça a condução elétrica é necessário que o retículo cristalino da placa seja “dopado” com átomos impuros de boro e fósforo. A figura 4 mostra

que o ânion de fósforo (tipo N) gera uma região negativa de um lado da célula e o cátion de boro (tipo P) uma região positiva do outro lado da célula, nessas regiões acontece a transferência de elétrons livres gerados pelos fótons luminosos que atingem o material. Quando a superfície é iluminada causa um desequilíbrio nas cargas elétricas permitindo a transferência de elétrons (GREEMPRO, 2004).

Um condutor externo une a camada positiva à negativa, gerando um fluxo de elétrons (corrente elétrica) enquanto houver a incidência de luz solar na célula, esta corrente varia conforme a intensidade de luz incidente. A célula, portanto, não armazena energia, apenas mantém o fluxo de elétrons durante o tempo que se tem a incidência de luz, denominando assim o “efeito fotovoltaico”.

Figura 4: Efeito fotovoltaico



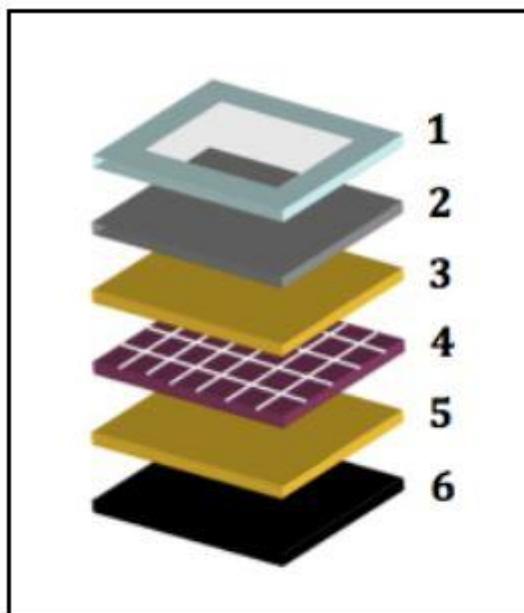
Fonte: <https://www.ufff.br/labsolar/>.

### 2.1.2. Células Fotovoltaica

A célula fica exposta a diferentes e adversas condições ambientais, desta forma se faz necessário adotar algumas condições em sua construção a fim de protegê-la contra esforços mecânicos, umidade entre outros agentes. Assim, adotou-se o uso de uma película de Etileno Acetato de Vinilo (EVA), que é um material flexível, translúcido e que não reflete a radiação solar, além de garantir o isolamento elétrico entre as células onde as células são encapsuladas (CARNEIRO, 2010). A figura 5 esquematiza os

componentes usados na montagem dos módulos fotovoltaicos e o quadro 3, a seguir, mostra quais são esses elementos e sua descrição.

Figura 5: Componentes que forma o módulo fotovoltaico



Fonte: Carneiro (2010).

Quadro 3: Descrição dos componentes que formam o módulo fotovoltaico

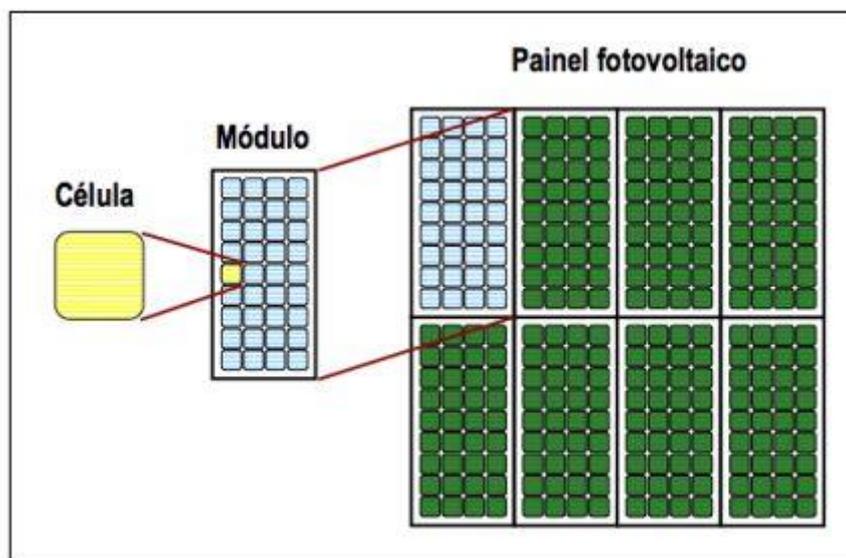
COMPONENTES		DESCRIÇÃO
1	MOLDURA	Moldura em alumínio - fornece rigidez e estabilidade mecânica aos módulos
2	VIDRO	Geralmente adota-se vidro antirreflexo temperado
3 e 5	ENCAPSULAMENTO	Película de EVA - Translúcida, não reflete a luz solar e garante isolamento elétrico entre as células
4	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	Elemento responsável pela conversão de luz solar em energia elétrica
6	ISOLANTE ELÉTRICO	Plástico Tedlar ou outro substrato - protege a parte posterior do módulo evitando entrada de água e gases

Elaborado pelo autor, 2019. Fonte de dados: Carneiro, 2010.

No geral a potência máxima alcançada através da utilização de uma única célula fotovoltaica não excede o valor de 3W, que se faz insuficiente para a maioria das aplicações reais, desta forma as células normalmente são agrupadas onde se formam os

módulos fotovoltaicos e, estes, quando agrupados, formam os painéis. A figura 6 exemplifica essa montagem.

Figura 6: Esquema de célula, módulo e painel.



Fonte: Carneiro (2010).

Existem diferentes tipos de células fotovoltaicas assim como diferentes processos de fabricação de tais. O material semicondutor mais utilizado nessa produção é o silício, a facilidade de encontra-lo na natureza assim como os avanços tecnológicos já alcançados permitem um custo mais baixo em relação aos outros materiais como arseneto de gálio e fosfeto de índio. Esses outros materiais apresentam melhor eficiência porém o custo é muito elevado, normalmente são utilizados em aplicações espaciais devido sua resistência a radiação (RAMOS, 2006).

Araujo; Ramanauskas; Zanesco; Moehlecke, (2018), constataram que, dos módulos fotovoltaicos fabricados no Brasil e etiquetados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), 74% deles foram produzidos com células solares de silício multicristalino e 26% com células de silício monocristalinos. Serão abordados, a seguir, as principais características e diferenças entre esses dois tipos de célula.

#### 2.1.2.1. Células De Silício Monocristalinos e Multicristalinos

A maioria das células de silício são produzidas com materiais de grau eletrônico os mesmos adotados na indústria microeletrônica. Os monocristalinos apresentam uma estrutura homogênea, em seu processo de fabricação é necessário que o silício tenha

um grau de pureza de 99,9999% o que o torna mais caro em relação aos multicristalinos (EPE, 2012). Esse tipo de célula é obtido a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. Essas barras são cortadas pastilhas finas (0,4-0,5 mm de espessura). A sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade está entre 13% e 19% (NASCIMENTO, 2004; EPE, 2012).

A célula produzida a partir do silício multicristalino é mais barata, tendo em vista que não exige um procedimento tão rigoroso e menor gasto energético, isso explica o fato de ser mais usada que o monocristalino. Essa célula é também produzida a partir do silício eletrônico onde através da fusão do silício puro em moldes especiais são obtidos blocos que serão cortados para a obtenção dos substratos, a eficiência nesse tipo de material é um pouco menor quando comparada ao monocristalino (RAMOS, 2006).

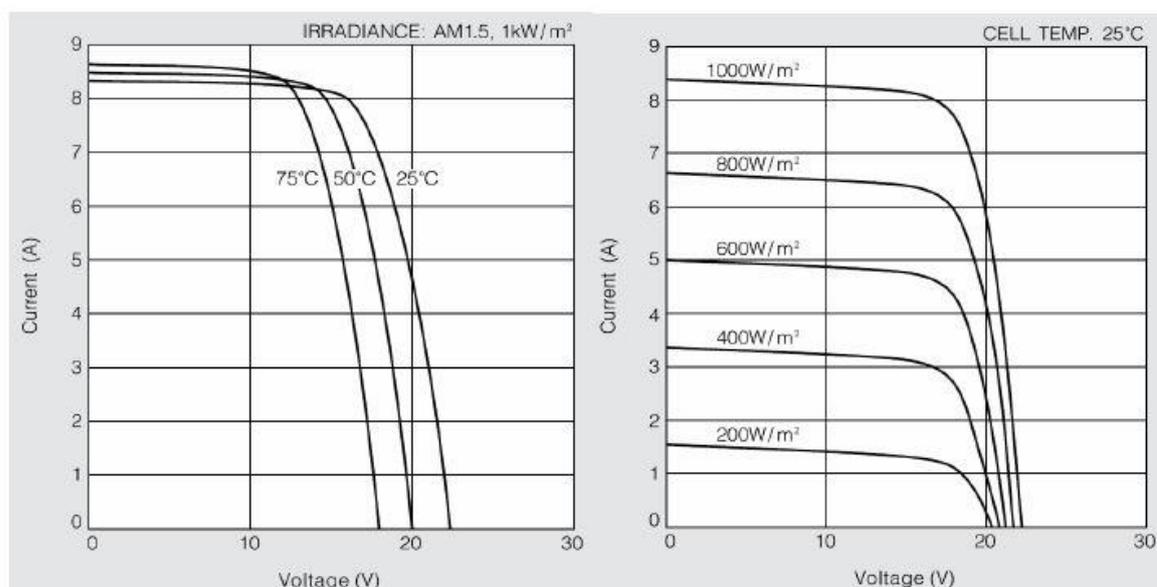
### **2.1.3. Eficiência em Painéis Fotovoltaicos**

Em todo momento busca-se o desenvolvimento de tecnologias e medidas que propiciem a melhora na eficiência energética de toda a matriz geradora, com base nas medidas que tem sido tomada atualmente espera-se que em 2027 seja possível economizar, em função da melhora na eficiência energética, o equivalente a 8% da energia consumida em 2017 (EPE, 2018).

Considerando condições de referência, Standart Test Conditions (STC), a eficiência da célula ou do painel fotovoltaico pode ser definida a partir da relação entre a potência máxima de saída da célula pela área da célula (EPE, 2012). A eficiência nos painéis fotovoltaicos pode ser afetada principalmente por dois fatores, intensidade da irradiação solar incidente sobre a célula e a temperatura ambiente de operação (EPE,2012). Para auxiliar no posicionamento correto e melhor aproveitamento da irradiação solar, alguns estados disponibilizam o atlas Solarimétrico que se tornam peça chave para conhecer o recurso solar disponível.

A melhora na eficiência energética dos painéis fotovoltaicos, através da redução de temperatura, é o principal objeto de estudo desta pesquisa, em que se deseja adaptar trocadores de calor nos painéis fotovoltaicos capazes de diminuir a temperatura de operação e com isso melhorar a eficiência. A figura 7 permite compreender a importância da redução da temperatura nesse processo de geração de energia.

Figura 7: Influencia da temperatura sobre a corrente e tensão nos painéis fotovoltaicos



Fonte: COGEN, 2012.

É possível observar na figura 7 uma considerável diminuição da tensão no interior da célula com o aumento da temperatura dos módulos, enquanto a corrente, praticamente, não se altera. Normalmente os fabricantes determinam a temperatura de 25°C como a temperatura ótima de funcionamento. Em relação a energia gerada nessas condições ótimas, tem-se que em países como o Brasil, em que as células alcançam facilmente temperaturas na casa dos 70°C, há a possibilidade da redução de pelo menos 20% na potência gerada.

## 2.2. Trocadores de Calor

Os trocadores de calor permitem a troca de calor entre dois fluidos ou superfícies, geralmente essa troca por condução térmica através da parede que separa os fluidos ou superfícies e também por convecção e ou radiação. A quantidade de calor trocada depende diretamente da magnitude da diferença de temperatura no local (Çengel, 2012).

A relação entre a quantidade de calor trocada durante uma faixa de tempo é chamada de taxa de transferência de calor. Quanto maior essa taxa maior a capacidade de troca de calor. Existem duas formas de aumentar a taxa de transferência de calor: aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção ou aumentar a área da superfície (Çengel, 2012).

Para aumentar o coeficiente de transferência de calor pode ser necessário a instalação de uma bomba ou um ventilador. Essa opção torna-se menos interessante no âmbito desta pesquisa visto que a ideia principal é melhorar a eficiência de um sistema gerador de energia, dispensando, portanto, a aplicação de componentes que consumam energia para seu funcionamento. Desta forma torna-se necessário buscar soluções que permitam aumentar a área da superfície. Esse aumento pode ser obtido anexando superfícies estendidas ao equipamento, as aletas.

A inserção de superfícies estendidas ou placas metálicas espaçadas é uma das maneiras mais comuns de diminuir o aumento excessivo de temperatura em determinado equipamento, tais placas, comumente chamadas de aleta permitem a dissipação do calor para o ar estagnado, oferecendo uma solução prática e de baixo custo para superaquecimento de diversos aparelhos.



Considerando a utilização de trocador de calor formado por aletas metálicas espaçadas paralelamente, deve-se atentar aos materiais que podem ser empregados em sua fabricação. Alguns materiais apresentam melhor condutividade térmica, embora esses valores variem um pouco com a temperatura, em muitos problemas de engenharia essa variação é suficientemente pequena e, portanto, desprezada.

### 2.3. CAD e Modelagem Paramétrica

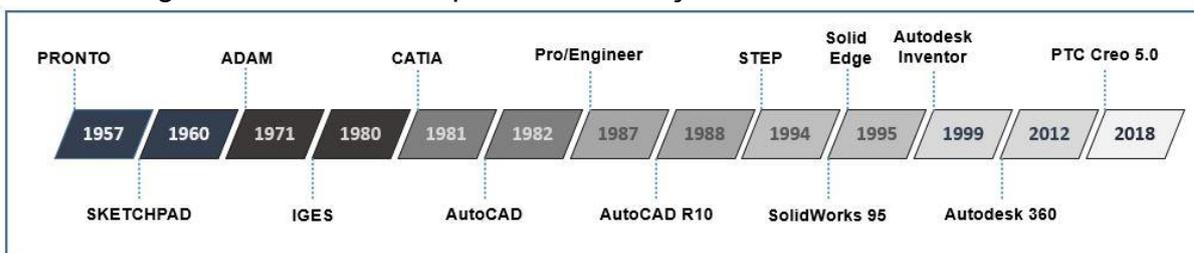
A utilização do computador no desenvolvimento de produtos para realização de desenhos e modelagens foi um marco muito importante na história da engenharia e arquitetura. Pode-se dizer que o CAD (*Computer Aided Design*) foi uma revolução para essas áreas de projeto. A partir da segunda metade do século XX, verificou-se a prática de uma nova forma de trabalho com a linguagem gráfica. O desenho digital torna-se uma ferramenta predominante na representação de projetos (Borges, 2015).

Com o surgimento dessa ferramenta tornou-se possível para o projetista criar, analisar, modificar, otimizar e gerar documentação técnica substituindo o desenho feito a mão por modelos em duas ou três dimensões (2D ou 3D). É válido destacar a importância do projetista, mesmo com todo desenvolvimento da tecnologia, a atividade de projetar continua sendo executada exclusivamente por seres humanos.

Existem várias ferramentas e programas computacionais de suporte, contudo não há máquina capaz de realizar a atividade de projetar por si só. Romeiro (2010) afirma que projetar não é uma atividade em que se pode ensinar ou explicar, como por exemplo nas disciplinas descritivas, pois projetar envolve uma grande quantidade de conhecimentos que só são adquiridos com a prática.

A trajetória das ferramentas de CAD iniciou-se em 1957 quando o cientista da computação Patrick Hanratty desenvolveu o primeiro sistema comercial de controle numérico computadorizado (CNC), o qual deu o nome de PRONTO. Desde então os investimentos e pesquisas voltados para essa área cresceram vertiginosamente, a figura 8, a seguir, mostra a linha do tempo com os principais *softwares* de CAD desde 1957.

Figura 8: Linha do tempo com a evolução das ferramentas de CAD



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de <https://www.proconcept.com.br>

Em 1960 o SKETCHPAD foi o primeiro programa que permitiu ao usuário usar uma interface gráfica total, o projetista escrevia com uma caneta de luz em uma exibição dos eixos XY. Em 1971, também escrito por Patrick Hanratty o ADAM foi projetado para trabalhar virtualmente em todas as máquinas, ele passou a ser atualizado para ser utilizado em computadores de 16 e 32 bits, 80% dos programas de CAD usados hoje podem ser rastreados até as raízes do ADAM.

Com o lançamento do IGES em 1980 tornou-se possível transferir projetos 3D entre outros programas de CAD, ele não é mais atualizado porém continua aceito na grande maioria dos softwares. Um dos mais importantes *softwares* de CAD surgiu em 1980, criado pela *Dassault Systemes*, o CATIA que foi usado por várias empresas montadoras do ramo automotivo e aéreo, é um programa que continua em uso nos dias atuais, porém perdeu um pouco de espaço para outros que surgiram com uma interface mais dinâmica e fácil.

O AutoCAD, em 1982, marcou a história por tornar possível a utilização do programa em computadores menores, inicialmente tratava-se de um software de CAD 2D, criado pela *Autodesk*, após inúmeras atualizações continua sendo muito utilizado nos tempos atuais principalmente por profissionais ligados a construção civil. *Pro/Engineer* foi o primeiro programa paramétrico em grande escala, trouxe diversas inovações e hoje deu lugar ao PTC Creo que será detalhado mais adiante. Em 1988, em uma nova versão que ficou conhecida como AutoCAD R10 a *Autodesk* tornou o programa mais profissional, implementou um novo sistema de coordenadas e novos recursos de comandos em 3D.

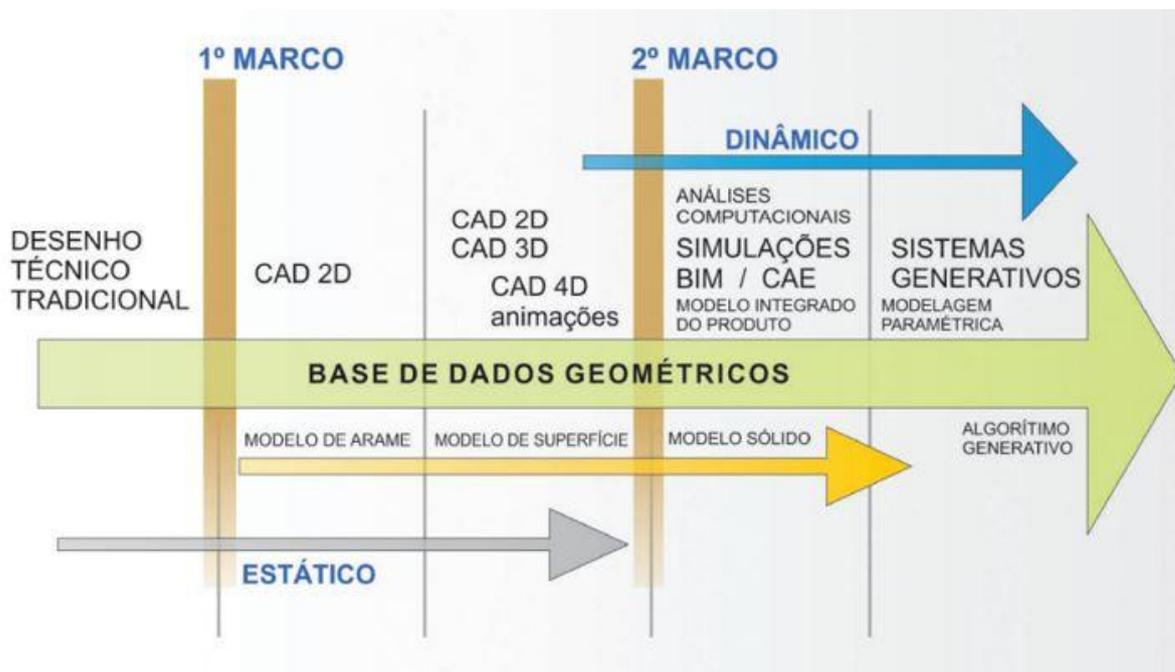
Surge em 1994 um programa que mais tarde se tornaria o padrão internacional de transferência de modelos em 3D. O STEP assumiu o IGES que já não vinha sendo atualizado e trouxe um novo formato para transferir modelos 3D de um programa para outro, possibilitando assim a interoperabilidade entre programas de CAD. No ano

seguinte, houve o lançamento de dois importantes *softwares* de CAD o primeiro deles *SolidWorks* criado pela *Dassault Systemes* teve sucesso por sua interface dinâmica e de fácil uso o que permitiu que os engenheiros tirassem mais proveito da tecnologia de CAD 3D. O segundo foi desenvolvido pela *Siemens*, o *Solid Edge* que era um *software* de gerenciamento do ciclo de vida do produto e permitia a modelagem sólida do produto, modelagem de montagem e visão ortográfica 2D.

A *Autodesk* lançou em 1999 o *Inventor*, na tentativa de ser mais simples e intuitivo e que permitisse a realização de montagens mais complexas em tempo recorde, o programa continua em uso após diversas atualizações. Também projetado pela *Autodesk*, em 2012 surgiu o A360 que é uma ferramenta de colaboração que ajuda na visualização, compartilhamento e revisão tanto em projetos 2D quanto em 3D. No que se tem de mais moderno hoje está a associação dos programas CAD às ferramentas de realidade aumentada (AR), resultando assim, em 2018, com o surgimento do PTC Creo 5.0 que substituiu o *Pro/Engineer* e permitiu a utilização dessas ferramentas além de recursos de manufatura aditiva e definição baseada em modelo.

Com tudo, essa evolução das ferramentas de digitais pode ser sintetizada em dois grandes marcos na história, figura 9. Borges (2015), divide o primeiro marco como uma transição dos meios tradicionais de projeto para o ambiente digital, transições essas que modificaram toda a estrutura da gestão do processo de projeto e que hoje estão solidamente estabelecidas na prática de projetar.

Figura 9: Evolução dos sistemas de CAD



Fonte: Borges (2015)

Segundo Borges (2015), o segundo marco pode ser caracterizado pela maior interação do projetista e das ferramentas de auxílio de projeto, tornando mais dinâmica a forma de projetar. Sendo possível analisar previamente o comportamento do produto, e de forma mais simples e rápida gerar mais alternativas de produto a partir de uma base geométrica parametrizada.

Após essa breve apresentação do histórico das ferramentas de CAD vale destacar uma característica de projeto comum em alguns desses *softwares* e que permitem aos projetistas o detalhamento e alteração do produto de forma mais rápida e simplificada, a modelagem paramétrica.

Na modelagem paramétrica o modelo é definido por meio de variáveis que são chamadas de parâmetros. A partir desses parâmetros é possível definir regras e relações entre dimensões, pontos, superfícies, entre outros e essas relações são sempre mantidas. No *SolidWorks*, por exemplo, as dimensões direcionam a geometria do modelo, quando se altera por exemplo uma dimensão que está vinculada a outras, todas as demais são alteradas automaticamente, preservando a relação entre todos os elementos e modificando o formato do modelo.

Para o desenvolvimento do produto desta pesquisa será adotado como padrão o *SolidWorks* por ser um *software* de CAD voltado para projetos mecânicos, permitindo a realização de simulações de montagem e uso do produto, o que permite ao projetista detectar possíveis falhas no projeto que sem esses recursos possivelmente só seriam percebidas no protótipo físico.

### **3. Materiais e Métodos**

Esse capítulo apresenta o que será realizado na pesquisa e como acontecerá, de fato. Partindo da premissa da metodologia adotada, do *Design Science Research*, onde sua abordagem é descrita a seguir, na condução desta pesquisa.

#### **3.1. A *Design Science Research* (DSR) como condução da pesquisa**

A utilização da DSR se justificada pela necessidade de estruturação da pesquisa de forma rigorosa para projetar, avaliar e resolver um problema que foi proposto. Projetando, portanto, um artefato e contribuindo para a geração do conhecimento na área aplicada.

Baseado na metodologia escolhida a pesquisa fundamentada será estruturada em cinco etapas, chamadas de conscientização do problema; sugestão; desenvolvimento; avaliação e conclusão.

##### **3.1.1. Etapa de conscientização**

Primeiramente foi identificado o problema da pesquisa através de uma revisão bibliográfica com o intuito de entender sobre a geração de energia fotovoltaica, eficiência energética e as características presentes nesse processo de geração de energia. Notou-se nessa revisão o constante crescimento de pesquisas envolvendo a geração de energia fotovoltaica, principalmente no que se trata de melhor aproveitamento dessa fonte e de redução de custos dos equipamentos usados.

Através da identificação dos principais fatores que influenciam na eficiência dos painéis fotovoltaicos, tornou-se possível identificar possíveis pontos de melhora dos equipamentos. Assim, a pesquisa caminha em busca da proposição de um modelo de trocador de calor que possa ser facilmente adaptado aos painéis fotovoltaicos permitindo

a redução de temperatura de operação do painel e possibilitando a melhora de sua eficiência.

### **3.1.2. Etapa de sugestão**

Concluída a etapa de conscientização onde foi identificada a possibilidade de melhorar a eficiência energética dos painéis fotovoltaicos através da adaptação de um trocador de calor, dá-se início a etapa de sugestão, onde são abordados os requisitos mínimos necessários para a construção do artefato, assim como algumas características que devem ser levadas em consideração.

Como pontos chaves para o desenvolvimento da pesquisa deve-se considerar a necessidade de projetar um produto que apresente um baixo custo, utilize de materiais que sejam facilmente encontrados no mercado e que sua instalação seja simples, aumentando com isso a chance de utilização do produto posteriormente.

### **3.1.3. Etapa de desenvolvimento**

Nesta etapa ocorre a construção do artefato primeiramente em um ambiente interno. Tomando como base os conceitos chave definidos na etapa anterior juntamente dos conhecimentos obtidos através da pesquisa de fundamentação teórica realizada é possível dar início ao desenvolvimento de algumas possíveis soluções para o problema abordado na etapa de conscientização.

Através da utilização de ferramentas de auxílio de projeto como *software* de CAD, por exemplo, torna-se possível a construção do artefato, propriamente dito, em estado funcional que, posteriormente, poderá e deverá ser submetido à simulações para garantir uma melhor avaliação e correção de possíveis erros.

### **3.1.4. Etapa de avaliação**

A etapa de avaliação tem o objetivo de analisar criticamente o artefato produzido na etapa anterior, na expectativa de que esse possa atender satisfatoriamente as necessidades colocadas inicialmente.

Pretende-se avaliar o artefato no ambiente interno através de simulações das condições de aplicação realizadas no ambiente virtual com o auxílio de ferramentas de CAD. Essas simulações tornam-se importantes ferramentas no processo de projeto,

permitindo antecipar e visualizar possíveis erros e conflitos que provavelmente só seriam identificados posteriormente na fase de construção do produto.

### **3.1.5. Etapa de conclusão**

Com base nas avaliações realizadas na etapa anterior, pretende-se propor um novo modelo de perfil de alumínio baseado nas simulações dos modelos já existentes e que apresente melhor eficiência na dissipação de calor.

Essa pesquisa se limitará pela realização de testes em ambientes virtuais, porém para trabalhos futuros o modelo de perfil resultante como produto dessa dissertação deverá ser testado através de um protótipo físico, para que seja possível comparar os resultados obtidos nesse teste com aqueles vindos da simulação em ambiente virtual.

## **4. DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO**

Nesse capítulo acontecerá o desenvolvimento do projeto, desde as demandas iniciais até a fase de construção e teste do protótipo para avaliação. É o momento em que as metodologias de desenvolvimento de produto e da DSR se cruzam permitindo a melhor estruturação do projeto.

Algumas ideias inicialmente tomadas vão se transformando em especificações detalhadas do produto e com isso, o nível de incerteza do produto diminui à medida em que o projeto avança, caminhando de forma que, em seu escopo sejam colocadas soluções que atendam às necessidades pré-estabelecidas.

### **4.1. Primeira Etapa – Conscientização**

Com essa etapa que também poderia ser chamada de demanda inicial busca-se entender as lacunas presentes no tema estudado, e definir o que será feito a partir de então para oferecer soluções para o problema apresentado.

Através da revisão bibliográfica mostrou-se como a preocupação em relação a geração de energia por fontes alternativas e limpas tem crescido. Com o foco voltado para a geração fotovoltaica foi percebido a necessidade de encontrar soluções que contribuam para a melhoria da eficiência energética das placas disponíveis no mercado e daquelas que já foram instaladas e estão em uso.

Como observado, o aumento da temperatura nas placas fotovoltaicas influi diretamente na capacidade de geração de energia das mesmas. Quanto maior a temperatura menor a quantidade de energia gerada, desta forma busca-se por uma solução que permita diminuir de forma passiva as temperaturas das placas, ou seja, sem a necessidade de empregar energia elétrica nesse processo o que tornaria inviável visto que o objetivo é melhorar a eficiência das mesmas.

Para que o calor seja dissipado e com isso diminua a temperatura das placas, pretende-se instalar perfis metálicos na parte inferior da placa, esses perfis tem o objetivo de aumentar a área de contato da placa com o ambiente permitindo maior troca de calor entre eles. Serão considerados três modelos de perfis diferentes com o intuito e comparar qual modelo apresenta melhor eficiência na dissipação do calor.

Pretende-se com isso mostrar a validade desse tipo de dissipador de calor para tal aplicação, nesse momento não serão calculadas as aletas ótimas que apresentam a maior eficiência, visto que, a partir do momento que perfis metálicos encontrados facilmente no mercado satisfaça essa condição, o mesmo poderá ser considerado para as aletas ótimas.

Quadro 4: Demanda inicial, problema e solução proposta

<b>DEMANDA INICIAL</b>	<b>PROBLEMA</b>	<b>SOLUÇÃO PROPOSTA</b>
Melhorar a eficiência de painéis fotovoltaicos	Quanto maior a temperatura dos painéis, menor a eficiência	Dissipador passivo de calor

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2. Segunda Etapa – Sugestão

Após compreender sobre a necessidade de melhorar a eficiência dos painéis fotovoltaicos e a possibilidade de ser feito através do dissipador de calor, deve-se levantar alguns aspectos que precisam ser levados em consideração no desenvolvimento do produto.

Alguns desses pontos serão requisitos mínimos para a construção do protótipo, enquanto outros poderão ser restritivos, esses pontos foram elencados pelo autor com base nos conhecimentos adquiridos com a fundamentação teórica e serão listados a seguir:

- **Materiais disponíveis:** para viabilização da pesquisa e realização de montagem e teste de protótipo, é importante que o material escolhido seja facilmente encontrado no mercado.
- **Baixo custo:** visto que a utilização de painéis fotovoltaicos para a geração de energia por muito tempo foi considerada cara, e que nos últimos anos algumas medidas

tanto de incentivo do governo, quanto de interesse das empresas fabricantes e distribuidoras permitiram a redução do custo desses equipamentos. É imprescindível que esse produto pensado para melhoria da eficiência energética dos painéis também apresente baixo custo, para assim viabilizar sua utilização.

- Vida útil: já que os fabricantes estipulam em média a vida útil dos painéis em 25 anos, é importante que o material escolhido para o trocador apresente também uma igual ou superior a 25 anos.

- Resistência: é importante levar em consideração a resistência do material às condições de uso que são submetidos, visto que o dissipador será usado em áreas externas sujeitas a sol, chuva, calor, poeira, entre outros.

- Capacidade do material de trocar calor: o material escolhido precisa apresentar boas condições de condução térmica, permitindo que o calor da placa seja dissipado para o ambiente mais facilmente.

- Sistema passivo: para que aconteça o aumento da eficiência energética dos painéis é importante que o sistema projetado para dissipar o calor seja capaz de realizar sua função sem a necessidade de se empregar energia para tal.

- Compatibilidade: existem diversos fabricantes no setor de painéis, por isso, visando maior utilização é importante que seja compatível com diversos modelos, ou que tenha uma adaptabilidade boa.

- Facilidade de instalação: quanto mais fácil a instalação, maior a chance de utilização do produto, visto que uma de suas aplicações é a melhoria da eficiência em painéis já instalados.

- Manutenção: como na maioria das vezes os painéis são montados sobre telhados o acesso torna-se mais difícil para a realização de intervenções e manutenções. Sendo assim a simplificação do modelo e o menor número de componentes contribuem diretamente para minimizar a necessidade de manutenção.

- Sustentabilidade: um dos mais importantes requisitos para o produto é a sustentabilidade, a energia fotovoltaica é vista como uma fonte limpa de geração de energia e é preciso que o dissipador seja projetado no intuito de causar o menor impacto em sua fabricação, instalação e descarte.

- Design estético: a forma com que o dissipador será montado na parte inferior do painel, dispensa uma maior preocupação estética, pois, geralmente essa parte fica fora do campo de visão.
- Peso: pensando no aproveitamento de estruturas prontas em que os painéis já estejam montados e em funcionamento, é importante a consideração do peso do dissipador, de forma que esse possa ser instalado sem a necessidade de modificações nas estruturas pré-existentes.

Todas estas informações e requisitos apontados acima, ainda precisam ser avaliados quanto à sua importância, desta forma, no quadro 5 esses pontos foram organizados e atribuiu-se a eles uma nota, obedecendo a escala de 1 a 5, onde cinco representa o valor de maior importância para o projeto. Essa ferramenta de avaliação é baseada em ferramentas de desdobramento da qualidade (QFD). Essa classificação é importante para a definição de parâmetros de projeto que serão muito úteis como embasamento para tomadas de decisão e escolhas que serão feitas mais à frente.

Quadro 5: Requisitos do projeto e classificação quanto a importância

<b>REQUISITOS DO PROJETO</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
Materiais disponíveis	4
Baixo Custo	4
Vida Útil	5
Resistência	5
Capacidade do material de trocar calor	5
Sistema Passivo	5
Compatibilidade	1
Facilidade de instalação	3
Manutenção	3
Sustentabilidade	5
Peso	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns requisitos foram classificados com a nota 5, pois foram considerados indispensáveis na elaboração do dissipador, são eles: vida útil, resistência, capacidade do material de trocar calor, sistema passivo e sustentabilidade, como pode-se observar no quadro 5, acima. Tomando como base a sustentabilidade, tratando como um processo de geração de energia alternativo é importante que seus aspectos sejam levados em consideração desde a concepção do projeto até mesmo ao descarte do dissipador.

Resistência e vida útil estão diretamente interligados, considerando a vida útil da placa e sendo o dissipador um produto que de certa forma aumentaria o custo inicial do sistema de geração de energia fotovoltaica é imprescindível que ele ofereça uma vida útil igual ou superior a considerada para os painéis e que suporte as diferentes condições de clima, temperatura, umidade e corrosões a que estará submetido.

Um dos requisitos mais importantes é a capacidade do material de trocar calor já que o objetivo do projeto é justamente diminuir a temperatura do painel fotovoltaico. Esse coeficiente deve ser levado em consideração na determinação do material para as aletas. Além disso o processo de resfriamento da placa deve ser realizado sem que seja necessário empregar energia pra isso, garantindo assim a eficiência energética.

A nota 4 foi atribuída àqueles requisitos que são importantes, mas que não serão os maiores determinantes no projeto, são eles: materiais disponíveis, baixo custo e peso. No que se diz respeito aos materiais, por mais que a disponibilidade e o custo sejam importantes, como mostrado anteriormente a capacidade do material em trocar calor, vida útil e a resistência do material escolhido são mais importantes, com isso, talvez seja preciso escolher por um material que não seja o de menor custo, mas que atenda da melhor forma os demais requisitos.

Ao peso do dissipador também foi atribuída a nota 4, pois pretende-se adaptar o produto em painéis que já estão montados e encontram-se em funcionamento. As estruturas de suporte não foram dimensionadas inicialmente para receber o dissipador, dessa forma esse requisito torna-se importante na escolha do material a ser empregado nas aletas, porém respeitando sempre os fatores classificados como mais importantes.

A nota intermediária, 3, foi atribuída pela facilidade de instalação e a manutenção. Por se tratar de um sistema simples de dissipação de calor através de aletas e de forma passiva o sistema conta apenas com os perfis metálicos que formam o dissipador, com isso reduz o número de componentes e, conseqüentemente, diminui a manutenção, tornando mais fácil a instalação.

Considerado com menor importância está a compatibilidade. A compatibilidade é importante, porém nesse primeiro momento o que se pretende é mostrar que a utilização de um dissipador de calor no painel favorece a diminuição de temperatura promovendo uma melhor eficiência energética do mesmo. Feito isto, pode-se pensar em maneiras de tornar o dissipador compatível com diferentes modelos de painéis. Após a consideração

e avaliação de todos esses requisitos é possível avançar no projeto passando, portanto, para a etapa de desenvolvimento.

### **4.3. Terceira Etapa – Desenvolvimento**

Nesta etapa serão definidos mais alguns parâmetros que juntamente com os conhecimentos obtidos na revisão bibliográfica e os requisitos definidos com sua importância na etapa anterior permitirão a elaboração de modelos que servirão como solução para a demanda inicial. A linguagem verbal do projeto constituída até então, será transformada em linguagem geométrica, onde será montada a arquitetura do projeto, essa fase também pode ser chamada de projeto conceitual. Também é nesse momento que será realizado o detalhamento do projeto com a descrição do produto, dimensionamento dos componentes e a realização de prototipagem virtual com auxílio do *SolidWorks*.

#### **4.3.1. Determinação do modelo de painel do estudo**

Para realização dos testes e dimensionamento do dissipador de calor será considerado para projeto as características do painel de silício policristalino modelo SX 120 U da empresa BP Solar. Tal modelo foi escolhido por se encontrar disponível para realização dos testes de protótipo no LABSOLAR (Laboratório Solar Fotovoltaico da Universidade Federal de Juiz de Fora). Destaca-se, que o dissipador de calor foi projetado em conformidade com as características do modelo SX 120 U de silício policristalino da empresa BP Solar, tais características estão definidas no quadro 6. A escolha foi pautada na facilidade de obtenção de informações, uma vez que, esse modelo está presente na usina fotovoltaica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Figura 10: Painéis SX 120 U – LABSOLAR/UFJF



Fonte: <https://www.ufjf.br/labsolar/>.

A potência máxima de 120 W é dada pelo fabricante para aplicação do painel em condições ideais de temperatura e radiação solar, são essas 25 °C e 1 kW/m<sup>2</sup> respectivamente.

Quadro 6: Características do painel BP Solar SX 120 U

FABRICANTE	MODELO	DIMENSÕES	POTÊNCIA MAX.
BP Solar	SX 120 U	1461 mm x 731 mm x 50 mm	120 W

Elaborado pelo autor. Fonte: <https://www.ufjf.br/labsolar/>.

#### 4.3.2. Determinação do material

Torna-se necessário primeiro a determinação de qual material será utilizado na construção das aletas, tomando como base a tabela da etapa de sugestão. O primeiro ponto a ser comparado é a condutividade térmica dos materiais, existem alguns materiais como diamante, ouro e prata que apresentam alta taxa de condutividade térmica, porém devido ao custo altíssimo desses materiais sua utilização foi descartada.

Por atenderem satisfatoriamente os requisitos levantados na etapa de sugestão, foram escolhidos para comparação o alumínio e o aço, o quadro a seguir mostra as características desses materiais quanto a condutividade térmica.

Quadro 7: Condutividade térmica

<b>CONDUTIVIDADE TÉRMICA</b>	
<b>MATERIAL</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m K)*</b>
ALUMÍNIO	205
AÇO	50,2

Elaborado pelo autor. Fonte: Young, Hugh D., University Physics, 7th Ed. Table 15-5

Além da condutividade térmica apresentada acima existem outros pontos característicos desses materiais que precisam ser comparados, para isso o quadro a seguir classifica como: bom, regular ou ruim cada um desses aspectos.

Quadro 8: Comparação Alumínio x Aço

COMPARAÇÃO PERFIS ALUMÍNIO x AÇO		
	PERFIL EM ALUMÍNIO	PERFIL EM AÇO
RESISTÊNCIA MECÂNICA		
RESISTÊNCIA A OXIDAÇÃO SEM TRATAMENTO		
PESO		
FACILIDADE NA MONTAGEM E MANUTENÇÃO		
DURABILIDADE E ACABAMENTO		
FACILIDADE NO APROVEITAMENTO (SUSTENTABILIDADE)		
CUSTO		

 BOM     
  REGULAR     
  RUIM

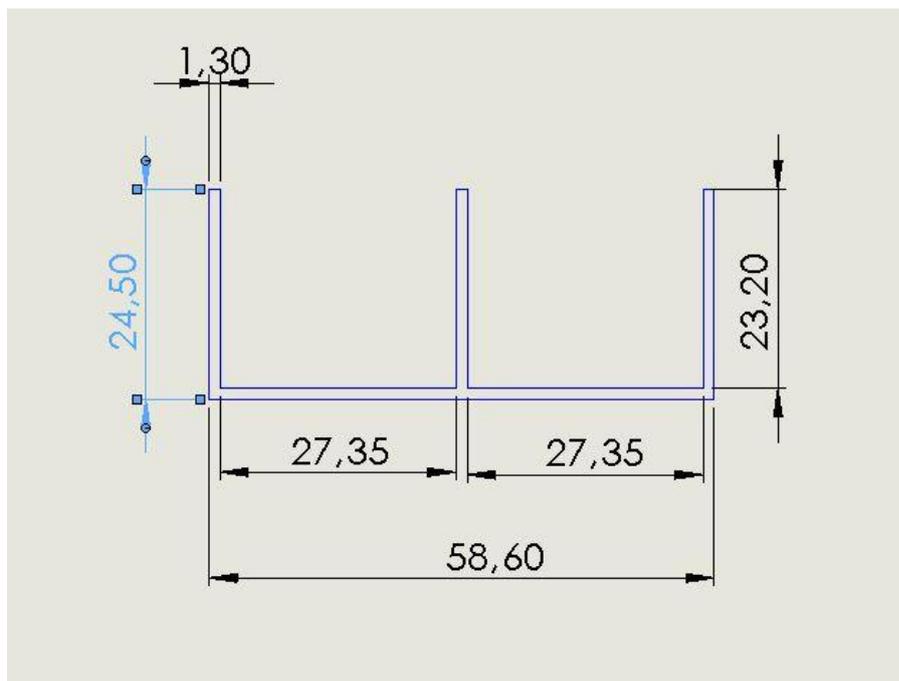
Elaborado pelo autor. Adaptado de Siembra Automação

Com base nas informações mostradas nas duas tabelas acima, foi possível escolher pela utilização do alumínio por esse material atender satisfatoriamente todos os requisitos definidos na etapa de sugestão. Apresentando melhores condições para transferir calor, boa resistência mecânica, vida útil maior que a dos painéis, resistência a oxidação, peso entre outros. Apenas o custo do aço mostrou ser menor que o do alumínio, porém se levar em consideração a necessidade de tratamentos da superfície do aço para sua utilização essa diferença do custo entre eles torna-se pequena.

### 4.3.3. Determinação dos perfis

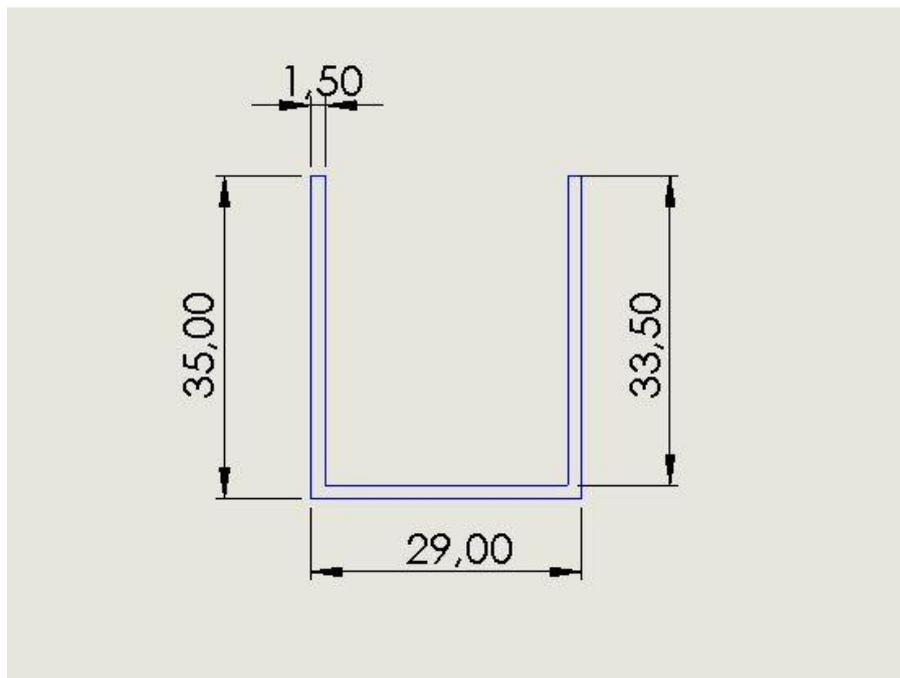
Em levantamento feito em lojas especializadas de perfis metálicos, foi possível perceber pelo autor, a existência de três perfis diferentes de alumínio para realização de prototipagem virtual e simulações, buscando definir o perfil, dentre estes, que apresenta melhor eficiência. Tais perfis estão detalhados nas figuras 10,11 e 12.

Figura 11: Perfil 1 de alumínio



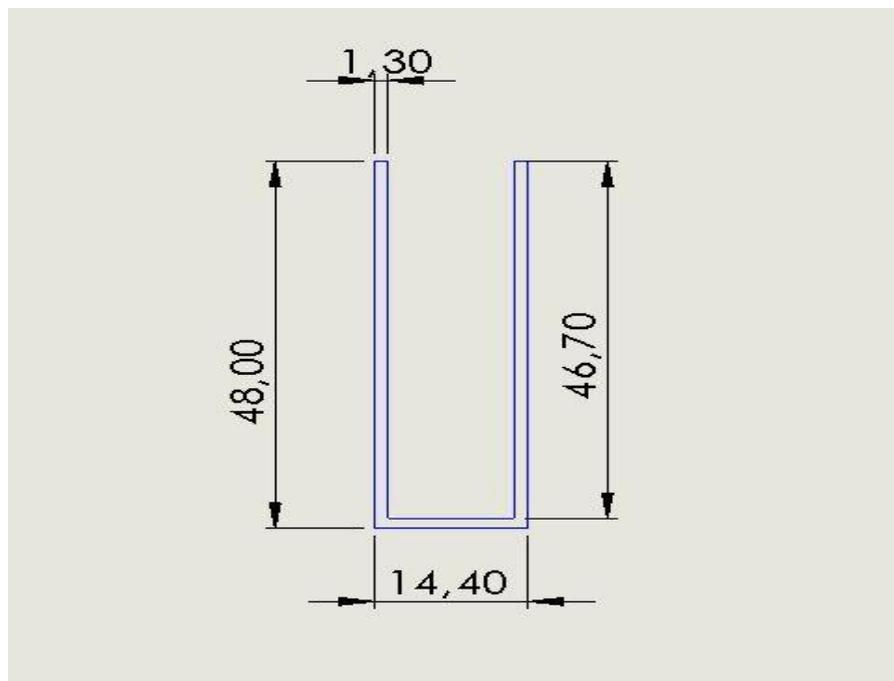
Fonte: Elaborado pelo autor. Perfil disponível no mercado.

Figura 12: Perfil 2 de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor. Perfil disponível no mercado.

Figura 13: Perfil 3 de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor. Perfil disponível no mercado.

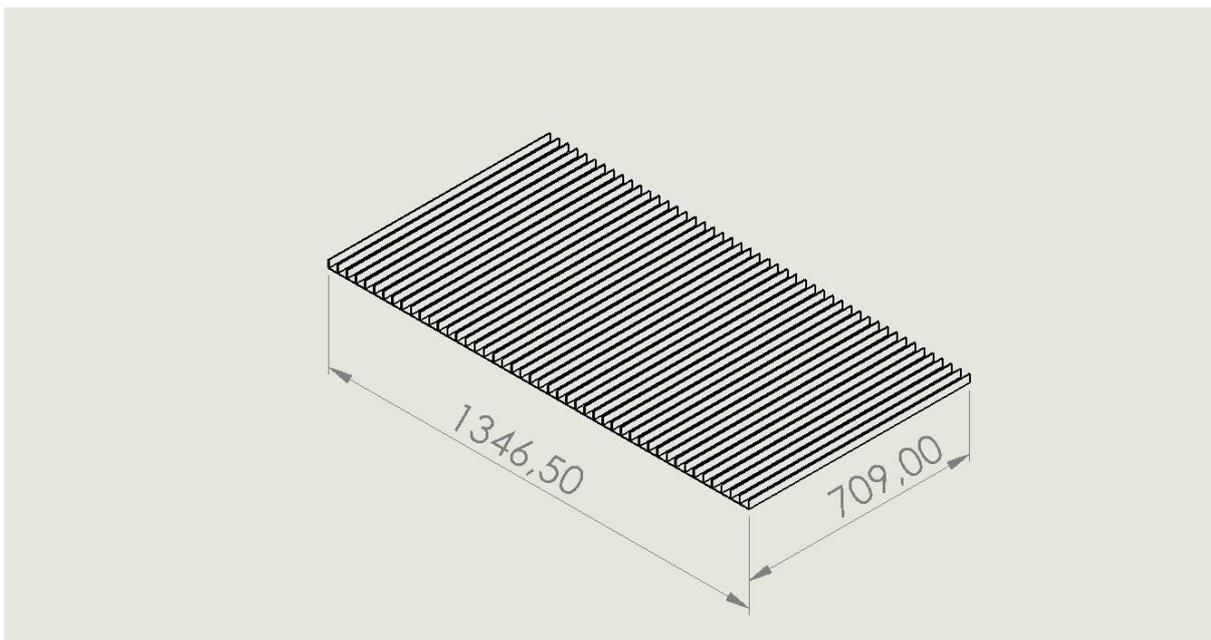
#### 4.3.4. Modelagem do dissipador e painel fotovoltaico

Como colocado anteriormente o SolidWorks foi o software escolhido para o desenvolvimento da pesquisa em ambiente virtual por se tratar de um programa que permite o desenvolvimento e testes de conjuntos mecânicos sendo muito utilizado para estudo de simulações térmicas e por apresentar uma interface interativa e de fácil utilização.

A partir da escolha dos perfis dá-se início a etapa de modelagem do painel e dos dissipadores no SolidWorks. Cada perfil foi modelado separadamente respeitando suas características individuais, foi determinado a utilização da liga de alumínio 6061, visto que essa liga é comumente empregada na fabricação de esquadrias e perfis metálicos na construção civil.

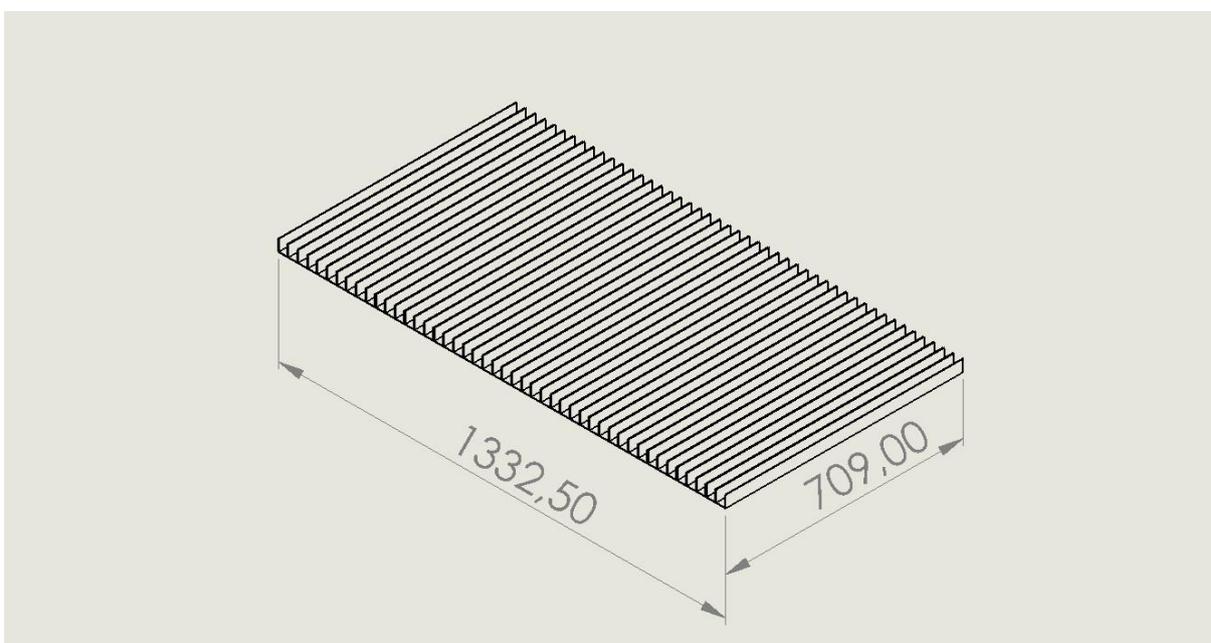
Foram construídos três modelos de dissipadores diferentes a partir dos perfis escolhidos, tais dissipadores foram dimensionados a partir das medidas do painel escolhido para testes nesse primeiro momento, SX 120 U, de forma que pudesse ser encaixado na parte inferior do painel fotovoltaico, dessa forma a superfície dissipadora deveria apresentar largura de 709 mm e comprimento máximo de 1360 mm. As figuras a seguir mostram o dimensionamento dos dissipadores para cada perfil, nota-se que eles apresentam comprimentos diferentes, visto que foi considerado o número máximo de perfis inteiros que poderiam ser colocados juntos sem ultrapassar o comprimento máximo de 1360mm.

Figura 14: Dissipador perfil 1 de alumínio



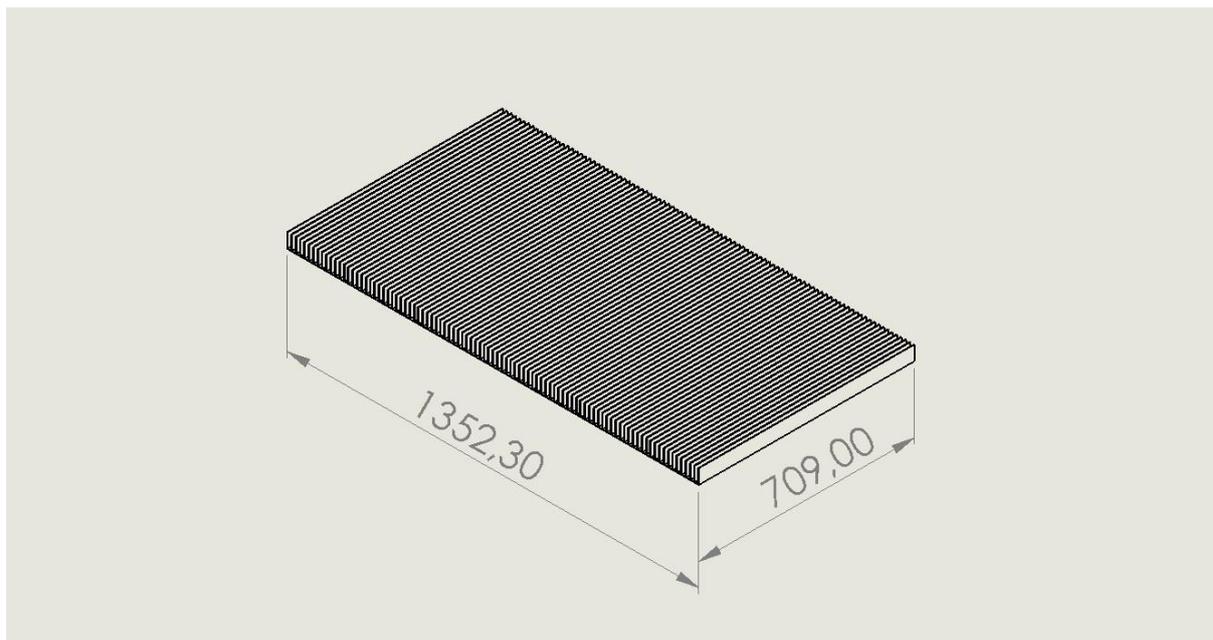
Fonte: Elaborado pelo autor. Perfil disponível no mercado.

Figura 15: Dissipador perfil 2 de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor. Perfil disponível no mercado.

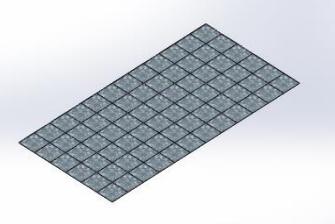
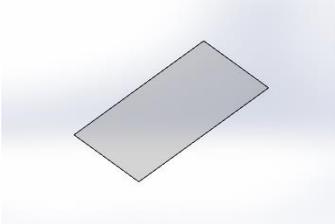
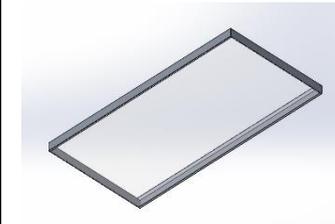
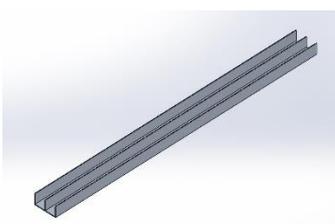
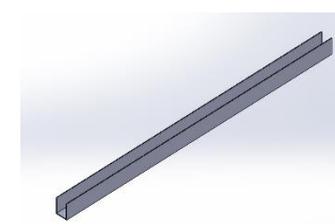
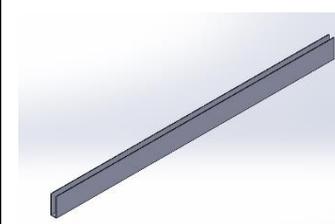
Figura 16: Dissipador perfil 3 de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor. Perfil disponível no mercado.

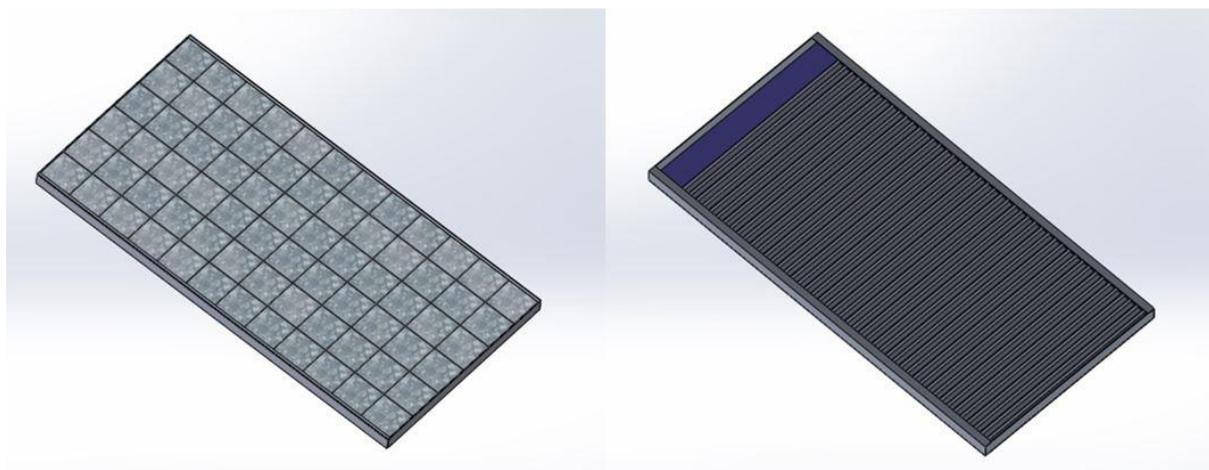
Com os modelos de dissipadores prontos foi realizado a modelagem do painel fotovoltaico, o modelo construído foi composto por três partes: a moldura do painel, o painel formado pelas células e o vidro que cobre o painel, quadro 9. E então foi realizada a montagem do painel completo com o dissipador, conforme mostrado na figura 16.

Quadro 9: Componentes para montagem de painel e dissipador

<b>PAINEL COM CÉLULAS</b>	<b>VIDRO</b>	<b>MOLDURA</b>
		
<b>PERFIL 1</b>	<b>PERFIL 2</b>	<b>PERFIL 3</b>
		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17: Montagem painel e dissipador perfil 1 de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor.

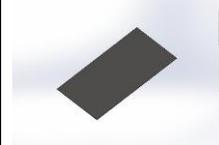
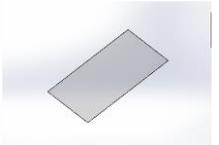
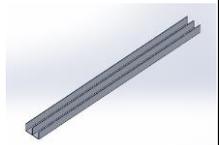
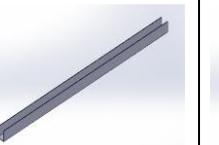
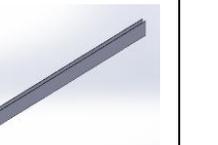
#### 4.4. Quarta Etapa – Etapa de avaliação

Com base nos modelos elaborados na etapa anterior e utilizando a linguagem geométrica de projeto, na etapa de avaliação pretende-se analisar criticamente os modelos construídos e avaliar se esses atendem satisfatoriamente as necessidades colocadas inicialmente. Essa análise se dá por meio da realização de simulações térmicas para assim determinar se os dissipadores de calor projetados como solução proporcionam uma redução da temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos.

Para realização das simulações tornou-se necessário a simplificação dos modelos no intuito de otimizar tais simulações, visto que, a realização com o modelo completo como aquele mostrado na figura 16 apresentou alguns erros de geração de malha e interferências impedindo a execução do estudo.

A montagem simplificada do conjunto a ser simulado contou com um painel de silício simplificado (sem divisão de células), vidro e como dissipador considerou apenas a utilização de alguns perfis que foram colocados no painel a uma mesma distância em todas as montagens, os componentes usados nessa montagem estão mostrados no quadro 10.

Quadro 10: Componentes para montagem de painel e dissipador simplificado

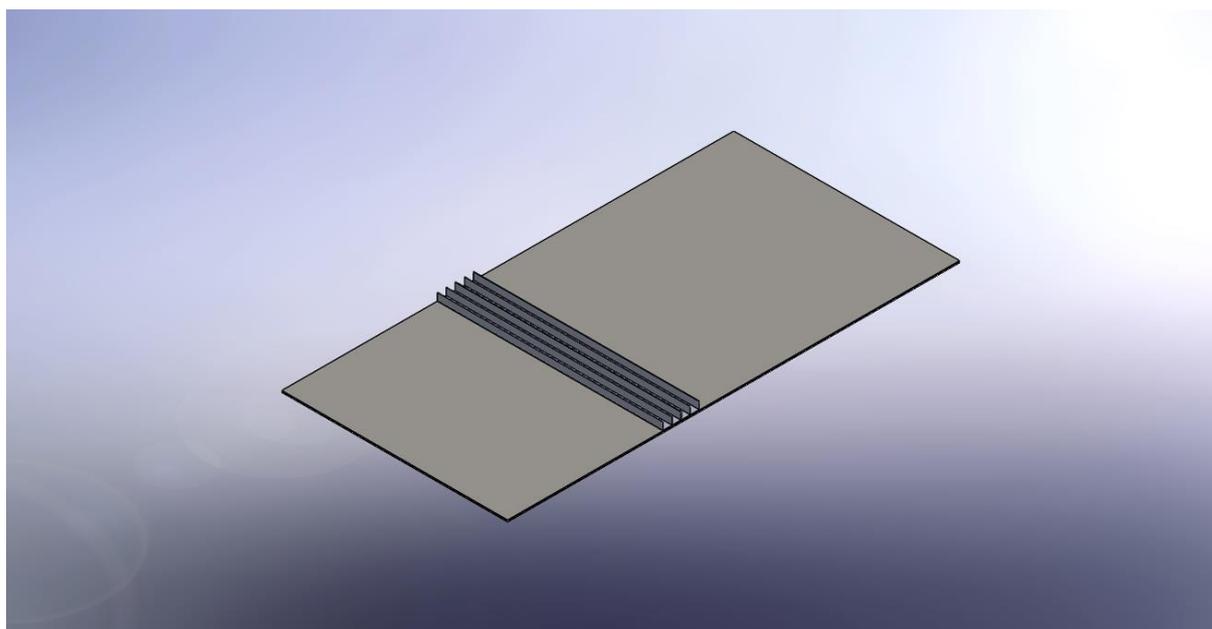
PAINEL SIMPLIFICADO	VIDRO	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3
				

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o intuito de ocupar os espaços existentes entre o dissipador e o painel e fixar as aletas optou-se pela aplicação de uma pasta térmica de silício. A escolha desse tipo de pasta se dá primeiramente pela sua alta capacidade de trocar calor contribuindo para a troca de calor entre o painel e o dissipador, e pelo baixo custo.

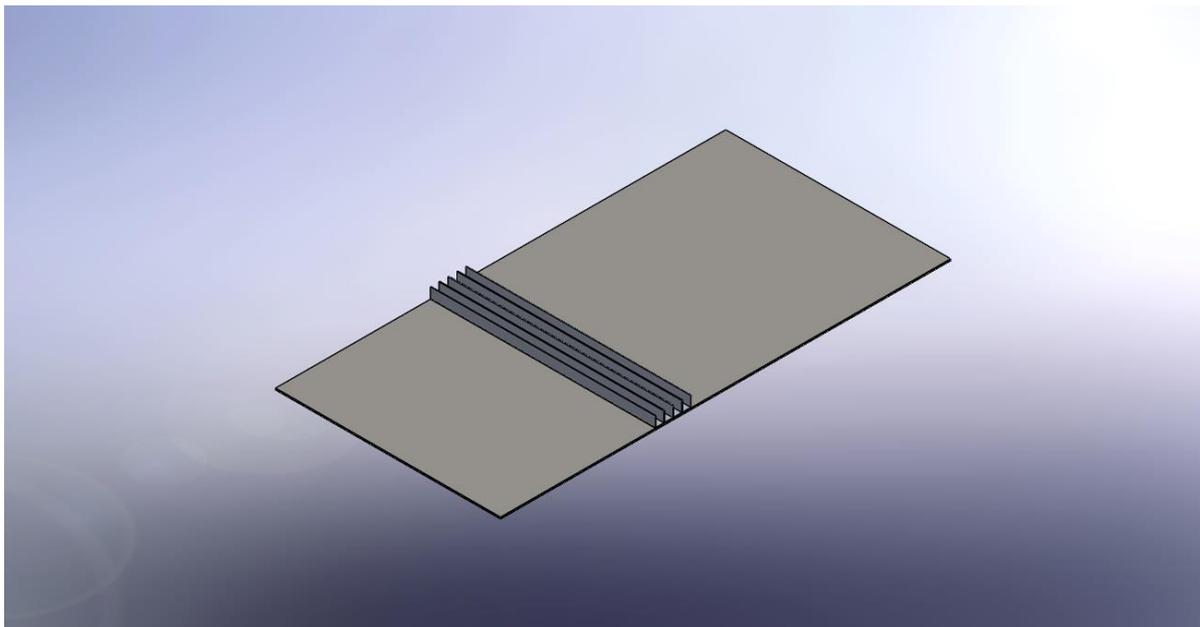
As figuras a seguir mostram como ficaram os conjuntos para cada perfil para a realização das simulações.

Figura 18: Montagem simplificada com perfil 1



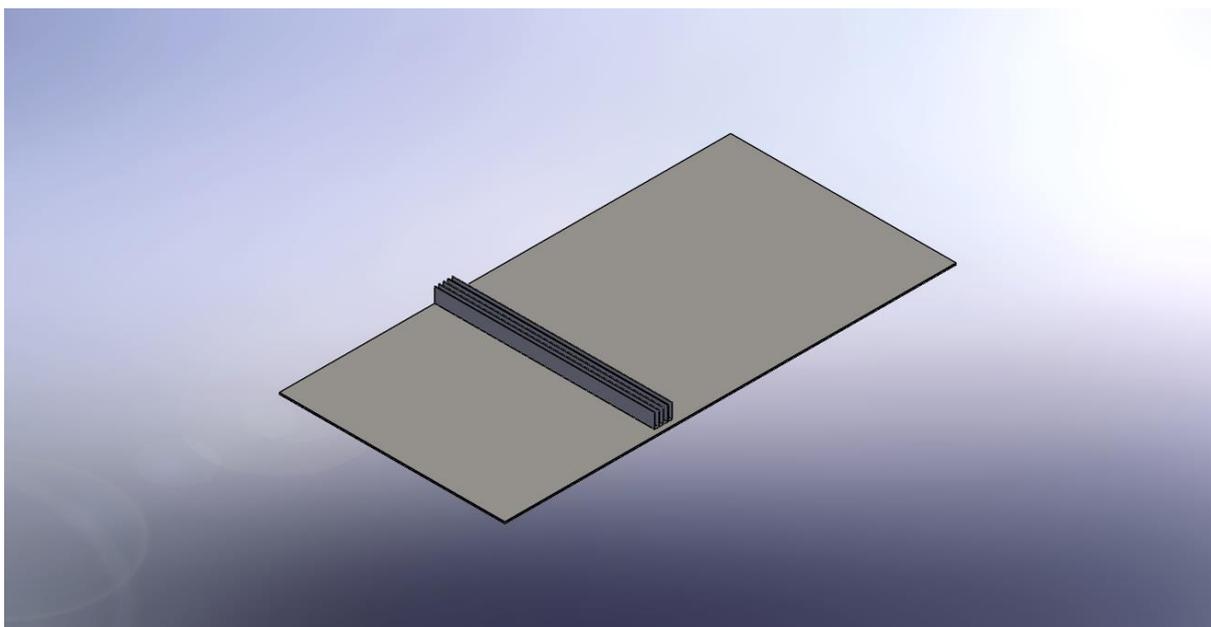
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19: Montagem simplificada com perfil 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20: Montagem simplificada com perfil 3



Fonte: Elaborado pelo autor

Para avaliar os modelos quanto a dissipação de calor e se esses atendem à demanda inicial de diminuição da temperatura, realizou-se no primeiro momento um estudo térmico, onde os parâmetros considerados foram adotados conforme os materiais empregados e mantido os mesmo para cada modelo.

O Quadro 11, mostra as condições de temperatura consideradas para os estudos térmicos assim como os resultados obtidos por cada perfil nessas condições.

Para realização dos estudos foi definido a temperatura do ar como 25 °C, variando apenas a temperatura superior do painel fotovoltaico.

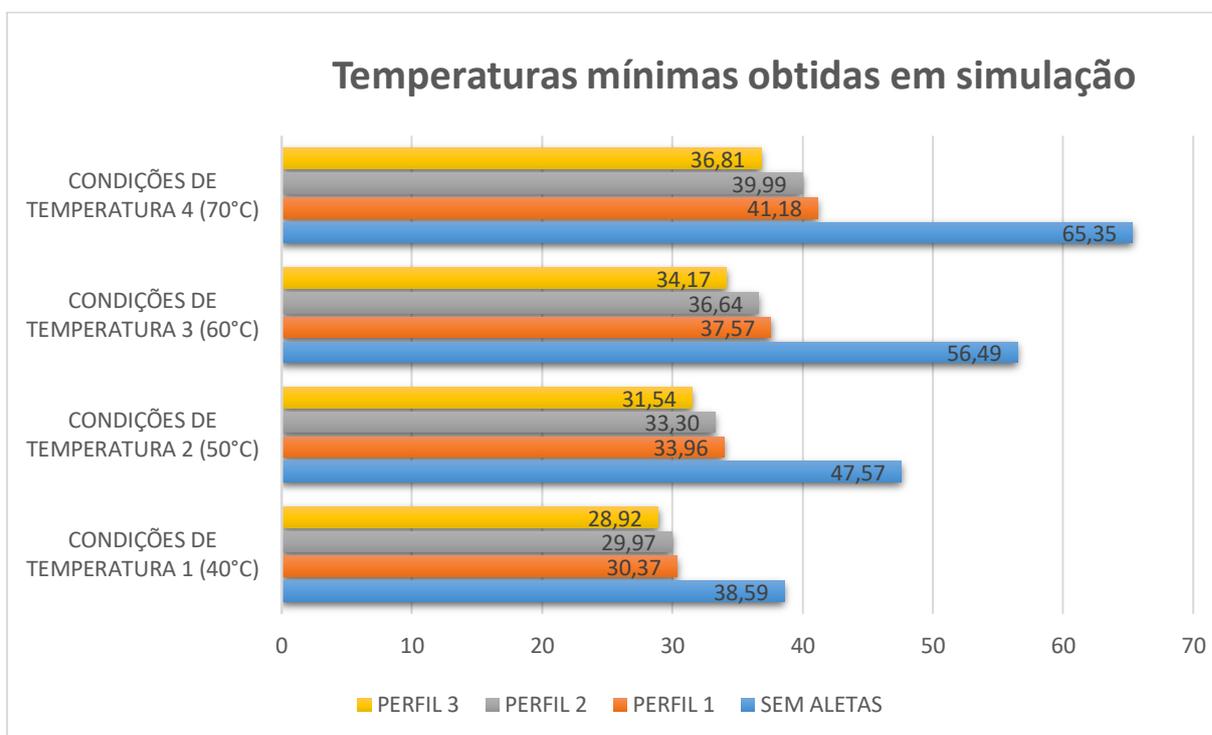
Quadro 11: Resultado simulações – Temperatura mínima e máxima

	CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 1 (40°C)		CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 2 (50°C)		CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 3 (60°C)		CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 4 (70°C)	
	T Mín.	T Máx.						
<b>SEM ALETAS</b>	38,59	38,74	47,57	47,83	56,49	56,87	65,35	65,85
<b>PERFIL 1</b>	30,37	34,45	33,96	40,77	37,57	47,11	41,18	53,47
<b>PERFIL 2</b>	29,97	34,45	33,30	40,76	36,64	47,10	39,99	53,46
<b>PERFIL 3</b>	28,92	34,45	31,54	40,77	34,17	47,11	36,81	53,47

T Mín. e T Máx. em °C

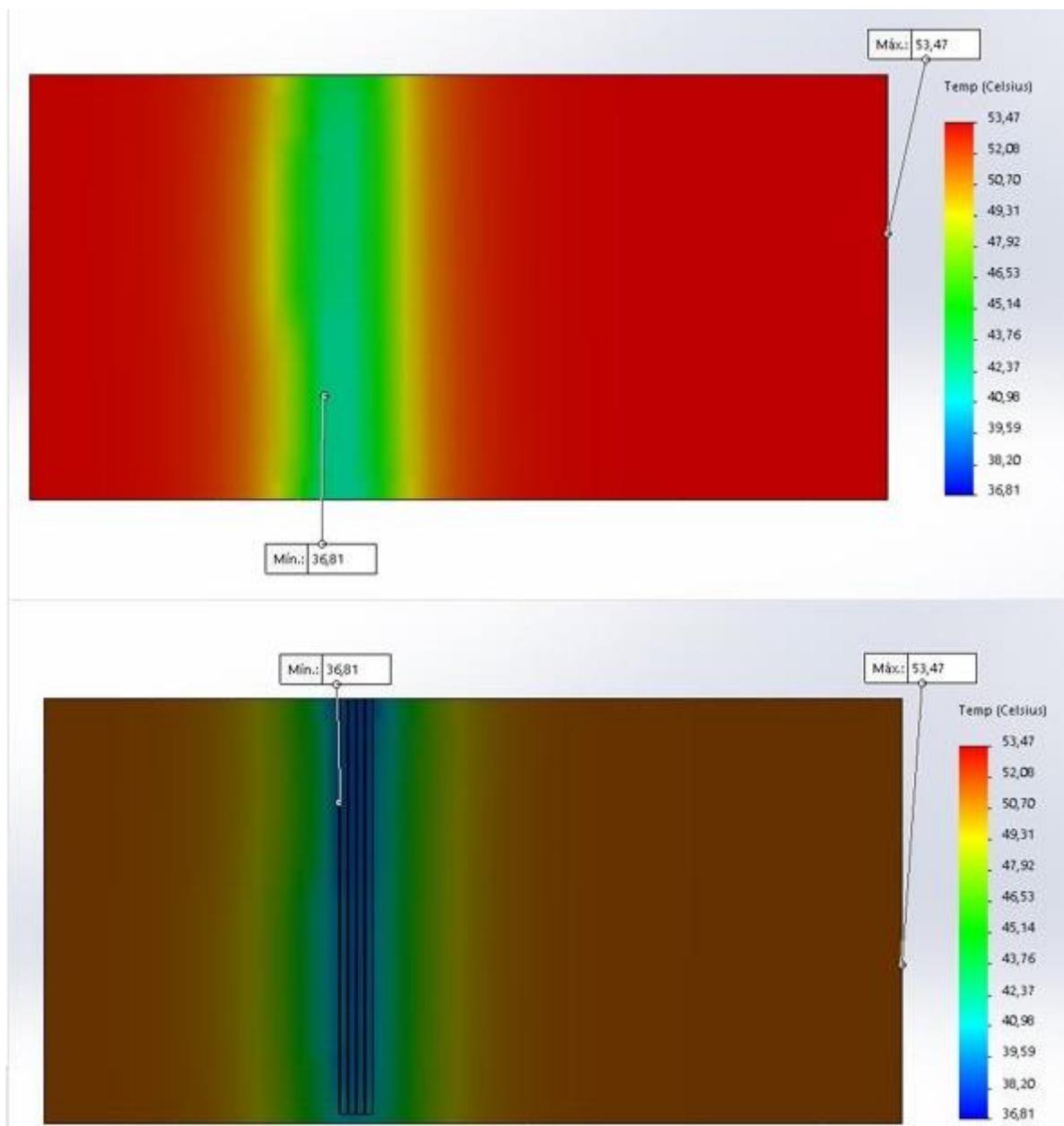
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21: Resultado simulações – Temperatura mínima



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22: Resultado simulação Perfil 3 – Condição de Temp. 4



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 22 mostra o resultado da simulação para o perfil 3 na condição de temperatura 4 (70°C). As imagens correspondentes aos demais resultados das simulações são mostradas no Anexo 1.

Como pode ser observado no quadro 11 e também no gráfico da figura 21, tem-se que a montagem com aletas possibilitou numa redução da temperatura do painel fotovoltaico. Desta forma é possível afirmar que a utilização do dissipador de calor contribui para a redução da temperatura dos painéis atendendo satisfatoriamente a demanda inicial da pesquisa.

Nos resultados mostrados no quadro 11, também foi possível notar que a temperatura máxima permanece praticamente constante nas aplicações com o dissipador de calor, sendo assim no quadro 12, serão apresentadas as temperaturas mínimas e o percentual de redução dessa temperatura em relação ao painel sem dissipador de calor.

Quadro 12: Resultado simulações – Temperatura mínima e percentual de redução

	CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 1 (40°C)		CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 2 (50°C)		CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 3 (60°C)		CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 4 (70°C)	
	T Mín.	%						
SEM ALETAS	38,59	0,00	47,57	0,00	56,49	0,00	65,35	
PERFIL 1	30,37	21,30	33,96	28,61	37,57	33,49	41,18	36,99
PERFIL 2	29,97	22,34	33,30	30,00	36,64	35,14	39,99	38,81
PERFIL 3	28,92	25,06	31,54	33,70	34,17	39,51	36,81	43,67
T Mín. em °C								

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando os resultados obtidos e a redução percentual de temperatura pode-se concluir que dentre os três modelos de perfil simulados o que apresentou o melhor desempenho na redução da temperatura do painel foi o PERFIL 3.

#### 4.5. Quinta Etapa – Etapa de conclusão

Após a avaliação realizada na etapa anterior e a constatação que perfis de alumínio encontrados facilmente no mercado podem ser usados na dissipação de calor dos painéis fotovoltaicos e satisfeita essa condição, é possível buscar por um novo modelo de perfil de alumínio capaz atingir maior desempenho quando aplicado nas mesmas condições de temperatura dos testes realizados na etapa de avaliação.

Como ponto de partida para esse novo perfil, adotou inicialmente o perfil 3. Tal perfil apresentou melhor desempenho na dissipação de calor dentre os perfis simulados anteriormente. Buscando entender os parâmetros da geometria do perfil de alumínio que podem contribuir para melhores resultados, realizou-se testes com seis perfis hipotéticos (perfil 4 ao perfil 9), sendo que, em cada um destes perfis um parâmetro da geometria A,B,C) foi alterado.

Para manter um padrão dessas alterações de parâmetro, o autor optou por adotar a variação de 50% para mais e para menos em cada dimensão do perfil. Sendo

que apenas um parâmetro variava enquanto os outros dois permaneciam constantes e iguais ao do perfil 3. O estudo térmico foi realizado na condição de temperatura 4 (70°C) e temperatura ambiente 25°C.

Quadro 13: Resultado simulações – Temperatura mínima para perfis hipotéticos

	A (mm)	B (mm)	C (mm)	T Mín	
<b>PERFIL 3</b>	14,4	48	1,3	36,81	
<b>PERFIL 4</b>	7,2	48	1,3	36,47	
<b>PERFIL 5</b>	21,6	48	1,3	37,73	
<b>PERFIL 6</b>	14,4	24	1,3	41,81	
<b>PERFIL 7</b>	14,4	72	1,3	33,8	
<b>PERFIL 8</b>	14,4	48	0,65	33,39	
<b>PERFIL 9</b>	14,4	48	1,95	37,66	
<b>T Mín. e T Máx. em °C</b>					

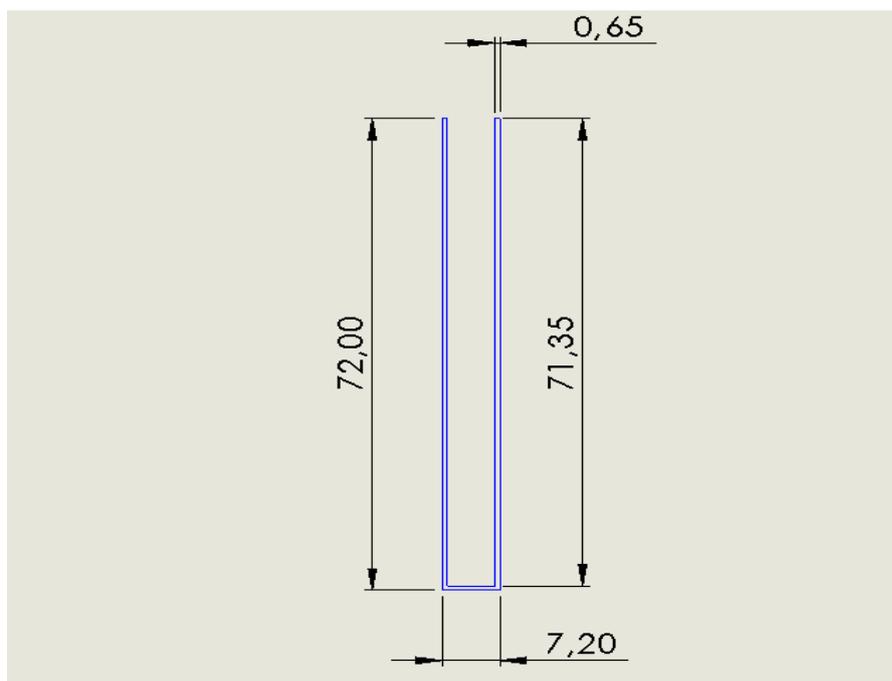
Fonte: Elaborado pelo autor

Observando os resultados obtidos através das alterações de parâmetros dos perfis, foi possível identificar que:

- Quanto mais estreito o perfil (menor valor de A), menor o valor encontrado para a temperatura mínima;
- Quanto maior a altura do perfil (maior valor de B), menor o valor encontrado para a temperatura mínima;
- Quanto mais fina a parede do perfil (menor valor da espessura C), menor o valor encontrado para a temperatura mínima.

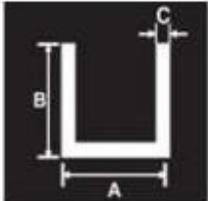
Sendo assim, um novo modelo de perfil hipotético (perfil 10) foi modelado no SolidWorks, tal modelo é mostrado na figura 21. Uma nova simulação foi realizada para esse perfil e os resultados estão mostrados na figura 24 e o quadro 14 mostra a comparação desses resultados com os do painel sem dissipador e os resultados do perfil 3 que foi aquele que apresentou melhor desempenho na etapa anterior.

Figura 23: Perfil 10 de alumínio



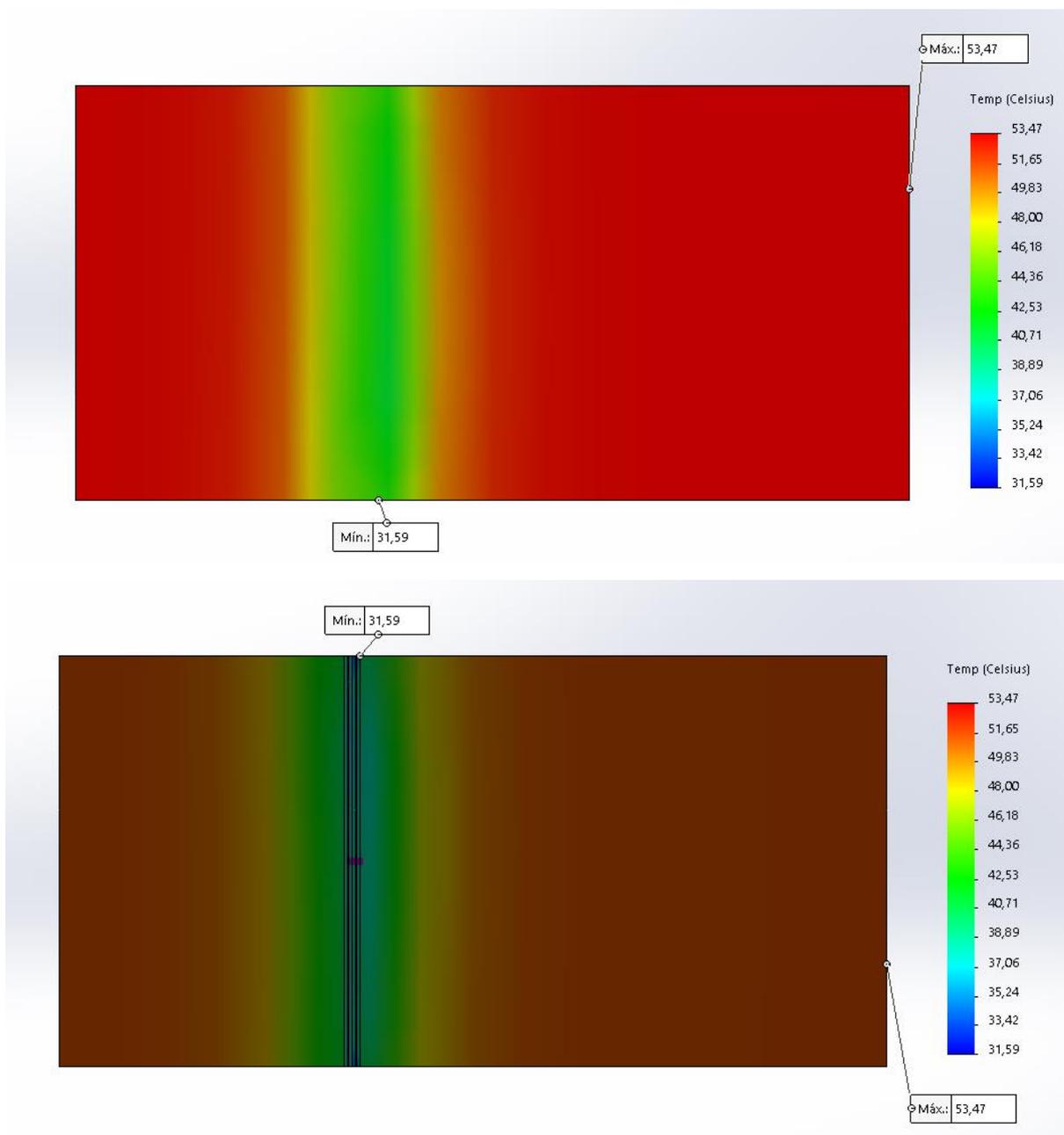
Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 14: Comparativo – Painel sem aletas, perfil 3 e perfil 10

	DIMENSÕES			CONDIÇÕES DE TEMPERATURA 4 (70°C)				
	A (mm)	B (mm)	C (mm)	T Mín.	T Máx.	%		
<b>SEM ALETAS</b>	0	0	0	65,35	65,85	0,76		
<b>PERFIL 3</b>	14,4	48	1,3	36,81	53,47	43,67		
<b>PERFIL 10</b>	7,2	72	0,65	31,59	53,47	51,66		
<b>T Mín. e T Máx. em °C</b>								

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24: Resultado simulação Perfil 10 – Condição de Temp. 4



Fonte: Elaborado pelo autor

Com as alterações dos parâmetros dimensionais o modelo criado (perfil 10) apresentou um desempenho superior quando comparado aos demais perfis simulados nessa pesquisa. Com esse perfil nas condições de temperaturas simuladas foi possível reduzir em mais de 51% a temperatura quando comparado as medidas do painel sem o dissipador, apresentando-se assim como uma boa solução para melhoria da eficiência energética através da redução de temperatura dos painéis fotovoltaicos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Conforme foi colocado por Bax (2013), a DSR fornece ao pesquisador ferramentas que vão permitir a estruturação, sustentação e a qualidade dos resultados obtidos. Gerando uma pesquisa mais robusta e com resultados confiáveis. A utilização dessa metodologia se justifica pelo fato dela fundamentar a condução da pesquisa para a solução de problemas reais.

Assim ocorre com o método proposto por Takeda, em que as 5 etapas acontecem de forma sequencial, porém quando necessário o pesquisador pode voltar e alterar essas etapas no intuito de corrigir possíveis erros encontrados durante sua execução. Tal método permite ao pesquisador entender o problema inicial e suas demandas, direcionando seu projeto para a proposição de soluções. Simon (1996), ressalta que os artefatos produzidos precisam atender satisfatoriamente a demanda inicial dentro do contexto em que se encontram e que tais artefatos não precisam necessariamente serem soluções ótimas.

O tipo predominante de geração de energia no mundo é um problema real. Torna-se cada vez mais necessário diminuir a utilização de combustíveis fósseis. A busca por fontes limpas e renováveis de geração de energia tem aumentado e a energia fotovoltaica surge como uma grande aposta para solucionar parte desses problemas, apesar do desenvolvimento ocorrido na área nos últimos anos, tal matriz representa hoje 2% da matriz energética mundial.

O problema central dessa pesquisa é melhorar a eficiência energética dos painéis fotovoltaicos através da redução de temperatura, para isso foram projetadas três propostas de dissipador de calor para serem instalados juntos ao painel, aumentando a área de contato do painel com o ar ambiente e com isso melhorando a troca de calor entre eles. Com a utilização de perfis metálicos disponíveis no mercado mostrou-se que o dissipador atende satisfatoriamente o problema inicial e proporciona redução da temperatura do painel.

Tomando como base o modelo de perfil de alumínio que proporcionou melhor desempenho na dissipação do calor e variando alguns parâmetros dimensionais desse perfil, um novo modelo de perfil foi proposto. Após simulação e comparação de resultados

tal perfil mostrou-se capaz de reduzir em mais de 51% a temperatura do painel fotovoltaico quando comparado com o painel sem dissipador de calor. Sendo assim, o objetivo geral da pesquisa foi alcançado.

No primeiro momento foi considerada a adaptação do dissipador de calor na parte inferior dos painéis, visto que o tipo de montagem presente no Labsolar da UFJF contribui para isso. Porém, a maior parte dos painéis fotovoltaicos instalados hoje, estão montados sobre telhados residenciais e industriais. Surge, portanto, um problema em relação ao espaço necessário entre o dissipador e o telhado, visto que tal distancia interfere diretamente na troca de calor entre o dissipador e o ar ambiente.

Como sugestão de continuação da pesquisa tem-se a construção e realização de testes com um protótipo físico e câmera termográfica, comparando assim os resultados obtidos através da simulação no SolidWorks com os resultados dos testes em campo. A medição da saída dos painéis com e sem o dissipador pode ser realizada, verificando o real aumento da eficiência energética proporcionado pela diminuição de temperatura.

Pode-se também pensar na proposição de um suporte para o conjunto: painel e dissipador. Tal suporte deve garantir uma distância mínima entre tal conjunto e os telhados, assegurando a troca de calor entre o dissipador e o ar ambiente, assim como a circulação desse ar, proporcionando, portanto, um melhor desempenho. O suporte pode ser projetado como parte da base do dissipador, dessa forma diminui o número de componentes necessários, contribuindo para a montagem e manutenção do sistema.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. Brasília – DF, 2005. 2ª Edição. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. **Resolução Normativa N 482, 2012**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. **Resolução Normativa N 687, 2015**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em março de 2019.

ANDERY, M. A. et al. **Para compreender a ciência: uma perspectiva histórica**. Rio de Janeiro: Editora EDUC, 2004.

ARAÚJO, Guilherme Pereira et al. **Comparação e Análise de Módulos Fotovoltaicos com Células de Silício Cristalino**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar–VII CBENS, Gramado. 2018. BANDEIRA, F. P. M. O aproveitamento da energia solar no Brasil – situação e perspectivas. Brasília. Câmara dos Deputados. 2012.

Bax, M. P. (2013, maio/ago.). **Design science: filosofia da pes-quisa em ciência da informação e tecnologia**. *Ciência da informação*, 42(2), 298–312.

Carneiro, J. **Electromagnetismo B: Semicondutores – modelo matemático da célula fotovoltaica**. Disponível em: <[https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores\\_Modelo%20matem%C3%A1tico%20da%20c%C3%A9lula%20fotovoltaica.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16960/1/Semicondutores_Modelo%20matem%C3%A1tico%20da%20c%C3%A9lula%20fotovoltaica.pdf)>. Acesso em abril de 2019.

CÂMARA DOS DEPUTADOS – PROJETO DE LEI. **PL 8322/2014**. Disponível em: < <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=860916>> . Acesso em março de 2019.

COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia): **Inserção da Energia Solar no Brasil**. São Paulo: GOPEN, 2012. Disponível em: <[www.cogen.com.br/Solar/.../Relatorio\\_Final\\_GT\\_COGEN\\_SOLAR.pdf](http://www.cogen.com.br/Solar/.../Relatorio_Final_GT_COGEN_SOLAR.pdf)>. Acesso em abril de 2019.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA. **CONFAZ - Convênio ICMS 101/97**. Disponível em: <[https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101\\_97](https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97)>. Acesso em março de 2019.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA. **CONFAZ - ICMS 16/2015**. Disponível em: <[https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016\\_15](https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15)>. Acesso em março de 2019.

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J.: **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática** 4ª Ed. Nova York: Bookman, 2012.

DRESCH, A. (2013). **Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção**. São Leopoldo 184p. Dussertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015. 181p.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano; FUCHS, Paulo Gustavo. **Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil**. Revista do BNDES, v. 40, dez/2013, pp. 85-114. Disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf). Acesso em março de 2019.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética): **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: <[www.epe.gov.br/geracao/Documents/...23/NT\\_EnergiaSolar\\_2012.pdf](http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/...23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf)>. Acesso em abril de 2019.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética): **Balanco Energético Nacional 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em abril de 2019.

FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras**. Revista Liberato (Novo Hamburgo), v. 12, p. 7/21788820-16, 2011.

GREEMPRO: **Energia Fotovoltaica. Manual sobre Tecnologias, Projeto e Instalação**. Volume Técnico ALTENER. Janeiro: 2004.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) – Disponível em <https://www.iea.org/>. Acesso em março de 2019

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. **Design and natural science research on information technology**. Decision Support Systems, v. 15, p. 251-266, 1995.

MARCH, S. T.; STOREY, V. C. **Design Science in the Information Systems Discipline: An Introduction to the Special Issue on Design Science Research**. MIS Quarterly, v. 32, n. 4, p. 725-730, 2008.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

Market Report Series: **Energy Efficiency 2018** - Analysis and Outlook to 2040. Disponível em: <https://webstore.iea.org/market-report-series-energy-efficiency-2018>. Acesso em: março de 2019.

PEREIRA, E. B; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L. de; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª ed. Nova Hamburgo: Feevale, 2013.

RAMOS, Cristina de Moura. **Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Univ. de S. Paulo, São Paulo, Brasil. 140p, 2006.

SIEMBRA AUTOMAÇÃO. **Tabela de Comparação de Perfis ALUMÍNIO x AÇO**. Disponível em: <https://www.siembra.com.br/noticias/qual-o-perfil-ideal-para-o-seu-projeto-aco-ou-aluminio/>. Acesso em: agosto de 2019.

SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, Fevereiro/2015 (Texto para Discussão nº 166). Disponível em: [www.senado.leg.br/estudos](http://www.senado.leg.br/estudos). Acesso em março de 2019.

SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial**. 3. ed. USA: MIT Press, 1996.

TAKEDA, H.; VEERKAMP, P.; TOMIYAMA, T.; YOSHIKAWA, H. **Modeling Design Processes**. AI Magazine, v. 11, n. 4, p. 37-48, 1990.

VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field- Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

VARELLA, F.; GOMES, R. D. M.; JANUZZI, G. M. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: panorama da atual legislação**. Campinas: International Energy Initiative, 2009. Disponível em: [http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO\\_PROJETO\\_2\\_FINAL.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO_PROJETO_2_FINAL.pdf). Acesso em abril de 2019.

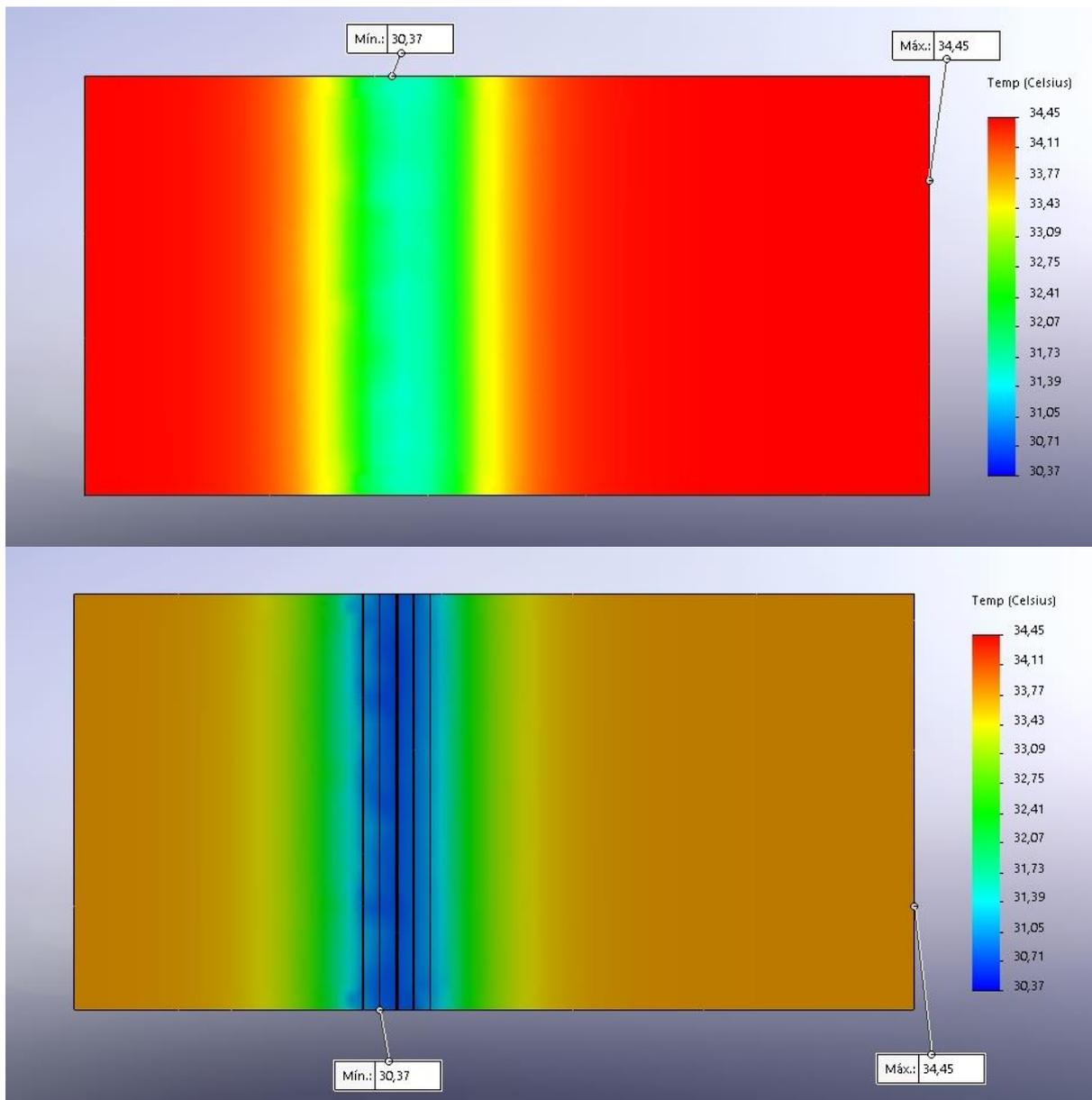
YOUNG, Hugh D., University Physics, 7th ed. Table 15-5

## ANEXO A

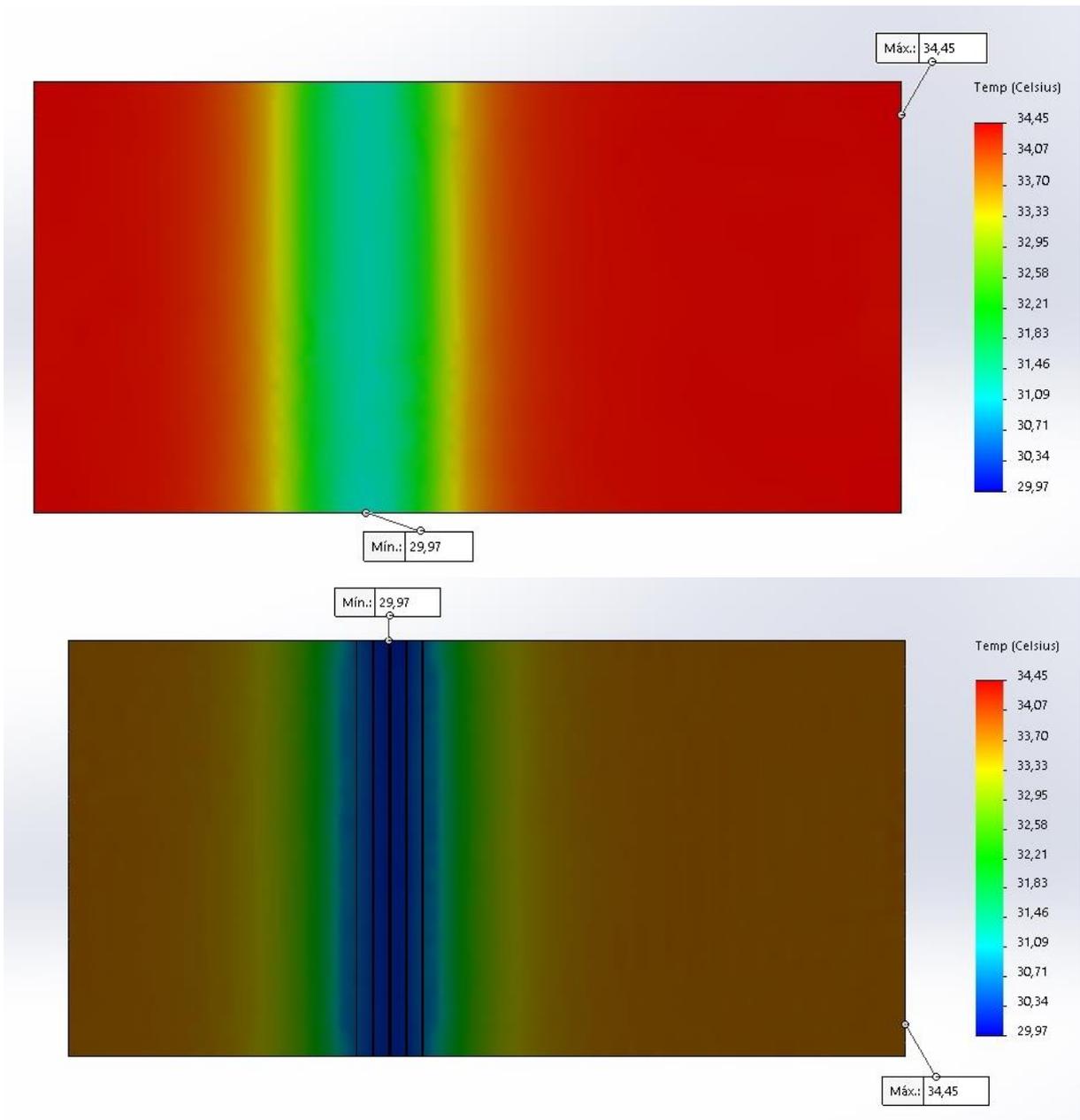
Segue abaixo as ilustrações dos resultados obtidos através dos estudos térmicos simulados no SolidWorks:

- Condição de temperatura 1 (40°C)

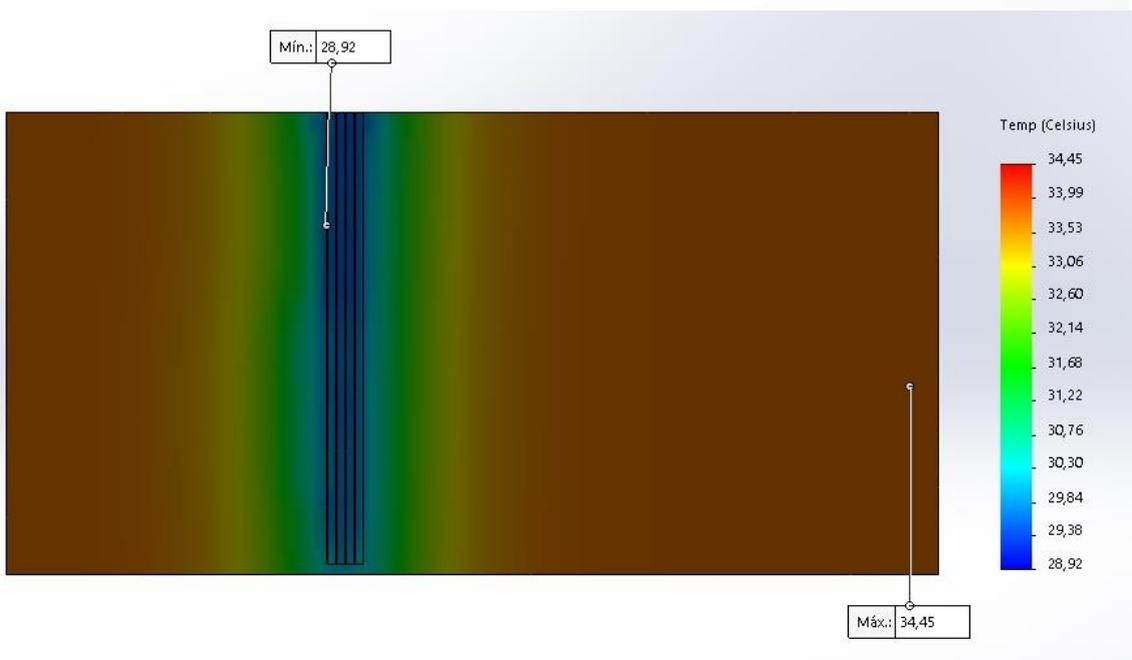
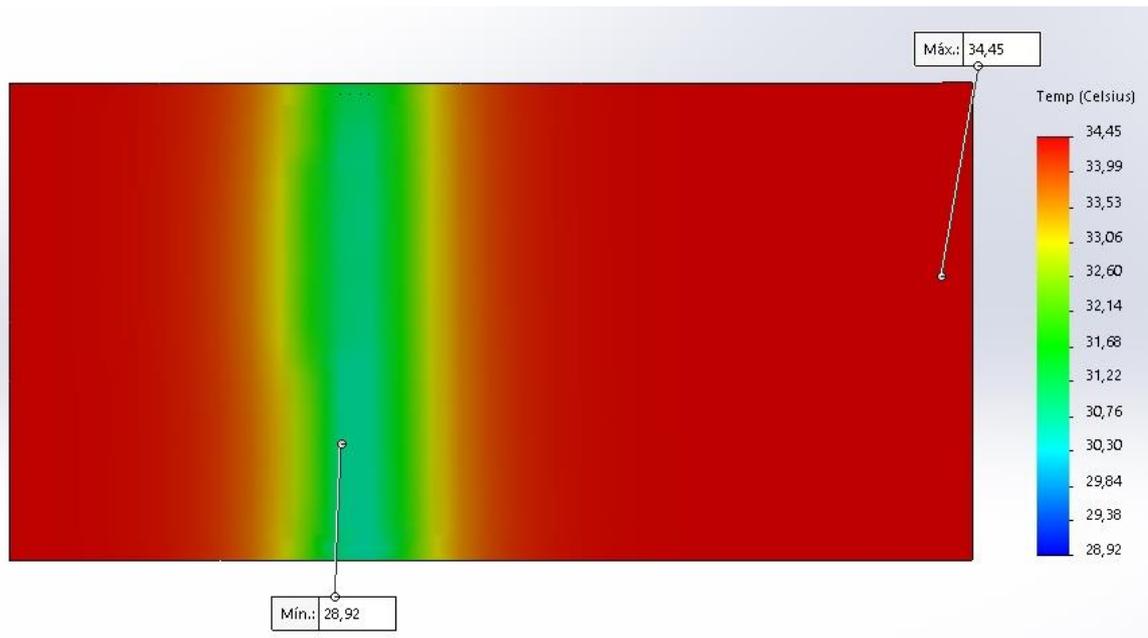
## PERFIL 1



PERFIL 2

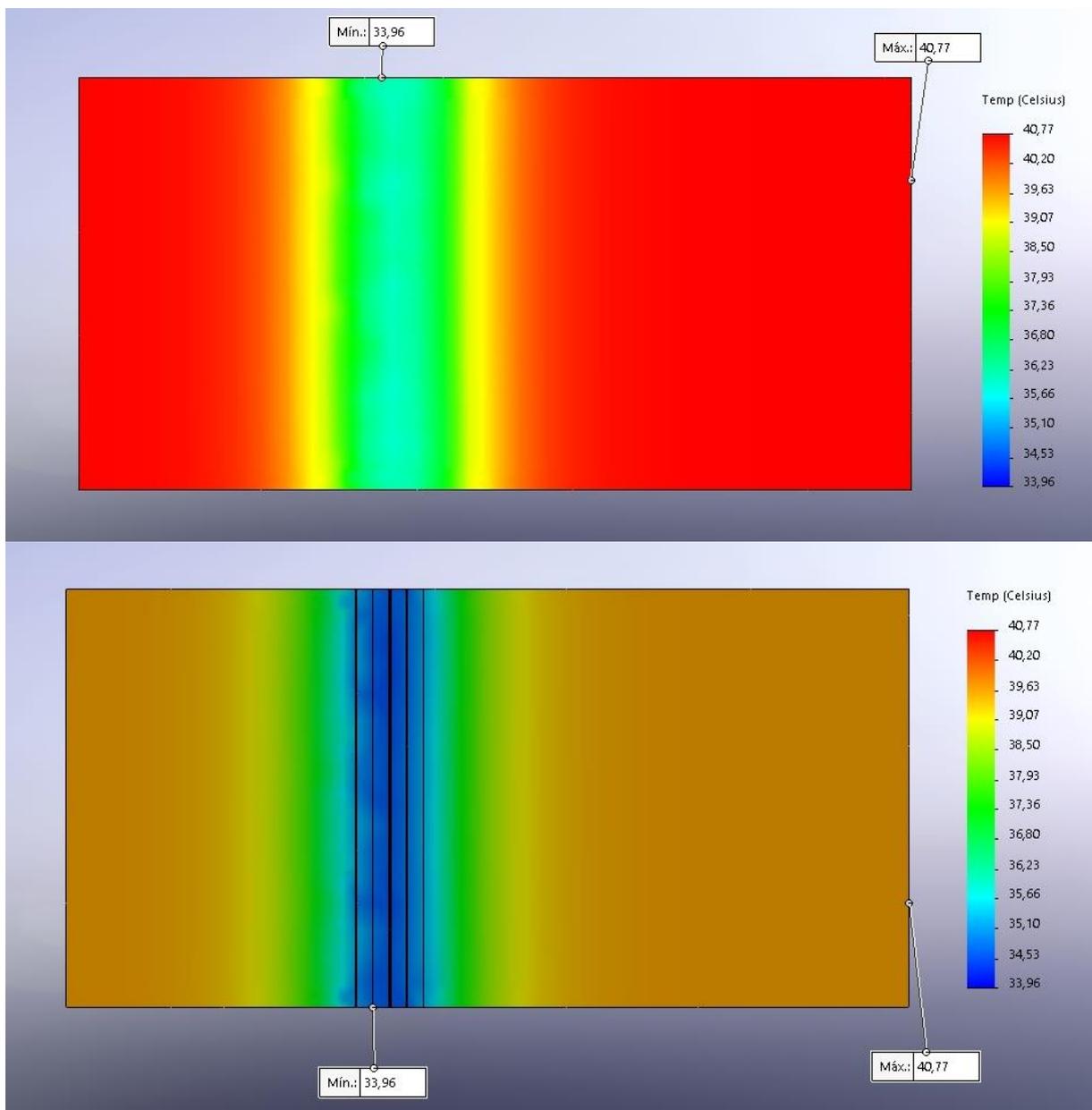


### PERFIL 3

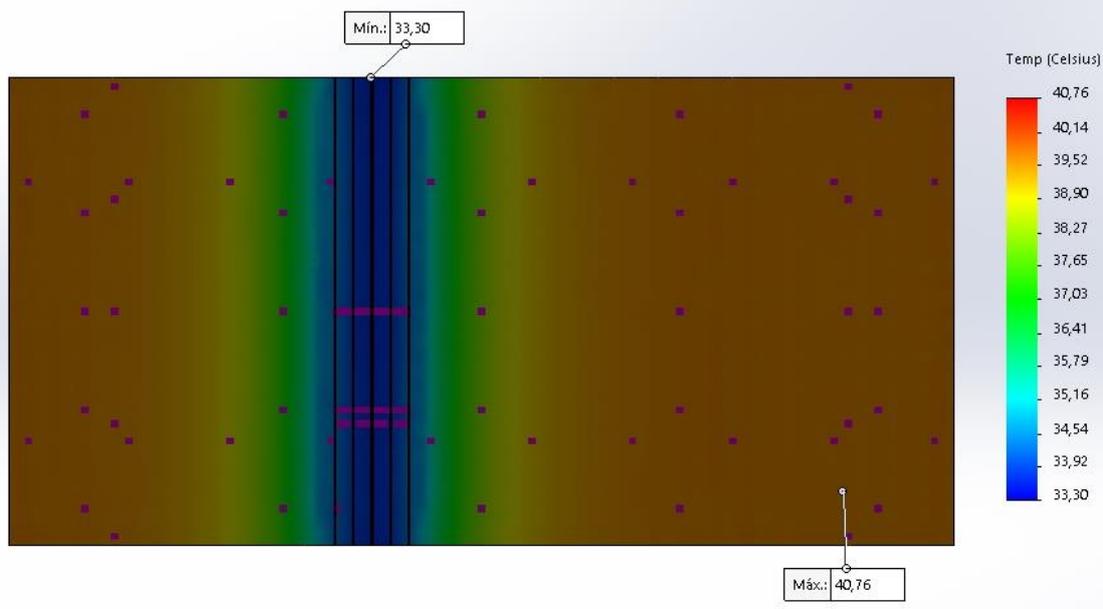
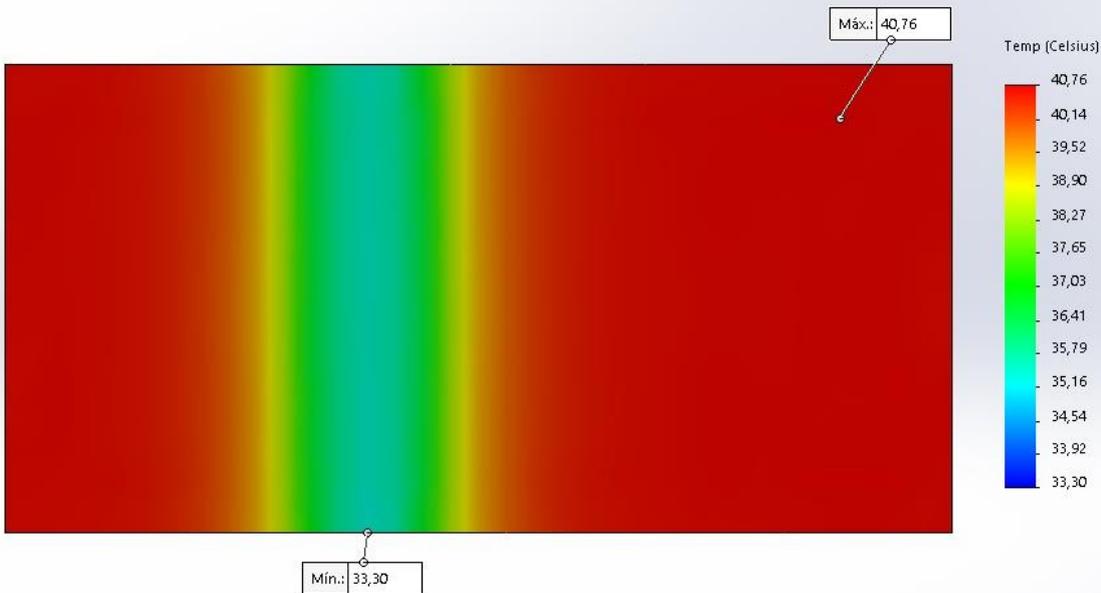


- Condição de temperatura 2 (50°C)

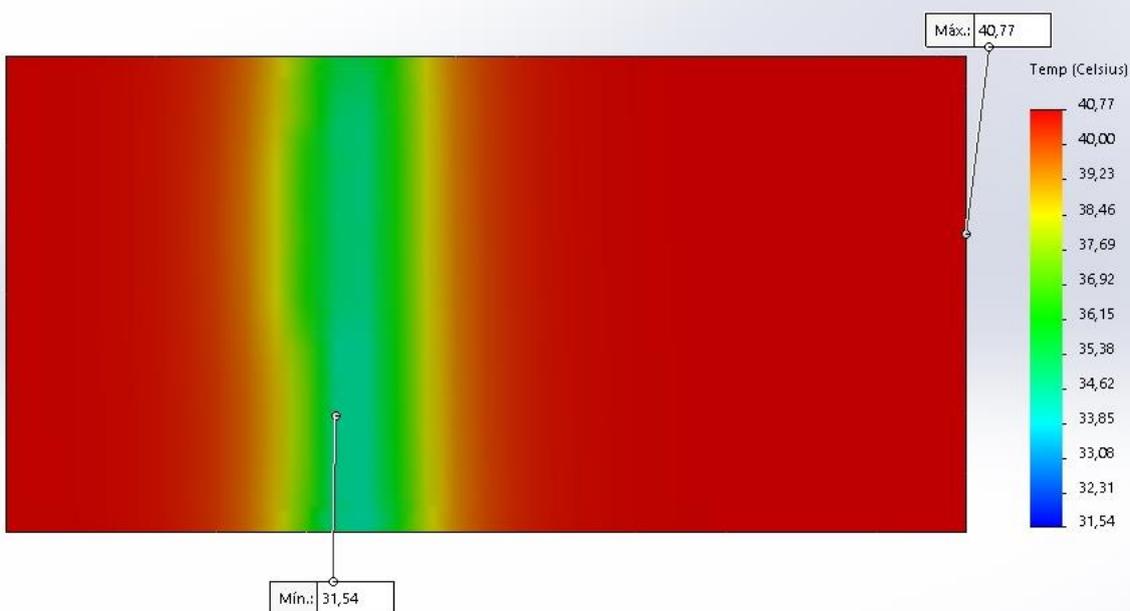
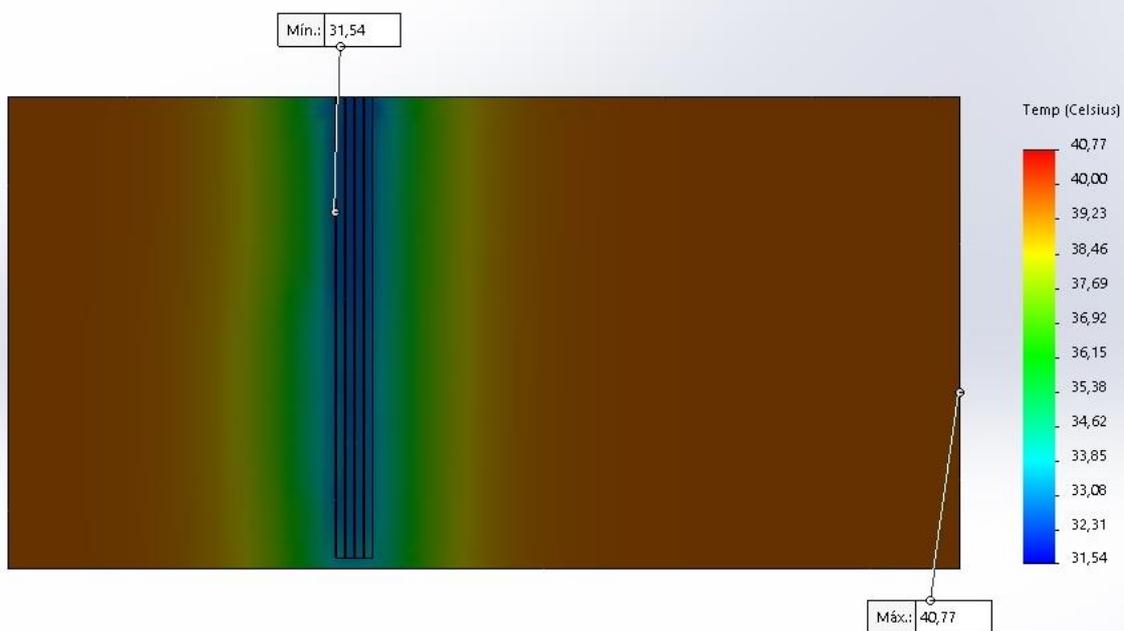
## PERFIL 1



PERFIL 2

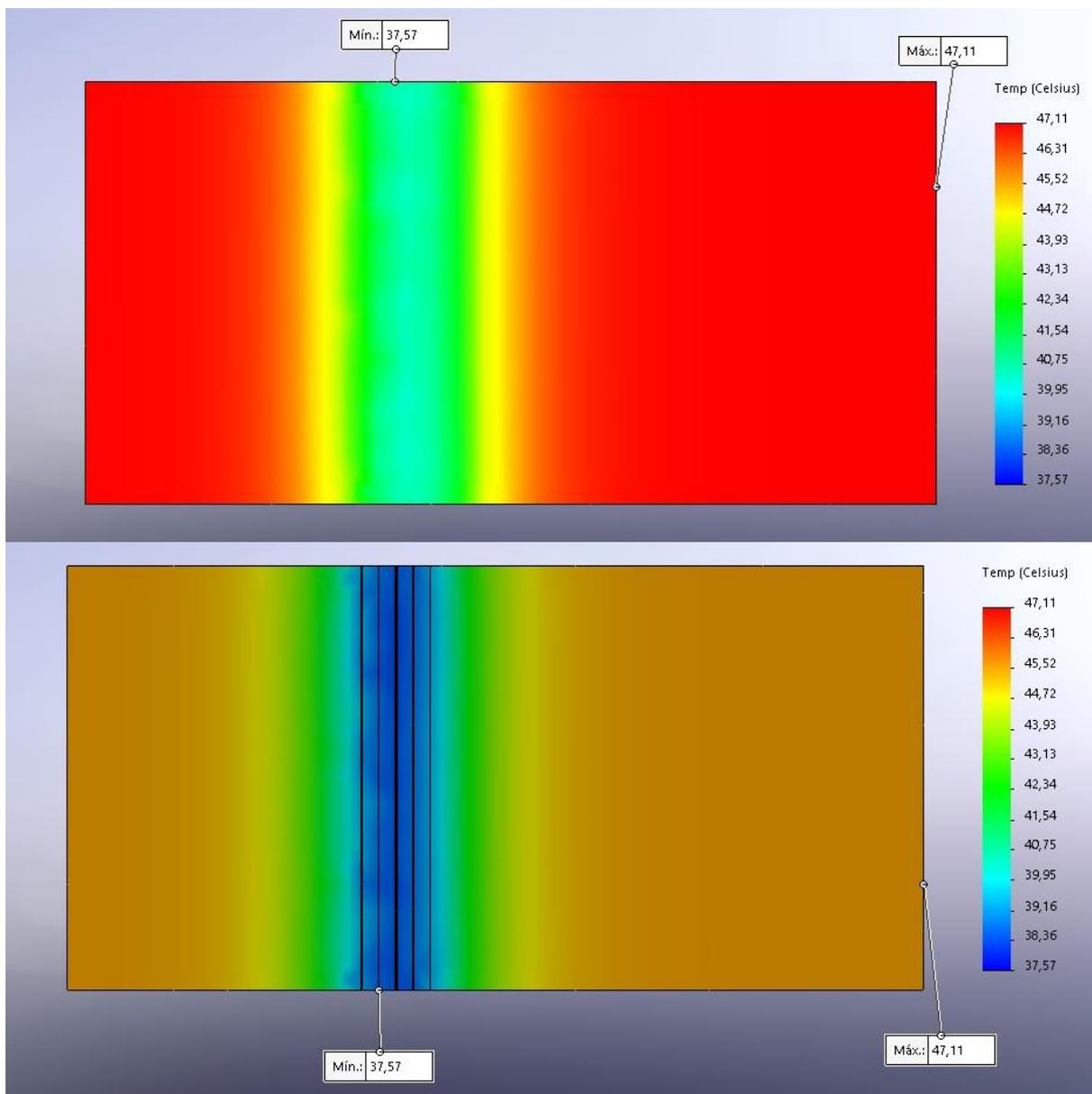


## PERFIL 3

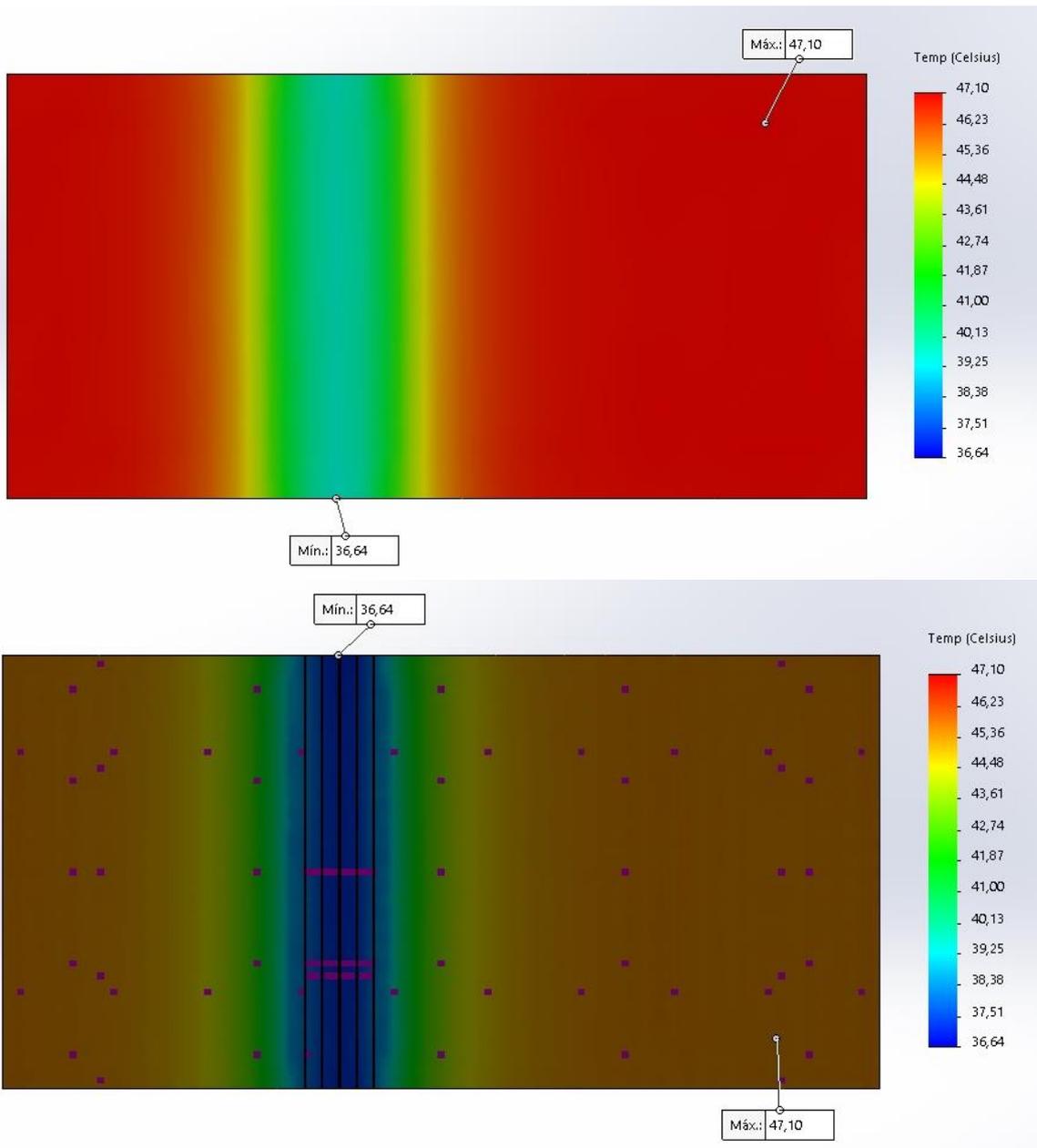


- Condição de temperatura 3 (60°C)

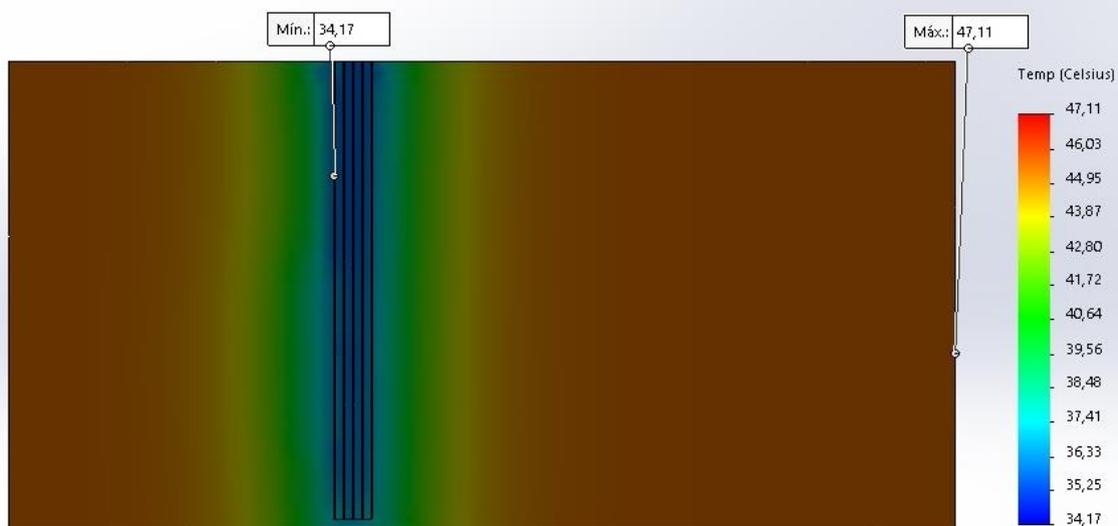
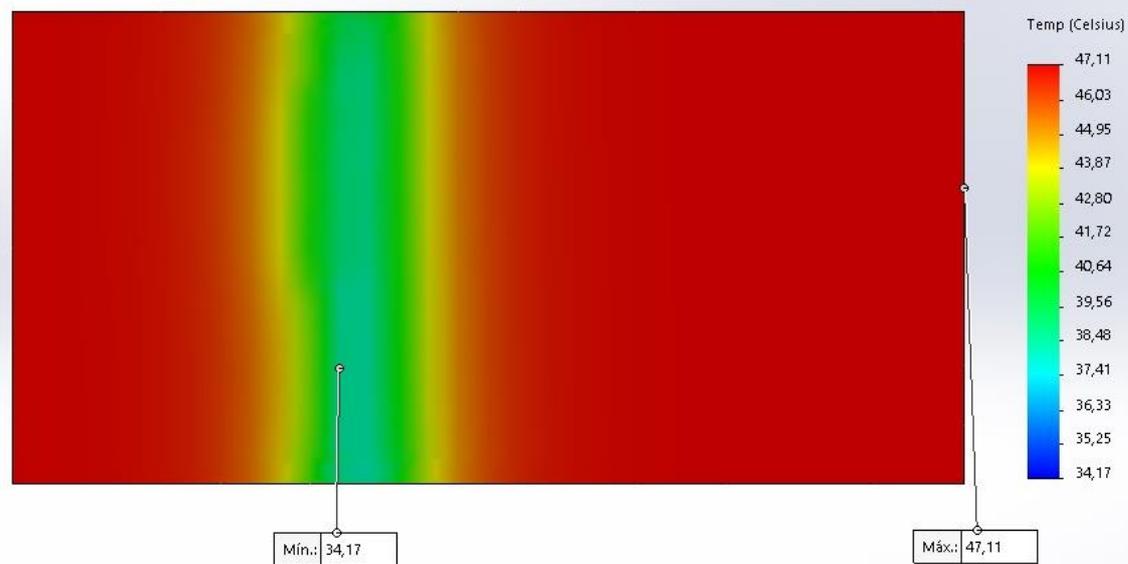
## PERFIL 1



## PERFIL 2

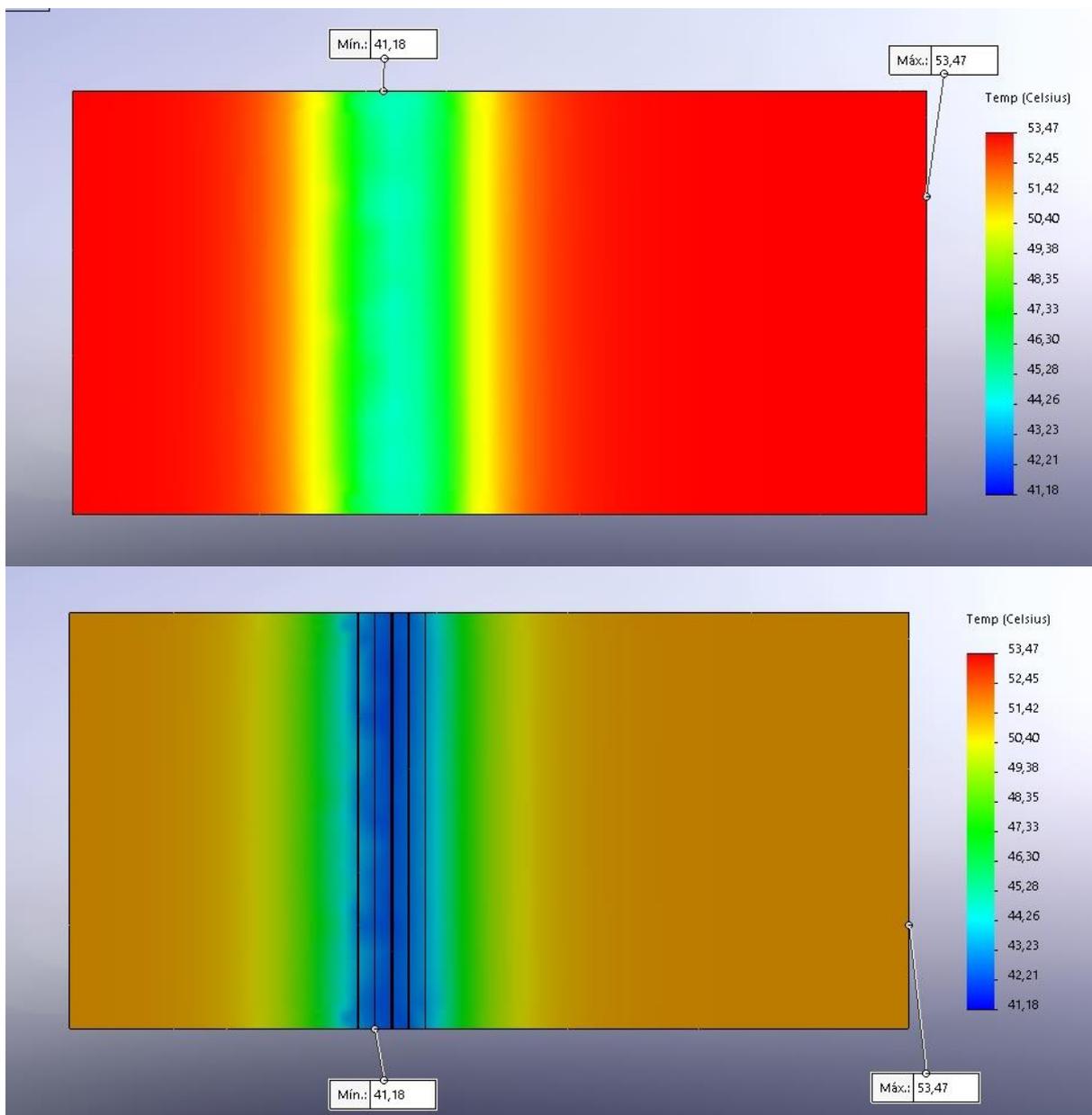


## PERFIL 3

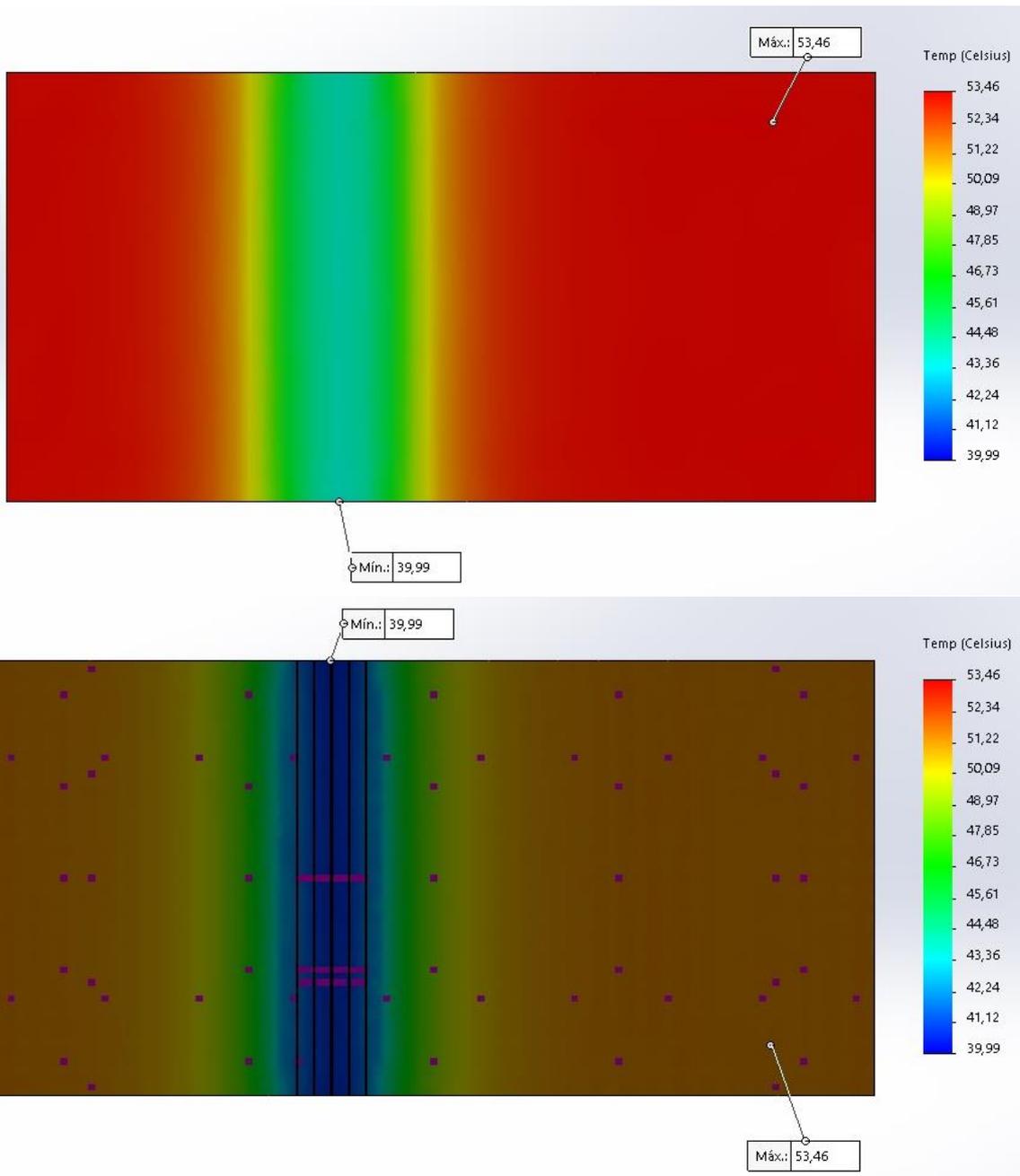


- Condição de temperatura 4 (70°C)

## PERFIL 1



# PERFIL 2



### PERFIL 3

