



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

SIMULAÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO MACH ZEHNDER NO ANSYS

Carlos Miguel Pignataro Lange

Relatório de Iniciação Científica do Programa PIBIC, orientado pelo Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira, Dra. Franciele Carlesso e Me. Adriany Rodrigues Barbosa.

INPE
São José dos Campos
2024



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

SIMULAÇÃO DE UM INTERFERÔMETRO MACH ZEHNDER NO ANSYS

Carlos Miguel Pignataro Lange

Relatório de Iniciação Científica do Programa PIBIC, orientado pelo Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira, Dra. Franciele Carlesso e Me. Adriany Rodrigues Barbosa.

INPE
São José dos Campos
2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de realizar um projeto de iniciação científica e pelo apoio oferecido durante o ano de execução do trabalho.

Agradeço aos meus orientadores pela indispensável ajuda na condução do projeto, por todo o respeito, amizade e dedicação demonstrados durante nosso tempo compartilhado.

Por fim, agradeço a minha família e aos meus amigos pelo carinho, incentivo e amor apresentados durante a realização deste projeto.

RESUMO

O Sol é responsável por praticamente toda a energia que chega à Terra e comanda o clima terrestre. Nesse sentido, é vital a medição da irradiância solar total (TSI) para a construção de modelos que visam a compreensão do clima terrestre. A simulação de um interferômetro Mach-Zehnder no software ANSYS era o projeto de iniciação científica a ser desenvolvido, no princípio, porém, a não liberação da licença para utilizar o software necessário para realizar simulações ópticas provocou uma alteração no caminho planejado. Ainda com o objetivo de desenvolver um trabalho relacionado à missão do Galileo Solar Space Telescope (GSST), à medição da irradiância solar total (TSI) e que utilizasse a plataforma acessível do ANSYS, o projeto prosseguiu no sentido de realizar a simulação da cavidade do radiômetro de substituição elétrica, com foco nos processos de transferência de calor. Dessa forma, o projeto tinha como finalidade o entendimento dos mecanismos de transferência de calor aplicados à cavidade do radiômetro para que fosse possível caracterizá-la para seu funcionamento correto e adequado, permitindo também o conhecimento das faixas de temperatura que atingem o dispositivo, informação que é útil para a aplicação do interferômetro Mach-Zehnder. A partir das simulações de transferência de calor realizadas no ANSYS, que analisaram os diversos parâmetros que influenciam as trocas de energia térmica, foi possível, gradualmente, extrair diversos resultados apresentados na forma de imagens de distribuição de temperatura ao longo da extensão da geometria utilizada na simulação. Além disso, através da análise das temperaturas máximas e mínimas atingidas pelas geometrias das simulações, permitiu-se a construção de tabelas que exibiam esses valores, permitindo a reflexão acerca dos resultados obtidos e, como consequência, a elaboração de conclusões coerentes e lógicas. Após a realização de diversas simulações que foram adquirindo maior complexidade gradativamente, além da compreensão e conclusões a respeito dos parâmetros que influenciam cada tipo de mecanismo de transferência de calor, concluiu-se que é necessário a escolha e utilização de materiais de alta condutividade térmica para constituir a cavidade do radiômetro, característica que permite a melhor distribuição de temperatura ao longo da extensão da cavidade e impede a formação de posições de altas temperaturas, possibilitando a leitura correta do valor da TSI. Também se obteve como conclusão a noção de que variações na temperatura ambiente utilizadas para a cavidade não influenciam significativamente nas diferenças entre temperaturas máximas e mínimas atingidas nas simulações, ou seja, a cavidade do radiômetro pode atuar em diferentes temperaturas ambientes e, da mesma forma, manter a diferença entre sua temperatura máxima e mínima praticamente constante, desde que a energia que atinge a cavidade seja a mesma.

Palavras-chave: Galileo Solar Space Telescope. ANSYS. Cavidade. Radiômetro de Substituição Elétrica. Transferência de Calor.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Variabilidade da TSI na escala de minutos a horas.....	5
Figura 2.2 - Variabilidade da TSI na escala dos ciclos solares	6
Figura 2.3 - Reconstrução da TSI a partir do registro de manchas solares	7
Figura 2.4 - Esquema da cavidade de um radiômetro.	8
Figura 2.5 - Cavidade de radiômetro de prata com revestimento interno de Ni-P	9
Figura 3.1 - Esquema da metodologia empregada no projeto de iniciação científica	14
Figura 4.1 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 22°C e coeficiente convectivo de 5 W/m ² °C.....	18
Figura 4.2 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 22°C e coeficiente convectivo de 10 W/m ² °C.....	18
Figura 4.3 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 22°C e coeficiente convectivo de 5 W/m ² °C, com escala ajustada para comparação com a figura 10.....	19
Figura 4.4 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 10°C e coeficiente convectivo de 5 W/m ² °C.....	19
Figura 4.5 - Distribuição de temperaturas do cubo de 1000 mm ³	21
Figura 4.6 - Distribuição de temperaturas do cubo de 8000 mm ³	21
Figura 4.7 - Distribuição de temperaturas do cubo de 27000 mm ³	22
Figura 4.8 - Geometria de dois cubos utilizada na simulação 3.....	23
Figura 4.9 - Distribuição de temperaturas do paralelepípedo com a taxa aplicada no cubo de cobre.....	24
Figura 4.10 - Distribuição de temperaturas do paralelepípedo com a taxa aplicada no cubo de óxido de alumínio.	24
Figura 4.11 - Fluxo aplicado na face interna da cavidade.	25
Figura 4.12 - Distribuição de temperaturas da cavidade de titânio.	26
Figura 4.13 - Distribuição de temperaturas da cavidade de alumínio.	27
Figura 4.14 - Distribuição de temperaturas da cavidade de prata.	27
Figura 4.15 - Distribuição de temperaturas da cavidade em regime transiente à temperatura ambiente de 25°C.	29
Figura 4.16 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da cavidade em regime transiente à temperatura ambiente de 25°C.....	29

Figura 4.17 - Distribuição de temperaturas da cavidade em estado estacionário à temperatura ambiente de 25°C.	30
Figura 4.18 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da cavidade em estado estacionário à temperatura ambiente de 25°C	30
Figura 4.19 - Aplicação do fluxo de calor na geometria 1.	32
Figura 4.20 - Aplicação do fluxo de calor na geometria 2.	32
Figura 4.21 - Distribuição de temperaturas da geometria 1.	33
Figura 4.22 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da geometria 1.	33
Figura 4.23 - Distribuição de temperaturas da geometria 2.	34
Figura 4.24 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da geometria 1.	34
Figura 4.25 - Aplicação do fluxo de calor na cavidade.	35
Figura 4.26 - Indicação da primeira faixa de monitoramento das temperaturas na cavidade.	36
Figura 4.27 - Indicação da segunda faixa de monitoramento das temperaturas na cavidade.	36
Figura 4.28 - Distribuição de temperaturas para a cavidade na qual foi aplicado o fluxo exponencial.	37
Figura 4.29 - Visualização interna da distribuição de temperaturas para a cavidade na qual foi aplicado o fluxo exponencial.	37
Figura 4.30 - Gráfico do monitoramento das temperaturas nas duas faixas da cavidade para os dois tipos de fluxo aplicado.	38

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Resultados da simulação 1	20
Tabela 4.2 - Resultados da simulação 2	22
Tabela 4.3 - Resultados da simulação 3	25
Tabela 4.4 - Resultados da simulação 4	28
Tabela 4.5 - Resultados da simulação 5	31
Tabela 4.6 - Resultados da simulação 6	35

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO TEÓRICA	4
2.1 Missão GSST	4
2.2 Irradiância Solar Total (TSI).....	4
2.2.1 Definição da TSI e sua relação com o clima e o tempo.....	4
2.2.2 Medição da TSI: radiômetros de substituição elétrica.....	7
2.3 Transferência de Calor	10
2.3.1 Condução.....	10
2.3.2 Convecção.....	11
2.3.3 Radiação	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Software ANSYS	13
3.2 Metodologia.....	14
4. RESULTADOS	17
4.1 Simulação 1: 03/10/2023	17
4.2 Simulação 2: 08/11/2023	20
4.3 Simulação 3: 28/02/2024.....	22
4.4 Simulação 4: 16/05/2024.....	25
4.5 Simulação 5: 03/06/2024.....	28
4.6 Simulação 6: 25/06/2024.....	31
4.7 Simulação 7: 29/07/2024.....	35
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
5.1 Simulação 1: 03/10/2023	39
5.2 Simulação 2: 08/11/2023	39
5.3 Simulação 3: 28/02/2024.....	40
5.4 Simulação 4: 16/05/2024.....	40
5.5 Simulação 5: 03/06/2024.....	41
5.6 Simulação 6: 25/06/2024.....	41
5.7 Simulação 7: 29/07/2024.....	42

6. CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

O projeto de iniciação científica desenvolvido consistia, inicialmente, na simulação de um interferômetro Mach-Zehnder no software ANSYS. No entanto, devido à recusa de liberação da licença para tal ferramenta, não foi possível prosseguir com o projeto na direção de realizar simulações ópticas. Portanto, ainda com a intenção de realizar simulações no ANSYS, decidiu-se utilizar sua plataforma grátis desenvolvida para estudantes que disponibilizava as ferramentas necessárias para a realização de simulações de transferência de calor. Dessa forma, mantendo o intuito de desenvolver um projeto que se relacione com a missão do Galileo Solar Space Telescope (GSST), foi desenvolvido um trabalho que consistiu na simulação da cavidade de um radiômetro de substituição elétrica no ANSYS com foco em analisar os processos de transferência de calor que ocorrem durante o funcionamento do dispositivo. Logo, buscou-se, a partir dessas simulações, entender os mecanismos de transferência de calor para caracterizar e analisar os parâmetros que permitem o funcionamento adequado do radiômetro.

O Galileo Solar Space Telescope (GSST) é a primeira missão solar brasileira que busca estudar a estrutura magnética do Sol e seus impactos a partir de observações solares de alta resolução (CARLESSO, 2022). O GSST possui os objetivos de não só compreender o comportamento das estruturas magnéticas na camada externa solar, como também entender a influência do Sol sobre o clima terrestre (CARLESSO, 2022). Assim, a missão possui como finalidade o fornecimento e monitoramento contínuo de alta precisão e estabilidade da irradiância solar total (TSI) a partir do espaço (CARLESSO, 2022). A compreensão da influência solar sobre o planeta Terra e seu clima se dá a partir da análise da TSI.

A TSI é a energia radiante (radiação eletromagnética) espacialmente e espectralmente integrada do Sol à distância de 1 unidade astronômica (UA), que é a distância do Sol à Terra, mensurada em 149.598.500 quilômetros (KOPP, 2018). A partir de sua medição, busca-se a construção de modelos que visam o entendimento do clima terrestre, visto que variações na TSI ao longo do tempo são um dos principais influenciadores do clima e temperatura terrestres. Além disso, o Sol é responsável por praticamente toda a energia que comanda o clima terrestre (KREN, 2015), explicitando a importância de medir-se corretamente o valor da TSI e aperfeiçoar as máquinas e dispositivos responsáveis por essas medidas. Nesse sentido, os radiômetros de

substituição elétrica se mostraram como o instrumento mais preciso e estável na medição da TSI (KOPP, 2018).

O radiômetro de substituição elétrica é o instrumento no qual a maioria dos sistemas de medição da TSI dependem e o seu funcionamento para a mensuração da TSI se dá a partir da transformação da energia radiante que chega na cavidade do radiômetro em energia térmica (KOPP, 2018). A cavidade do radiômetro é mantida a uma temperatura constante devido à passagem de corrente elétrica e, com a chegada da energia solar, ocorre variação na intensidade dessa corrente para que a temperatura não sofra alteração. Essa variação, juntamente com a correta calibração do dispositivo, é o que permite a determinação do valor da TSI (KOPP, 2018). Portanto, revela-se necessário o entendimento de como ocorrem os processos de transferência de calor na cavidade do radiômetro a fim de caracterizá-lo, compreendendo não só quais parâmetros influenciam nas trocas de energia térmica, mas também quais permitem a performance adequada do instrumento.

O estudo da transferência de calor busca o conhecimento sobre a geração, troca e conversão de calor entre um sistema e outro, ou entre um sistema e suas vizinhanças e, dessa forma, calor é definido como energia térmica em transmissão. Nesse contexto, existem três formas nas quais é possível ocorrer a transmissão de energia térmica: a condução, a convecção e a radiação. A compreensão desses mecanismos de transferência de calor e suas propriedades permitem a escolha das características adequadas da cavidade do radiômetro para o desempenho correto do dispositivo. Assim, o software do ANSYS se mostra como uma plataforma que possibilita a realização de simulações de transferência de calor sobre diversas geometrias.

A plataforma de simulações do ANSYS disponível para estudantes consiste em um pacote de softwares que permite não só a utilização de recursos como a modelagem de geometrias, até a realização de simulações térmicas a partir dessas geometrias. O funcionamento do software que permite a realização de simulações de transferência de calor, o Ansys Mechanical, se dá a partir da geração de malha da geometria utilizada em uma simulação e a consequente resolução da simulação proposta por meio da Análise de Elementos Finitos (FEA) (MUHAMMAD, ALI, SHANONO, 2020; MADENCI, GUVEN, 2015). Dessa forma, as simulações e a disponibilização dos resultados obtidos

pelo uso do software permitem, além da interpretação das informações adquiridas, a possível formação de conclusões a respeito dos diversos parâmetros envolvidos nos processos de transferência de calor aplicados à geometria da cavidade do radiômetro.

2. REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão retomados alguns tópicos e conceitos apresentados na introdução, relacionando-os, de maneira mais profunda, com o trabalho de iniciação científica desenvolvido e permitindo o entendimento da teoria por trás do trabalho. Dessa forma, será possível compreender não só a importância do projeto, mas também o contexto no qual ele está inserido.

2.1 Missão GSST

O projeto de iniciação científica desenvolvido está inserido no contexto de estudo do Sol e suas influências sobre o clima terrestre. Nesse cenário, a missão GSST é a primeira missão brasileira desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que visa o estudo e observação de alta resolução do Sol, para entender a evolução da estrutura magnética dessa estrela e os impactos dela no geoespaço (CARLESSO, 2022). Além desses dois objetivos mencionados, um dos principais objetivos da missão é a compreensão da influência do Sol sobre o clima terrestre a partir da medição precisa da Irradiância Solar Total (TSI), e da observação da variação nos valores medidos, de acordo com os efeitos provocados pelo Sol. (CARLESSO, 2022).

É possível perceber que o trabalho de iniciação científica efetuado se relaciona fortemente com a missão GSST não só no sentido de buscar entendimento da influência solar sobre a Terra, mas principalmente no âmbito de medição da TSI. Dessa forma, o projeto realizado, a partir da compreensão das diversas variáveis associadas à medição dessa irradiância, que estão relacionadas aos mecanismos de transferência de calor e às características do radiômetro de substituição elétrica, e realização de simulações, objetiva auxiliar a missão GSST e se basear nela para a formação de conclusões a respeito da cavidade do radiômetro de substituição elétrica.

2.2 Irradiância Solar Total (TSI)

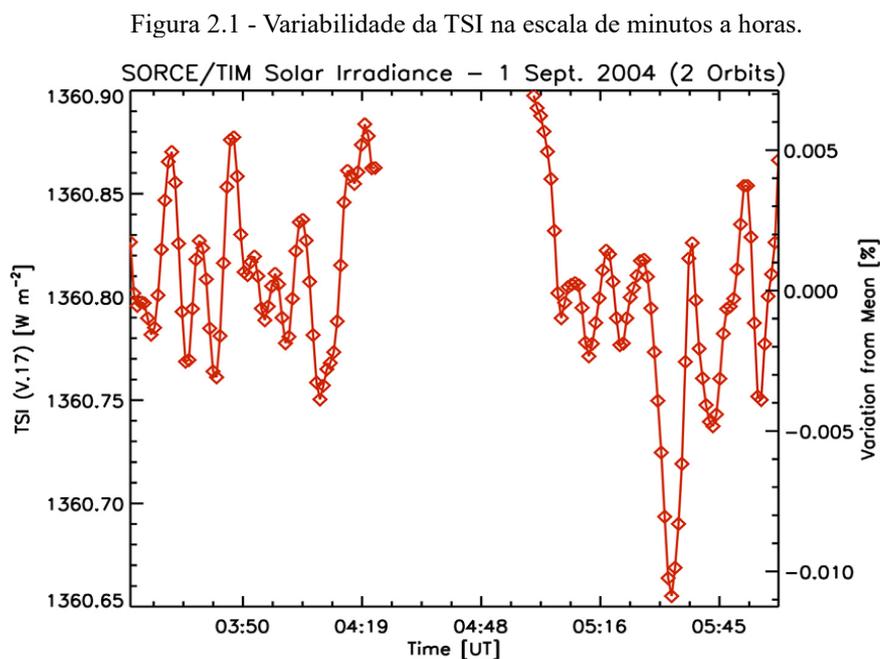
2.2.1 Definição da TSI e sua relação com o clima e o tempo

Conforme mencionado anteriormente, a Irradiância Solar Total (TSI) é a energia radiante espacialmente e espectralmente integrada do Sol à sua distância do planeta Terra de 149.598.500 quilômetros (KOPP, 2018). Em outras palavras, os valores mensurados para a TSI consideram toda a radiação eletromagnética, emitida pelo Sol e que chega à Terra. Assim, todo o espectro eletromagnético é analisado pelos instrumentos de medição

da TSI. Segundo Kren (2015), essa potência solar é responsável por 99,98% de toda a energia, direta ou indireta, que comandam o clima da Terra. Logo, revela-se necessário a medição da TSI para a construção de modelos climáticos e estudo do clima terrestre.

Desde 1978, os instrumentos de medição da TSI são utilizados e posicionados além da atmosfera terrestre, porque a influência desta diminui a precisão na mensuração da TSI. Dessa forma, esses instrumentos são capazes de detectar variações mínimas da TSI, cujo valor médio é 1361 W/m^2 , visto que ocorrem diversos fenômenos no Sol provocadores dessas variações (KOPP,2018). Essas variações podem ser de curto, médio ou longo prazo, podendo ocorrer na escala de minutos e horas ou até na escala de séculos. Segundo Domingo (2009), a correlação dessas variações com o comportamento magnético do Sol, possibilita a estimativa da irradiância solar em períodos anteriores às medições no espaço e, como consequência disso, a construção de modelos climáticos, visto que o clima terrestre varia no longo prazo. Verifica-se, então, a importância de estudar essas variações na TSI.

Na escala de minutos a horas, a TSI varia a nível de 0,01% de seu valor médio e essa variação se dá devido à convecção solar, oscilações e erupções solares (FRÖHLICH, LEAN, 2004). É possível ter uma noção da magnitude dessas variações a partir da imagem abaixo:

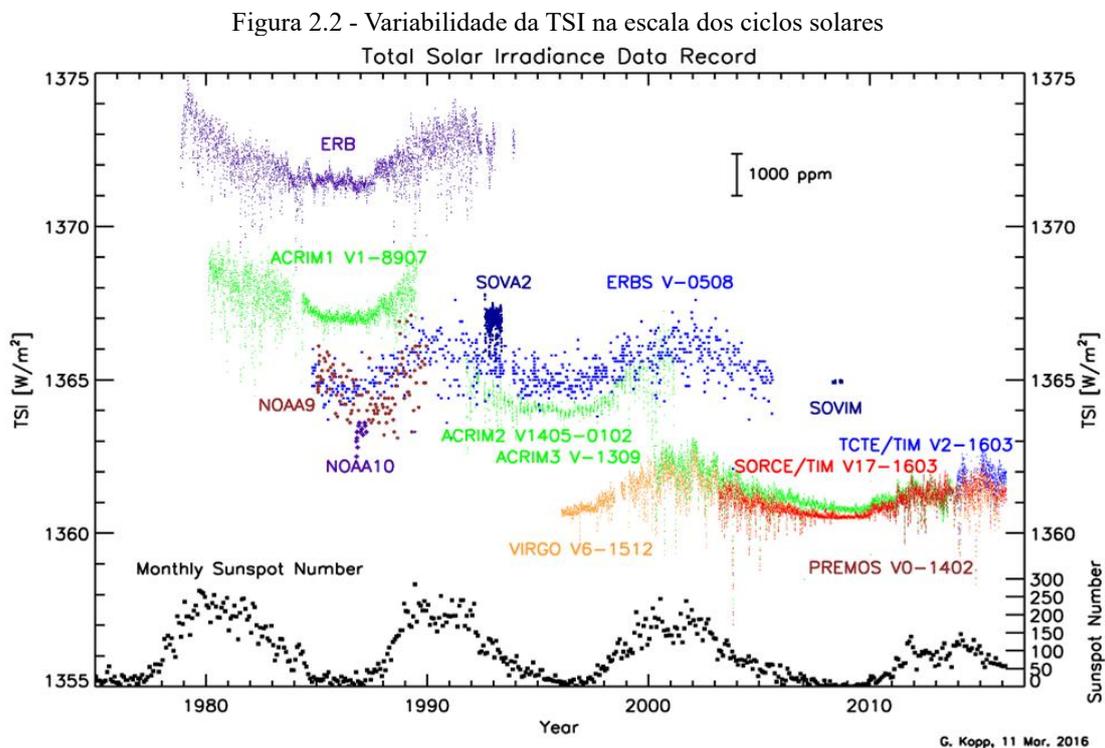


Fonte: Kopp (2018).

Embora os fenômenos mencionados provoquem variação na TSI, essa variação energética é muito baixa comparada com a energia total solar e esses fenômenos ocorrem em períodos muito curtos de tempo. Logo, esses fenômenos não possuem influência direta no clima terrestre (KOPP, 2018).

Na escala de tempo de 27 dias, o tempo da rotação solar, a variabilidade da TSI é explicada pelo aparecimento e desaparecimento de manchas e fáculas solares (LEAN, 2010). Nesse período, a TSI varia, normalmente, a nível de 0,1%. Essas variações solares podem afetar a atmosfera terrestre, no entanto, ainda são rápidas demais para afetar o clima terrestre ou verificar alteração na temperatura global.

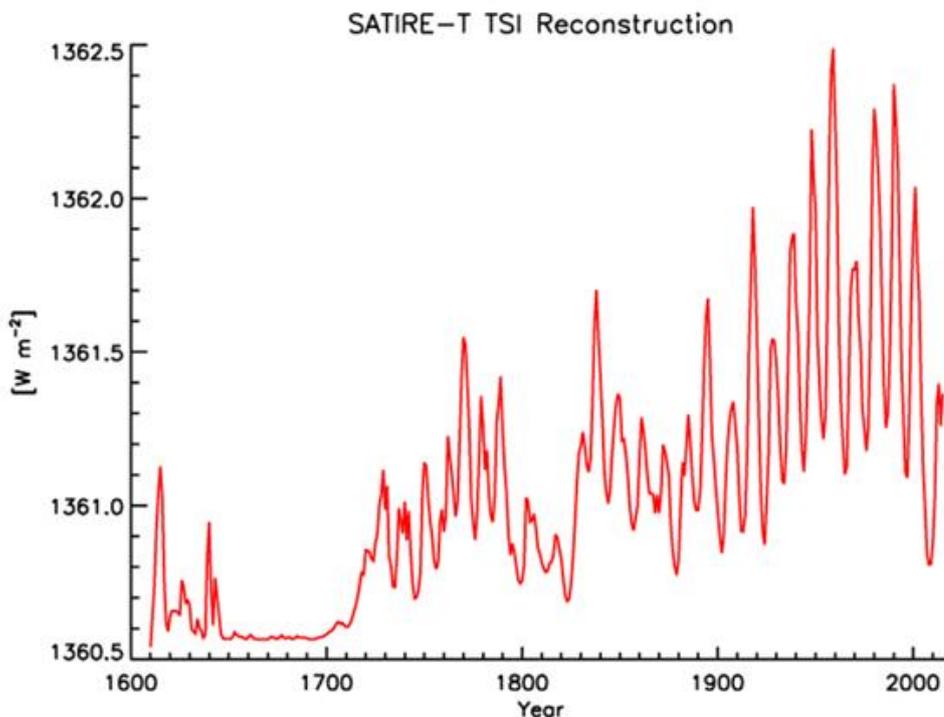
Na escala de tempo de 11 anos, o tempo de um ciclo solar, a TSI também varia a nível de 0,1% (KOPP, 2018). Essas variações ao longo desse período possuem magnitude e duração suficientes para impactarem o clima terrestre, provocando alterações na temperatura global, em temperaturas regionais, no nível do mar e até na quantidade de chuvas (LEAN, 2010; LEAN, RIND, 2008; GRAY et al., 2010). A imagem a seguir expõe a variação da TSI com os ciclos solares, com base no instrumento utilizado para medição:



Fonte: Kopp (2018).

Embora ainda não existam registros da medição da TSI na escala de tempo de séculos, sabe-se que o clima é afetado pelo comportamento do Sol desenvolvido nesse período. Dessa forma, são feitas reconstruções da TSI para sua estimativa em épocas anteriores à sua medição. Para isso, vários métodos são utilizados e, entre eles, está a correlação das manchas solares com a TSI. Como o número e tamanho de manchas solares são registrados há séculos, torna-se possível realizar essa correlação. Um exemplo dessas reconstruções encontra-se abaixo:

Figura 2.3 - Reconstrução da TSI a partir do registro de manchas solares



Fonte: Kopp (2018).

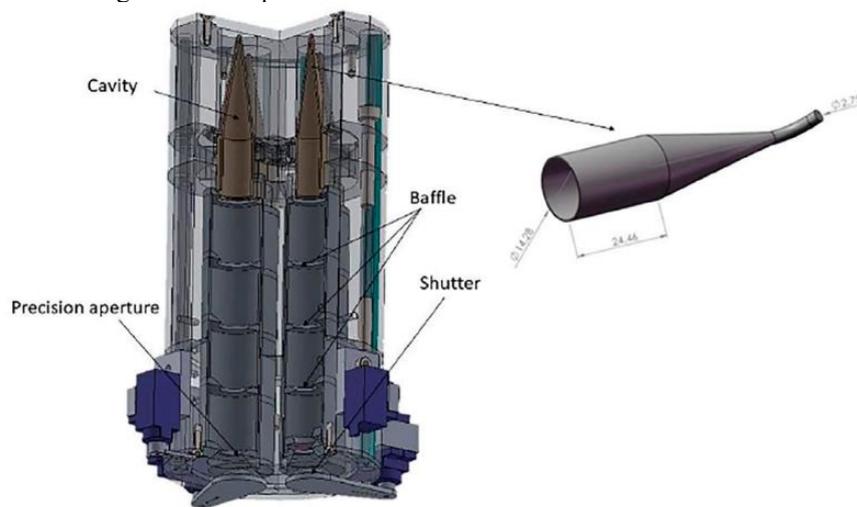
De forma geral, períodos de baixa atividade solar corresponderam a períodos com temperaturas médias globais mais baixas (EDDY, 1976). A partir do conteúdo exposto anteriormente, é notável a relevância de se medir a TSI. Nesse sentido, o principal instrumento utilizado na medição da TSI é o radiômetro de substituição elétrica.

2.2.2 Medição da TSI: radiômetros de substituição elétrica

Para que seja possível detectar as pequenas variações que ocorrem nas diversas escalas de tempo de medição da TSI, é vital que os instrumentos de mensuração sejam

suficientemente estáveis e precisos a ponto de que as incertezas envolvidas nas medições sejam muito menores que as variações detectadas (KOPP, 2018). Dessa forma, dentre os diversos radiômetros utilizados para a mensuração da TSI, todos se baseiam na precisão e estabilidade dos bolômetros (KOPP, 2018). Estes absorvem a energia solar radiante a partir da cavidade do radiômetro e a transformam em energia térmica (KOPP, 2018). Nos radiômetros, a abertura para a entrada da luz solar é controlada, assim a razão entre a energia incidente advinda do Sol e a área de abertura do instrumento fornece o valor da TSI. A imagem abaixo retrata um radiômetro, explicitando algumas de suas partes:

Figura 2.4 - Esquema da cavidade de um radiômetro.

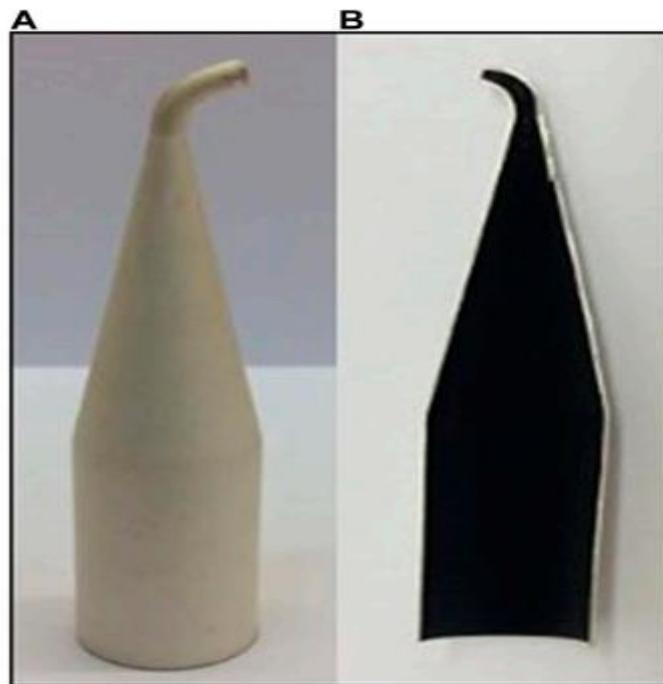


Fonte: Carlesso et al. (2022).

A maioria dos instrumentos medidores da TSI são radiômetros de substituição elétrica (KOPP, 2018). Esses dispositivos funcionam a partir da manutenção da cavidade à temperatura constante, a partir da passagem de corrente elétrica. Assim, quando ocorre a incidência de energia solar, a corrente elétrica deve variar de maneira a manter a temperatura da cavidade constante. A partir dessa variação, descobre-se o quanto de energia é proveniente do Sol (KOPP, 2018; CARLESSO et al., 2021, 2022). Esses instrumentos são constituídos por mais de uma cavidade, visto que, conforme se utiliza a cavidade, ela se degrada devido à ação do Sol. Dessa forma, a cavidade menos utilizada no radiômetro serve como referência para permitir correções à cavidade que está mais degradada (KOPP, 2018; CARLESSO et al., 2021, 2022).

Para o projeto de iniciação científica realizado, a cavidade do radiômetro foi importante objeto de estudo, porque as simulações realizadas no ANSYS utilizaram a geometria dessa cavidade, permitindo, assim, a obtenção de resultados relacionados às características da cavidade. Então, revela-se essencial a exposição das seguintes informações a respeito das cavidades de radiômetro: as cavidades do radiômetro são normalmente constituídas de prata (CARLESSO et al., 2022; SONG et al., 2021; WALTER et al. , 2017) para que a energia térmica seja facilmente distribuída ao longo da cavidade e não concentrada em determinadas regiões; diversas cavidades possuem um fino revestimento de Níquel-Fósforo (Ni-P) que permite boa absorção da energia solar (KOPP, 2018; CARLESSO et al., 2020, 2022); e as cavidades possuem dimensões pequenas, na ordem de milímetros. As dimensões de cavidade utilizadas nas simulações serão especificadas na seção de resultados das simulações. A imagem abaixo permite a visualização de uma cavidade de radiômetro:

Figura 2.5 - Cavidade de radiômetro de prata com revestimento interno de Ni-P



Fonte: Carlesso et al. (2021).

O conteúdo acerca das cavidades dos radiômetros de substituição elétrica apresentado anteriormente é indispensável não só para o entendimento das simulações de transferência de calor realizadas neste trabalho, como também a interpretação de

resultados e formação de conclusões. Portanto, a compreensão das características da cavidade de um radiômetro aliado ao conhecimento a respeito dos mecanismos de transferência de calor está no centro do desenvolvimento do projeto de iniciação científico.

2.3 Transferência de Calor

A transferência de calor trata sobre a geração, troca e conversão de calor entre um sistema e outro ou entre um sistema e suas vizinhanças e, nesse contexto, calor é definido como energia térmica em transmissão. Diferentemente da termodinâmica, a ciência da transferência de calor possui como objetivo a determinação das taxas de transferência de energia térmica. Essa transferência de calor ocorre devido à diferença de temperatura entre dois meios, sendo que o meio de maior temperatura transfere calor para o meio de menor temperatura, processo que só se encerra com os dois meios adquirindo a mesma temperatura. Além disso, a transferência de calor pode ocorrer de três maneiras distintas: a condução, a convecção e a radiação (ÇENGEL, GHAJAR, 2012; INCROPERA et al., 2003). Portanto, o entendimento de como se dá a transferência de energia para cada modo, aliado à compreensão do equacionamento e as diversas variáveis associadas a esses mecanismos de transferência de calor são necessários para a realização das simulações no ANSYS e interpretação dos resultados.

2.3.1 Condução

O primeiro modo de transferência de calor citado é a condução e ela consiste na transferência de energia a partir da interação de partículas mais energéticas com partículas adjacentes menos energética, podendo ocorrer em um meio sólido, líquido ou gasoso. Segundo Çengel e Ghajar (2012): “a taxa de condução de calor por um meio depende da geometria, da espessura, do tipo de material e da diferença de temperatura a que o meio está submetido.” Essa expressão também pode ser entendida a partir da análise do equacionamento da taxa de condução de calor, chamada de lei de Fourier da condução térmica, apresentada abaixo:

$$\dot{Q}_{cond.} = -kA \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad (2.1)$$

Na equação, $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura ou a taxa de variação da temperatura com relação à direção x , A é a área de transferência térmica perpendicular à direção da transferência de calor e k é a condutividade térmica do material (ÇENGEL, GHAJAR, 2012). Assim é possível perceber que, quanto maiores forem essas variáveis, maior será a taxa de transferência de calor. A unidade da taxa no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o Watt (W). A condutividade térmica é a capacidade que um material tem de conduzir calor, portanto valores maiores de condutividade térmica descrevem bons condutores, enquanto valores menores indicam que um material é isolante. Dessa forma, essa variável se apresentou como uma das mais importantes no desenvolvimento e realização das simulações no ANSYS. Além disso, serão realizadas análises em relação à condutividade térmica no capítulo de discussão de resultados que permitem a interpretação de resultados e a elaboração de conclusões.

2.3.2 Convecção

A convecção é o modo de transferência de calor que se dá a partir do contato entre um fluido em movimento e uma superfície sólida, quando os dois estão a temperaturas diferentes (INCROPERA et al., 2003). Segundo Incropera et al. (2003), ela pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido, podendo ser considerada forçada ou livre. A convecção forçada indica que a movimentação do fluido é forçada a partir de um meio externo, como exemplo pode-se citar tanto o funcionamento de um ventilador quanto a ação do vento. Já a convecção livre ou natural ocorre por causa da diferença de densidades no fluido devido às variações de temperatura causadas pelo contato do fluido com a superfície sólida (ÇENGEL, GHAJAR, 2012; INCROPERA et al. 2003). Segundo Çengel e Ghajar (2012), a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido e pode ser expressa pela lei de resfriamento de Newton, apresentada a seguir:

$$\dot{Q}_{conv.} = hA(T_s - T_\infty) \quad [W] \quad (2.2)$$

Na expressão, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, que é um parâmetro que depende da geometria da superfície, da natureza do escoamento e de propriedades do fluido. Além disso, A é a área da superfície na qual ocorre a convecção,

T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do fluido distante da superfície (ÇENGEL, GHAJAR, 2012). A unidade dessa taxa no SI é o Watt. Essas variáveis estiveram presentes nas diversas simulações realizadas, portanto é importante saber relacionar a expressão da transferência de energia por convecção com os resultados obtidos, para que seja possível a compreensão das influências desse mecanismo nas trocas de calor.

2.3.3 Radiação

O último mecanismo de transferência de calor é a radiação. A radiação é a energia emitida por ondas eletromagnéticas devido a mudanças nas configurações eletrônicas de átomos e moléculas. A radiação térmica é emitida por toda matéria que possui temperatura diferente de zero Kelvin (K) e ela não depende de um meio físico para ocorrer, diferentemente da condução e convecção. Assim, a transferência de energia por radiação pode acontecer no vácuo, que é a maneira pela qual a energia do Sol chega ao planeta Terra. É vital a compreensão de que a radiação térmica é um tipo específico de radiação, sendo diferente, portanto, de outras formas de radiação como os raios-X, os raios gama e as micro-ondas, por exemplo (ÇENGEL, GHAJAR, 2012; INCROPERA et al., 2003). Como um corpo emite e recebe energia na forma de radiação térmica, torna-se conveniente utilizar expressões que consideram a taxa de transferência de calor líquida por radiação, conforme a equação abaixo, desenvolvida a partir da lei de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{rad.} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad [\text{W}] \quad (2.3)$$

Na equação, ε é a emissividade da superfície do corpo, propriedade que depende das características da superfície e do material e que possui um valor que está entre 0 e 1. Além disso, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, A é a área da superfície na qual ocorre a transferência de energia por radiação, T_s é a temperatura da superfície e T_{viz} é a temperatura das vizinhanças e, no SI, a unidade da taxa é o Watt (ÇENGEL, GHAJAR, 2012). Dessa forma, se um corpo estiver em uma temperatura maior que suas vizinhanças, suas superfícies emitem mais energia na forma de radiação do que absorvem. Portanto, é vital o entendimento de como essas variáveis se relacionam com as trocas de calor presentes nas simulações desenvolvidas no projeto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo será explicado novamente como funciona o software ANSYS, utilizado para realizar as simulações de transferência de calor e será detalhado qual foi a metodologia e o procedimento adotado ao longo do projeto para que fosse possível a formação de conclusões a respeito dos temas estudados.

3.1 Software ANSYS

O software ANSYS foi utilizado para a execução das simulações de transferência de calor deste trabalho de iniciação científica. Esse software permite a resolução de diversos problemas complexos de engenharia com condições de contorno a partir do método de Análise de Elementos Finitos (FEA), método que explica o funcionamento do software (MUHAMMAD, ALI, SHANONO, 2020; MUHAMMAD, ALI, 2019; MADENCI, GUVEN, 2015). Esse método é uma ferramenta computacional e ele consiste na geração de malha a partir de uma geometria, ou seja, o método divide o sistema em várias subdivisões menores ou elementos mais simples para, a partir de métodos numéricos, resolver as diversas equações associadas ao problema em questão. Assim, a FEA permite a modelagem e resolução de vários fenômenos físicos associados a problemas de engenharia (MUHAMMAD, ALI, SHANONO, 2020; MUHAMMAD, ALI, 2019; MADENCI, GUVEN, 2015).

Inicialmente, realizou-se a tentativa de obter a licença dos softwares ópticos pagos do ANSYS (SPEOS, Lumerical e Zemax) para realizar as simulações ópticas para o interferômetro Mach-Zehnder, porém a tentativa não obteve êxito. Dessa forma, o ANSYS Mechanical foi o software utilizado neste projeto, porque o software permite a realização de simulações de transferência de calor e está presente no ANSYS Workbench, plataforma grátis e disponível para estudantes, sendo possível utilizá-lo por tempo limitado. Na versão do ano de 2023, essa plataforma disponibiliza vários pacotes de software que permitem desde a resolução de problemas de transferência de calor até problemas mecânicos ou de fluidodinâmica.

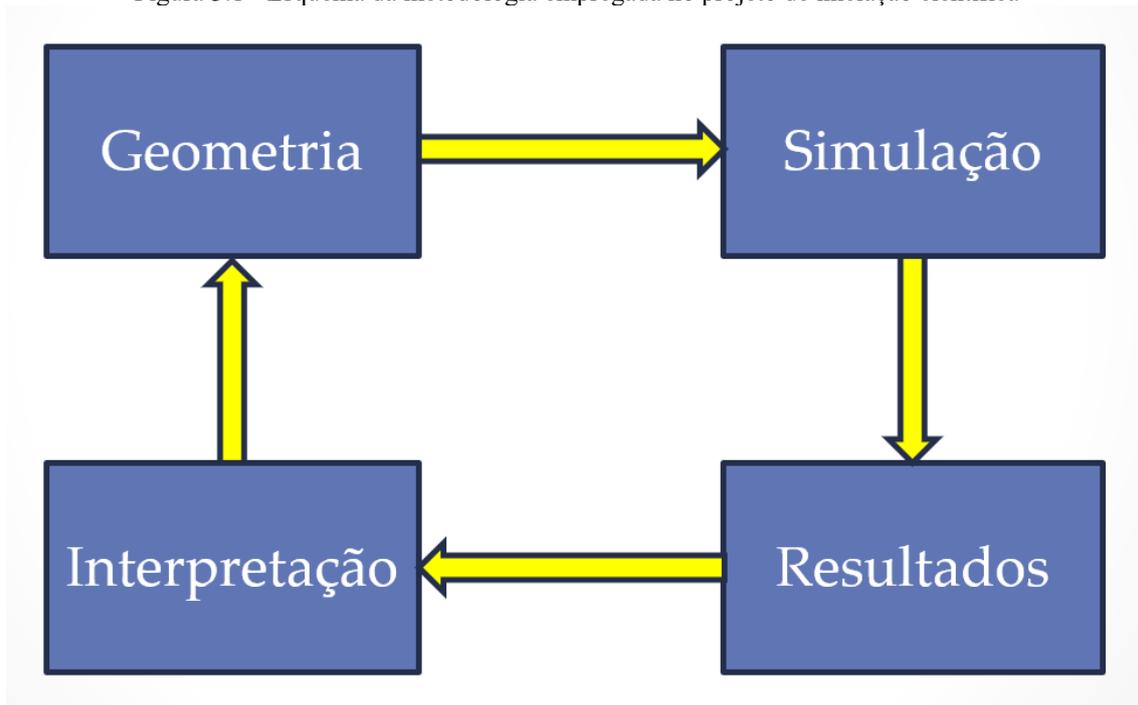
Além disso, através de seu site, o ANSYS providencia não somente fóruns online para auxílio dos estudantes que utilizam os softwares de simulação, como também vídeos explicativos para a compreensão das interfaces de simulação e da teoria envolvida em cada tipo de simulação. Logo, a utilização dos recursos do ANSYS permitiu um processo

de aprendizagem gradual e completo desde o conteúdo teórico até a aplicação deste conteúdo nas simulações.

3.2 Metodologia

Como o projeto de iniciação científica consistiu em realizar inúmeras simulações no software do ANSYS, foi adotado uma metodologia circular que permitiu o aprendizado gradual tanto em relação à interface e opções da plataforma de simulação, quanto aos processos de transferência de calor e suas variáveis. Desse modo, a metodologia empregada consistiu em ciclos formados por quatro etapas: a escolha da geometria para a simulação; a determinação e o ajuste dos vários parâmetros relacionados à simulação de transferência de calor; a obtenção e organização dos resultados da simulação por meio de imagens e tabelas; e a interpretação dos resultados para a possível formação de conclusões. O esquema abaixo ilustra o procedimento circular mencionado:

Figura 3.1 - Esquema da metodologia empregada no projeto de iniciação científica



Fonte: produção do autor.

A escolha da geometria para a realização da simulação é a primeira etapa desse ciclo que se repetiu diversas vezes no desenvolvimento do projeto. Essa etapa diz respeito à criação da geometria no software de desenho do ANSYS ou à importação da geometria

à interface de simulação. Nos primeiros meses do projeto, trabalhou-se com geometrias simples como, por exemplo, placas e cubos, que permitiram a compreensão inicial de como funcionavam as simulações no ANSYS e a relação dessas simulações com os mecanismos de transferência de calor. Posteriormente, foi utilizada a geometria de cavidade de radiômetro, desenvolvida pela coorientadora Dra. Franciele Carlesso, nas simulações, fato que permitiu a elaboração de conclusões para o trabalho.

A segunda etapa desse procedimento cíclico é a determinação dos parâmetros e do que é desejado simular no software do ANSYS. Essa etapa consistiu em escolher o que se deseja simular em relação à geometria utilizada, ou seja, escolhia-se as condições nas quais a geometria estaria submetida, como, por exemplo, um fluxo de calor, ou uma temperatura fixa, entre outras diversas opções. Além disso, era necessário habilitar e ajustar os mecanismos de transferência de calor da simulação, sendo determinados vários parâmetros como o material da geometria, diretamente relacionado à condutividade térmica, e o coeficiente convectivo de transferência de calor.

Após a escolha do que se objetiva simular, realiza-se a simulação e obtém-se os resultados. A obtenção e organização dos resultados é a terceira etapa da metodologia cíclica. Para as múltiplas simulações executadas no projeto, frequentemente obteve-se os resultados por meio de imagens que representavam a distribuição de temperaturas na geometria utilizada. Dessa forma, organizava-se as informações contidas nessas imagens na forma de tabelas que facilitavam a leitura dos resultados, relacionando-os com parâmetros de interesse na simulação.

A última etapa é a interpretação dos resultados. Essa etapa é a mais complexa do ciclo, porque ela depende das outras etapas. Para que seja possível interpretar os resultados obtidos, é necessário ter em mente tudo o que foi realizado nos passos anteriores, além de conhecer os mecanismos e variáveis da transferência de calor. Durante a realização deste trabalho, esse passo normalmente consistiu na comparação entre simulações que são muito similares, no entanto, se diferem em relação a uma variável. Portanto, era possível interpretar os resultados a partir da análise dessa variável, diminuindo a complexidade do problema.

Verifica-se que, a partir da metodologia empregada, foi possível aumentar a complexidade das simulações gradualmente, conforme avançava-se o entendimento em

relação ao software do ANSYS e ao estudo da transferência de calor. Logo, essa metodologia circular foi vital para a formação de conclusões a respeito dos processos de troca de calor na geometria da cavidade de radiômetro.

4. RESULTADOS

Este capítulo está dedicado à apresentação de resultados obtidos a partir das simulações realizadas no ANSYS. Como foram feitas diversas simulações no período de execução deste trabalho, apenas algumas simulações serão expostas no capítulo, tentando-se mostrar o máximo número de simulações de caráter relevante e que foram importantes para a evolução do projeto. Desse modo, as simulações estarão expostas a seguir em ordem cronológica, explicitando-se o que foi simulado e os resultados obtidos. O capítulo não contemplará as interpretações dos resultados, visto que há um capítulo dedicado para a discussão dos resultados.

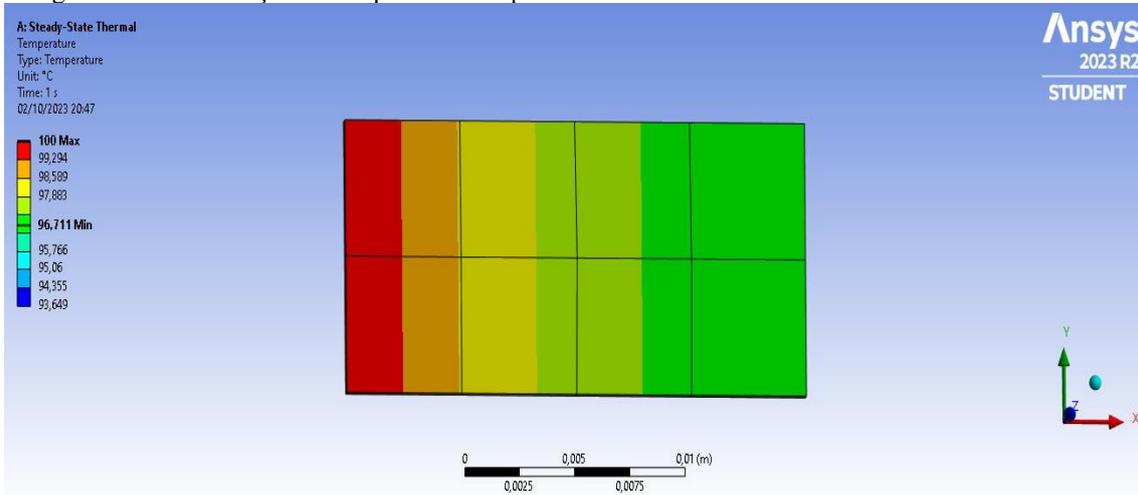
4.1 Simulação 1: 03/10/2023

Esta simulação foi uma das primeiras realizadas, portanto ela possui caráter mais simples. O objetivo da simulação era verificar a influência que a temperatura ambiente e o coeficiente convectivo possuem em relação à quantidade de calor transferido.

A simulação consistia na aplicação de uma temperatura fixa de 100°C em uma face de uma fina placa de 1cm x 2cm, com 0,1 mm de espessura. A simulação foi realizada considerando estado estacionário, ou seja, as variáveis do sistema, como a temperatura não variam mais com o tempo. Assim, é possível afirmar que, no estado estacionário, a temperatura fixa de 100°C foi aplicada por tanto tempo que a temperatura ao longo da geometria da placa não varia mais com o tempo. O aço, cuja condutividade térmica é de 50,44 W/(m°C), foi considerado como o material da placa. Todos os valores de condutividade térmica presentes neste relatório foram disponibilizados pela base de dados do software do ANSYS, não sendo necessário importar dados de outras referências e facilitando a realização das simulações. Não foram considerados os efeitos da perda de calor por radiação na simulação 1.

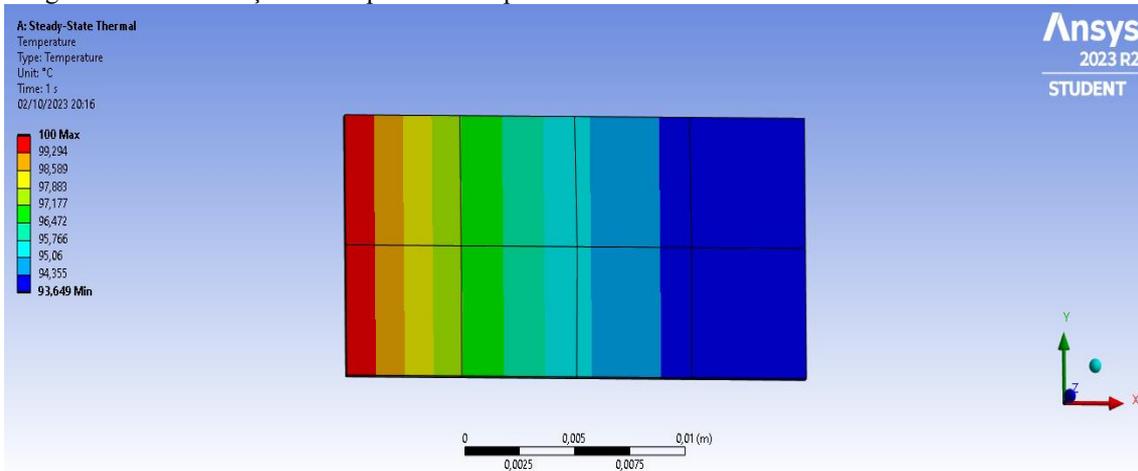
As imagens de distribuição de temperatura e a tabela contendo os parâmetros que sofreram variação e as temperaturas máximas e mínimas atingidas pela geometria para cada condição simulada encontram-se abaixo:

Figura 4.1 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 22°C e coeficiente convectivo de 5 W/m²C.



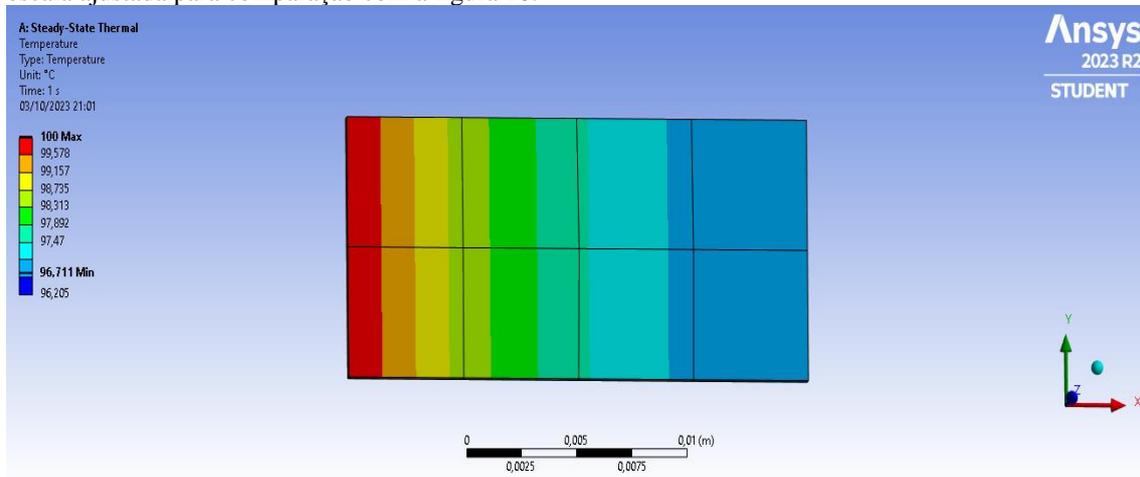
Fonte: produção do autor.

Figura 4.2 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 22°C e coeficiente convectivo de 10 W/m²C.



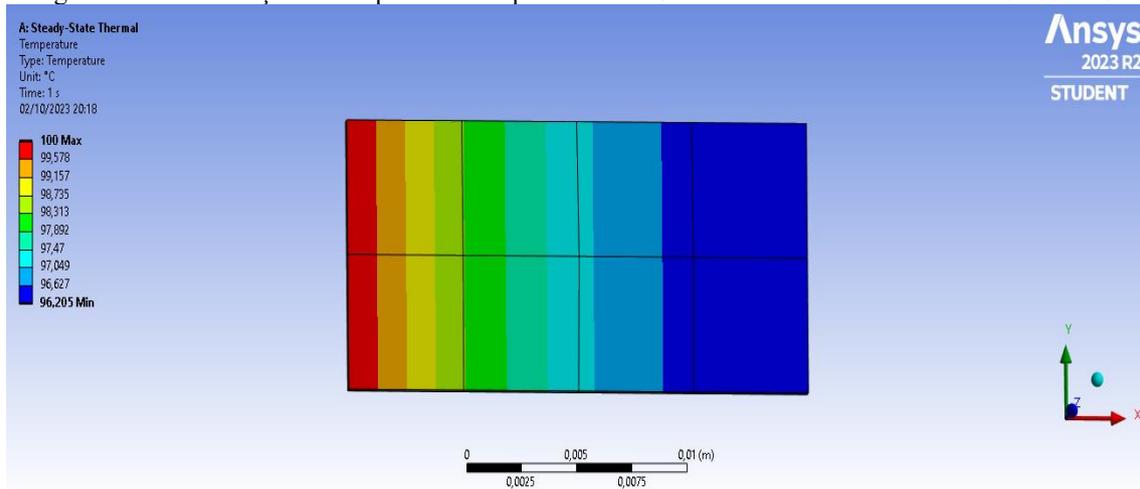
Fonte: produção do autor.

Figura 4.3 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 22°C e coeficiente convectivo de 5 W/m²°C, com escala ajustada para comparação com a figura 10.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.4 - Distribuição de temperaturas da placa fina a 10°C e coeficiente convectivo de 5 W/m²°C.



Fonte: produção do autor.

Tabela 4.1 - Resultados da simulação 1

Temperatura ambiente (°C)	Coefficiente convectivo (W/m ² °C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
22	5	100	96,711
22	10	100	93,649
10	5	100	96,205

Fonte: produção do autor.

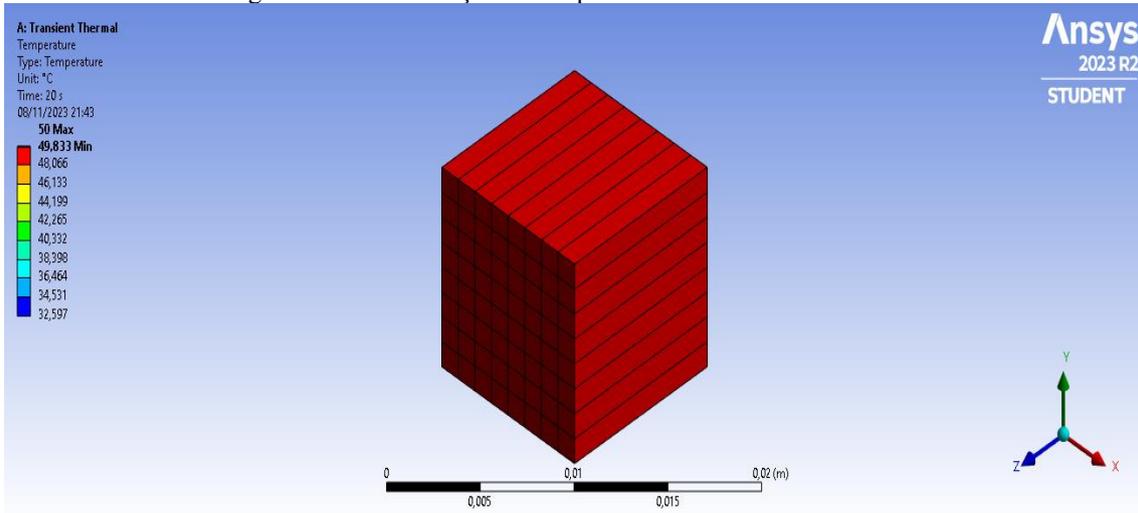
4.2 Simulação 2: 08/11/2023

Embora a simulação 2 apresente uma evolução relacionada à geometria utilizada, quando comparada à simulação 1, ela ainda possui caráter simples, pois ela foi realizada nos primeiros meses do projeto de iniciação científica. Nesta simulação a geometria utilizada é de um cubo. O objetivo da simulação 2 era de analisar a influência das dimensões da geometria sobre as trocas de calor entre objeto e ambiente. Então decidiu-se utilizar um cubo de 1000 mm³, outro de 8000 mm³ e outro de 27000 mm³.

Essa simulação consistiu, novamente, na aplicação de uma temperatura fixa em uma face da geometria, porém a temperatura utilizada foi de 50°C. Desta vez, a simulação realizada considerou que o sistema estava em regime transiente, ou seja, ainda não se atingiu o estado estacionário. Nesse tipo de simulação, deve ser definido o instante de tempo em que se obtém os resultados. No caso da simulação 2, foi considerado que a temperatura fixa de 50°C foi aplicada por 20 segundos e analisou-se a distribuição de temperatura na geometria nesse instante. O coeficiente convectivo utilizado foi de 5 W/m²°C, que é um valor estimado para o coeficiente convectivo em um ambiente com ar estagnado. Além disso, considerou-se que a temperatura ambiente era de 22°C e o material escolhido para as geometrias era um aço de condutividade térmica de 60,5 W/m°C. Novamente, não foram considerados os efeitos da radiação.

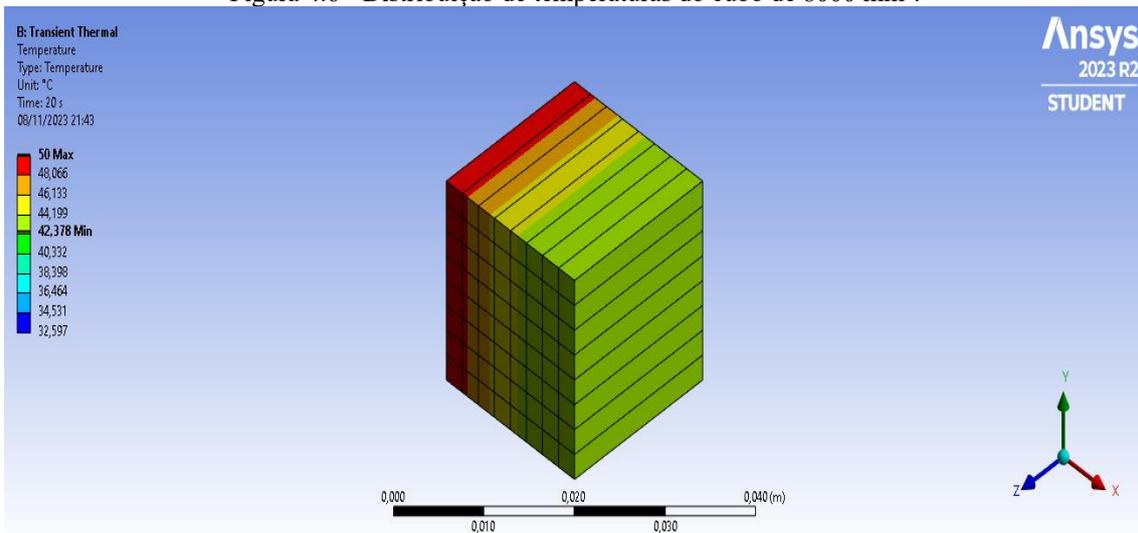
Abaixo encontram-se as imagens de distribuição de temperatura para as três geometrias utilizadas na simulação e uma tabela indicando os valores de temperatura máxima e mínima atingidas para cada geometria, além da diferença entre esses valores:

Figura 4.5 - Distribuição de temperaturas do cubo de 1000 mm³.



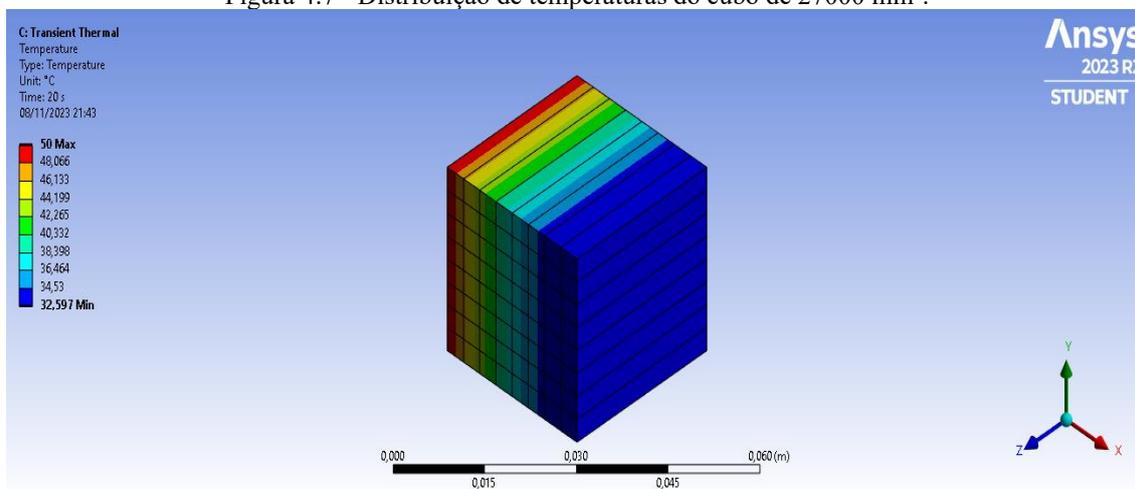
Fonte: produção do autor.

Figura 4.6 - Distribuição de temperaturas do cubo de 8000 mm³.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.7 - Distribuição de temperaturas do cubo de 27000 mm³.



Fonte: produção do autor.

Tabela 4.2 - Resultados da simulação 2

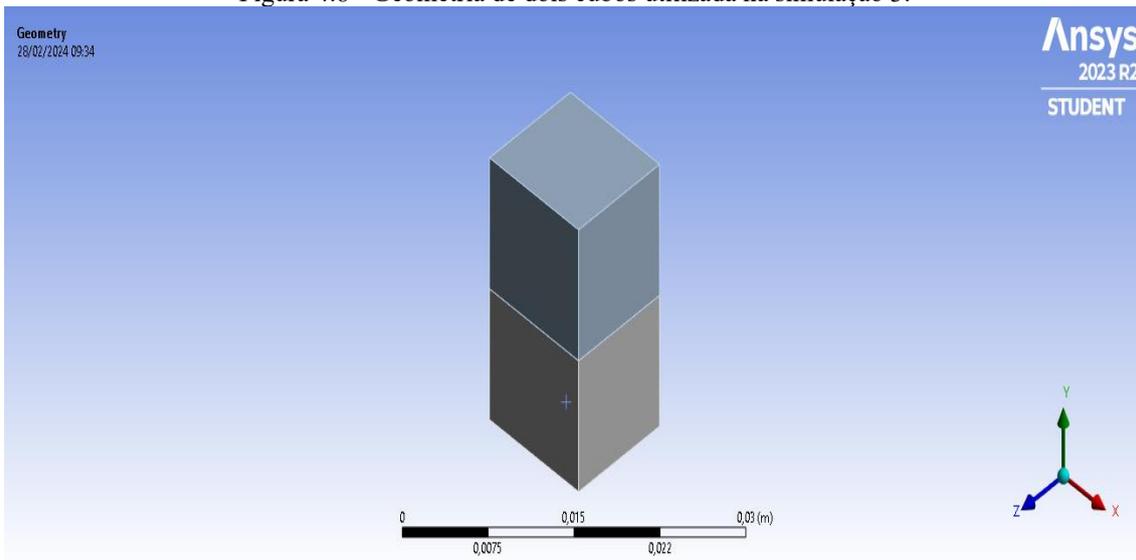
Volume do cubo (mm ³)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Diferença entre temperatura máx. e mín. (°C)
1000	50	49,833	0,167
8000	50	42,378	7,622
27000	50	32,597	17,403

Fonte: produção do autor.

4.3 Simulação 3: 28/02/2024

A partir da simulação 3, foi demonstrado novamente uma evolução em relação à simulação anterior, deixando evidente o aumento gradual da complexidade das simulações. Na simulação 3 trabalhou-se com dois cubos de 10 mm x 10 mm x 10 mm acoplados, formando um paralelepípedo. A principal diferença entre se trabalhar com duas geometrias acopladas ao invés de uma inteira é a possibilidade de atribuir materiais diferentes para cada geometria. Dessa forma, o objetivo da simulação 3 é notar de que maneira a troca de materiais ao longo de um corpo pode influenciar os mecanismos de transferência de calor. É possível visualizar o paralelepípedo, dividido em dois cubos de materiais diferentes, mencionado anteriormente na imagem abaixo:

Figura 4.8 - Geometria de dois cubos utilizada na simulação 3.

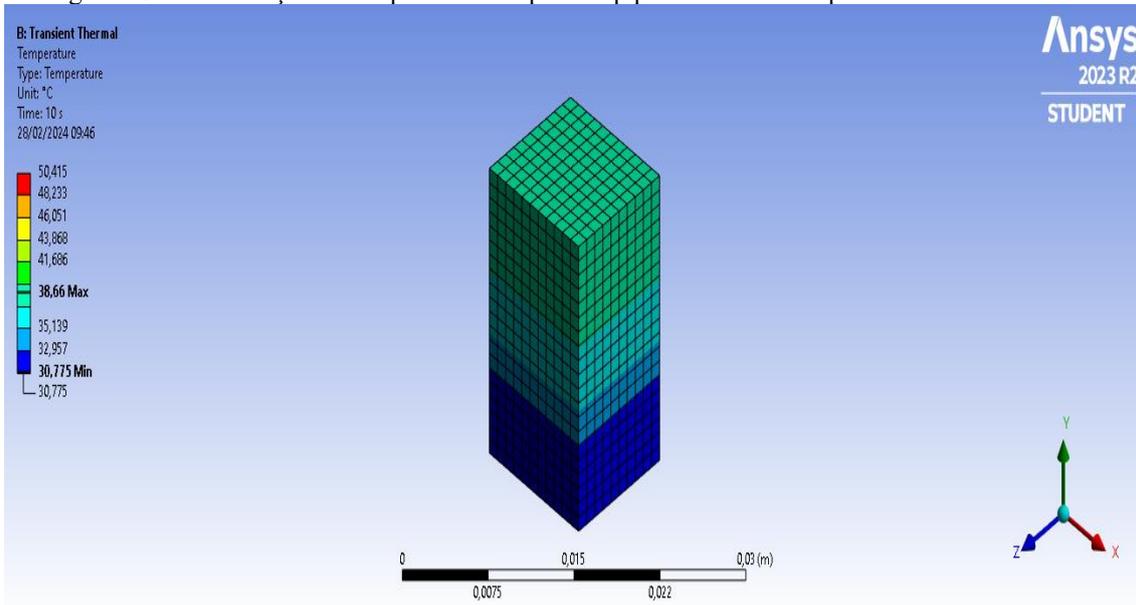


Fonte: produção do autor.

Nessa simulação, variou-se a face da geometria a qual recebe uma taxa de calor de 10 W. Assim, foi possível verificar que tipos de influência o material da face receptora da taxa exerce sobre os processos de transferência de calor. A simulação foi realizada em regime transiente, analisando-se o sistema no instante de 10 segundos e considerou-se que o ambiente era composto por ar estagnado (coeficiente convectivo igual a $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$) a uma temperatura de 22°C . Os materiais que compõem os cubos são o óxido de alumínio (Al_2O_3), de condutividade térmica de $35,00 \text{ W/m}^2\text{°C}$, e o cobre (Cu), de condutividade térmica de $400,00 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Na simulação, ainda não foi considerada as perdas de calor por radiação.

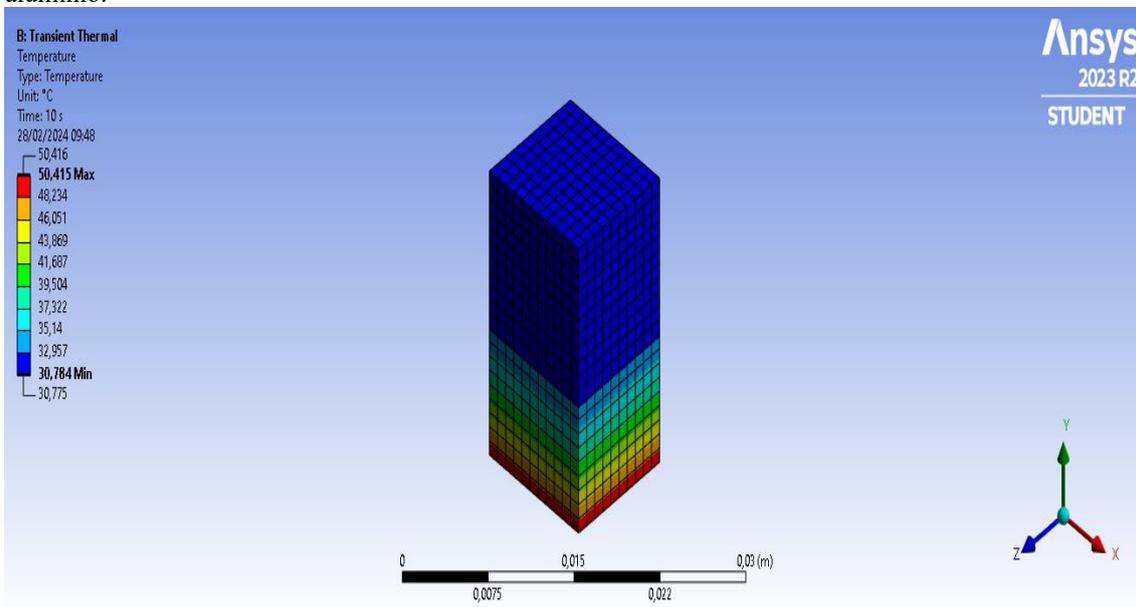
As imagens abaixo permitem a visualização da distribuição de temperaturas da geometria para as duas maneiras na qual a taxa de calor foi aplicada. Além disso, abaixo encontra-se a tabela dos resultados dessa simulação, que explicita o material da face que recebe a taxa, as temperaturas máxima e mínima atingidas e a diferença entre as duas:

Figura 4.9 - Distribuição de temperaturas do paralelepípedo com a taxa aplicada no cubo de cobre.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.10 - Distribuição de temperaturas do paralelepípedo com a taxa aplicada no cubo de óxido de alumínio.



Fonte: produção do autor.

Tabela 4.3 - Resultados da simulação 3			
Material da face receptora da taxa	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Diferença entre temperatura máx. e mín. (°C)
Cu	38,660	30,775	7,885
Al ₂ O ₃	50,415	30,784	19,631

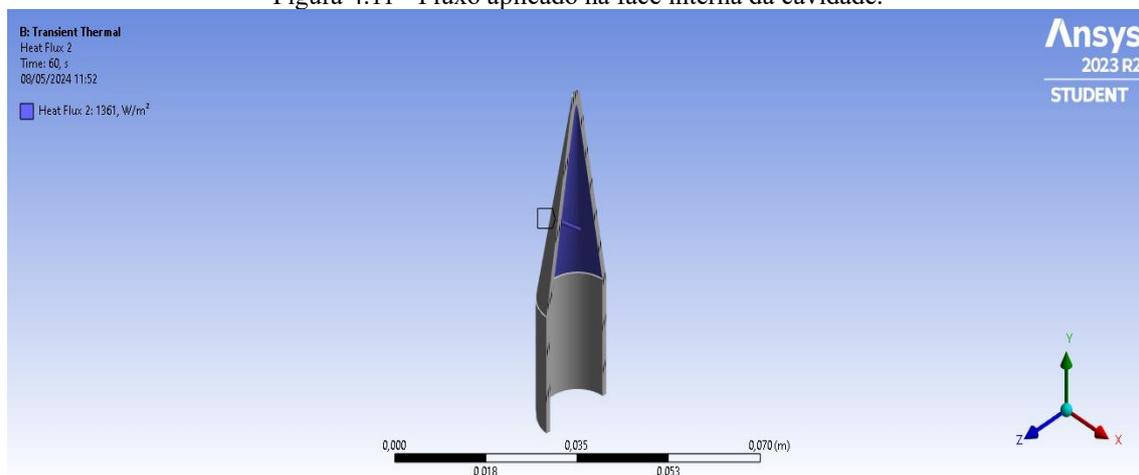
Fonte: produção do autor.

4.4 Simulação 4: 16/05/2024

A simulação 4 foi uma das primeiras simulações realizadas no projeto que utilizaram a geometria da cavidade do radiômetro, representando um grande avanço em relação às simulações mais simples de geometrias menos complexas. Com o conhecimento adquirido através de todas as simulações anteriores à simulação 4, tornou-se viável iniciar a execução e análise de simulações de transferência de calor na cavidade do radiômetro. A geometria da cavidade utilizada para as simulações possui 2mm de espessura, 14 mm de diâmetro na parte cilíndrica de 23 mm de altura e uma parcela cônica de 40 mm de altura.

A simulação 4 consistiu na aplicação de um fluxo de calor de 1361 W/m², o valor médio para a TSI, segundo Kopp (2018), na região interior da geometria, simulando a energia radiante do Sol atingindo a cavidade, conforme a figura abaixo:

Figura 4.11 - Fluxo aplicado na face interna da cavidade.

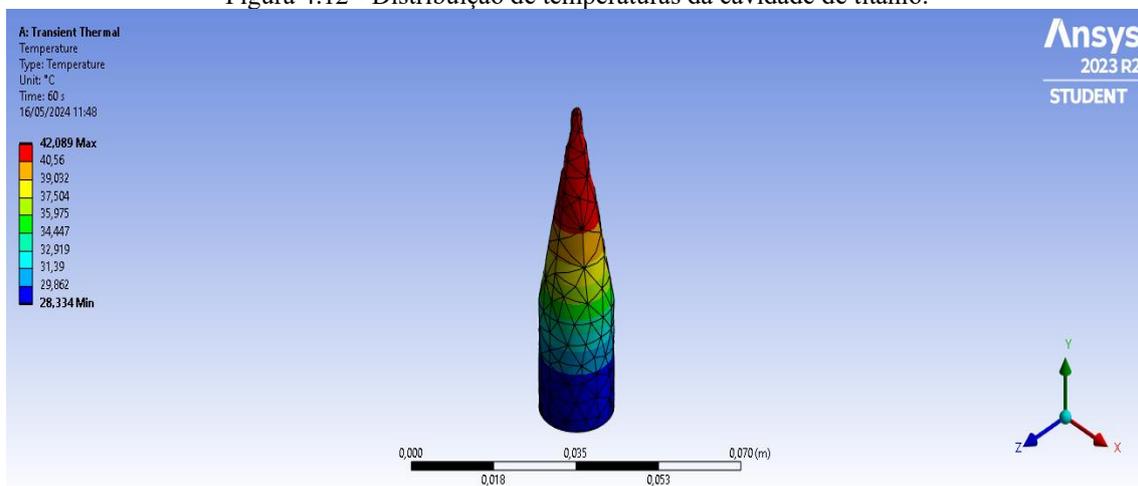


Fonte: produção do autor.

Além disso, fez-se essa simulação para três materiais diferentes: o titânio (Ti), de condutividade térmica de 21,00 W/m°C, o alumínio (Al), de condutividade de 237,50 W/m°C, e a prata (Ag), de condutividade de 429,00 W/m°C. Considerou-se realizar uma análise de regime transiente no instante de 60 segundos, porque este é um tempo comum para a exposição da cavidade a partir da abertura do radiômetro (MEFTAH et al. 2011). Manteve-se as características de simulação relacionadas à convecção, ou seja, utilizou-se 22°C como a temperatura ambiente e o coeficiente convectivo utilizado foi de 5 W/m²°C. Além disso, nesse momento do projeto, já havia sido incorporado as trocas de calor por radiação nas simulações. Assim, essa simulação considera as perdas de energia por radiação, sendo necessário determinar as emissividades para cada material utilizado. Os valores da emissividade para o titânio, o alumínio e a prata são 0,63, 0,04 e 0,02, respectivamente (ÇENGEL, GHAJAR, 2012).

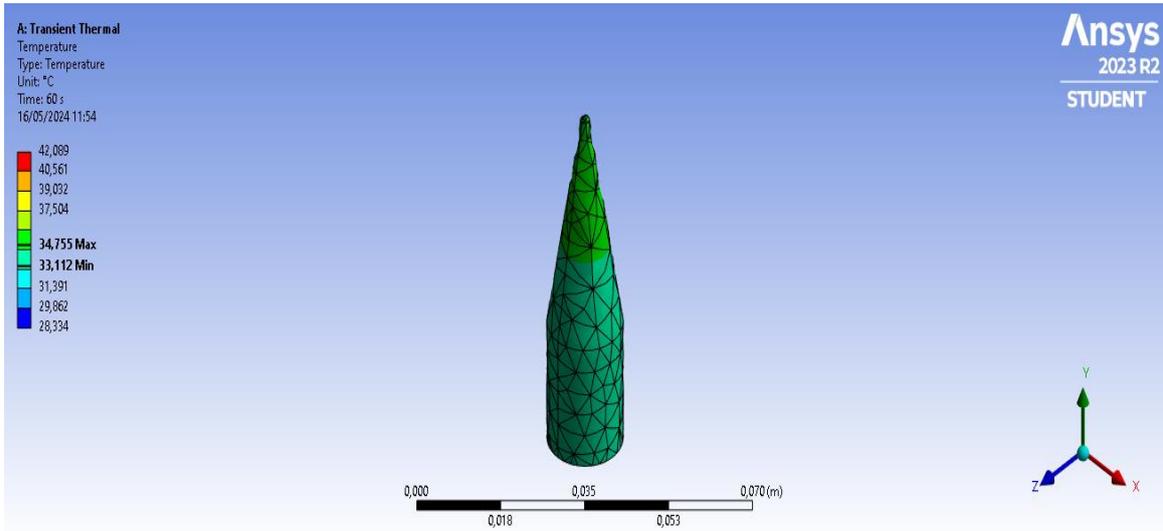
Os resultados da simulação 4 encontram-se a seguir nas figuras de distribuição de temperatura para as três geometrias consideradas e na tabela que organiza esses resultados em função do material que compõe a cavidade, explicitando as condutividades térmicas, temperaturas máximas e mínimas e a diferença entre ambas:

Figura 4.12 - Distribuição de temperaturas da cavidade de titânio.



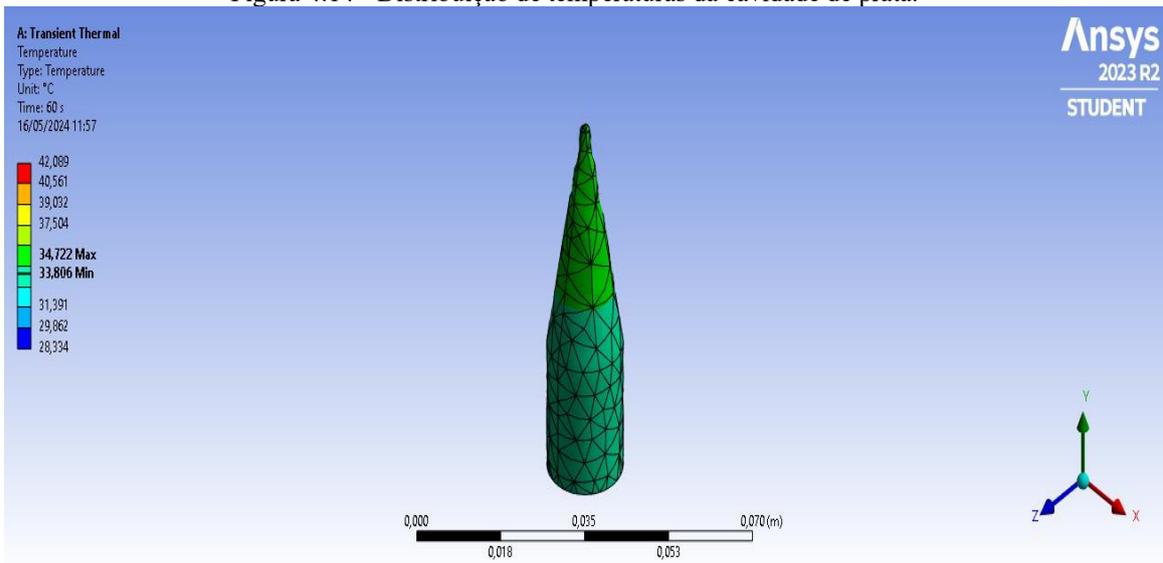
Fonte: produção do autor.

Figura 4.13 - Distribuição de temperaturas da cavidade de alumínio.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.14 - Distribuição de temperaturas da cavidade de prata.



Fonte: produção do autor.

Tabela 4.4 - Resultados da simulação 4

Material	Condutividade térmica (W/m°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Diferença entre temperatura máx. e mín. (°C)
Ti	21,00	42,089	28,334	13,755
Al	237,50	34,755	33,112	1,643
Ag	429,00	34,722	33,806	0,916

Fonte: produção do autor.

4.5 Simulação 5: 03/06/2024

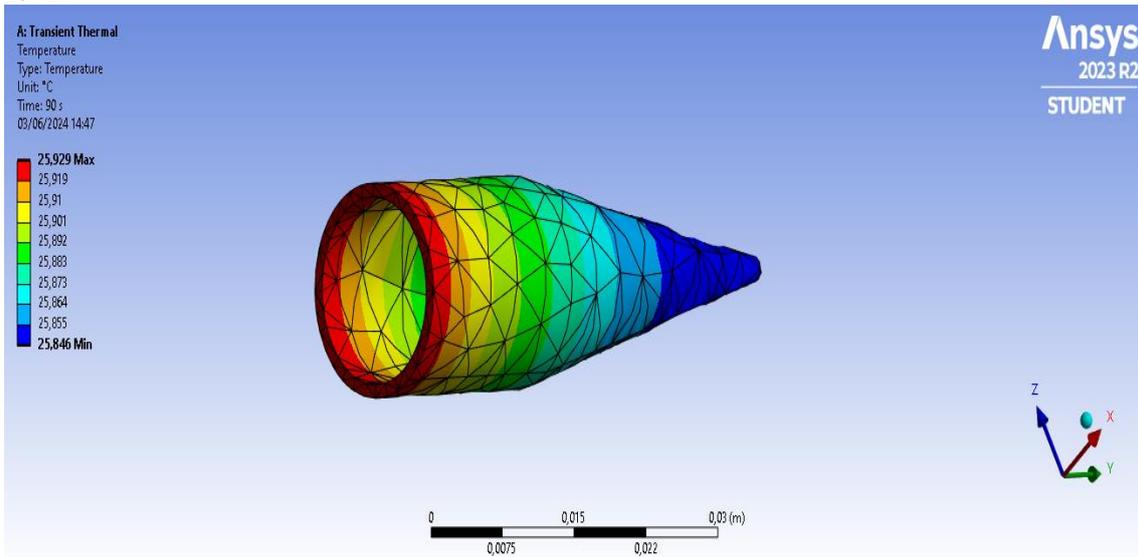
A simulação 5 fez uso da geometria da cavidade de radiômetro novamente, porém a forma na qual aplicou-se o fluxo de energia incidente foi diferente da simulação anterior, porque na simulação 5 o fluxo atinge a região anelar de entrada da cavidade. Decidiu-se realizar essa mudança apenas para testar se era possível considerar outras formas de aplicação de calor na cavidade, visto que o modo que o fluxo de energia incide na cavidade é mais bem representado na simulação 4. O objetivo da simulação 5 era de verificar como era o comportamento das temperaturas máximas e mínimas atingidas pela geometria, quando se variava a temperatura ambiente.

Assim, foi aplicado a taxa de 1361 W/m^2 na região mencionada, considerou-se que o coeficiente convectivo seria de $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$, novamente, e que o material utilizado seria a prata, de $429,00 \text{ W/m}^2\text{°C}$ de condutividade térmica e $0,02$ de emissividade. A simulação foi realizada tanto em estado estacionário quanto em regime transiente, observando-se o instante de 90 segundos após a aplicação do fluxo, para se ter uma noção da diferença entre esses dois estados em relação às temperaturas atingidas. Então, foi realizada a simulação com as condições mencionadas para três temperaturas ambientes diferentes: $25,0^\circ\text{C}$, $27,5^\circ\text{C}$ e $30,0^\circ\text{C}$.

Abaixo encontram-se algumas das imagens da simulação apenas para se obter uma estimativa visual da distribuição das temperaturas atingidas tanto internamente, quanto

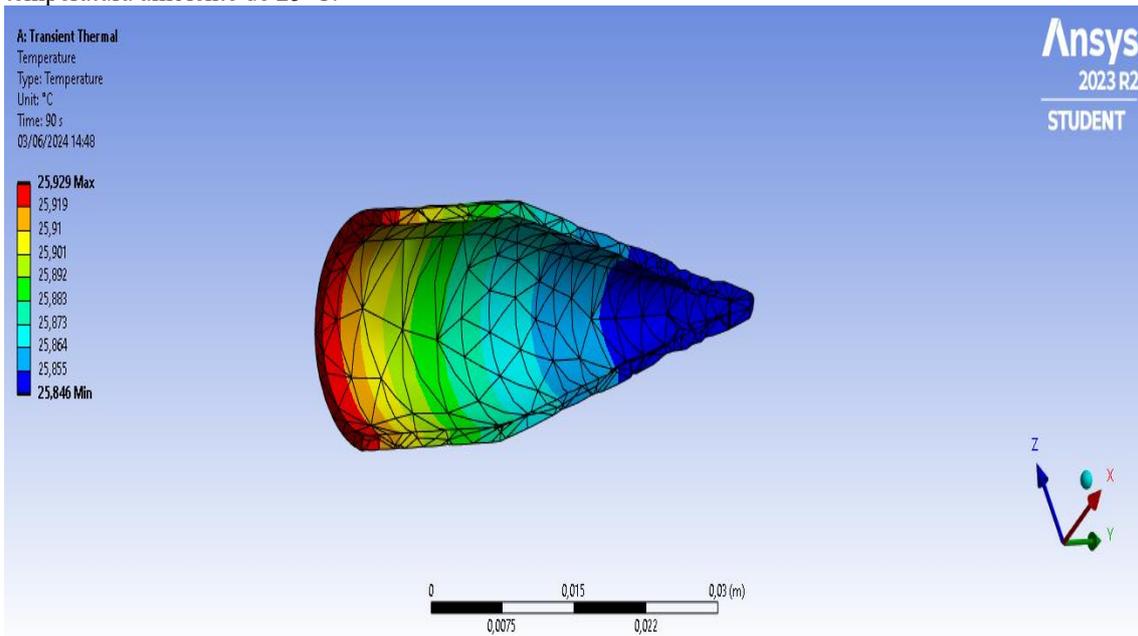
externamente. Também se encontra a seguir a tabela que contém os resultados da simulação, com as informações organizadas em função da temperatura ambiente utilizada e explicitando-se o tipo de simulação realizada, as temperaturas máximas e mínimas atingidas, bem como a diferença entre as duas:

Figura 4.15 - Distribuição de temperaturas da cavidade em regime transiente à temperatura ambiente de 25°C.



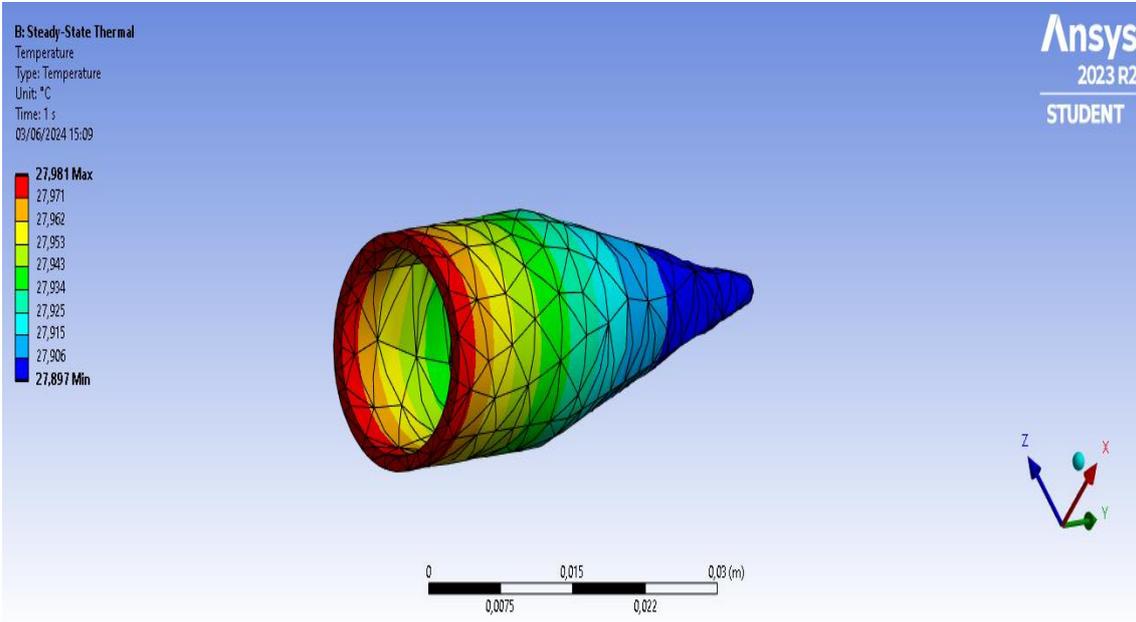
Fonte: produção do autor.

Figura 4.16 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da cavidade em regime transiente à temperatura ambiente de 25°C.



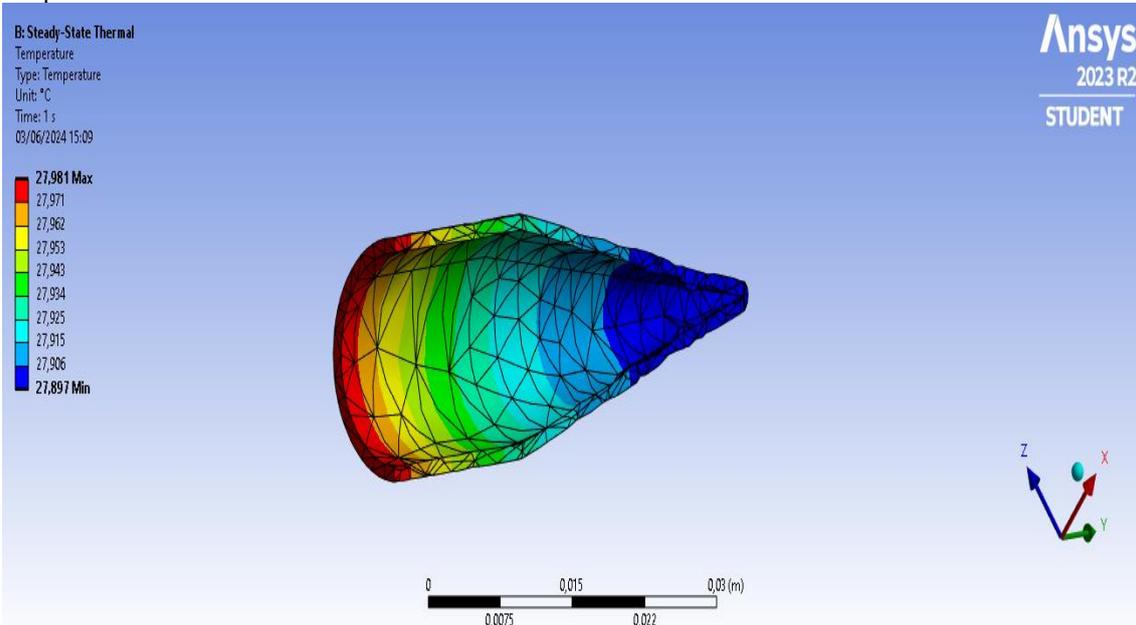
Fonte: produção do autor.

Figura 4.17 - Distribuição de temperaturas da cavidade em estado estacionário à temperatura ambiente de 25°C.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.18 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da cavidade em estado estacionário à temperatura ambiente de 25°C



Fonte: produção do autor.

Tabela 4.5 - Resultados da simulação 5

Temperatura ambiente (°C)	Tipo de simulação	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Diferença entre temperatura máx. e mín. (°C)
25,0	Transiente	25,929	25,846	0,083
	Estacionário	27,981	27,897	0,084
27,5	Transiente	28,410	28,328	0,082
	Estacionário	30,416	30,332	0,084
30,0	Transiente	30,892	30,809	0,083
	Estacionário	32,849	32,765	0,084

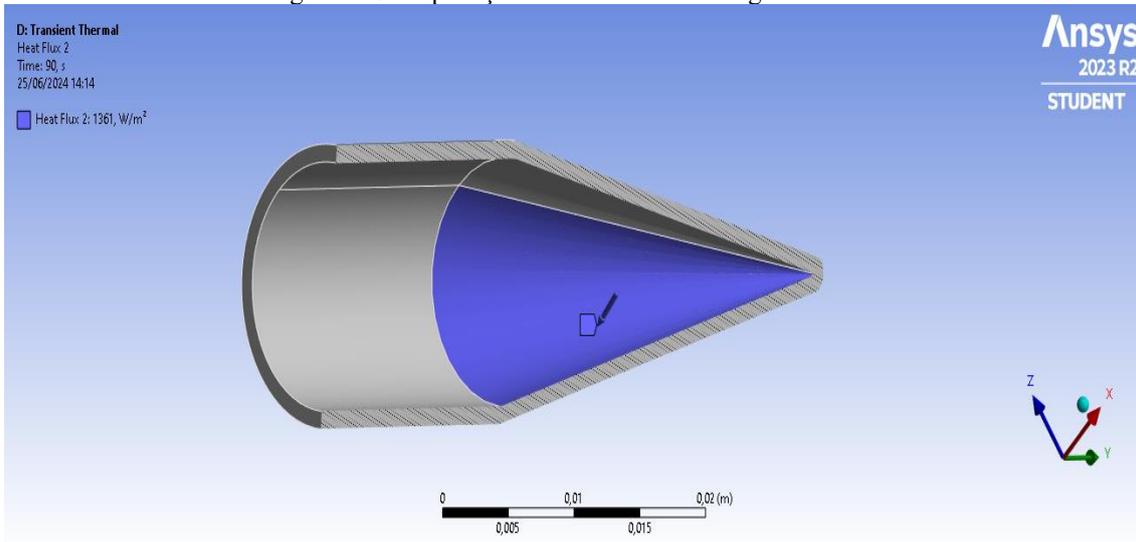
Fonte: produção do autor.

4.6 Simulação 6: 25/06/2024

A simulação 6 teve como objetivo, além da disponibilização dos resultados para as condições que se deseja testar, a comparação entre duas cavidades de radiômetro de dimensões semelhantes. Assim, essa simulação comparou as temperaturas atingidas por cada geometria utilizada.

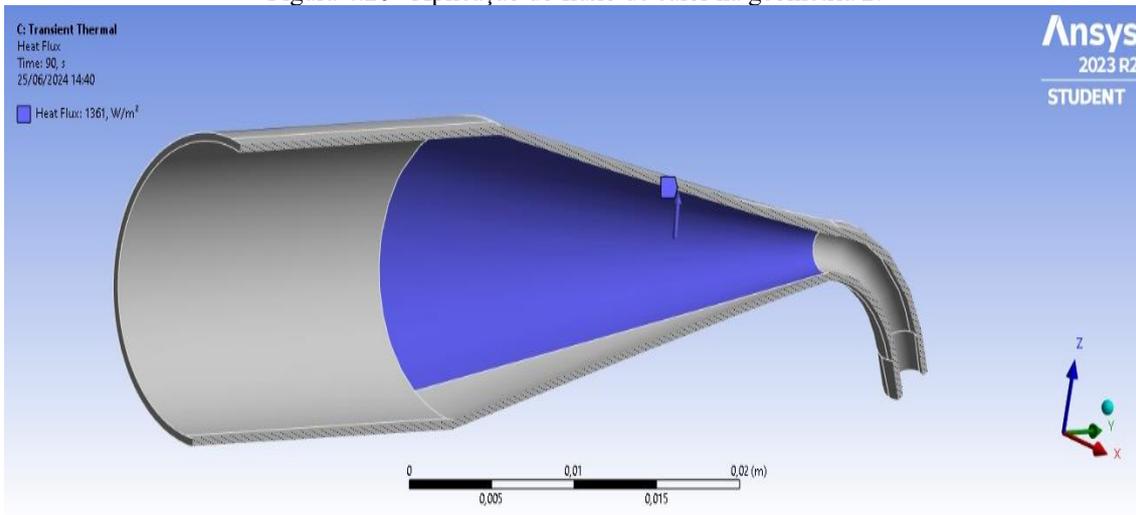
Como apenas a geometria sofreu variação na simulação, as outras condições foram mantidas constantes para os dois casos de geometria. A simulação consistiu na aplicação de um fluxo de calor de 1361 W/m^2 nas faces internas da geometria, similarmente ao fluxo aplicado na simulação 4. Mesmo que as figuras abaixo mostrem a aplicação do fluxo de maneira parcial à face interna de geometria, o fluxo aplicado atinge toda a região cônica da parte interior da cavidade. Dessa forma, as imagens abaixo ilustram a região de aplicação do fluxo, sendo que a geometria da primeira imagem está indicada pelo número 1, e a geometria da segunda imagem indicada pelo número 2:

Figura 4.19 - Aplicação do fluxo de calor na geometria 1.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.20 - Aplicação do fluxo de calor na geometria 2.

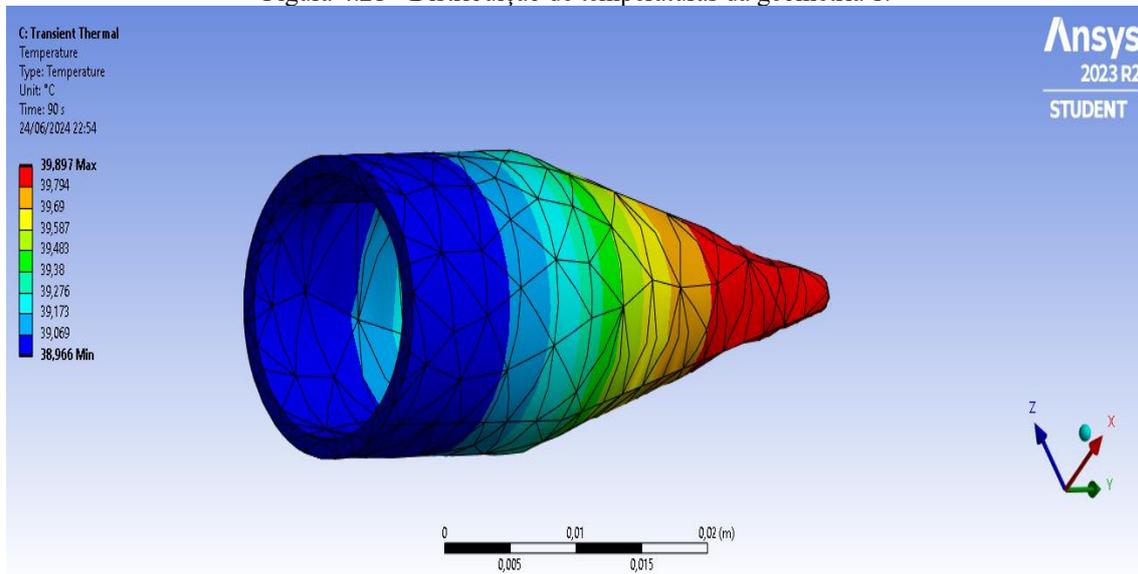


Fonte: produção do autor.

Para a simulação considerou-se novamente a prata como o material constituinte das geometrias, assim a condutividade térmica da geometria foi de $429,00 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e a emissividade foi de $0,02$. O coeficiente convectivo usado foi de $5 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ e considerou-se 22°C como a temperatura ambiente. Além disso, a simulação foi realizada em regime transiente, analisada no instante de 90 segundos.

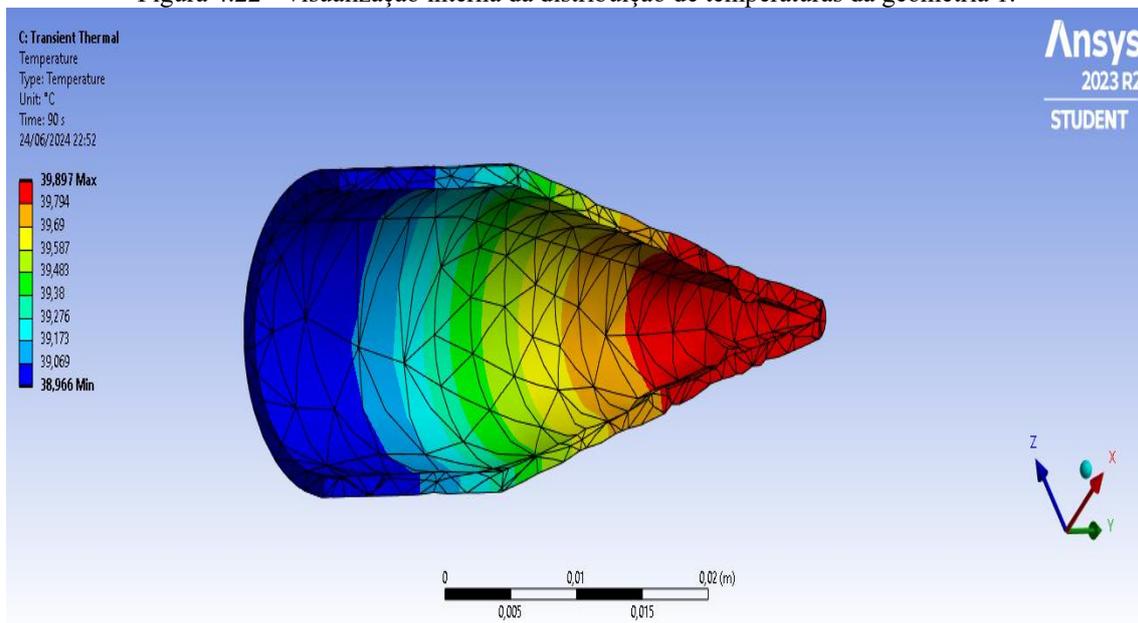
Abaixo estão disponíveis as imagens para visualização interna e externa para a distribuição de temperaturas nas geometrias de cavidade de radiômetro, além da tabela que contém, para cada tipo de geometria, as temperaturas máxima e mínima atingidas junto da diferença entre elas:

Figura 4.21 - Distribuição de temperaturas da geometria 1.



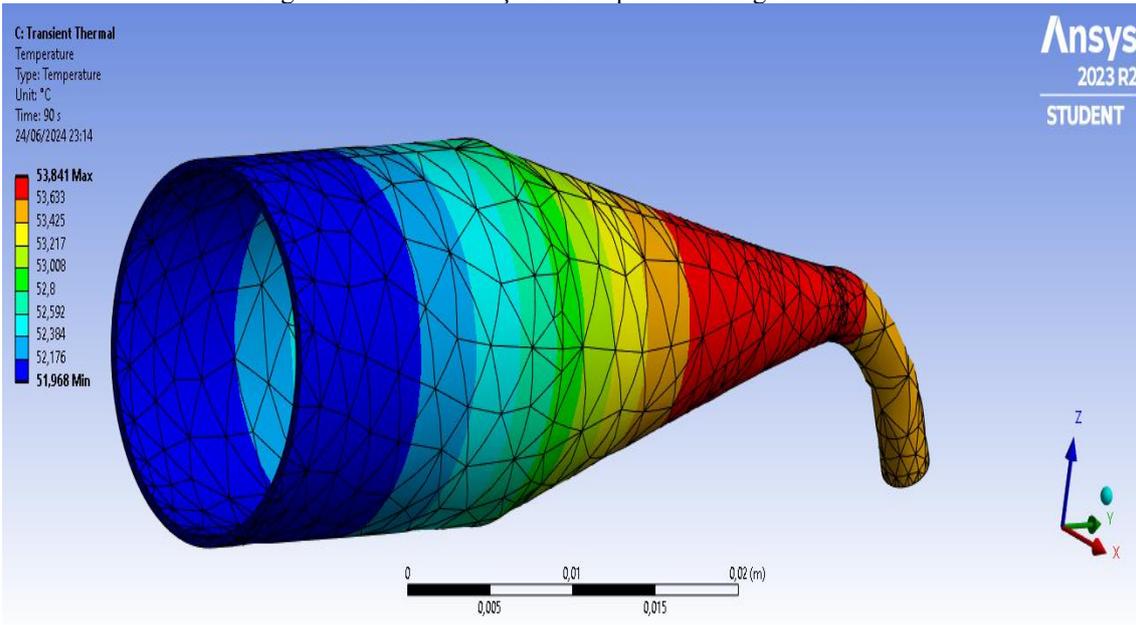
Fonte: produção do autor.

Figura 4.22 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da geometria 1.



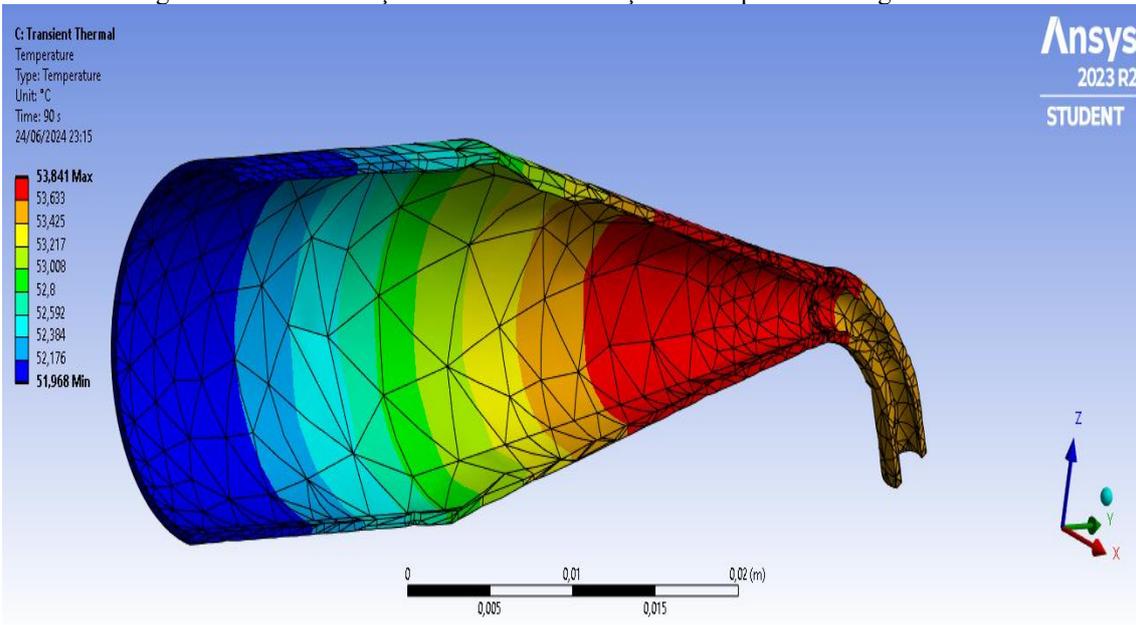
Fonte: produção do autor.

Figura 4.23 - Distribuição de temperaturas da geometria 2.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.24 - Visualização interna da distribuição de temperaturas da geometria 1.



Fonte: produção do autor.

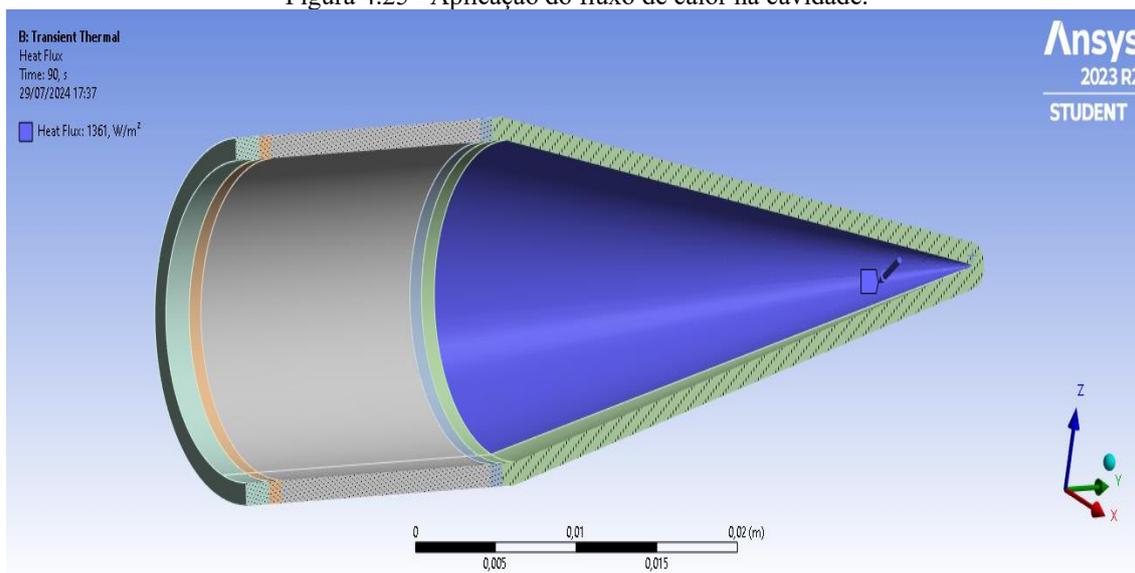
Geometria	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Diferença entre temperatura máx. e mín. (°C)
1	39,897	38,966	0,931
2	53,841	51,968	1,873

Fonte: produção do autor.

4.7 Simulação 7: 29/07/2024

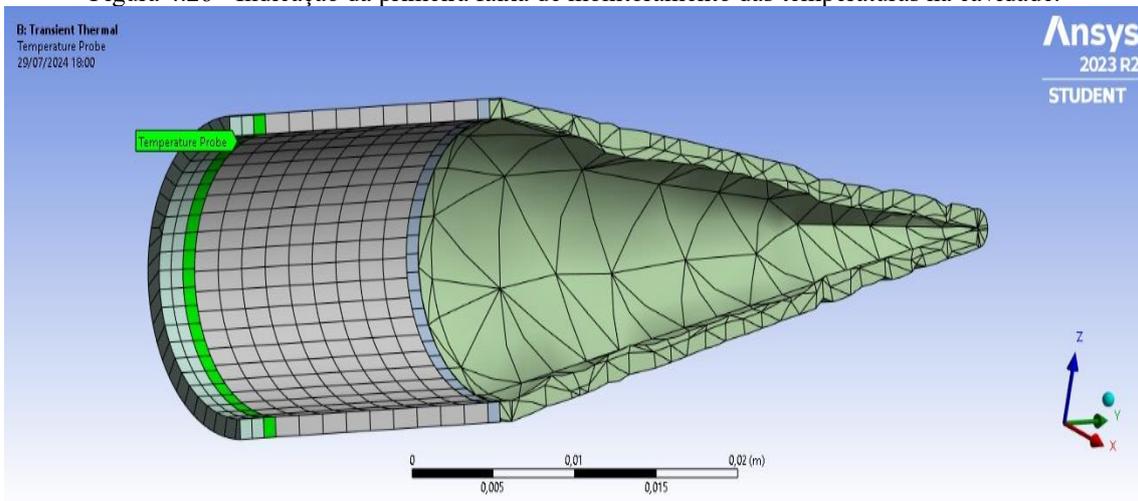
A simulação 7 é a última simulação exposta neste relatório e ela possui caráter de teste, porque ela consiste na comparação entre a aplicação de um fluxo de calor constante e um fluxo cujo comportamento obedeça a uma função matemática. Além disso, foram criadas duas regiões na geometria da cavidade, para que se faça o monitoramento da temperatura nessas regiões ao invés de olhar somente as temperaturas máxima e mínima atingidas pela geometria em um determinado instante. Os dois recursos mencionados, tanto da utilização de uma função matemática para modelar o comportamento de um fluxo, quanto do monitoramento da temperatura em uma determinada região, não haviam sido testados anteriormente a essa simulação. Dessa forma, a maneira na qual se deu a aplicação dos fluxos e as regiões de monitoramento da temperatura estão indicados pelas figuras abaixo:

Figura 4.25 - Aplicação do fluxo de calor na cavidade.



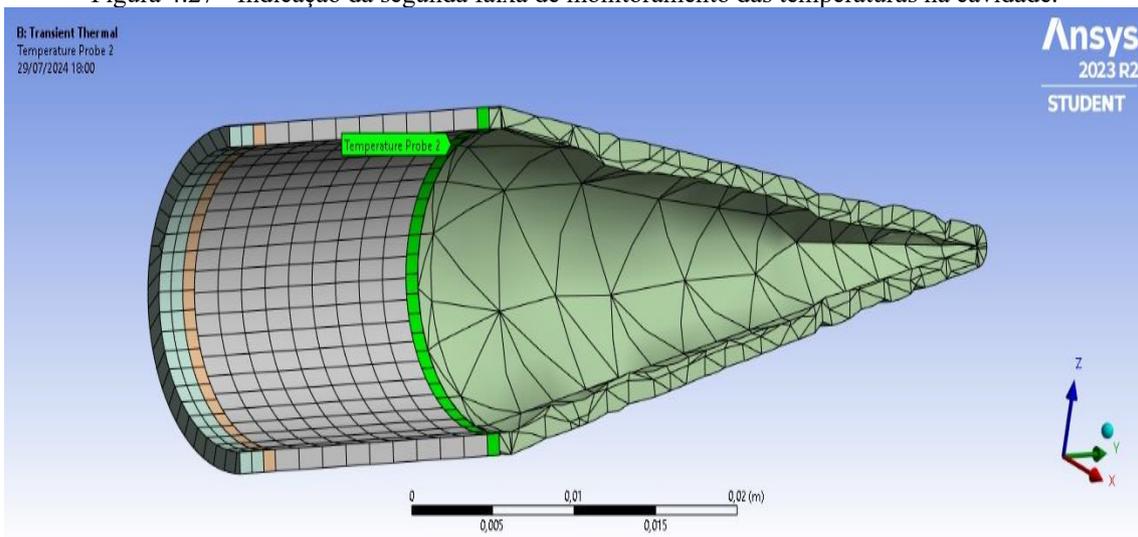
Fonte: produção do autor.

Figura 4.26 - Indicação da primeira faixa de monitoramento das temperaturas na cavidade.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.27 - Indicação da segunda faixa de monitoramento das temperaturas na cavidade.



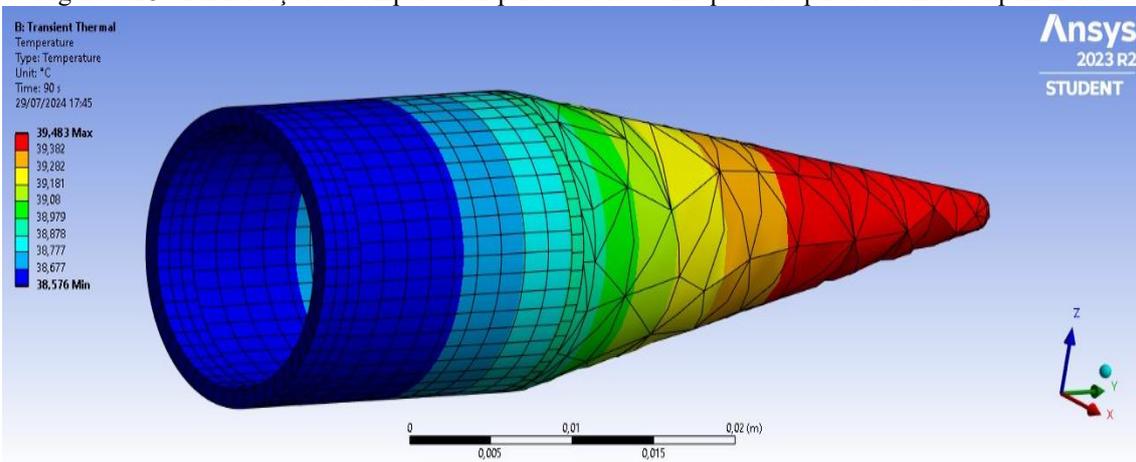
Fonte: produção do autor.

Como mencionado anteriormente, a simulação 7 consistiu num teste dos recursos mencionados e os fluxos comparados foram um fluxo constante de 1361 W/m^2 e um fluxo que apresentou o seguinte comportamento em relação ao tempo: $f(t) = e^{t/10}$, uma função exponencial com a variável t na unidade de segundos. A simulação foi realizada considerando regime transiente, analisando-se os resultados no instante de 90 segundos.

O material utilizado para a geometria foi a prata, com condutividade térmica de 429,00 W/m°C e emissividade de 0,02. Também se considerou 22°C como a temperatura ambiente e um coeficiente convectivo de 5 W/m².

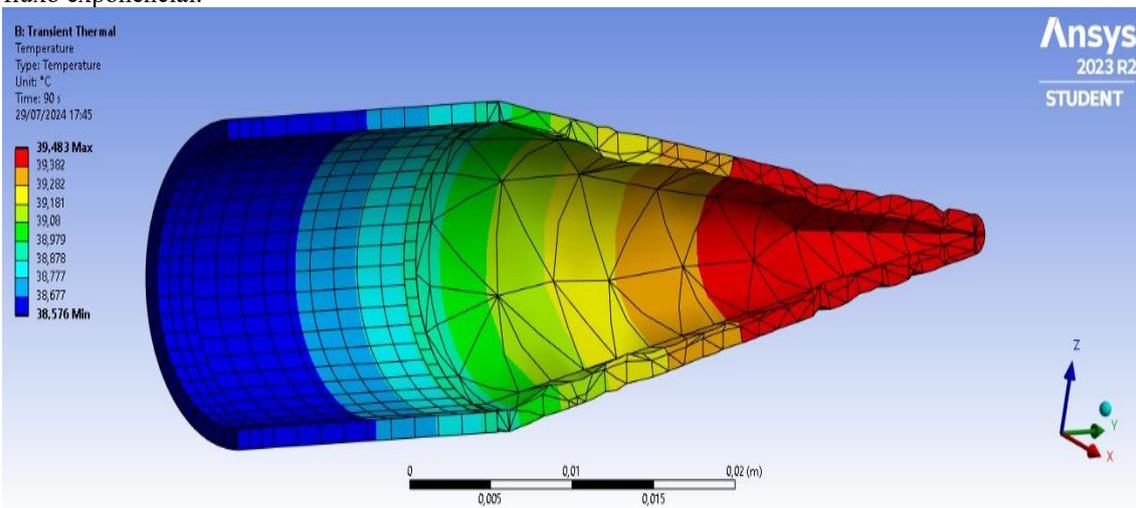
As imagens abaixo permitem a visualização interna e externa da distribuição de temperaturas para o fluxo exponencial, apenas para se obter uma noção visual dessa distribuição, visto que a leitura das temperaturas nas faixas da geometria apresentadas anteriormente encontra-se presentes em um gráfico. O gráfico permite a comparação entre os comportamentos das temperaturas a partir do fluxo utilizado:

Figura 4.28 - Distribuição de temperaturas para a cavidade na qual foi aplicado o fluxo exponencial.



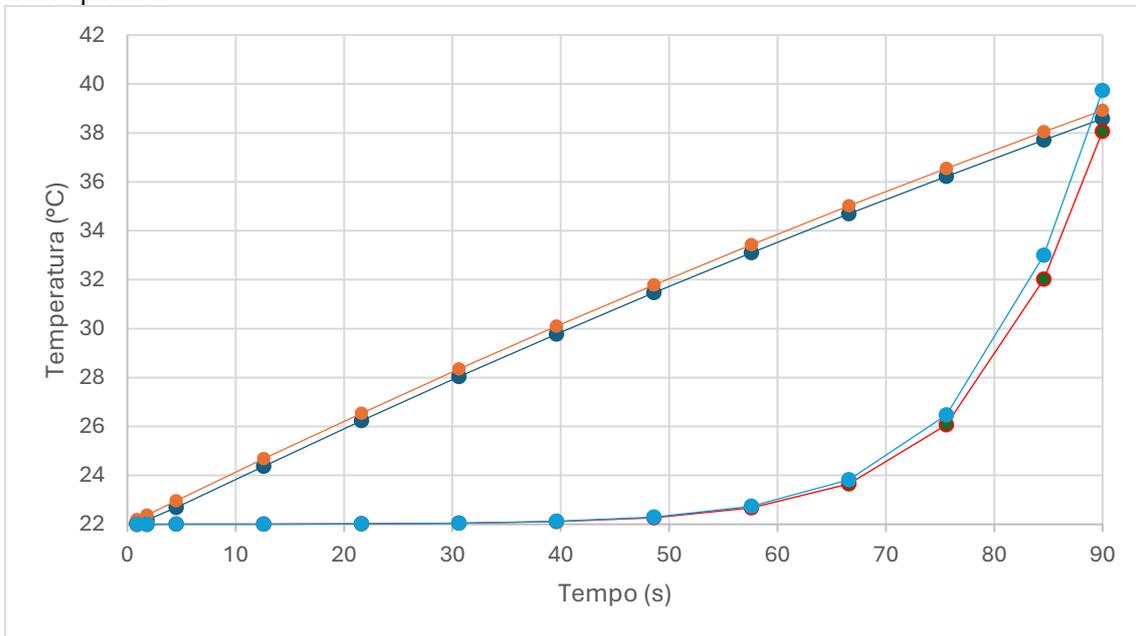
Fonte: produção do autor.

Figura 4.29 - Visualização interna da distribuição de temperaturas para a cavidade na qual foi aplicado o fluxo exponencial.



Fonte: produção do autor.

Figura 4.30 - Gráfico do monitoramento das temperaturas nas duas faixas da cavidade para os dois tipos de fluxo aplicado.



Fonte: produção do autor.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados de todas as simulações apresentadas anteriormente e serão expostas as interpretações que permitiram a formação de conclusões para o projeto de iniciação científica.

5.1 Simulação 1: 03/10/2023

A partir dos valores disponíveis na tabela 4.1, é possível verificar que um aumento no coeficiente convectivo de transferência de calor provoca uma diminuição na temperatura mínima atingida pela geometria. Além disso, percebe-se que uma diminuição na temperatura ambiente também provoca uma diminuição na temperatura mínima da geometria. Logo, tanto um aumento do valor do coeficiente convectivo, quanto uma diminuição da temperatura ambiente provocaram maiores perdas de energia da geometria para o ambiente por convecção.

Era possível prever esse comportamento ao analisar a equação 2.2, que indica a taxa de transferência de calor por convecção. Dessa forma, o comportamento observado nessa simulação permitiu maior entendimento em relação aos mecanismos de transferência de calor, principalmente a convecção, sendo que o comportamento estava de acordo com o esperado indicado pela literatura (ÇENGEL, GHAJAR, 2012; INCROPERA et al. 2003).

5.2 Simulação 2: 08/11/2023

Com base nos resultados apresentados no capítulo 4, verifica-se que quanto maior forem as dimensões e , conseqüentemente, maior for o volume da geometria, menores são as temperaturas mínimas atingidas. De maneira semelhante, quanto maior o volume, maior a diferença entre a temperatura máxima e a mínima, embora todas as geometrias sejam cubos com uma face inteira à temperatura constante de 50°C .

Inicialmente poderia haver confusão na compreensão dos resultados da simulação, pois seria possível esperar o mesmo comportamento nas três geometrias, visto que a relação entre a face submetida à temperatura fixa com o restante da geometria é a mesma para os três casos. No entanto, os cubos de maiores volumes possuem maiores superfícies, possibilitando maior contato com o ar ambiente. Portanto, nos cubos de maiores dimensões a perda de energia para o ambiente por convecção é maior do que a perda para cubos menores. Analisando-se novamente a equação 2.2, percebe-se que o

resultado é coerente com a literatura (ÇENGEL, GHAJAR, 2012; INCROPERA et al. 2003)

5.3 Simulação 3: 28/02/2024

As imagens de distribuição de temperatura para a simulação 3 possibilitam a compreensão de ordem qualitativa a respeito da influência dos materiais utilizados sobre essa distribuição e as formas de transferência de calor. A partir dessas imagens, visualiza-se que, quando a face receptora é de cobre, o material de maior condutividade térmica na simulação, a temperatura é distribuída e conduzida de maneira mais homogênea ao longo da geometria. Já quando a face receptora é de óxido de alumínio, verifica-se não só a concentração de altas temperaturas nessa face, mas também uma pobre condução de calor e distribuição de temperaturas ao longo da geometria. Desse modo, é possível perceber a influência que a condutividade térmica pode exercer em relação aos mecanismos de troca de calor, de maneira que altas condutividades térmicas permitem melhor condução de calor, evitando a formação de pontos de temperaturas muito altas ou muito baixas. Essa análise está de acordo com Çengel e Ghajar (2012) e Incropera et al. (2003).

Além disso, nota-se que uma alta condutividade térmica possibilita maiores trocas de calor por convecção, porque, ao conduzir o calor de maneira mais eficiente e distribuir as temperaturas de maneira mais homogênea, as superfícies passam a perder mais calor por convecção, conforme a interpretação de resultados da simulação 2.

5.4 Simulação 4: 16/05/2024

Os resultados apresentados para a simulação 4 permite a formação de interpretações semelhantes à simulação 3, pois as duas trabalharam com efeitos que materiais diferentes podem ter sobre as temperaturas das geometrias e sobre a transferência de calor. Ao analisar todas as informações expostas nas figuras referentes à quarta simulação e na tabela 4.4, compreende-se que materiais de baixa condutividade térmica provocam um aumento na diferença entre a temperatura máxima e mínima atingida na geometria. Em outras palavras, quanto menor for a condutividade térmica, maior será a temperatura máxima atingida e menor será a temperatura mínima, devido à maior dificuldade de condução (ÇENGEL, GHAJAR, 2012; INCROPERA et al. 2003).

Em relação às cavidades de radiômetro, deve-se evitar grandes disparidades nas temperaturas ao longo da extensão da cavidade, porque essas diferenças comprometem o

funcionamento adequado do instrumento devido à leitura errada de temperaturas, gerando erros no cálculo do valor da TSI. Por isso, materiais de alta condutividade térmica, como a prata, são utilizados para constituir a cavidade de radiômetro, possibilitando seu correto funcionamento (CARLESSO et al., 2022; SONG et al., 2021; WALTER et al., 2017).

5.5 Simulação 5: 03/06/2024

A partir dos resultados expostos para a simulação 5, é possível notar que, quanto maior for a temperatura ambiente utilizada na simulação, maiores serão as temperaturas atingidas pela geometria. Já era possível se ter essa percepção intuitivamente antes da execução das simulações. Também é possível observar que, conforme o esperado, as temperaturas atingidas nas simulações em estado estacionário são maiores do que as temperaturas atingidas na análise no instante de 90 segundos em regime transiente, quando comparadas à mesma temperatura ambiente. Isso indica que o tempo de 90 segundos não é o suficiente para que as temperaturas da cavidade não se alterem mais com o tempo.

A principal análise que pode ser feita pela observação dos resultados tabelados é de que, independentemente da temperatura ambiente utilizada para a simulação, a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas atingidas se mantém praticamente constante. Esse comportamento sinaliza que a temperatura ambiente não influencia nas diferenças entre as temperaturas atingidas na geometria, embora ela influencie os valores das temperaturas. Portanto, é possível compreender que a cavidade de radiômetro pode ser mantida a diferentes temperaturas ambientes de maneira que o correto funcionamento do instrumento não seja comprometido.

5.6 Simulação 6: 25/06/2024

Primeiramente, a partir dos resultados expostos para a simulação 5, é possível notar que não há significativa diferença entre as distribuições de temperatura das imagens que trazem a visualizações interna e externa da geometria, portanto o comportamento da temperatura nessas duas faces é semelhante. Isso ocorre, porque a espessura da geometria não é grande o suficiente para provocar diferenças de temperatura entre a face interna e a face externa da cavidade.

Em segundo lugar, nota-se que há uma significativa diferença entre as temperaturas atingidas pela geometria 2 quando comparada à geometria 1. Embora as

duas geometrias possuam dimensões similares, é possível notar que a geometria 1 possui espessura maior do que a espessura da geometria 2. Assim, essa disparidade de espessuras explica a diferença entre as temperaturas atingidas por cada cavidade, visto que, quanto menor for a espessura, menor será o volume da geometria e mais rapidamente se propaga o calor devido à incidência do fluxo de energia. Como essa propagação acontece de maneira mais rápida e influencia um objeto de menor volume, consequentemente as temperaturas atingidas por esse objeto serão maiores.

Além da comparação entre as cavidades, é importante perceber que essa simulação permite a estimativa de valores de temperatura atingidos para as condições da simulação determinadas anteriormente.

5.7 Simulação 7: 29/07/2024

Dado o caráter de teste que a simulação 7 possuiu, verificou-se que é possível realizar simulações considerando a aplicação de um fluxo de calor que obedeça a uma função matemática. Havia sido testado, também, posteriormente à simulação, a utilização de funções do tipo seno e cosseno para descrever o comportamento do fluxo aplicado. Assim, foi verificado que é possível utilizar essas funções, informação que é de grande interesse, pois torna-se possível simular o comportamento do fluxo com a entrada do radiômetro sendo aberta e fechada, operando em ciclos, comportamento que ocorre na prática (MEFTAH et al. 2011).

Além disso, a partir do gráfico da figura 36, nota-se que a variação das temperaturas com o tempo está de acordo com a maneira que o fluxo é aplicado sobre a geometria. Portanto, para o fluxo constante, a temperatura apresentou comportamento linear, enquanto, para o fluxo exponencial, a temperatura apresentou comportamento exponencial.

A leitura das temperaturas em duas regiões diferentes da geometria e em vários instantes de tempo diferentes até atingir os 90 segundos mostrou-se como um recurso que pode ser explorado mais, permitindo novas interpretações para as simulações. Assim, os recursos explorados e testados nessa simulação indicaram que há maneiras de aprofundar as análises realizadas nas simulações, fato que valoriza a habilidade de se utilizar um software que permite a simulação dos processos de transferência de calor.

6. CONCLUSÕES

A partir da execução deste projeto de iniciação científica, foi possível formar conclusões devido à interpretação dos diversos resultados obtidos nas simulações realizadas. A primeira conclusão diz respeito à escolha do material que deve constituir a cavidade de um radiômetro de substituição elétrica. Concluiu-se que esse material deve possuir alta condutividade térmica, de maneira que a energia que atinge a cavidade possa ser distribuída adequadamente, evitando a formação de posições de temperaturas altas e baixas e permitindo a correta leitura do valor da TSI.

Outra conclusão trata sobre a temperatura ambiente na qual a cavidade pode ser exposta. Foi possível concluir que a cavidade de radiômetro pode operar em diferentes temperaturas ambientes, porque verificou-se que, ao variar a temperatura ambiente, a amplitude térmica da cavidade se manteve praticamente constante, ou seja, a diferença entre as temperaturas máxima e mínima atingidas não variou. Assim, pode-se utilizar diferentes temperaturas ambientes, sem prejudicar o funcionamento correto da cavidade de radiômetro.

Por fim, também se concluiu que, por meio de simulações de transferência de calor no software ANSYS, podem ser testadas várias condições de aplicação e uso da cavidade, permitindo a obtenção de estimativas de faixas de temperatura na qual a cavidade será submetida na realidade. Além disso, notou-se que ainda é possível aprofundar e enriquecer o conteúdo das simulações, pois testou-se a aplicação de fluxos variantes e o monitoramento das temperaturas em regiões específicas das geometrias de cavidade. Dessa forma, a exploração desses recursos indica caminhos para a realização de trabalhos futuros com o mesmo tema.

Portanto, o projeto de iniciação científica realizado ajudou e se relacionou com a missão GSST a partir da compreensão e confirmação de informações sobre as características de aplicação da cavidade de um radiômetro de substituição elétrica. Desse modo, o trabalho desenvolvido oferece a estimativa e noção das condições para correta aplicação do instrumento de mensuração da TSI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLESSO, F. et al. Design, implementation and characterization of cavity for absolute radiometer. **Frontiers in Physics**, v. 9, p. 598490, 2021.

CARLESSO, F. et al. Physical and optical properties of ultra-black Nickel–Phosphorus for a total solar irradiance measurement. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 248, n. 1, 10 p., 2020.

CARLESSO, F. et al. Solar irradiance variability monitor for the galileo solar space telescope mission: Concept and challenges. **Frontiers in Physics**, v. 10, p. 869738, 2022.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**, 4ª ed. São Paulo: McGraw Hill, Bookman, 2012. 902 p.

DOMINGO, V. et al. Solar surface magnetism and irradiance on time scales from days to the 11-year cycle. **Space Science Reviews**, v. 145, p. 337-380, 2009.

EDDY, J. A. The Maunder Minimum: The reign of Louis XIV appears to have been a time of real anomaly in the behavior of the sun. **Science**, v. 192, n. 4245, p. 1189-1202, 1976.

FRÖHLICH, C.; LEAN, J. L. Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms. **The Astronomy and Astrophysics Review**, v. 12, n. 4, p. 273-320, 2004.

GRAY, L. J. et al. Solar influences on climate. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 4, 2010.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: editora LTC, 2003. 1699 p.

KOPP, G. Earth's incoming energy: The total solar irradiance. **Earth Systems and Environmental Sciences**, v. 5, p. 32 – 66, 2018.

KREN, Andrew Charles. **Investigating the role of the Sun, the quasi-biennial oscillation, and the pacific decadal oscillation on decadal climate variability of the stratosphere**. 2015. 243 p. Tese de Doutorado, University of Colorado at Boulder, 2015.

LEAN, J. L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. **Wiley interdisciplinary reviews: climate change**, v. 1, n. 1, p. 111-122, 2010.

LEAN, J. L.; RIND, D. H. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 18, 2008.

MADENCI, E.; GUVEN, I. **The finite element method and applications in engineering using ANSYS®**. 2.ed. Springer, 2015. 652 p.

MEFTAH, M. et al. The space instrument SOVAP of the PICARD mission. **UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts V**. SPIE, 2011. p. 434-452.

MUHAMMAD, A.; ALI, M. A. H.; SHANONO, I. H. ANSYS–A bibliometric study. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 1005-1009, 2020.

MUHAMMAD, A.; SHANONO, I. H. Transient analysis and optimization of a knuckle joint. **Kinetik**, v. 4, n. 2, p. 179-186, 2019.

SONG, B. et al. The fengyun-3E/joint total solar irradiance absolute radiometer: instrument design, characterization, and calibration. **Solar Physics**, v. 296, p. 1-18, 2021.

WALTER, B. et al. The CLARA/NORSAT-1 solar absolute radiometer: instrument design, characterization and calibration. **Metrologia**, v. 54, n. 5, p. 674-682, 2017.