

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS LEOCADIO BATTISTON

ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA REGIÃO EXTERNA AO
COMBUSTOR EM SISTEMAS TERMOFOTOVOLTAICOS

CURITIBA

2021

LUCAS LEOCADIO BATTISTON

ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA REGIÃO EXTERNA AO
COMBUSTOR EM SISTEMAS TERMOFOTOVOLTAICOS

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – PPGEQ, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Éliton Fontana

Coorientadores: Prof. Dr. Luiz Fernando de Lima Luz Junior.

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

B336a

Battiston, Lucas Leocadio

Análise da transferência de calor na região externa ao combustor em sistemas termofotovoltaicos [recurso eletrônico] / Lucas Leocadio Battiston. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Química, 2021.

Orientador: Eliton Fontana – Coorientador: Luiz Fernando de Lima Luz Junior

1. Câmaras de combustão. 2. Radiação. 3. Energia elétrica. 4. Calor – radiação e absorção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fontana, Eliton. III. Luz Junior, Luiz Fernando de Lima. IV. Título.

CDD: 621.4023

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA

No dia vinte e cinco de agosto de dois mil e vinte e um às 14:00 horas, na sala Microsoft Teams, Plataforma online, em função do teor da portaria 754/Reitoria - UFPR, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação do mestrando **LUCAS LEOCADIO BATTISTON**, intitulada: **Análise da transferência de calor na região externa ao combustor em sistemas termofotovoltaicos**, sob orientação do Prof. Dr. ELITON FONTANA. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: ELITON FONTANA (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), VIVIANA COCCO MARIANI (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ), FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela APROVAÇÃO. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, ELITON FONTANA, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 25 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 16:15:43.0

ELITON FONTANA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 18:30:03.0

VIVIANA COCCO MARIANI

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 16:17:14.0

FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS LEOCADIO BATTISTON** intitulada: **Análise da transferência de calor na região externa ao combustor em sistemas termofotovoltaicos**, sob orientação do Prof. Dr. ELITON FONTANA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 16:15:43.0

ELITON FONTANA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 18:30:03.0

VIVIANA COCCO MARIANI

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 16:17:14.0

FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

Com a implementação de novas tecnologias, aparelhos portáteis estão sendo desenvolvidos, com isso entende-se que devem ser aplicadas técnicas e alternativas para suprir o abastecimento energético desses equipamentos. Trata-se de uma tarefa complexa, uma vez que os aparelhos estão cada vez menores, o tamanho de suas baterias devem seguir essa proporção. Dentre os dispositivos que buscam atender essa necessidade e se mostraram promissores, pode-se destacar os sistemas microtermofotovoltaicos (MTPV). Esses sistemas apresentam conversão direta de energia térmica em energia elétrica. A energia térmica é gerada devido as altas temperaturas nas paredes dos microcombustores, que por sua vez emitem energia na forma de radiação térmica. Este trabalho tem o intuito de avaliar a transferência da energia térmica emitida na forma de radiação e sua conversão em energia elétrica. Utilizando o software de código aberto OpenFOAM, foram replicadas condições reais de um sistema MTPV com filtro seletor, o que permitiu avaliar e quantificar a radiação emitida pelas paredes do sistema. Os resultados dessa radiação incidente foram obtidos para diferentes condições de contorno, chegando a um valor máximo de $58,77 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ variando-se a temperatura e mínimo de 127 W/m^2 variando-se o coeficiente de absorção do filtro óptico. Outras duas variações importantes como a distância entre filtro e emissor e a velocidade de escoamento do fluido também foram avaliadas. No caso em que a distância entre as superfícies é modificada, os valores da radiação incidente são bem significativos, alcançando a amplitude de até $6 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$. Já para as diferentes velocidades, os valores de $U=0,05\text{m/s}$ e $U=0,25\text{m/s}$ apresentaram melhores resultados, chegando a $45,72 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $46,32 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ respectivamente, de radiação incidente.

Palavras-chave: Microcombustor. Radiação térmica. Energia. Filtro seletor. Microtermofotovoltaico. Radiação incidente. OpenFOAM, Transferência de Calor por Radiação.

ABSTRACT

With the implementation of new technologies, portable devices are being developed, with this it is understood that techniques and alternatives must be applied to supply the energy supply of these equipments. This is a complex task, as devices are getting smaller, the size of their batteries must follow this proportion. Among the devices that seek to meet this need and have shown themselves to be promising, the micro-thermophotovoltaic systems (MTPV) can be highlighted. These systems feature direct conversion of thermal energy into electrical energy. Thermal energy is generated due to the high temperatures in the walls of the microcombustors, which in turn emit energy in the form of thermal radiation. This work aims to evaluate the transfer of thermal energy emitted in the form of radiation and its conversion into electrical energy. Using the open source software OpenFOAM, real conditions of an MTPV system with a selector filter were replicated, which allowed evaluating and quantifying the radiation emitted by the walls of the system. The results of this incident radiation were obtained for different boundary conditions, reaching a maximum value of $58.77 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, varying the temperature, and a minimum of 127 W/m^2 , varying the absorption coefficient of the optical filter. Two other important variations such as the distance between filter and emitter and fluid flow velocity were also evaluated. In the case where the distance between the surfaces is modified, the incident radiation values are quite significant, reaching an amplitude of up to $6 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$. As for the different speeds, the values of $U=0.05\text{m/s}$ and $U=0.25\text{m/s}$ presented better results, reaching $45.72 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ and $46.32 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ respectively, of incident radiation.

Keywords: Microcombustor. Thermal radiation. Energy. Selector filter. Micro-thermophotovoltaic. Incident radiation. OpenFOAM, Radiation Heat Transfer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA MICRO-TERMOFOTOVOLTÁICO.....	14
FIGURA 2: ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	18
FIGURA 3: CÉLULA FOTOVOLTÁICA.....	20
FIGURA 4: SISTEMA TPV.....	23
FIGURA 5: DISPOSITIVO MICROCOMBUSTOR.....	24
FIGURA 6: SISTEMA MICROCOMBUSTOR COM RECIRCULAÇÃO DE GASES....	24
FIGURA 7: HEMISFÉRA RADIATIVA REPRESENTATIVA PARA ÂNGULO SÓLIDO E DIREÇÃO EMISSORA.....	29
FIGURA 8: EMISSÃO DE RADIAÇÃO DE UMA ÁREA DA _p NO SISTEMA TPV.....	30
FIGURA 9: ABSORÇÃO, REFLECCÃO E TRANSMISSÃO POR UMA SUPERFÍCIE SEMITRANSARENTE.....	31
FIGURA 10: ESTRUTURA GERAL DO OPENFOAM.....	33
FIGURA 11: MALHA COMPUTACIONAL DO SISTEMA MTPV (CASO BASE).....	35
FIGURA 12: MALHA COMPUTACIONAL DO SISTEMA MTPV EM WIREFRAME (CASO BASE).....	37
FIGURA 13: SISTEMA MTPV 2D.....	38
FIGURA 14: CONDIÇÕES DE CONTORNO PURA CONVECCÃO.....	43
FIGURA 15: CONDIÇÕES DE CONTORNO CONVECCÃO E RADIAÇÃO ACOPLADAS.....	44
FIGURA 16: CONDIÇÕES DE CONTORNO DO CASO BASE.....	49
FIGURA 17: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE AS SUPERFÍCIES EMISSOR/FILTRO.....	50
FIGURA 18: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE AS SUPERFÍCIES DO EMISSOR E DO FILTRO. .	52
FIGURA 19: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO.....	53
FIGURA 20: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO.....	54
FIGURA 21: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO.....	55

FIGURA 22: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO FILTRO.....	56
FIGURA 23: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO SÓLIDO SEMITRASPARENTE. 57	57
FIGURA 24: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO SÓLIDO SEMITRASPARENTE. 58	58
FIGURA 25: PERFIL DE TEMPERATURA DO EMISSOR PARA O CASO BASE UTILIZADO POR FONTANA (2020).....	59
FIGURA 26: RADIAÇÃO EMITIDA PELA PAREDE DO MC NO CASO BASE.....	59
FIGURA 27: RADIAÇÃO INCIDENTE NA CELULA TPV PARA O CASO BASE.....	60
FIGURA 28: PERFIS DE TEMPERATURA DO EMISSOR UTILIZADOS POR FONTANA (2020) AVALIADO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ALIMENTAÇÃO.....	61
FIGURA 29: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO EMITIDA PELA PAREDE DO EMISSOR PARA OS DIFERENTES PERFIS DE TEMPERATURA.....	61
FIGURA 30: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE, NA CÉLULA TPV, PARA OS DIFERENTES PERFIS DE TEMPERATURA...62	62
FIGURA 31: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO SÓLIDO SEMITRASPARENTE. 64	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1:	FAIXA ESPECTRAL E ENERGIA DE FÓTON ASSOCIADA.....	19
TABELA 2:	ESTUDO MTPV, CARACTERÍSTICAS, MODELOS RADIATIVOS E MATERIAIS UTILIZADOS.....	26
TABELA 3:	CONDIÇÕES DE CONTORNO DO CASO BASE.....	41
TABELA 4:	FATORES DE RELAXAÇÃO DO SISTEMA MTPV.....	42
TABELA 5:	CONSTANTES UTILIZADAS NA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA.....	45
TABELA 6:	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO UTILIZADOS NA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA.....	45
TABELA 7:	RESULTADOS DO NÚMERO DE NUSSELT CONVECTIVO.....	46
TABELA 8:	ERRO ABSOLUTO EM MÓDULO PARA O NÚMERO DE NUSSELT CONVECTIVO.....	46
TABELA 9:	RESULTADOS DO NÚMERO DE NUSSELT CONVECTIVO FRENTE AO CUSTO COMPUTACIONAL VS TEMPO DE SIMULAÇÃO.....	47
TABELA 10:	RESULTADOS DO NÚMERO DE NUSSELT TOTAL.....	47
TABELA 11:	PROPRIEDADES DO AR A 300K.....	48
TABELA 12:	PROPRIEDADES DO SÓLIDO.....	49
TABELA 13:	VALORES MÉDIOS PARA A RELAÇÃO T/G, NA CÉLULA TPV, PARA DIFERENTES PERFIS DE TEMPERATURA DO EMISSOR.....	63
TABELA 14:	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DO SISTEMA MTPV.....	65

LISTA DE SIGLAS

- CDS – método de diferenças centrais
- CFD – dinâmica dos fluidos computacionais
- MC – microcombustor
- MTPV – micro-termofotovoltaico
- PV – fotovoltaico
- SE – emissor seletivo
- TPV – termofotovoltaico

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	calor específico a pressão constante	kJ/kg.K
d	espessura	m
E	poder emissivo	-
h	entalpia	kJ/kg
h	altura	m
H_f	entalpia de formação	kJ/mol
k	condutividade térmica	W/m.K
M	massa molar	kg/kmol
p	pressão	kg/m.s^2
Pr	número de Prandtl	-
q	fluxo de calor	W/m^2
R	constante dos gases	kJ/mol.K
Re	número de Reynolds	-
T	temperatura	K
a^*	coeficiente de absorção	m^{-1}
e^*	coeficiente de emissividade	m^{-1}
A_{slab}	superfície absorvedora	-
I	intensidade radiativa	-
\hat{n}	vetor normal a superfície	-
Q	fluxo total de calor	W
G	Radiação Incidente	W/m^2
R_{slab}	superfície refletora	-
\hat{s}	vetor posição	-
T_{slab}	superfície transmissora	-
L	comprimento	m

Letras gregas

α	difusividade térmica	m^2/s
β	coeficiente de expansão térmica	K^{-1}
μ	viscosidade dinâmica	N.s/m^2
ρ	densidade	kg/m^3
ν	viscosidade cinemática	m^2/s

σ	constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2.K^4$
λ	comprimento de onda	m
ν	frequência	Hz
Ω	ângulo dos sólidos	sr
θ	ângulo polar	rad
ε	emissividade	-
τ'	espessura óptica	-
τ	transmissividade	-
α	absortividade	-
ρ	reflexividade	-
η	número de onda	m^{-1}
ψ	ângulo azimutal	rad

Subscritos

eff efetivo

s sólido

f fluido

b corpo negro

p ponto no espaço emissor

0 passo de tempo inicial

r residual

m médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTO E PROBLEMÁTICA.....	13
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	RADIAÇÃO TÉRMICA.....	17
2.1.1	Radiação em meios semitransparentes.....	20
2.2	SISTEMAS TERMOFOTOVOTÁICOS.....	22
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO.....	27
2.4	PROPRIEDADES RADIATIVAS FUNDAMENTAIS.....	28
2.4.1	Ângulo sólido.....	28
2.4.2	Intensidade radiativa.....	29
3	OPENFOAM	32
3.1	ESTRUTURA DO OPENFOAM.....	32
3.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA PRELIMINAR PARA SOLVER CHTMULTIREGIONFOAM.....	34
3.2.1	Caso base para emissão radiativa.....	34
3.3	DISCRETIZAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO E MALHA COMPUTACIONAL.....	36
4	MODELAGEM MATEMÁTICA	37
4.1	EQUAÇÕES REGENTES DO SISTEMA MTPV.....	37
4.2	ALGORITMO DE SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES.....	39
4.3	DETERMINAÇÃO DO MODELO RADIATIVO.....	40

4.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONSTANTES DOS MODELOS PARA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA.....	40
4.5	CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA.....	41
4.6	VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO PURA CONVECÇÃO.....	42
4.7	VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO RADIATIVO.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA PARA O NÚMERO DE NUSSELT CONVECTIVO E RADIATIVO.....	46
5.2	RESULTADOS DO SISTEMA MTPV.....	48
5.2.1	Análise da influência da distância entre a parede do emissor e do filtro.....	50
5.2.2	Análise da influência da velocidade de escoamento do fluido.....	52
5.2.3	Análise da influência do coeficiente de absorção da região sólida.....	55
5.2.4	Análise da influência do perfil de temperatura do emissor.....	58
6	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E PROBLEMÁTICA

Com a implementação de melhores tecnologias, um maior número de aparelhos portáteis estão sendo desenvolvidos. Esses aparelhos são projetados de forma a atender as necessidades do público, desta forma são fabricados com um design mais compacto e com maior desempenho. Pode-se citar diversas aplicações desses aparelhos: as micro aeronaves (drones), carros elétricos, smartwatches, smartphones e até mesmo os marcapassos cardíacos (VULLERS et al., 2014). Esses equipamentos por possuírem maior desempenho, demandam mais energia, conseqüentemente, sua bateria deve suprir essa demanda. Um exemplo é a bateria dos carros elétricos.

As baterias utilizadas nesses veículos são chumbo-ácido (Pb-ácido), íon-lítio, hidreto de níquel-metal (Ni-MH) e níquel-cádmio (Ni-Cd). As baterias de chumbo-ácido são as mais baratas, de maior disponibilidade no mercado, mas têm os ciclos de carga e descarga menor que o restante. As baterias Ni-MH e Ni-Cd têm muitas características semelhantes, sendo a última a mais resistente à temperatura de todas as baterias (CASTRO, 2018).

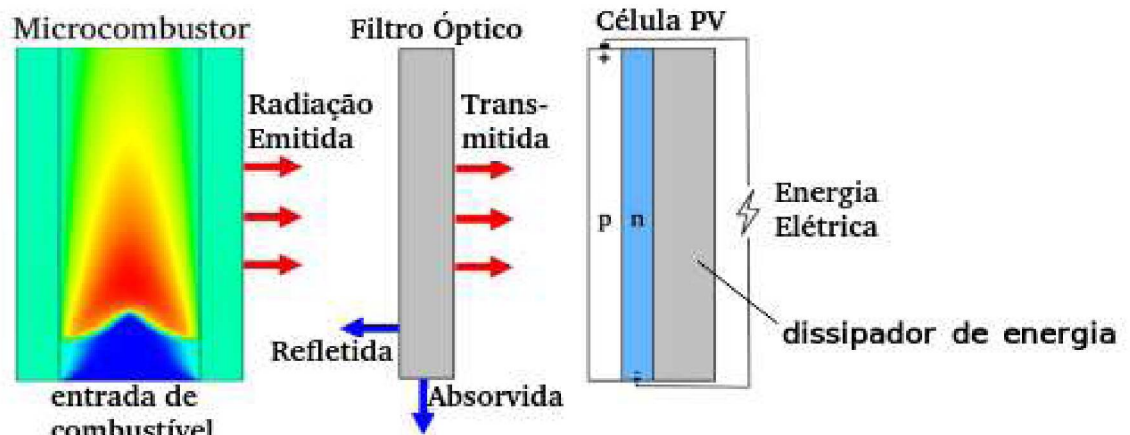
Ainda assim, em diversas outras aplicações o peso e volume ocupado por estas baterias dificulta sua aplicação. Além disso, a disposição desses materiais gera um grande impacto ambiental.

Dentre os estudos que se mostram promissores, pode-se destacar os que avaliam sistemas micro-termofotovoltaicos (MTPV). Um exemplo desse tipo de sistema pode ser visualizado na Figura 1. Neste dispositivo, um combustível é alimentado em um microcombustor, onde sua combustão causa um aumento na temperatura da parede. A radiação emitida pela parede é então utilizada por uma célula fotovoltaica para geração de eletricidade, passando antes por um filtro óptico que tem o objetivo de selecionar os comprimentos de onda desejados. Esse sistema apresenta conversão direta de energia térmica em energia elétrica (YANG et al., 2006).

Porém, por ser um dispositivo ainda pouco estudado, existem muitas incógnitas e dificuldades no desenvolvimento desses sistemas, uma delas é a perda de calor justificada pela regra do quadrado cúbico, quanto menor o tamanho do sistema, maior a relação área superficial versus volume (CHOU et al., 2010), o que dificulta a estabilização da chama. Além disso, pouco se sabe sobre a influência das

condições externas ao microcombustor no desempenho do sistema, já que a grande maioria dos trabalhos avalia somente o microcombustor.

FIGURA 1: ESQUEMA MICRO-TERMOFOTOVOLTÁICO



FONTE: FONTANA (2019).

Desenvolver um sistema MTPV pequeno o suficiente que consiga fazer essa conversão energética de forma eficiente, é um grande desafio. A eficiência da célula é diretamente afetada pelos mecanismos de troca térmica entre a parede do combustor e a superfície da célula, sendo que, esta influência é usualmente desprezada nos estudos encontrados na literatura. Neste trabalho será avaliado numericamente a transferência de calor na região externa ao microcombustor, buscando entender como as condições de operação afetam o desempenho do sistema.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho será utilizar a ferramenta *computational fluid dynamic* (CFD) para avaliar numericamente a transferência de calor na região externa ao microcombustor em um sistema MTPV, para isso, será necessário o desenvolvimento e verificação numérica de uma malha computacional, a determinação das condições de contorno do sistema e a determinação de uma metodologia de resolução adequada das equações que regem os fenômenos físicos. Além disso, serão avaliadas diferentes condições geométricas a fim de investigar a influência dos efeitos da condução e convecção no sistema MTPV.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Definir a modelagem matemática do sistema
- II. Reproduzir um modelo 2D de um sistema gerador de energia composto por um filtro óptico utilizando o software OpenFOAM, além de verificar numericamente esse sistema com base em dados obtidos na literatura.
- III. Avaliar diferentes condições geométricas visando aumentar a eficiência da célula PV.

1.3 JUSTIFICATIVA

Apesar do significativo aumento na eficiência de conversão de energia térmica em elétrica nos dispositivos fotovoltaicos (PV) observados nas últimas décadas, os valores médios de eficiência ainda são relativamente baixos, em torno de 14 - 20% para células de silício e em torno de 25 - 30 % para células de multi-junção¹ (XING et al., 2017). O restante da radiação incidente usualmente é convertida diretamente em calor, aumentando a temperatura do dispositivo. Este aspecto representa um grande obstáculo, pois a eficiência da células reduz com o aumento da temperatura a uma taxa de 0.4 - 0.6% por cada grau Celsius a mais (SCHIRO et al., 2017).

Neste trabalho, serão avaliados numericamente os fenômenos de transferência de calor em um sistema termofotovoltaico, com o objetivo de obter a

1 Células formadas por várias camadas de diferentes materiais, em que cada uma destas camadas é especializada em absorver uma parte do espectro.

distribuição de temperatura na célula fotovoltaica. Com isso, espera-se obter uma ferramenta capaz de prever o comportamento do sistema quando sujeito a modificações estruturais e operacionais. Estas modificações serão formuladas de modo a auxiliar no gerenciamento de calor no sistema e assim maximizar a quantidade de energia que pode ser extraída do dispositivo, aumentando a sua eficiência.

A realização desta pesquisa permitirá que sistemas de geração de energia mais eficientes sejam desenvolvidos, diminuindo a perda de energia e o consumo de combustível necessário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho será abordada a transferência de calor por radiação em um sistema TPV, em particular na região externa ao microcombustor. A modelagem e simulação desta forma de transferência de calor é relativamente complexa devido às características associadas à forma como a energia é transferida e interage com a matéria. Assim, será inicialmente apresentada uma breve revisão sobre os principais fenômenos presentes na radiação em meios semitransparentes.

2.1 RADIAÇÃO TÉRMICA

Conforme definido por Incropera et al. (2008), radiação térmica é a energia emitida pela matéria que possui temperatura acima de 0 K. Esta emissão está relacionada com mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas constituintes da matéria. Diferente das outras formas de transferência de calor, a radiação não necessita de um meio material para propagação, isso ocorre pois a energia radiativa é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas que se propagam através do vácuo, enquanto que nos sistemas condutivos e convectivos um meio material se faz necessário para propagar a energia.

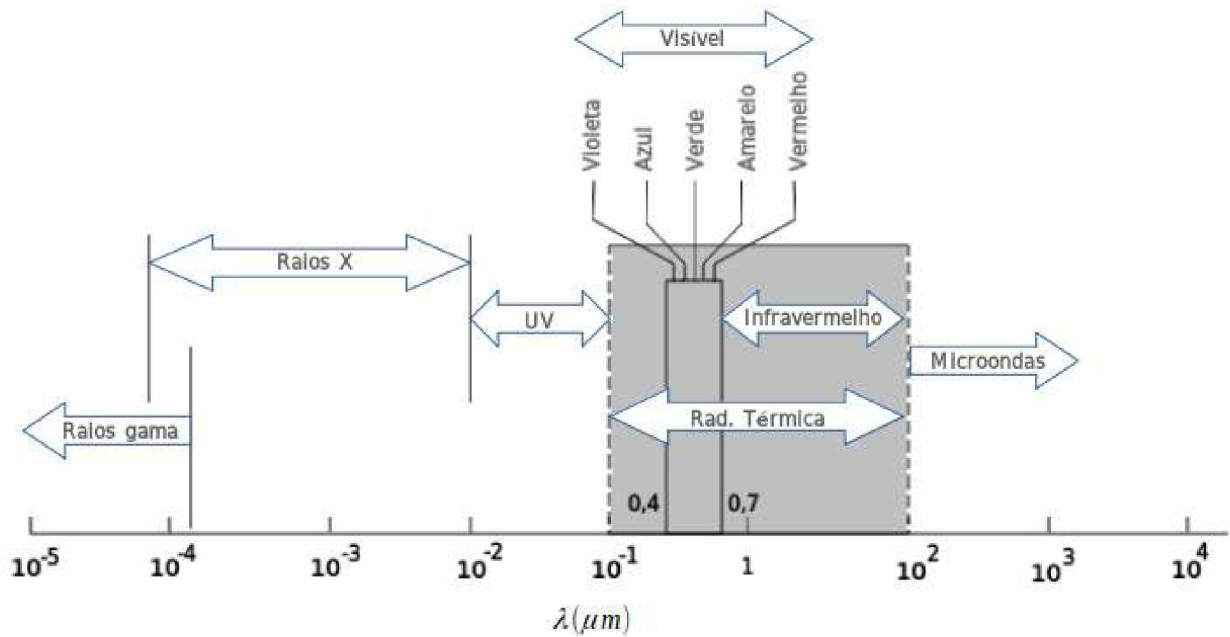
Um fato que evidencia a importância da radiação térmica em muitas aplicações é a maneira na qual a emissão radiante depende da temperatura. Isso torna evidente a importância da radiação em casos onde são empregados altos níveis de temperatura como fornos, câmaras de combustão e emissões de energia em explosões nucleares. Contudo, as análises de radiação térmica são mais complexas do que as análises convencionais aplicadas nas trocas de calor por condução e convecção (SIEGEL e HOWELL, 1992).

Em dispositivos termofotovoltaicos, a emissão de radiação é feita através da superfície externa de um combustor, neste caso chamado de emissor. Esses dispositivos devem ser capazes de emitir radiações térmicas suficientemente altas (MODEST, 2003).

Existem diversos tipos de emissores térmicos, cada um desses emissores são capazes de emitir um tipo de radiação que varia de acordo com a temperatura que atinge. O tipo de radiação é representado por uma escala do espectro eletromagnético, como ilustrado na Figura 2. Da ordem crescente de energia, tem-se primeiro as ondas de radio, seguida pela radiação infravermelha, luz visível, luz ultravioleta, raios X e por ultimo os raios gama. Neste trabalho, a região de interesse

espectral equivale aos comprimentos de onda na região da luz visível e infravermelho ($3,10 - 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$).

FIGURA 2: ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO



FONTE: INCROPERA et al. (2008).

Todo comprimento de onda do espectro eletromagnético possui uma quantidade de energia de fóton associada, essa associação é representada pela relação de Planck (LIMA, 2019). A Tabela 1 apresenta a energia do fóton para cada comprimento desse espectro. Observa-se que, quanto menor o comprimento de onda, maior a energia associada a este.

TABELA 1: FAIXA ESPECTRAL E ENERGIA DE FÓTON ASSOCIADA

Radiação eletromagnética	Frequência	Comprimento de onda	Energia do fóton (eV)
raios X e gama	> 3 PHz	< 100nm	> 12
Ultravioleta UVC UVB UVA	3 PHz – 1,07 PHz	100nm – 280nm	12,42 – 4,42
	1,07 PHz – 0,952 PHz	280nm – 315nm	4,42 – 3,94
	0,952 PHz – 0,75 PHz	315nm – 400nm	3,94 – 3,10
luz visível	0,75 PHz – 0,428 PHz	400nm – 700nm	3,10 – 1,77
infravermelha IVA IVB IVC	385 THz – 214 THz	780nm – 1,4 μ m	1,59 – 0,88
	214 THz – 100 THz	1,4 μ m – 3,0 μ m	0,88 – 0,414
	100 THz – 300 GHz	3,0 μ m – 1,0mm	0,414 – 1,24 ⁻³
radiofrequência	300 GHz – 10 kHz	1mm – 30km	muito pequena
Micro-onda	300 GHz – 300 MHz	1mm – 1M	
frequência extremamente baixa	300 Hz – 0 Hz	1M - ∞	extremamente pequena

FONTE: Okuno e Yoshimura: Física das Radiações (2010).

Os dispositivos TPV operam com base na energia do fóton, através do efeito fotovoltaico, esse efeito descreve como a radiação incidente sobre uma junção positivo-negativo (p-n) induz uma força eletromotriz (BASU et al., 2007). Isto requer uma barreira interna de potencial, construída através de um campo elétrico para separar os pares elétron-lacuna como mostrado na Figura 3. A barreira é formada em um único cristal semiconductor contendo ambas regiões do tipo-n e do tipo-p, sendo que na região do tipo-p existe uma grande concentração de lacunas e com poucos elétrons, já na região do tipo-n o oposto é observado. A interface entre as duas regiões é usualmente chamada de junção p-n.

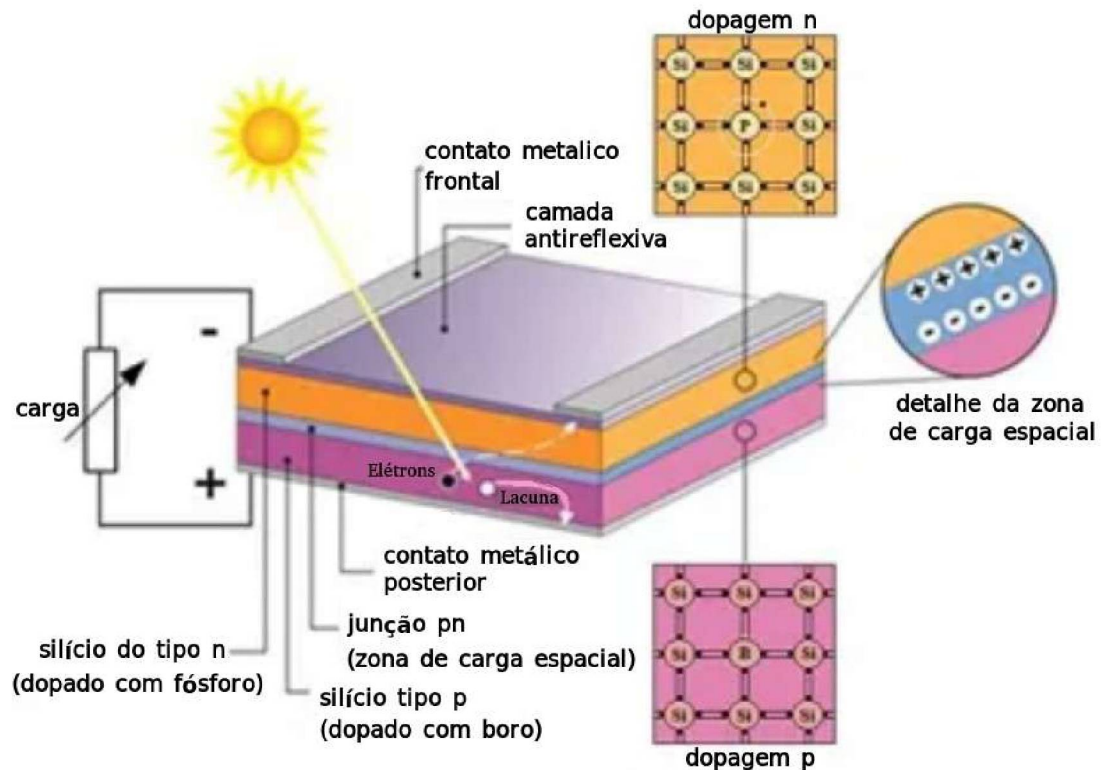
A formação de um gradiente de concentração causa a difusão de elétrons do lado-n que irão se ligar a lacunas no lado-p. Este fenômeno ocorre em uma região próxima à junção, chamada de região de depleção, sendo que a formação de um campo elétrico que se opõe à difusão faz com que a extensão da região de depleção seja limitada.

Quando um fóton incidente com energia suficiente (maior que o *band gap*² da célula) é absorvido por um átomo no lado-n da região de depleção, ocorre a formação

2 Band gap – É a diferença energética entre o topo da banda de valência e a parte inferior da banda de condução.

de pares elétron-lacuna e o elétron livre pode sair da região de depleção devido ao campo elétrico gerado, podendo ser coletado por eletrodos e conduzido para um circuito externo, retornando à célula pelo lado-p e fechando o circuito.

FIGURA 3: CÉLULA FOTOVOLTÁICA



FONTE: SUN7 (2020).

Caso a radiação incidente não possua energia suficiente, esta poderá causar um aumento de temperatura indesejado no sistema, por isso, é comum o uso de um filtro óptico que diminua a passagem da radiação no comprimento de onda indesejado. Esses filtros podem ser vistos como materiais semitransparentes, que interagem com a radiação de maneira seletiva, como será discutido a seguir.

2.1.1 Radiação em meios semitransparentes

Algumas substâncias líquidas e sólidas são capazes de absorver energia radiativa somente em comprimentos de onda específicos, logo, não podem ser chamados de opacos e sim semitransparentes. Exemplos típicos dessas substâncias são a água, o vidro e o quartzo.

Vidros e outros sólidos amorfos tendem a ter superfícies extremamente lisas, logo, suas propriedades radiativas são facilmente determinadas através da geometria

óptica e do raio rastreador, permitindo previsões precisas das refletividades na interface, calculadas pela teoria das ondas eletromagnéticas (MODEST, 2003).

Um exemplo de aplicação desses materiais, são os filtros ópticos usados em células PV. Esses filtros permitem que uma resposta de frequência arbitrária seja aproximada em uma faixa de frequência de interesse (MADSEN et al., 1999).

Essa função dos filtros é fundamental para aplicação nos sistemas TPV, permitindo apenas que o comprimento de onda espectral de interesse seja transmitido, enquanto o restante do comprimento de onda espectral é refletido/absorvido. Um exemplo desses filtros são os filtros “bandpass”, que transmitem luz apenas sobre uma região de comprimento de onda finita, enquanto os filtros de banda transmitem apenas acima ou abaixo de certos comprimentos de onda (MODEST, 2003).

Os problemas encontrados na fabricação desses filtros ópticos estão na dependência da temperatura, no controle sobre os índices de refração e espessuras de suas camadas. Sendo o controle da temperatura uma preocupação prática, pois esses dispositivos devem operar em uma determinada faixa de temperatura, por exemplo, de 0 e 80°C, caso contrário, apresentará queda em seu desempenho (MADSEN et al., 1999).

Pesquisas sobre a aplicação dos filtros ópticos em sistemas TPV são frequentemente encontrados na literatura. Por exemplo, Basu et al. (2006) em seu estudo sobre sistemas MTPV, cita que o filtro óptico acoplado com malhas metálicas, apresentam alta transmitância na região espectral de 1,6 e 2,0 μm , retendo todos os outros fótons para comprimentos de ondas diferentes.

Celanovic et al. (2004) aplicou filtros ópticos dispostos em duas pilhas dielétricas compostas por dez camadas de Si-SiO₂, em uma pilha modificaram o perfil do índice refractivo (L/2.HLHLHL.H/2) e a outra não (LHLHLHL). Segundo Celanovic et al. (2004), nos sistemas TPV, os filtros modificados apresentaram desempenho superior em relação aos não modificados em ~10%.

O'Sullivan et al. (2005) também utilizou filtros ópticos de Si-SiO₂, variando as espessuras das camadas. Seus resultados apresentaram índices de reflectância e transmitância de 0,8 e 3,3 μm respectivamente, além de possuir eficiência espectral de 40% na seletividade de comprimentos de onda emitidos por um corpo negro a temperatura de 1500K.

2.2 SISTEMAS TERMOFOTOVOLTAICOS

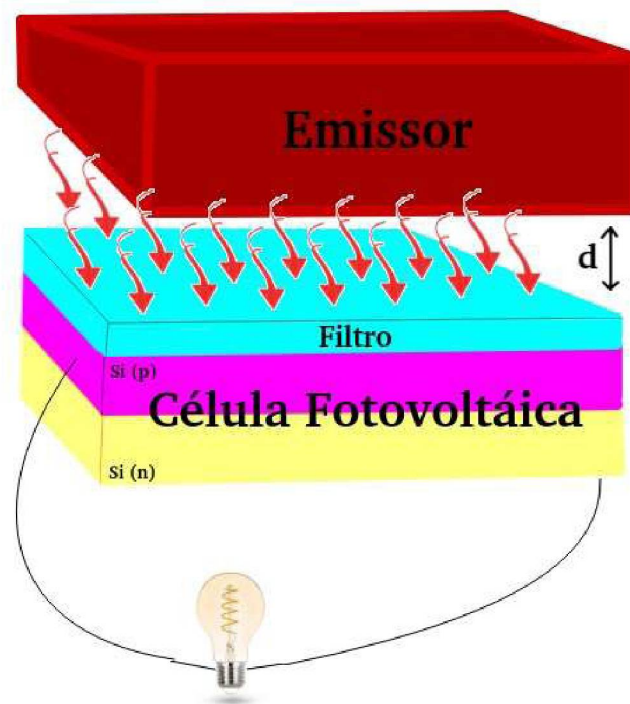
Também conhecidos por sua sigla TPV, os sistemas termofotovoltaicos são basicamente conversores de radiação emitidas pelo aquecimento de um corpo em energia elétrica. Um sistema termofotovoltaico é composto por um emissor térmico, um filtro óptico e uma célula fotovoltaica como mostrado na Figura 4. Esses sistemas foram propostos há quase 100 anos e sua aplicação é bastante restrita em comparação com sistemas energéticos usados atualmente (energia nuclear, eólica, hidroelétricas, etc.), devido à sua baixa eficiência na conversão energética.

Substancialmente iniciando na década de 1960, esses sistemas eram investigados por pesquisadores, em universidades, em laboratórios governamentais e em centros de pesquisas industriais a fim de buscar um recurso que ampliasse a produção energética (BASU et al., 2007). Com o passar dos anos os sistemas TPV sofreram inúmeras revoluções, em 1980 com o filtro de baixa lacuna de banda fotovoltaica e em seguida, potencializada pela adição de emissores espectralmente seletivos de alta temperatura.

São muitos os trabalhos e pesquisas sobre emissores e modelos termofotovoltaicos, mas são poucas as demonstrações experimentais sobre esses estudos. Além disso, a grande maioria dos trabalhos considera somente a região do microcombustor (emissor), sem avaliar a transferência de calor na região externa.

Um estudo experimental realizado por Woolf et al. (2018) com emissor seletivo de platina a temperatura de 1055°C, alcançou uma eficiência de conversão térmica para elétrica de 23,3% utilizando filtro óptico e 15,4% sem o filtro.

FIGURA 4: SISTEMA TPV

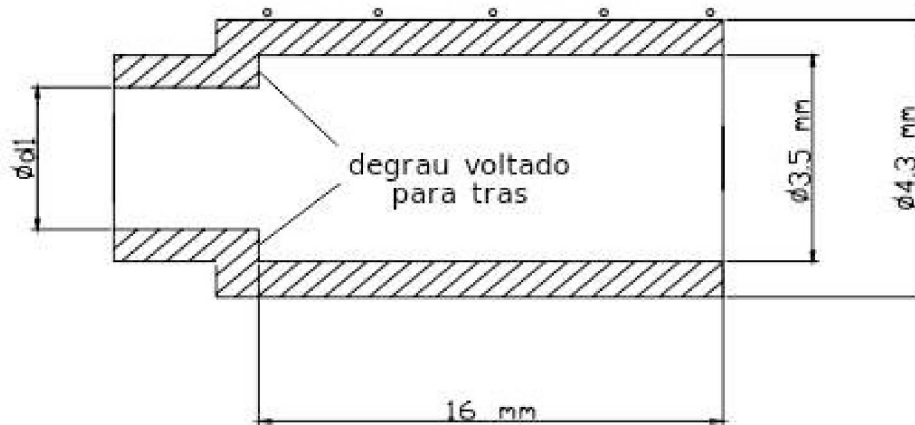


FONTE: O Autor (2020).

Yang et al., (2007) da universidade nacional de Singapura (NUS) apresentaram um estudo utilizando carbeto de silício (SiC) como emissor. A configuração desse microcombustor foi do tipo degrau voltado para trás, esse equipamento apresenta um pequeno canal de entrada e ao final deste canal, o diâmetro é ligeiramente aumentado, gerando assim o degrau, como ilustrado na Figura 5. Neste estudo, Yang et al. (2007) apresentou resultados experimentais alterando o diâmetro do canal de entrada de combustível (d_1) e conseqüentemente o tamanho do degrau na Figura 5. Nesta figura, o combustível é alimentado por esse canal e queimado no interior do MC, ocasionando o aquecimento das paredes do equipamento. O aumento do degrau garante a estabilização da chama de queima, que por sua vez ocasiona uma maior e mais uniforme distribuição de temperatura nas paredes do MC.

Yang et al. (2007) relatou que, apenas microcombustores com altura de degrau acima de 0,5mm obtiveram resultados em produção energética. O filtro óptico, utilizado por eles foi um cristal fotônico composto de nove camadas alternadas de Si-SiO₂.

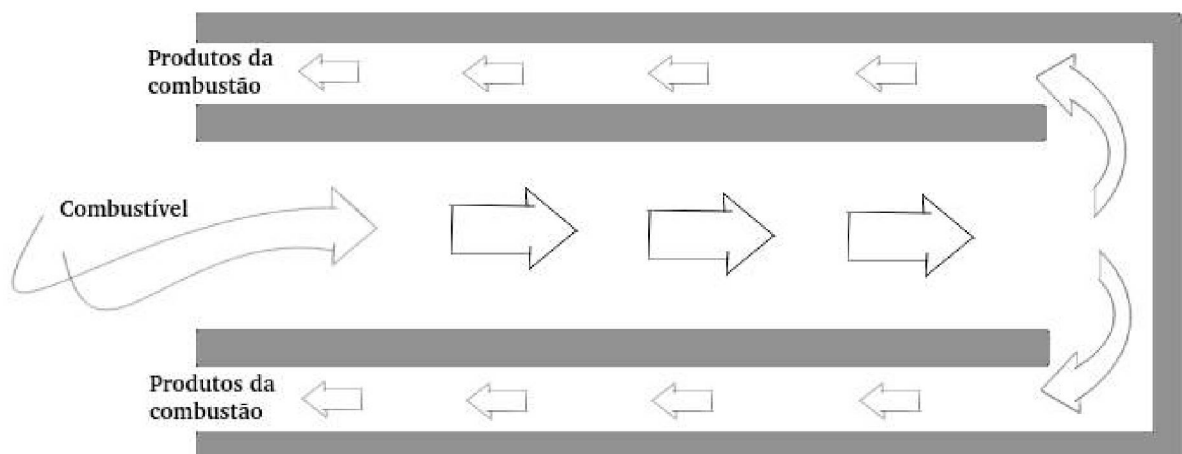
FIGURA 5: DISPOSITIVO MICROCOMBUSTOR



FONTE: YANG et al. (2007).

Yilmaz et al. (2017) investigou microcombustores simples similares, na tentativa de estabilizar a chama, utilizou cavidades na zona de combustão. Segundo Yilmaz et al. (2017), a estabilização da chama garante maior tempo de residência e melhora a distribuição de temperatura na parede externa do microcombustor. Chen et al. (2017) aplicou um sistema de recirculação com uma câmara de reação localizada ao centro de outras duas câmaras de recirculação separadas por paredes de platina conforme mostrado na Figura 6. Nesta figura, observa-se que os produtos da combustão do sistema microcombustor foram distribuídos entre as câmaras, pré aquecendo a alimentação de entrada fria ao invés de serem apenas expelidos na forma de gases quentes.

FIGURA 6: SISTEMA MICROCOMBUSTOR COM RECIRCULAÇÃO DE GASES



FONTE: Chen (2017).

Chou et al. (2010) utilizou um microcombustor SiC com recheio poroso na tentativa de aumentar a temperatura média da parede do microcombustor. Seus

resultados apresentaram um aumento de 134K em relação ao sistema microcombustor sem poros, resultando em um acréscimo de 81,2% de energia radiativa útil após a passagem pelo filtro óptico. Relatou ainda, a obtenção de 4,11W de potência elétrica para microcombustor de porosidade 0,4.

Zhao et al. (2010) na tentativa de otimizar o design dos sistemas termofotovoltaicos, aplicou técnicas de radiação solar concentrada e não concentrada nas células fotovoltaicas, essa radiação foi atenuada na região 0,8 - 2 μm apresentando alto índice de absorção enquanto na região de 0,2 - 0,8 μm apresentou alto índice de transmissão radiativa.

Um trabalho realizado por Lin et al. (2003), apresentou um emissor seletivo de tungstênio com camada de cristal fotônico, fabricado utilizando silicone modificado. Segundo Lin et al. (2003), quando esse emissor é submetido a temperatura de 1535K, um forte pico radiativo dominante encontra-se na região espectral $\lambda \sim 1.5 \mu\text{m}$, isso representa cerca de 40.5W/cm² de poder radiativo e uma conversão de energia óptica em elétrica de ~34%.

Para facilitar o entendimento do leitor a Tabela 2 apresenta um resumo de alguns trabalhos sobre sistemas MTPV encontrados na literatura. Alguns desses trabalhos não mencionam o método radiativo utilizado e se utilizaram filtros ópticos em seus sistemas, mas as informações que nela constam como o tipo de material utilizado como emissor e a temperatura deste, podem ser utilizadas como referência para o desenvolvimento de estudos similares. A coluna ef. elétrica é de suma importância pois apresenta a eficiência obtida pelos respectivos autores na conversão de energia térmica em elétrica.

Por fim, a coluna filtro apresenta os tipos de filtros utilizados pelos autores, como é o caso dos filtros de cristais fotônicos aplicados por Lin et al. (2003), Celanovic et al. (2004) e Yang et al. (2007). Esses cristais são materiais dielétricos dispostos em diversas camadas, que afetam a passagem dos fótons para determinado comprimento de onda λ . As propriedades desses cristais como transmissividade, reflexividade e absorvidade variam de acordo com a quantidade de camadas dos materiais dielétricos.

TABELA 2: ESTUDO MTPV, CARACTERÍSTICAS, MODELOS RADIATIVOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Ano	Autor	Método Radioativo	Emissor	T_E (K)	Filtro	Material do Filtro	Ef. Elétrica
2003	Lin et al.	-	Emissor Seletivo	1535	Cristal Fotônico	Si-SiO ₂	~34%
2004	Celanovic et al.	-	SiC	1500	Cristal Fotônico	Si-SiO ₂	~18%
2007	Yang et al.	-	SiC	3003	Cristal Fotônico	Si-SiO ₂	-
2010	Chou et al.	-	SiC	1624	NA	-	-
2010	Zhao et al.	Inverso	Emissor Seletivo	5762	Placa de Vidro	SiO ₂	~10%
2017	Chen et al.	View Factor	Swiss Roll	800	NA	-	-
2018	Woolf et al.	View Factor	Emissor Seletivo	1328	Filtro Dielétrico	CaF ₂	~24%

FONTE: O Autor (2020).

 T_E = temperatura do emissor;

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

Para condução e convecção, a transferência de energia entre dois locais depende da diferença de temperatura das posições na ordem de T^1 . Enquanto a transferência de energia por radiação térmica entre dois corpos, depende da diferença entre a temperatura absoluta individual de cada corpo na ordem de T^4 ou T^5 (SIEGEL e HOWELL, 1992).

Sob condições normais, condução e convecção são fenômenos de curto alcance: a distância média entre colisões moleculares é geralmente muito pequena, talvez em torno de 10^{-10} m. Se ocorrerem, por exemplo, 10 colisões até que uma molécula de alta energia cinética tenha uma energia cinética similar a das moléculas nas proximidades, então qualquer influência externa não é diretamente sentida de uma distância acima de 10^{-9} m. Já nos sistemas de radiação térmica, trata-se de um fenômeno de curto e longo alcance (MODEST, 2003).

Por isso a radiação é importante em muitas instâncias, por que ela age à distância fornecendo fontes de calor locais que modificam a distribuição de temperatura, influenciando assim a condução, convecção livre ou convecção forçada. Por exemplo, a radiação pode aquecer as paredes de um local fechado, produzindo convecção livre de ar onde ele normalmente não ocorreria (SIEGEL e HOWELL, 1992).

Essa energia radiativa pode ser vista como ondas eletromagnéticas ou pacotes de energia sem massa. Quando essa energia viaja através de um meio (ou vácuo) e colide com uma outra superfície de outro meio, parte desse pacote de energia pode ser refletida e qualquer parte dessa energia que não for refletida penetra no meio. Quando isso ocorre, a radiação penetrante pode ou não atenuar-se até que não volte a aparecer. Em meios onde a atenuação é completa, denominam-se por opacos, já quando a atenuação da energia é desprezível, ou seja, quando toda a radiação incidente é transmitida ao lado oposto do meio, denominam-se por transparentes. Podem-se ainda existir meios no qual apenas parte da energia radiante incidente é atenuada, esses são denominados semitransparentes (MODEST, 2003).

Essas características de meios, transparentes, semitransparentes e opacos se dá devido a propriedade do material e a espessura que este possa ter, por exemplo, uma superfície opaca que não reflete qualquer radiação é denominada de absorvedor perfeito ou superfície negra.

2.4 PROPRIEDADES RADIATIVAS FUNDAMENTAIS

2.4.1 Ângulo Sólido

Quando energia radiativa sai de um meio e entra em outro, este fluxo energético usualmente tem diferentes forças e diferentes direções. Este fluxo costuma ser descrito por um vetor direção em termos de esfera ou sistema de coordenadas polares. Aparentemente a superfície pode irradiar energia para muitas direções e seus raios penetram através da hemisfera de unidade radial. A área da hemisfera é dada por $2\pi r^2$ e é conhecido como ângulo sólido total sobre a superfície. Uma direção de emissão arbitrária da superfície é especificada pelo vetor direção unitário \hat{s} , qual pode ser expresso em termos de ângulo polar θ e ângulo azimutal ϕ (MODEST, 2003).

Pode-se interpretar as forças e direções utilizando termos de coordenadas polares, a Figura 7 apresenta a emissão radiativa de um corpo qualquer em um ponto P de área dA . Considerando uma hemisfera de área $2\pi r^2$. A força da radiação incidente projetada na superfície ortonormal ao plano do vetor direção pode ser representada por

$$d\Omega = \frac{dA_{jp}}{\hat{s}^2} = \frac{\cos \theta_j dA_j}{\hat{s}^2} = dA_j'' \quad (1)$$

Pode-se ainda escrever na forma das coordenadas polares como:

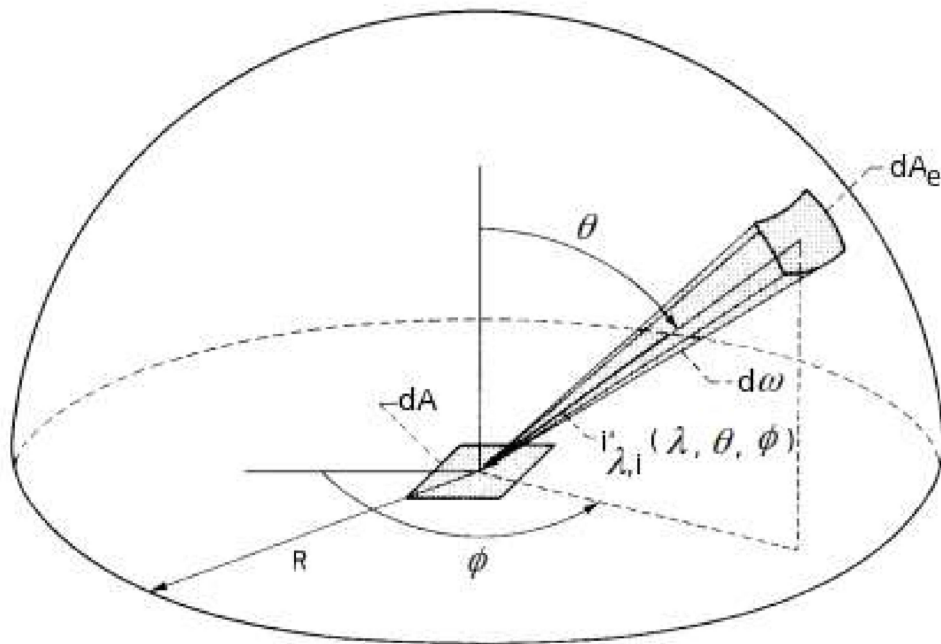
$$d\Omega = dA_j'' = \sin \theta d\theta d\phi \quad (2)$$

Integrando em relação total a área da hemisfera tem-se:

$$\Delta \Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta d\theta d\phi \quad (3)$$

Onde $d\psi$ e $d\theta$ são o ângulo azimutal e o ângulo polar respectivamente.

FIGURA 7: HEMISFÉRA RADIATIVA REPRESENTATIVA PARA ÂNGULO SÓLIDO E DIREÇÃO EMISSORA.



FONTE: SIEGEL e HOWELL, (1992).

2.4.2 Intensidade Radiativa

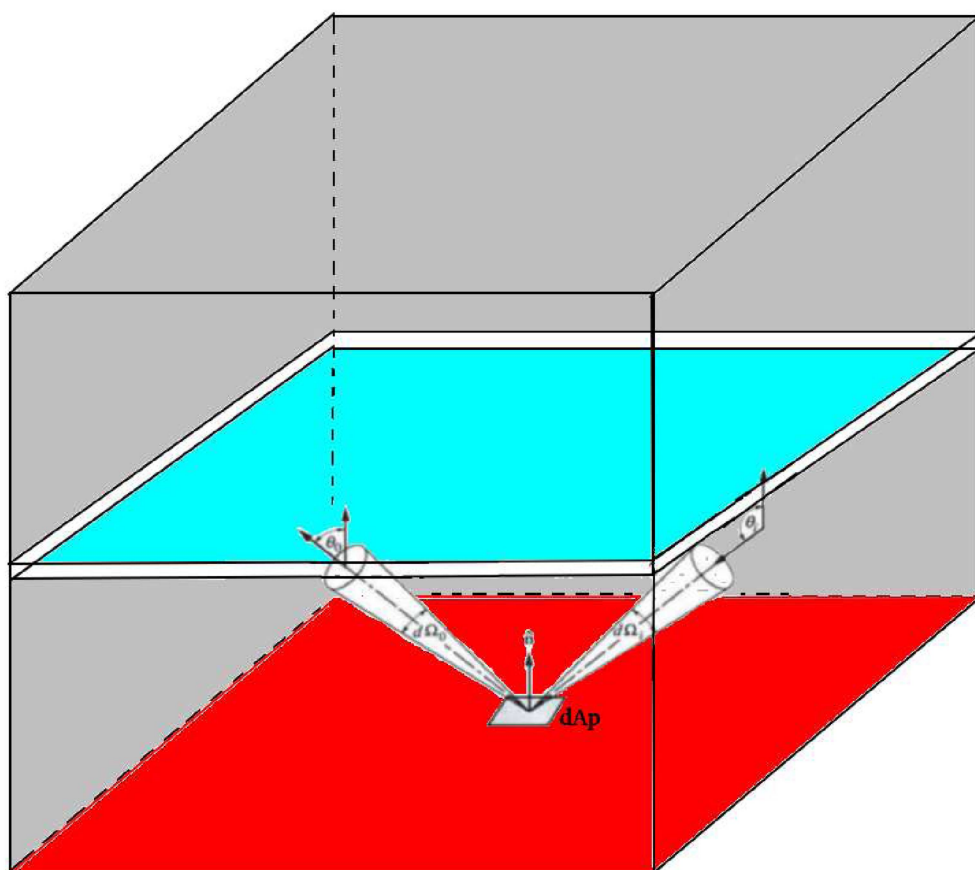
De uma maneira similar ao poder emissivo, pode-se definir a intensidade radiativa (I) como um fluxo energético radiativo por unidade do ângulo sólido por unidade de área normal aos raios emitidos.

$$I(r, \vec{s}) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(r, \vec{s}, \lambda) d\lambda \quad (4)$$

Integrando sobre todas as direções:

$$I(r, \vec{s}) dA_p d\Omega = I(r, \vec{s}) dA \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (5)$$

Onde dA_p é a área infinitesimal emissora em um ponto p , $d\Omega$ é o ângulo sólido infinitesimal e θ representa o ângulo entre o vetor direção \hat{s} e a normal n a área dA_p como mostrado na Figura 8.

FIGURA 8: EMISSÃO DE RADIAÇÃO DE UMA ÁREA dA_p NO SISTEMA TPV

FONTE: O Autor (2020).

Em superfícies opacas, a energia segue atenuando-se dentro do sólido até que cesse totalmente sem realizar qualquer reflexão ou transmissão desta. Já para superfícies semitransparentes, parte da radiação é refletida e transmitida como mostra a Figura 9. Nesta figura, Oliveira (2018) mostra que para uma superfície semitransparente, colimada³ por uma quantidade de radiação incidente⁴ G , uma parcela dessa radiação poderá ser refletida (ρG), uma parcela poderá ser absorvida (αG) e uma parcela poderá ser transmitida (τG). Para o filtro semitransparente utilizado neste trabalho, as propriedades radiativas fundamentais como a reflexividade, a absortividade e a transmissividade, podem ser determinadas através das seguintes relações:

$$\rho = \frac{\text{parte refletida da radiação incidente}}{\text{radiação incidente total}} \quad (6)$$

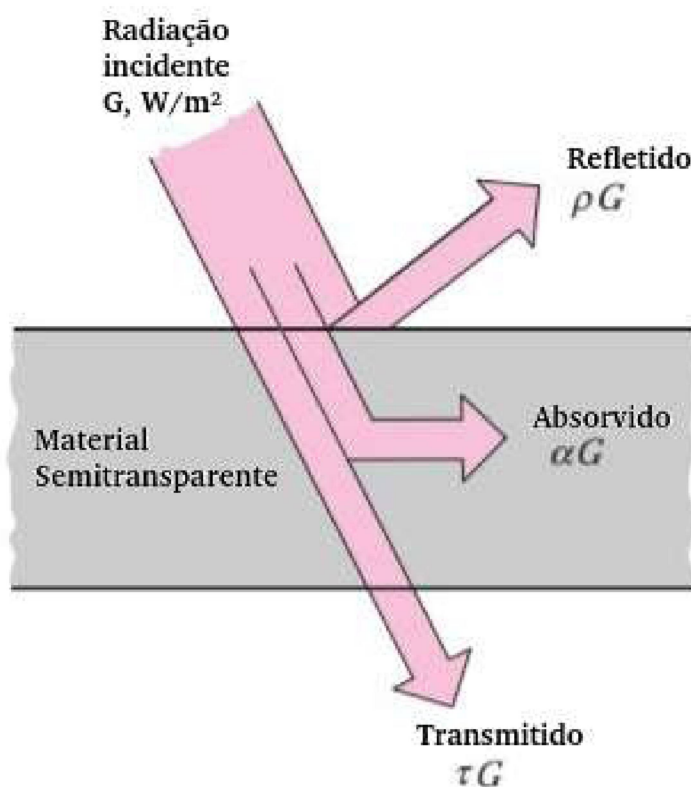
3 Superfície colimada – É a superfície visada, pretendida, almejada.

4 Radiação incidente – É a radiação que incide sobre uma superfície ou objeto.

$$\alpha = \frac{\text{parte absorvida da radiação incidente}}{\text{radiação incidente total}} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\text{parte transmitida da radiação}}{\text{radiação incidente total}} \quad (8)$$

FIGURA 9: ABSORÇÃO, REFLEÇÃO E TRANSMISSÃO POR UMA SUPERFÍCIE SEMITRASPARENTE



FONTE: Oliveira (2018).

Desde que toda a radiação possa ser refletida, absorvida e transmitida, conclui-se que

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (9)$$

Se o meio for suficientemente espesso a ponto de ser opaco, então $\tau = 0$ e

$$\rho + \alpha = 1 \quad (10)$$

Nota-se que todas as três propriedades são adimensionais e podem variar na magnitude entre os valores de 0 e 1. Para uma superfície negra $\alpha=1$, logo, $\rho = \tau = 0$.

Como todas as superfícies emitem radiação térmica, e de acordo com a lei de Kirchhoff que diz que os corpos negros são os melhores emissores, pode-se definir a quarta propriedade não dimensional:

$$\epsilon = \frac{\text{energia emitida de uma superfície}}{\text{energia emitida de uma superfície negra a mesma temperatura}} \quad (11)$$

A absorvidade pode ser diferente para diferentes direções de irradiação, enquanto a emissividade pode variar com as direções de saída. Finalmente, a magnitude da reflexividade e transmissividade pode depender de ambas direções de entrada e saída (MODEST, 2003).

3 OPENFOAM

Neste trabalho, as simulações foram realizadas utilizando o software OpenFOAM. Inicialmente, o software FOAM ("Field Operation And Manipulation") foi criado por Henry Weller no final da década de 1980 no Imperial College London, com o propósito de desenvolver uma plataforma de simulação geral mais capacitada e flexível que o padrão da época, a linguagem Fortran. Isto levou à escolha do C++ como linguagem de programação. Tornou-se um software de código aberto em 10 de dezembro de 2004, licenciado exclusivamente sob a GNU General Public License. O software foi renomeado como "OpenFOAM" para refletir sua nova identidade e FOAM deixou de ser licenciado com efeito imediato (OPENFOAM, 2004).

O software possui uma grande base de usuários, na maioria das áreas da engenharia e ciência, tanto de organizações comerciais quanto acadêmicas. Isso porque abrange uma ampla gama de recursos para resolver problemas que vão de fluxos complexos de fluidos envolvendo reações químicas, turbulência e transferência de calor até acústica, mecânica de sólidos e eletromagnetismo (OPENFOAM, 2019).

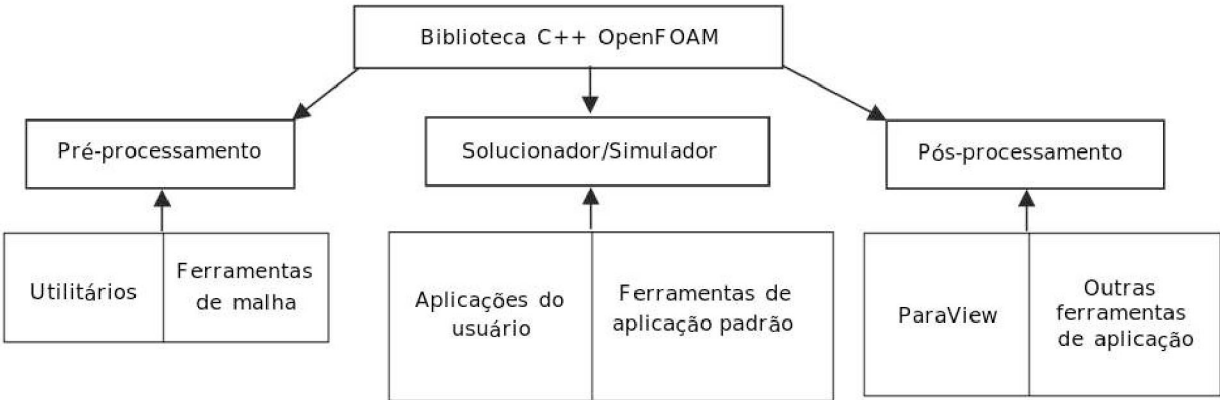
3.1 ESTRUTURA DO OPENFOAM

OpenFOAM é uma biblioteca C++ e tem duas aplicações: solvers e utilitários, cabe ao usuário escolher o solver e manipular os dados de acordo com o problema a ser resolvido. A operação do OpenFOAM inclui configuração de caso, usando a ampla gama de funções disponíveis no banco de dados, execução de aplicativos e pós-

processamento dos resultados como mostrado na Figura 10. No pré-processamento, para gerar a malha, pode-se usar o gerador de malha do OpenFOAM ou ferramentas de conversão de malha (AUNG et al., 2018).

No pós-processamento, pode-se usar o ParaView, um aplicativo de visualização de código aberto, que pode ser chamado pelo utilitário de pós-processamento paraFoam no OpenFOAM (AUNG et al., 2018).

FIGURA 10: ESTRUTURA GERAL DO OPENFOAM



FONTE: Aung et al. (2018).

A determinação do solucionador utilizado define o conjunto de equações que regem os fenômenos físicos que modelam o sistema e que serão resolvidas. O software apresenta uma gama enorme de solucionadores para escoamentos laminares e turbulentos, compressíveis e incompressíveis, sistemas multifásicos, etc (GREENSHIELDS, 2019). Um solucionador que se encaixa nas necessidades desse trabalho é o de transferência de calor conjugada em multiregiões (*chtMultiRegionFoam*). Esse solucionador trabalha com fluxo de fluido estacionário ou transiente, condução de calor com transferência de calor conjugada entre regiões, efeitos de flutuabilidade, turbulência, reações e modelagem de radiação (USERGUIDE, 2018).

3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA PRELIMINAR PARA SOLVER CHTMULTIREGIONFOAM

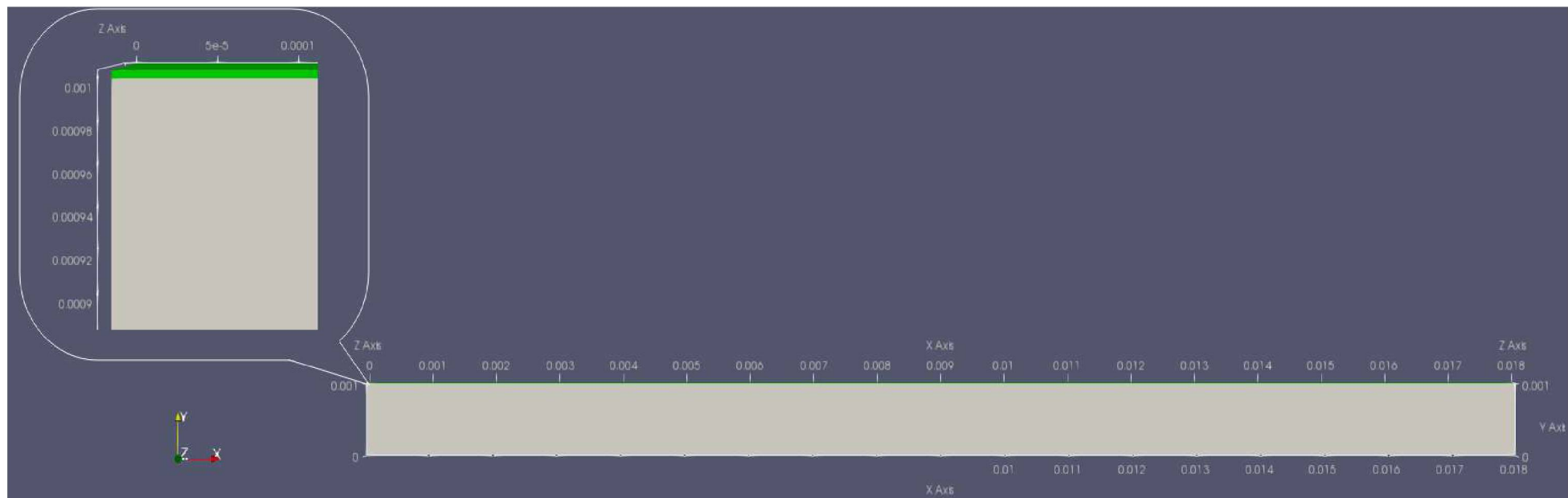
3.2.1 Caso Base para Emissão Radiativa

As equações que regem os fenômenos físicos e modelam o movimento dos fluidos e a transferência de calor são regidas por leis físicas de conservação, contudo, antes de apresentar essas equações, algumas hipóteses devem ser adotadas para o caso base:

- O modelo termodinâmico será de gás ideal;
- O sistema é considerado falso transiente (os resultados são coletados após a estabilidade do sistema);
- As propriedades físicas são constantes;
- A região fluida apresenta escoamento laminar e compressível;
- Na região fluida será considerada troca de calor por convecção e radiação;
- Na região do filtro será considerada troca de calor por condução e radiação;
- A região do filtro será considerada um meio participante semitransparente.

Ainda, neste trabalho, será considerado um sistema cartesiano 2D, constituído de uma região sólida (filtro) e uma região fluida (ar).

FIGURA 11: MALHA COMPUTACIONAL DO SISTEMA MTPV (CASO BASE)



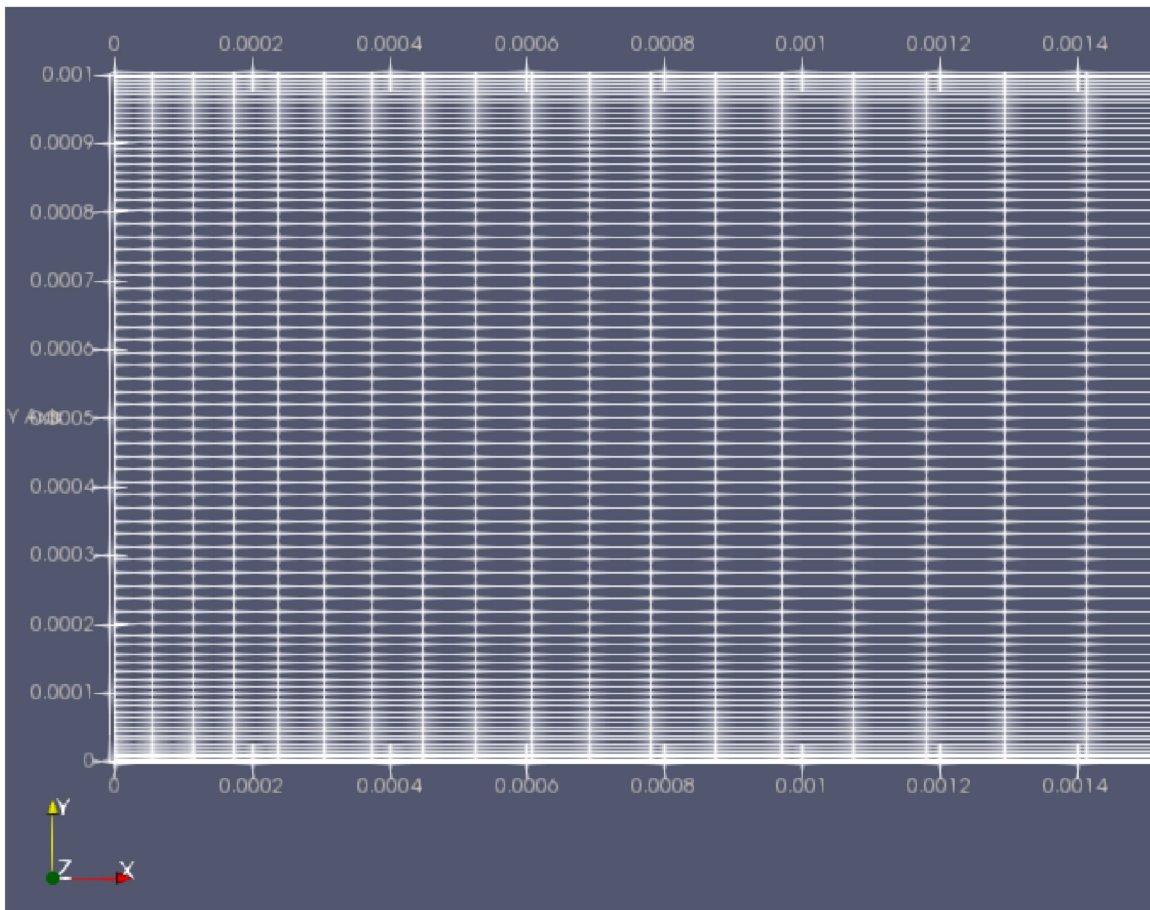
FONTE: OPENFOAM (2020).

3.3 DISCRETIZAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO E MALHA COMPUTACIONAL

As malhas são formadas por diferentes blocos de células, neste trabalho será utilizado o sistema de blocos hexaédricos o que resultará em um decréscimo considerável no custo computacional necessário para realizar as simulações. Em casos onde a geometria do objeto é demasiado complexa, a criação da malha computacional pode ser gerada pelo próprio OpenFOAM ou ferramentas de conversão de malha para dados de malha, como Fluent, STAR-CD, ANSYS, GAMBIT e CFX.

A geometria do caso base será de 18mm x 1,0039mm e refinado nas proximidades do limite superior e inferior. Essa técnica de refinamento pode ser aplicada em diferentes regiões, por exemplo, onde o gradiente de temperatura é mais relevante, aumentando os elementos na malha computacional como mostrado na Figura 13, esse aumento ocasiona uma redução no erro da solução numérica e não influi significativamente no custo computacional. Em alguns casos uma malha mais refinada pode ser necessária caso o problema apresente divergência na solução (JATOBA, 2019). O software OpenFOAM permite refinar a malha manualmente, alterando as seções de números de célula nos eixos x , y no índice de expansão de célula. Ainda para este caso base, a região fluida possui dimensões 18mm x 1,00mm e o filtro possui dimensões 18mm x 0,0039mm.

FIGURA 12: MALHA COMPUTACIONAL DO SISTEMA MTPV EM WIREFRAME (CASO BASE)



FONTE: OpenFOAM (2020).

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1 EQUAÇÕES REGENTES DO MTPV

As equações de conservação válidas para o caso 2D, falso transiente, laminar, compressível e de propriedades físicas constantes, são:

conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (12)$$

conservação de momento:

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) - \nabla P - \rho \vec{g} \quad (13)$$

Conservação de energia:

-Fluido

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \vec{v}) = -\nabla \cdot (k \nabla T) + \rho r + Q_\lambda \quad (14)$$

-Sólido

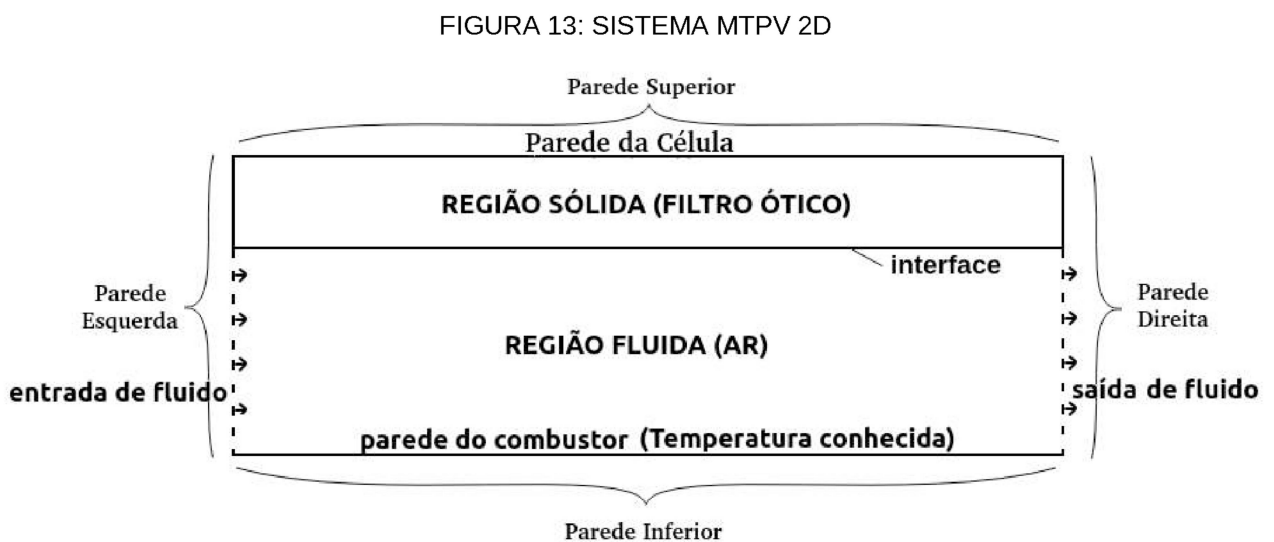
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) + Q_\lambda \quad (15)$$

Equação do transporte radiativo:

$$I_\lambda(\Omega \vec{s}) = I_0(\vec{s}) e^{-k_\lambda \delta} + \frac{n^2 k_\lambda \sigma}{\pi} \int_{s=0}^s T^4(s') e^{-k_\lambda s'} ds \quad (16)$$

P = pressão (kg/m.s²); μ = viscosidade (kg/m.s); g = gravidade (m/s²); h = entalpia (m²/s²); T = temperatura (K); ρ = densidade (kg/m³); Q = fluxo de calor (W/m²) e fluxo de calor radiativo (W/m²) respectivamente; k = condutividade térmica (kg.m/s³.K); α = difusividade térmica ($k/\rho.c_p$)(m²/s).

Essas equações são aplicadas no sistema MTPV presente na Figura 13.



FONTE: O Autor (2020).

Para o cálculo do gradiente das variáveis de interesse, são utilizados esquemas de primeira ordem como Upwind ou de segunda ordem Gauss linear/Diferenças centrais (CDS) (MALALASKERA & VERSTEEG, 2007). Neste trabalho, para algumas variáveis como velocidade U , pressão p e intensidade radiativa I será adotado esquemas de segunda ordem Gauss linear pois o sistema MTPV conta com uma baixa velocidade no escoamento, e também pelo fato de que, CDS é um método eficiente na solução de problemas que envolvam equações convecção-difusão (MALALASKERA & VERSTEEG, 2007). O restante das variáveis serão calculadas pelo método de primeira ordem Upwind.

O número de Nusselt convectivo, radiativo e total são calculados pelos fluxos de calor nas paredes da seguinte forma:

Número de Nusselt convectivo:

$$Nu_c = \frac{q_c L}{k \Delta T} \quad (17)$$

Número de Nusselt radiativo:

$$Nu_r = \frac{q_r L}{k \Delta T} \quad (18)$$

Número de Nusselt total:

$$Nu_{total} = Nu_c + Nu_r \quad (19)$$

4.2 ALGORITMO DE SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

Para solução dos sistemas de equações, será utilizado um dos algoritmos disponíveis na biblioteca do software OpenFoam (PISO, SIMPLE ou PIMPLE). Estes algoritmos utilizam o método de volumes finitos como base para a resolução dos sistemas de equações através de métodos segregados ou acoplados. Esse método foi desenvolvido baseado no método de integração numérica que começou a ser difundida em 1972. Inicialmente foi tratada como um método de diferenças finitas, com uma formulação via volumes de controle (VC) (PATANKAR e SPALDING, 1972).

Em problemas de escoamento, tem-se como variáveis dependentes pressão e velocidade. Segundo Patankar e Spalding (1972), obtém-se a pressão através da combinação entre a equação da continuidade e do movimento. No algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), o acoplamento dessas variáveis pressão-velocidade permite o cálculo da pressão em todas as direções (MUNIZ, 1995). Esse algoritmo quando combinado ao algoritmo PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) resulta no algoritmo PIMPLE. Todos estes algoritmos são solucionadores iterativos, contudo o PISO e o PIMPLE são utilizados em casos transientes. Outra característica que os define é a melhor estabilidade obtida pelo algoritmo PIMPLE por utilizar as iterações como corretores externos que apenas passam para a próxima etapa de tempo quando ocorre convergência nos valores (SIMWIKI, 2018). Por apresentar essas características vantajosas, será utilizado esse algoritmo para solucionar os sistemas de equações deste trabalho.

4.3 DETERMINAÇÃO DO MODELO RADIATIVO

São muitos os modelos radiativos disponíveis na literatura: viewfactor, método das esferas harmônicas, método zonal, método Monte Carlo e método das ordenadas discretas. Neste trabalho será abordado apenas o método das ordenadas discretas de volumes finitos (fvDOM).

Este método é baseado na representação discreta da variação direcional da intensidade radiativa abrangendo a faixa total do ângulo dos sólidos (4π) (MODEST, 2003).

4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONSTANTES DOS MODELOS PARA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

As condições de contorno para pressão p , temperatura T , velocidade U e radiação incidente G do problema devem ser inseridas na pasta diretório de tempo 0 do OpenFOAM e são apresentadas na Tabela 3. Cada campo é sempre inicializado pelos valores inseridos neste diretório enquanto os outros diretórios de tempo ficam destinados apenas a armazenar os resultados das simulações.

TABELA 3: CONDIÇÕES DE CONTORNO DO CASO BASE

Condições de Contorno			
variável	limite	região sólida	região fluida
p	Todas as Regiões	Calculável	Calculável
p_rgh	Todas as Regiões	Fluxo de Pressão Fixo	Fluxo de Pressão Fixo
T	Parede Esquerda	Gradiente Nulo	Gradiente Nulo
	Parede Direita	Gradiente Nulo	Gradiente Nulo
	Parede Superior	Convecção com o Meio Externo	-
	Parede Inferior	-	Perfil Fixo
	interface	Acoplamento de Temperatura e Radiação	Acoplamento de Temperatura e Radiação
U	Parede Esquerda	Nulo	Entrada e Saída de Velocidade
	Parede Direita	Nulo	Gradiente Nulo
	Parede Superior	Nulo	-
	Parede Inferior	-	Nulo
	interface	Nulo	Nulo
G	Todas as Regiões	Calculável	Calculável
Idefault	Todas as Regiões	Radiação Difusiva por Comp. de Onda	Radiação Difusiva por Comp. de Onda

FONTE: O Autor (2020).

4.5 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

Critérios de convergência são baseados nos controles residuais que o software calcula para finalizar as iterações dos “looping’s”. Para cada caso, existem critérios de convergência e fatores de relaxação que auxiliam e garantem a qualidade dos resultados. Neste trabalho, aplicam-se critérios de convergência para os fluidos, onde estes critérios validam a velocidade residual (u_r), entalpia residual (h_r), radiação incidente residual (G_r) e pressão residual (p_rgh_r), e os fatores de relaxação são

aplicados para a pressão (p_{rgh}), velocidade (u), entalpia (h) e intensidade radiativa (I) afim de garantir a estabilidade e convergência do problema (SOUZA, 2002).

Já na região sólida aplicam-se critérios de convergência apenas para entalpia residual (h_r) e radiação incidente residual (G_r) pois, as outras variáveis nesta região são menos significativas. Quanto aos fatores de relaxação, aplicam-se apenas para as equações de entalpia (h).

Os valores inseridos nos fatores de relaxação são considerados padrão nos casos de transferência de calor por radiação e são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4: FATORES DE RELAXAÇÃO DO SISTEMA MTPV

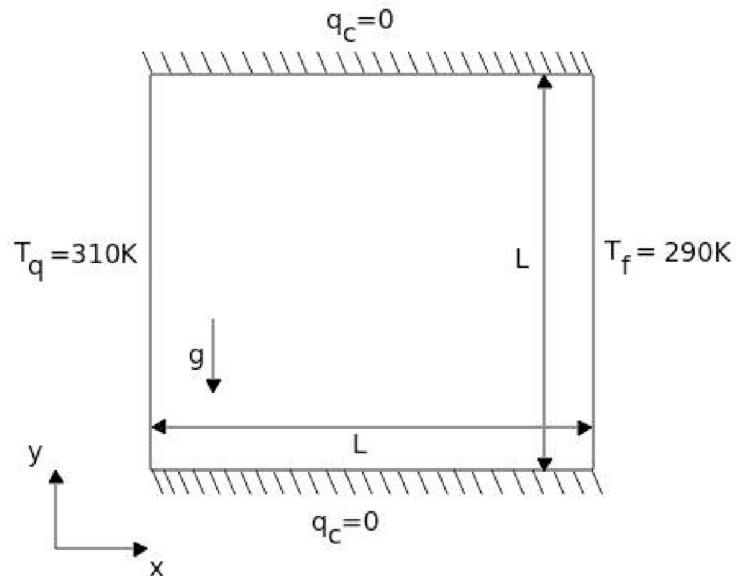
Fator de Relaxação			
Regiões Fluidas		Região Sólida	
p_{rgh}	0,7	h	0,7
U	0,3		
h	0,7		
I	0,7		
G	0,7		

FONTE: O Autor (2020).

4.6 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO PURA CONVECÇÃO

Para a verificação numérica do modelo de pura convecção foi desativado o modo radiativo do OpenFOAM inserindo a informação *none* no arquivo *radiationProperties*, isso faz com que nenhuma contribuição radiativa seja considerada nos cálculos. O esquema para essa verificação seguiu as condições de contorno presente na Figura 15 seguindo o modelo apresentado por Lari et al. (2011).

FIGURA 14: CONDIÇÕES DE CONTORNO PURA CONVECÇÃO



FONTE: O Autor (2020).

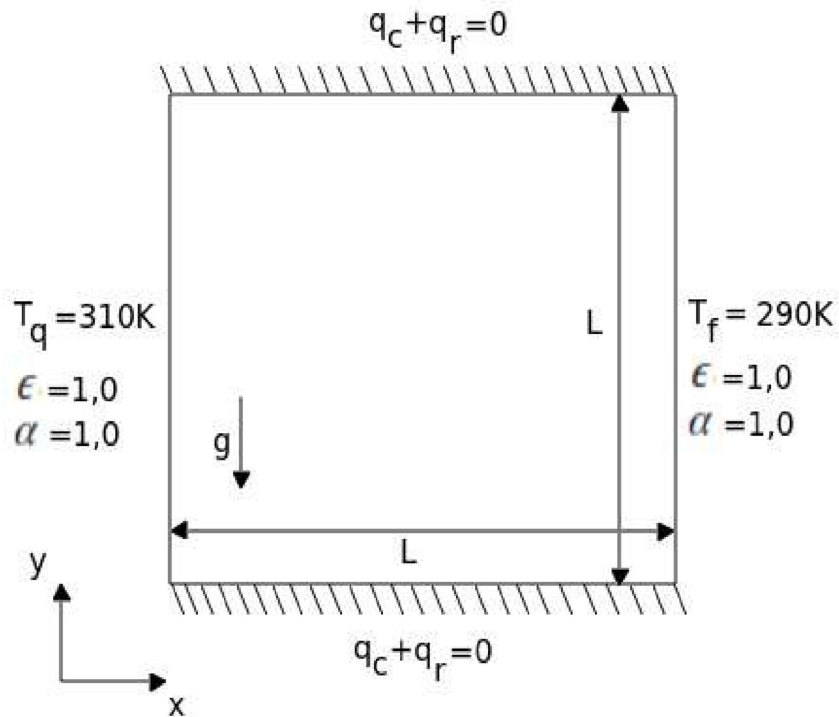
Para essas condições foram calculados diferentes números de Rayleigh ($Ra = 10^3$ até $Ra = 10^6$). A malha utilizada nessa verificação (80×80), apresenta um refino em suas extremidades laterais, onde há maior interesse no gradiente de temperatura. As paredes superior e inferior são adiabáticas e as paredes laterais são isotérmicas.

4.7 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO RADIATIVO

Para a verificação numérica do modelo radiativo, foi realizada a configuração do modelo fvDOM no arquivo *radiationProperties*, fazendo com que haja contribuição na transferência de calor por convecção e radiação. A malha computacional para esta verificação é a mesma da malha anterior (80×80) e também apresenta refino de malha nas regiões onde, os gradientes de temperatura são mais relevantes. As paredes superior e inferior também foram consideradas adiabáticas e as laterais, isotérmicas. Neste modelo, houve variação na espessura óptica do fluido de $\tau' = 0$ até $\tau' = 5$, onde:

$$\tau' = -\ln(\tau) \quad (20)$$

FIGURA 15: CONDIÇÕES DE CONTORNO CONVECÇÃO E RADIAÇÃO ACOPLADAS



FONTE: O Autor (2020).

As constantes do sistema foram utilizadas conforme INCROPERA et al. (2008) e são apresentadas na Tabela 5. O comprimento das geometrias desse sistema é dado em função do número de Rayleigh e pode ser calculado isolando L na equação 15.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (21)$$

TABELA 5: CONSTANTES UTILIZADAS NA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

Constantes	
ν	1,589E-05
α	2,25E-05
g	9,81
β	3,00E-03
Pr	0,707
μ	1,85E-05
ρ	1,1614
C_p	1007

FONTE: INCROPERA et al. (2008). Apêndice A, pag 600.

TABELA 6: VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO UTILIZADOS NA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

Variação de L para diferentes números de Rayleigh				
Ra	1,00E+03	1,00E+04	1,00E+05	1,00E+06
L (m)	0,00847	0,01824	0,03930	0,08467

FONTE: O Autor (2020).

É importante ressaltar que a malha escolhida para essas simulações é uma condição ótima, custo computacional VS precisão dos resultados, neste caso o tempo de simulação varia de acordo com a configuração do equipamento computacional, Para este trabalho utilizou-se o CPU de operação intel Core I5-2500 de 3.3GHz, gráficos intel HD Graphics 2000 com 8GiB de memória RAM e 1 TB de HD.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados numéricos deste presente trabalho são mostrados a seguir e discutidos nesta seção.

5.1 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO NUMÉRICA PARA O NÚMERO DE NUSSOLT CONVECTIVO E RADIATIVO

Os resultados das validações dos modelos, obtidos pelas simulações, se aproximam dos encontrados na literatura e são apresentados na Tabela 6.

TABELA 7: RESULTADOS DO NÚMERO DE NUSSOLT CONVECTIVO

Nusselt conv	Este trabalho	Lari et al. (2011)	Barakos et al. (1994)	Fusegi et al. (1991)	markatos et al. (1984)	de Vahl Davis (1983)
Ra = 1E3	1,098	1,122	1,114	1,134	1,108	1,118
Ra = 1E4	2,150	2,244	2,245	2,274	2,201	2,243
Ra = 1E5	4,370	4,518	4,510	4,568	4,430	4,519
Ra = 1E6	8,847	8,814	8,806	8,935	8,754	8,799

FONTE: O Autor (2020).

TABELA 8: ERRO ABSOLUTO EM MÓDULO PARA O NÚMERO DE NUSSOLT CONVECTIVO

Nusselt conv	Este trabalho	Lari et al. (2011)	Barakos et al. (1994)	Fusegi et al. (1991)	markatos et al. (1984)	de Vahl Davis (1983)
Ra = 1E3	1,098	0,024	0,016	0,036	0,010	0,020
Ra = 1E4	2,150	0,094	0,095	0,124	0,051	0,093
Ra = 1E5	4,370	0,148	0,140	0,198	0,060	0,149
Ra = 1E6	8,847	0,033	0,041	0,088	0,093	0,048

FONTE: O Autor (2020).

Uma análise de sensibilidade permitiu comprovar que, a sutil diferença desses valores é ocasionada pelo aumento na malha computacional. Por exemplo, Lari et al. (2011) usou malhas 161x161 para $Ra = 10^3$ e $Ra = 10^4$, 201x201 para $Ra = 10^5$ e 421x421 para $Ra = 10^6$. A Tabela 7 apresenta os resultados para o número de Nusselt, utilizando os mesmos valores de malha computacional que Lari et al. (2011).

Como resultado da análise de refino de malha, obteve-se o valor de $Nu_c = 1,105$ para $Ra = 10^3$ quando uma malha com 160×160 elementos é utilizada. Contudo comparando o custo computacional VS tempo de simulação utilizado para essas validações, esses tempos são significativamente maiores.

Esse aumento no número de elementos na malha computacional e consequentemente o aumento no tempo de simulação justifica então a sutil diferença nos valores de Nusselt encontrados anteriormente.

TABELA 9: RESULTADOS DO NÚMERO DE NUSSOLT CONVECTIVO FRENTE AO CUSTO COMPUTACIONAL VS TEMPO DE SIMULAÇÃO

Caso Pura Convecção			
Rayleigh	Malha	Tempo Comp.	Nusselt
10^3	80x80x1	162,58 s	1,098
10^3	160x160x1	1886,79 s	1,105
10^4	80x80x1	171,44 s	2,150
10^4	160x160x1	2539,67 s	2,160
10^5	80x80x1	141,64 s	4,370
10^5	200x200x1	4528,65 s	4,401
10^6	80x80x1	132,2 s	8,847
10^6	420x420x1	80619,2 s	8,922

FONTE: O Autor (2020).

Para os valores do número de Nusselt total, o qual representa a soma entre o número de Nusselt convectivo e radiativo foram calculadas as variações na espessura óptica τ' do fluido, baseado-se apenas nos números de Rayleigh de maior magnitude ($Ra = 10^5$ e $Ra = 10^6$). Esses valores foram comparados aos valores encontrados por Lari et al. (2011) e são apresentados na Tabela 8.

TABELA 10: RESULTADOS DO NÚMERO DE NUSSOLT TOTAL

Nusselt total	Ra = 1E5			Ra = 1E6		
	$\tau'=0$	$\tau'=1$	$\tau'=5$	$\tau'=0$	$\tau'=1$	$\tau'=5$
Resultados						
Este trabalho	10,08	8,36	7,04	21,49	17,44	14,38
Lari et al.	10,12	8,35	6,78	20,67	17,12	14,46

FONTE: O Autor (2020).

É possível observar que os resultados deste trabalho e o de Lari et al. (2011) se assemelham tanto para $Ra= 10^5$ quanto para $Ra= 10^6$ nos diferentes valores de τ' , como visto anteriormente, essa tênue diferença ocorre possivelmente em razão da utilização de uma malha mais robusta pelo autor.

Um fato importante desta análise é a constatação de que, quanto maior a espessura óptica, menor o número de Nusselt total, resultado da maior absorção radiativa do meio, como previsto na lei de Lambert-Beer.

A verificação numérica dos modelos convectivo e radiativo é composta apenas de ar, suas propriedades foram selecionadas conforme INCROPERA et al. (2008) e são mostradas na Tabela 9.

TABELA 11: PROPRIEDADES DO AR A 300K.

Propriedades	Ar	Unidades
k	2.63E-02	W/(m.K)
Cp	1007	J/(kg.K)
ρ	1,161	kg/m ³
M	28,9	kg/kmol
α	2,25E-05	m ² /s
Pr	0,71	
μ	1,84E-05	N.s/m ²

FONTE: INCROPERA et al. (2008). Apêndice A, pag 600.

5.2 RESULTADOS DO SISTEMA MTPV

Como abordagem inicial, o filtro seletor será considerado composto pelo material sólido semitransparente, sendo este um sólido semitransparente. Como o OpenFOAM não permite a adição do modelo fvDOM em regiões sólidas, será tratada a região do filtro como um fluido congelado, isso é possível através da técnica *frozenFlow* inserida no arquivo da pasta sistema *fvSolution*, utilitário do OpenFOAM. As propriedades desse material são apresentadas na Tabela 10.

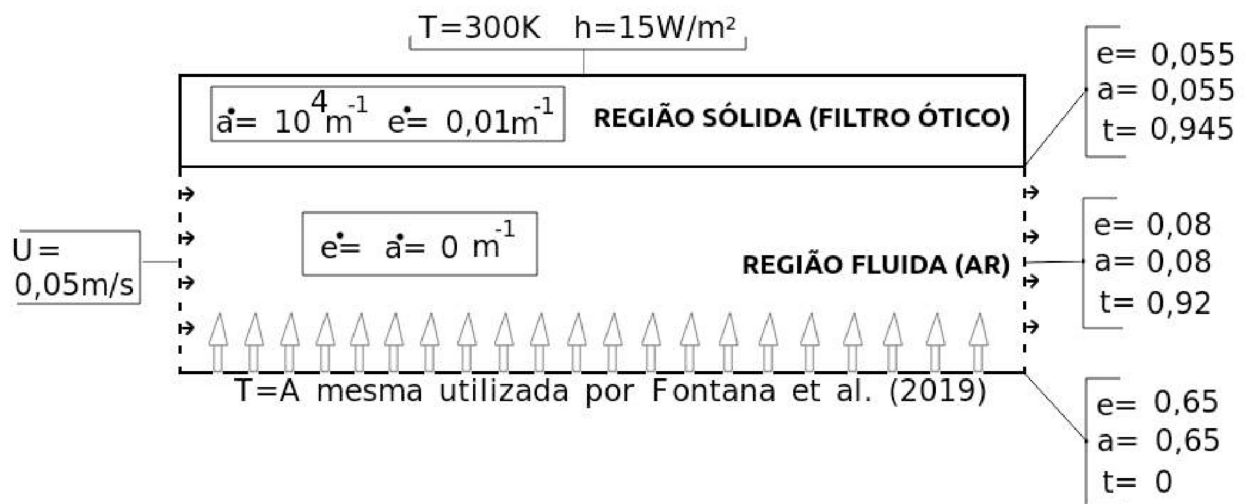
TABELA 12: PROPRIEDADES DO SÓLIDO

Propriedades	Gelo	Unidades
k	0,13	W/(m.K)
Cp	1007	J/(kg.K)
ρ	999,8	kg/m ³
M	18	kg/kmol
α	1,31E-07	m ² /s
Pr	13,67	

FONTE: INCROPERA et al. (2008). Apêndice A, pag 592.

Tendo os resultados do caso base para valores da radiação incidente (G), pode-se executar alterações no sistema e confrontar esses valores.

FIGURA 16: CONDIÇÕES DE CONTORNO DO CASO BASE



FONTE: O Autor (2020).

A Figura 17 apresenta as condições de contorno para o caso base. Nesta figura a temperatura da região inferior (temperatura da parede do MC) é obtida conforme Fontana et al. (2019). As propriedades superficiais das fronteiras são encontradas ao lado direito da figura onde e = emissividade, a = absorvidade, t = transmissividade. As propriedades internas, coeficiente de absorção (\dot{a}) e coeficiente de emissividade (\dot{e}) são encontradas dentro dos retângulos e possuem unidade m^{-1} . Ao lado esquerdo da figura encontra-se a velocidade de entrada do ar por entre as superfícies do filtro e do

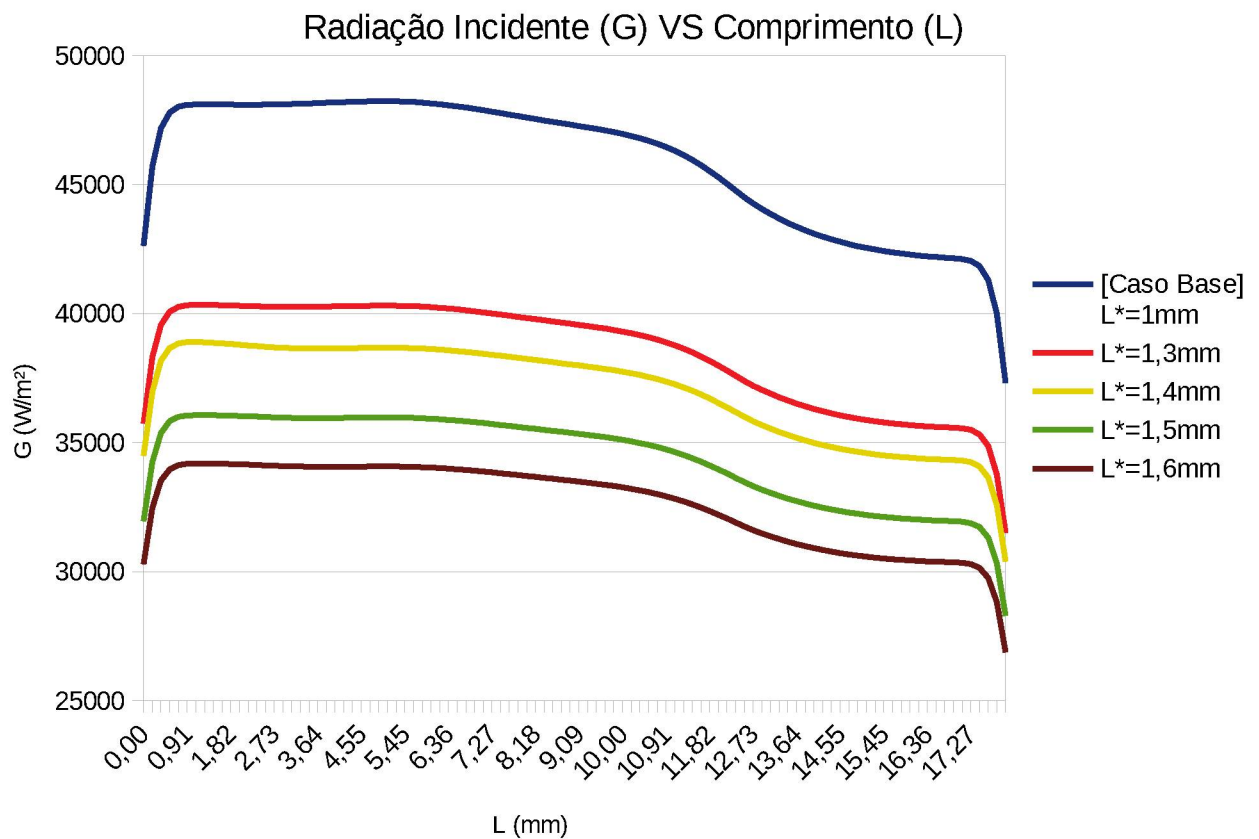
MC. Por fim, na superfície superior (célula TPV) encontram-se a temperatura ambiente T e o coeficiente de transferência de calor h .

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para diferentes características do sistema, essas análises são fundamentais pois permitem avaliar o quanto essas modificações influenciam na energia térmica incidida sobre a célula TPV.

5.2.1 Análise da influência da distância entre a parede do emissor e do filtro

Para esta análise foram avaliadas as radiações incidentes (G) após o filtro seletor, variando a distância entre as superfícies (emissor-filtro) de $L^*=1,3\text{mm}$ até $L^*=1,6\text{mm}$. Esses valores foram comparados com os valores obtidos no caso base e são apresentados na Figura 18.

FIGURA 17: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE AS SUPERFÍCIES EMISSOR/FILTRO

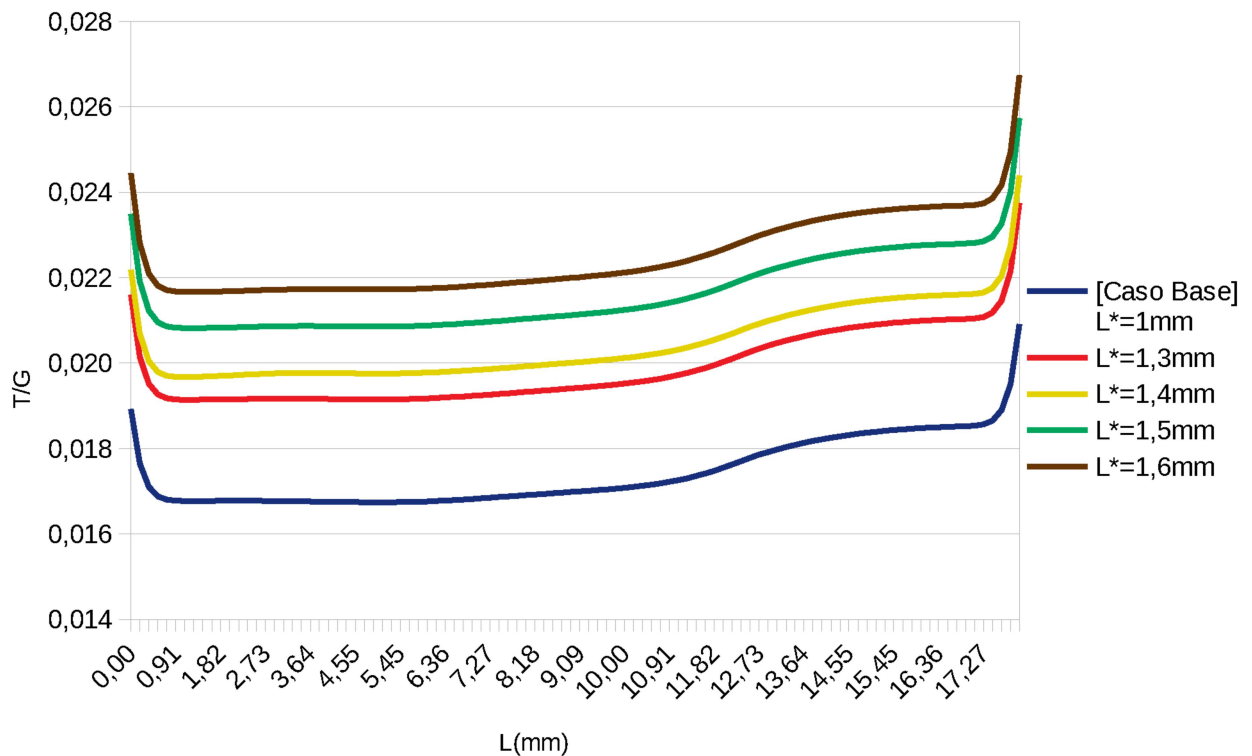


FONTE: O AUTOR (2020).

O caso base da figura 18 possui distância entre as superfícies (emissor-filtro) de 1mm e sua radiação incidente inicial (G_i) foi de aproximadamente $42,6 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ chegando a $48,2 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ em seu pico, enquanto as outras variações entre as superfícies, não conseguiram alcançar o valor de $40,5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ em seus picos. Por exemplo, para a distância $L^*=1,3\text{mm}$, os valores foram $G_i= 35,74 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $G_{\text{max}}= 40,33 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, para $L^*=1,4\text{mm}$, $G_i= 34,49 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $G_{\text{max}}= 38,89 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, para $L^*=1,5\text{mm}$, $G_i= 31,95 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $G_{\text{max}}= 36,06 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e para $L^*=1,6\text{mm}$, $G_i= 30,29 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $G_{\text{max}}= 34,19 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$. Isso ocorre por se tratar de um fenômeno direcional, ou seja, quanto maior a distância entre as superfícies (emissor/filtro), menor será a radiação incidente que alcançará a célula TPV.

Com base nos resultados também é interessante avaliar a relação de temperatura (T) e radiação incidente (G) ao longo do comprimento da célula TPV, uma vez que a eficiência da célula decresce aproximadamente de forma linear com o aumento da temperatura, a Figura 19 traz essa relação T/G VS L(mm) onde a condição ótima é aquela na qual T/G tende a zero.

FIGURA 18: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE AS SUPERFÍCIES DO EMISSOR E DO FILTRO



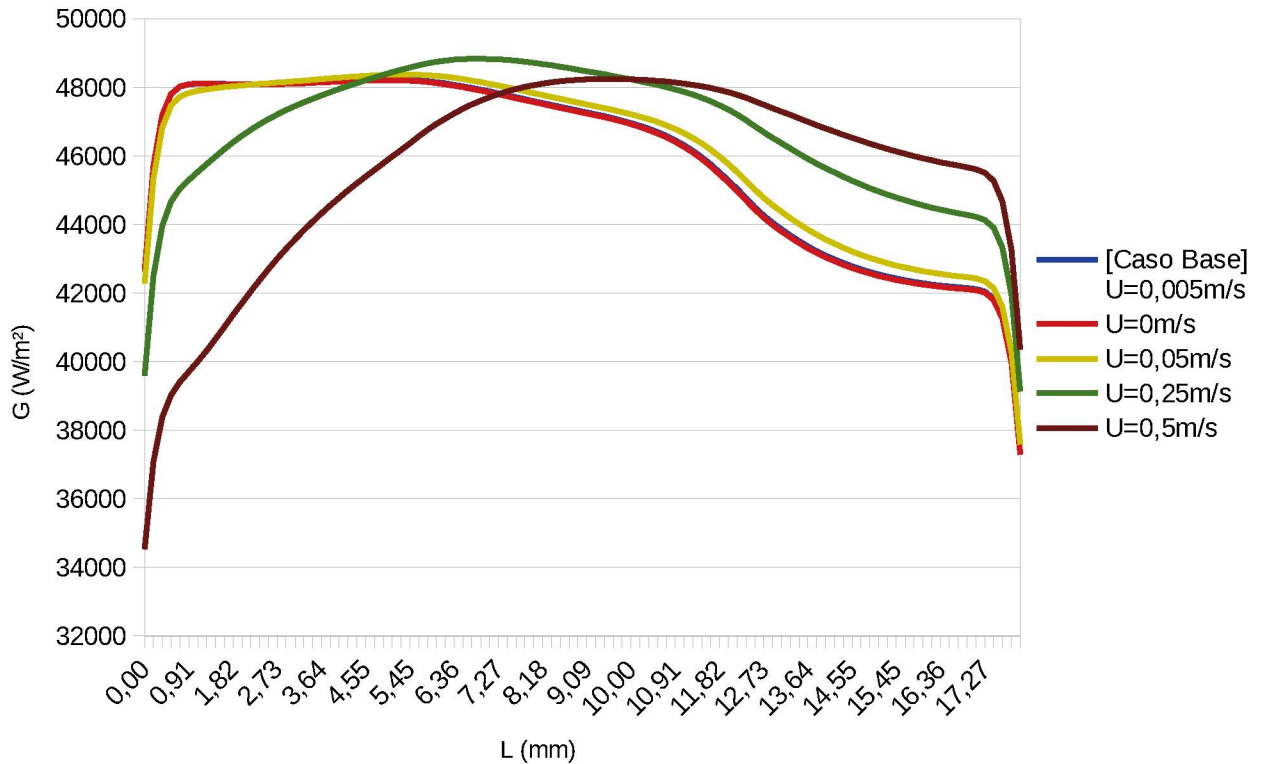
FONTE: O Autor (2020).

Os resultados de melhor desempenho são aqueles em que a razão T/G será menor uma vez que a necessidade é de que, a uma menor temperatura, a radiação incidente sob a célula TPV seja maior. Nessa condição, pode-se destacar três casos, $L^*=1,3\text{mm}$, $L^*=1,4\text{mm}$ e o Caso Base, que possuem aproximadamente $1,96 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$, $2,02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ e $1,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ respectivamente.

5.2.2 Análise da influência da velocidade de escoamento do fluido

Nesta etapa, a quantidade de radiação incidente após o filtro seletor, foi analisada de acordo com a variação de velocidade do fluido. Essa variação foi avaliada para o intervalo de $U=0\text{m/s}$ até $U=0,5\text{m/s}$ e seus resultados comparados com os valores obtidos no caso base, valores esses apresentados na Figura 20.

FIGURA 19: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO



FONTE: O Autor (2020).

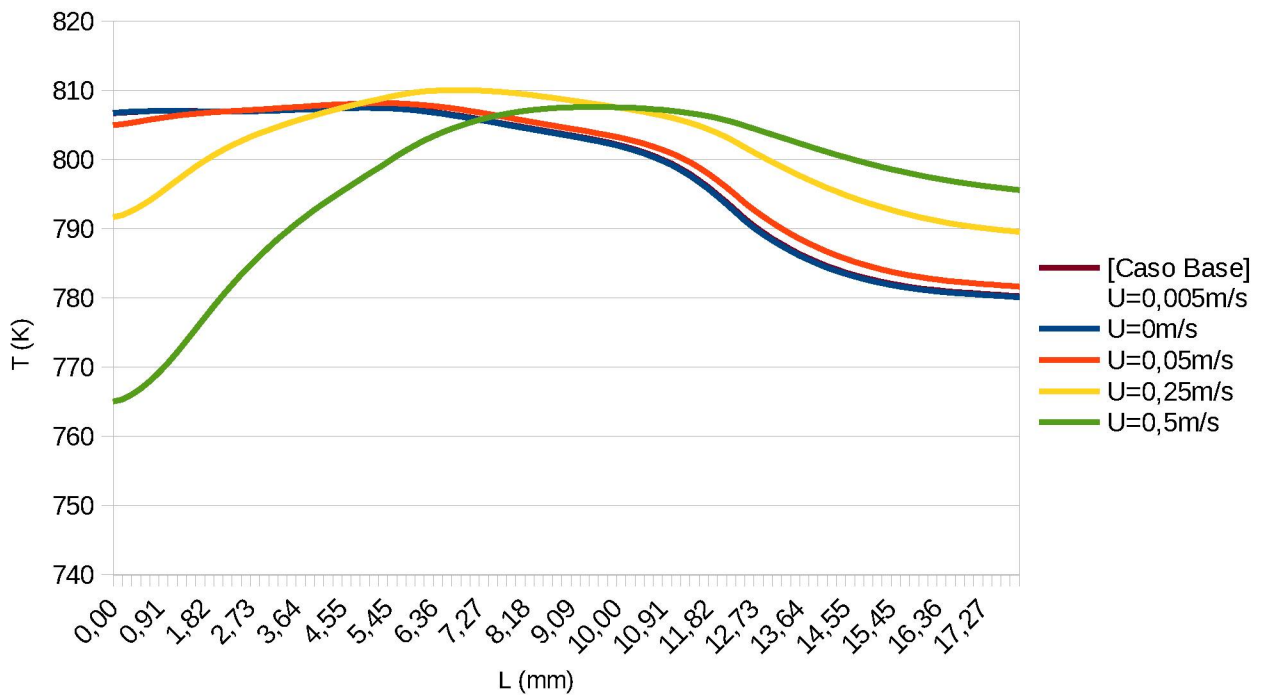
É possível observar nessa figura 20 que, para velocidade maiores, a radiação incidente é mais influenciada na entrada do sistema do que ao longo desse, esse fato ocorre devido ao fluido de entrada estar em menor temperatura.

Para as velocidades mais baixas, por exemplo, $U=0\text{m/s}$ e $U=0,005\text{m/s}$, a radiação incidente avaliada em $x=0$ possui $42,64 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $42,28 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ respectivamente, enquanto que para as velocidade maiores, $U=0,25\text{m/s}$ e $U=0,5\text{m/s}$, a radiação incidente é de $39,59 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e $34,53 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ respectivamente.

Porém, nos casos em que as velocidades são maiores ($0,5\text{m/s}$ e $0,25\text{m/s}$), o arraste do fluido após o contato com as paredes quentes na entrada do emissor faz com que ocorra um aumento tênue na temperatura mais ao centro do sistema, que por sua vez ocasiona um acréscimo na radiação incidente como pode ser observado na Figura 21. No intervalo de $8,73\text{mm} < L < 9,82\text{mm}$, a radiação incidente é de $\approx 48,23 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ quando $U= 0,5\text{m/s}$ e $\approx 48,47 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ quando $U= 0,25\text{m/s}$, enquanto que, para as velocidade menores, os valores são de $\approx 47,50 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ quando $U= 0,05\text{m/s}$ e

$\approx 47,24 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ quando $U = 0 \text{ m/s}$. Contudo, deve-se levar em conta a radiação incidente ao longo de todo o comprimento do filtro e não apenas em intervalos. Nesse caso, os valores de G_m são: $45,47 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ para $U = 0 \text{ m/s}$, $45,72 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ para $U = 0,05 \text{ m/s}$, $46,32 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ para $U = 0,25 \text{ m/s}$ e $45,26 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ para $U = 0,5 \text{ m/s}$.

FIGURA 20: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO

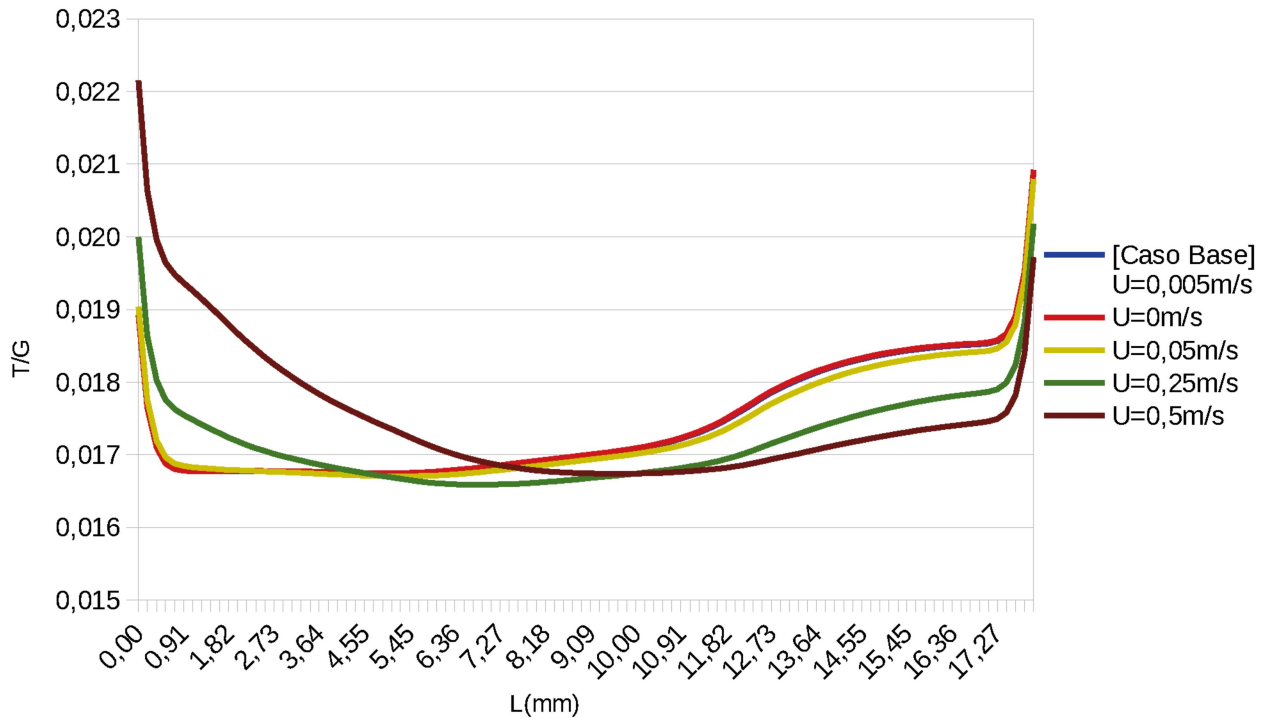


FONTE: O Autor (2020).

Vale lembrar que a radiação incidente (G) é dada pelo produto das contribuições de diferentes intensidades radiativas (I_λ) e o ângulo sólido (Ω). Essas intensidades radiativas por sua vez são influenciadas pelas bandas e temperaturas e por isso podem apresentar diferentes valores em seus raios.

Analisando a razão T/G , pode-se aproximar a condição ideal para as diferentes velocidades de entrada de fluido no sistema, essa análise é apresentada na Figura 22.

FIGURA 21: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DE FLUIDO



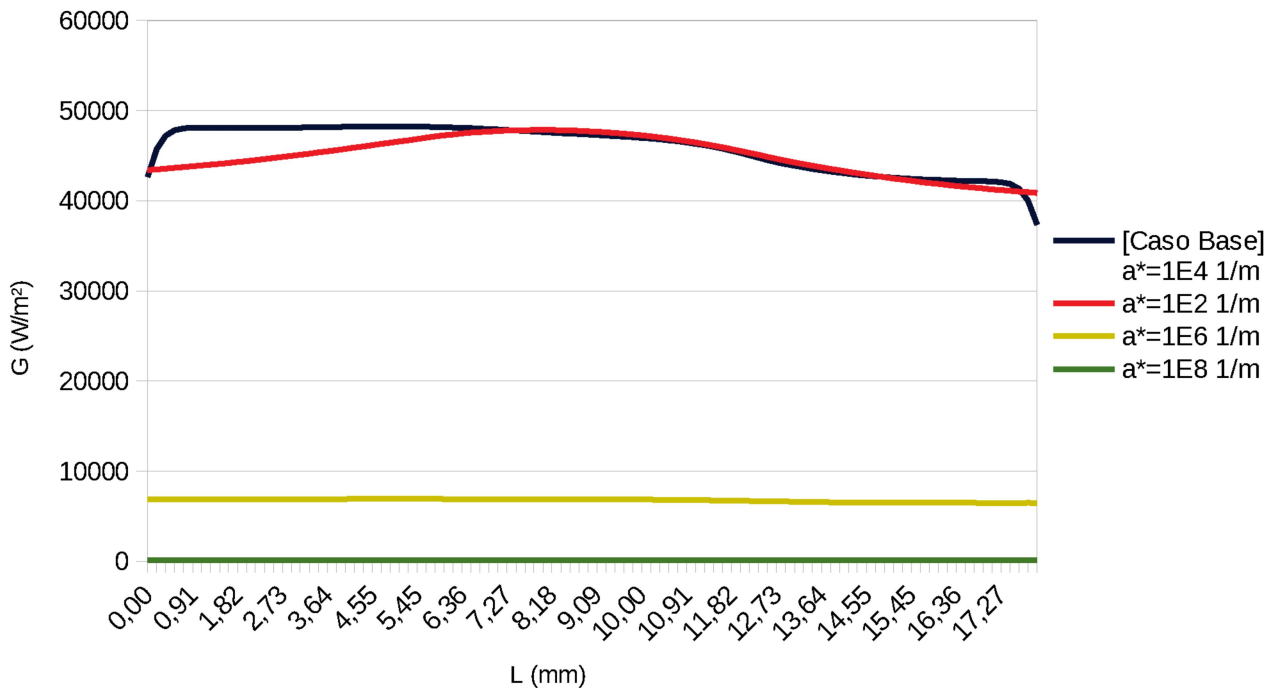
FONTE: O Autor (2020).

Os valores da razão T/G em relação ao comprimento da célula TPV mostra que ao centro do comprimento da célula, os valores para as diferentes velocidades são próximos, apresentam sutis diferenças entre $1,65 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ e $1,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$. Porém, a condição ótima deve levar em conta todo o comprimento da célula. Logo, as velocidades que apresentaram melhores resultados foram: $U=0,25\text{m/s}$, $U=0,05\text{m/s}$ e Caso Base ($U=0,005\text{m/s}$), pois os valores de T/G se aproximam mais de zero, $1,69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$, $1,71 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ e $1,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ respectivamente.

5.2.3 Análise da influência do coeficiente de absorção da região sólida

Uma das análises mais importantes é a do coeficiente de absorção (a^*) do filtro. Esse coeficiente está diretamente relacionado a quantidade da absorbância (α) e transmitância (τ) da região sólida para um determinado comprimento de onda (λ). Para verificar a influência de a sobre a radiação incidente, foram avaliados diferentes coeficientes de absorção ($a^*=10^2 \text{ m}^{-1}$ até $a^*=10^8 \text{ m}^{-1}$) e os resultados são apresentados na Figura 23.

FIGURA 22: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO FILTRO



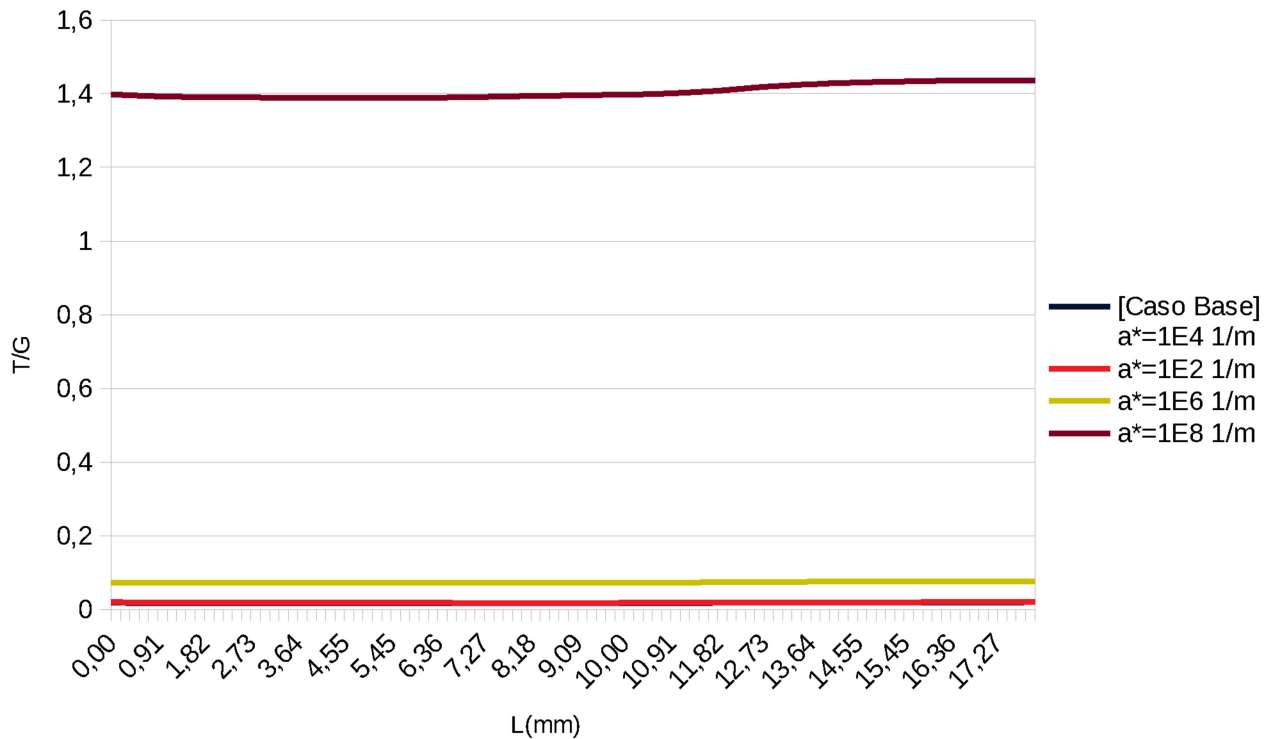
FONTE: O Autor (2020).

Os resultados dessa análise mostram que o coeficiente de absorção é inversamente proporcional a quantidade de radiação incidente na célula TPV, ou seja, quanto maior o valor de a^* no filtro, maior será radiação incidente retida por ele. Por exemplo, nos resultados para valores de $a^*=10^6$ m^{-1} e $a^*=10^8$ m^{-1} a quantidade de radiação incidente que alcança a célula TPV é em média igual a $6,68 \cdot 10^3$ W/m^2 e 130 W/m^2 respectivamente. O que era esperado, uma vez que a transmitância (τ) do filtro é baixa ($\tau_{10^6} = 0,04$ e $\tau_{10^8} = 0$), a energia que atravessa esse material também será baixa. Em alguns casos, essa situação não é ideal para o sistema, pois retém grande parte da energia térmica que poderia ser convertida em energia elétrica, além de possibilitar um superaquecimento do filtro.

Já para os menores valores do coeficiente de absorção, $a^*=10^2$ m^{-1} e $a^*=10^4$ m^{-1} , onde $\tau=0,99$ e $\tau=0,97$ o valor de G_m é $45,89 \cdot 10^3$ W/m^2 e $45,01 \cdot 10^3$ W/m^2 respectivamente, o que pode não significar uma condição ideal para o sistema, uma vez que, nem toda a energia que chega à célula TPV poderá ser convertida, ocasionando aquecimento da célula e reduzindo consequentemente a sua eficiência.

Sendo assim, pode-se utilizar novamente a relação T/G para aproximar uma condição ótima dentre os diferentes coeficientes de absorção experimentados.

FIGURA 23: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO SÓLIDO SEMITRANSARENTE



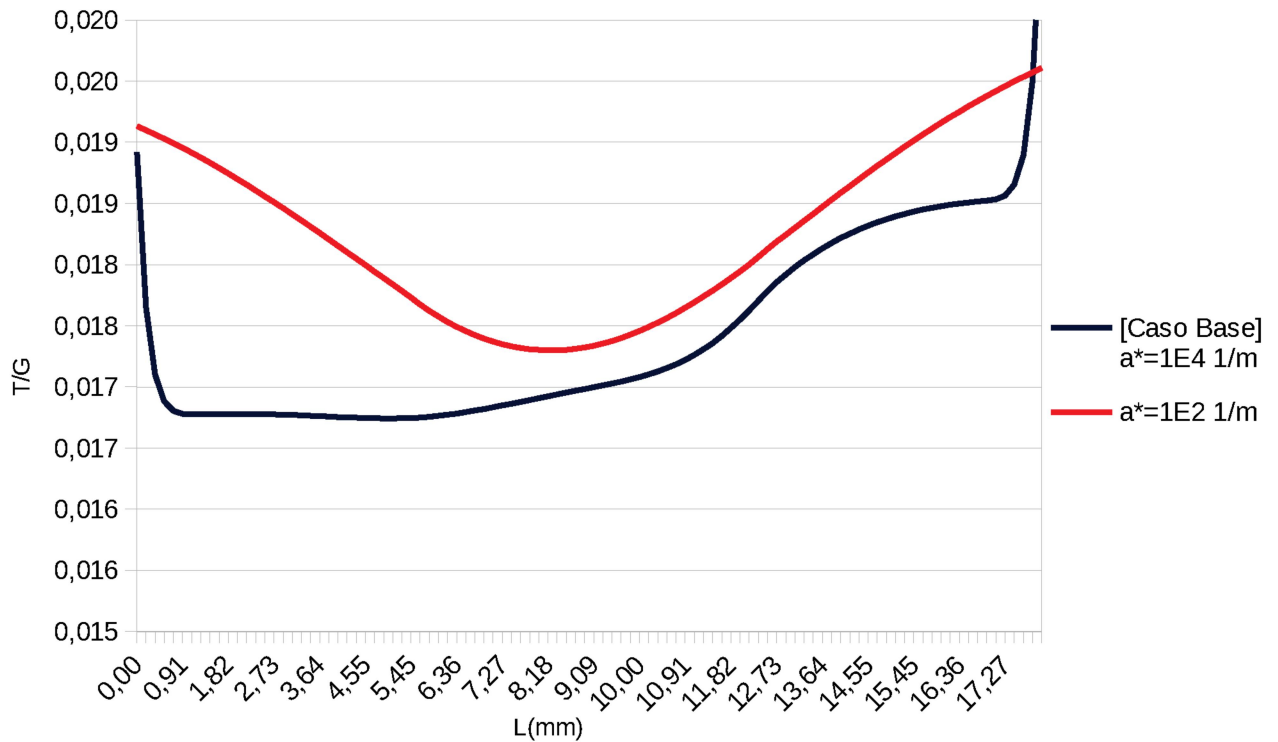
FONTE: O Autor (2020).

Essa relação T/G apresentada na Figura 24, permite verificar que os coeficientes de absorção mais baixos, $a^*=10^4 \text{ m}^{-1}$ e $a^*=10^2 \text{ m}^{-1}$, demonstraram melhor desempenho pois aproximaram-se mais de zero ($1,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ e $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$). Enquanto que para os valores do coeficiente de absorção, $a^* \geq 10^6 \text{ m}^{-1}$, os resultados se mostraram ineficientes ($7,24 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$ e $139,11 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$), o que era esperado, uma vez que possuem baixos índices de radiação incidente na célula em relação a temperatura emissora.

Para avaliar os dois coeficientes de melhor desempenho, foi necessário gerar um novo gráfico com valores mais precisos como apresenta a Figura 25. Nesse gráfico é possível verificar que mesmo tendo um coeficiente de absorção maior e uma transmitância menor o caso base destacou-se ao longo de todo o comprimento da célula TPV, estando mais próximo do valor mínimo na relação T/G, isso ocorre pois a

temperatura no caso base ($a^*=10^4 \text{ m}^{-1}$) em média é inferior a do caso 9 ($a^*=10^2 \text{ m}^{-1}$) e a radiação incidente em média ao longo de todo comprimento do filtro é superior.

FIGURA 24: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO SÓLIDO SEMITRANSARENTE

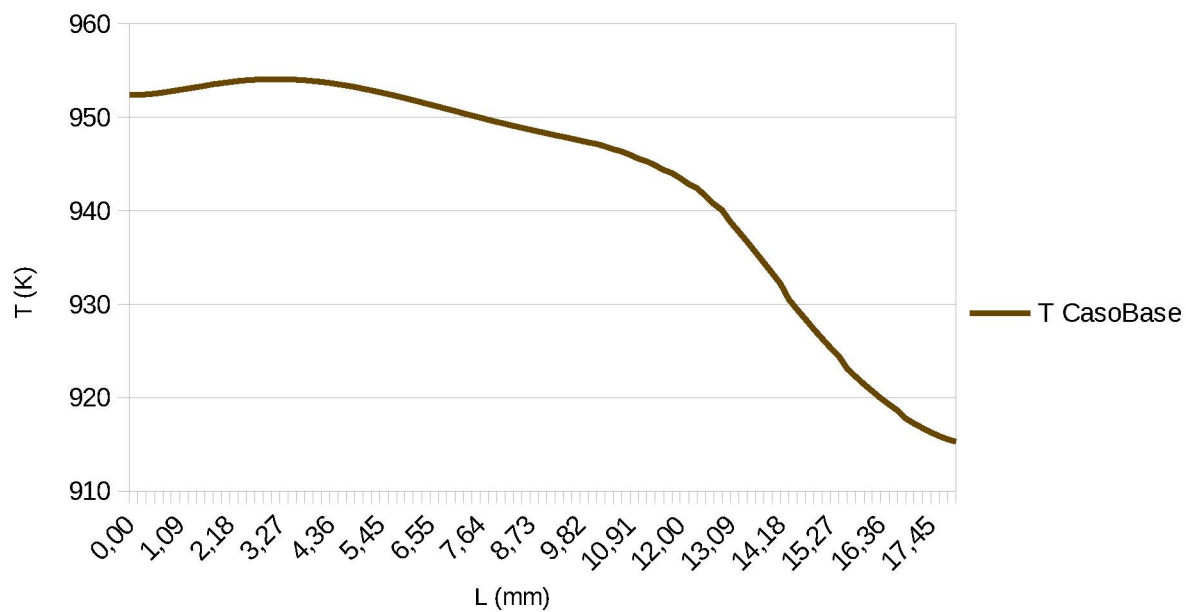


FONTE: O Autor (2020).

5.2.4 Análise da influência do perfil de temperatura do emissor

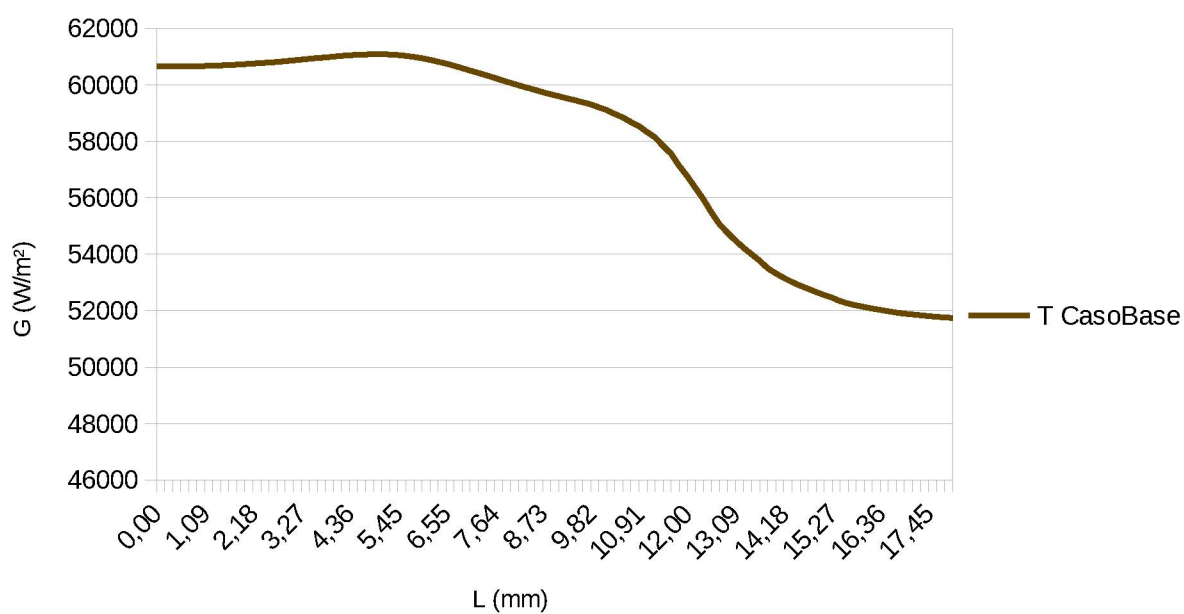
O perfil de temperatura utilizado no caso base foi extraído do artigo de Fontana (2020), trata-se do caso 5 da tabela 6, onde o autor utiliza velocidade de entrada de fluido igual a 6m/s. O perfil de T para o caso base é mostrado na Figura 26, a radiação emitida pela parede do MC na Figura 27 e a radiação incidente sobre a célula TPV na Figura 28.

FIGURA 25: PERFIL DE TEMPERATURA DO EMISSOR PARA O CASO BASE UTILIZADO POR FONTANA (2020)



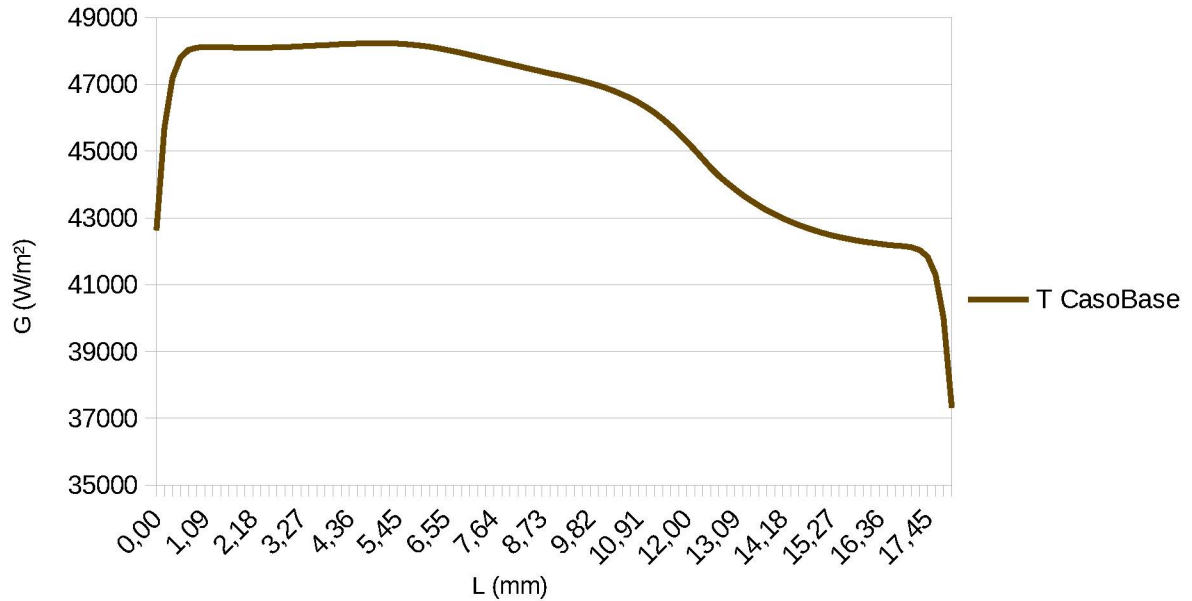
FONTE: O Autor (2020).

FIGURA 26: RADIAÇÃO EMITIDA PELA PAREDE DO MC NO CASO BASE



FONTE: O Autor (2020).

FIGURA 27: RADIAÇÃO INCIDENTE NA CELULA TPV PARA O CASO BASE



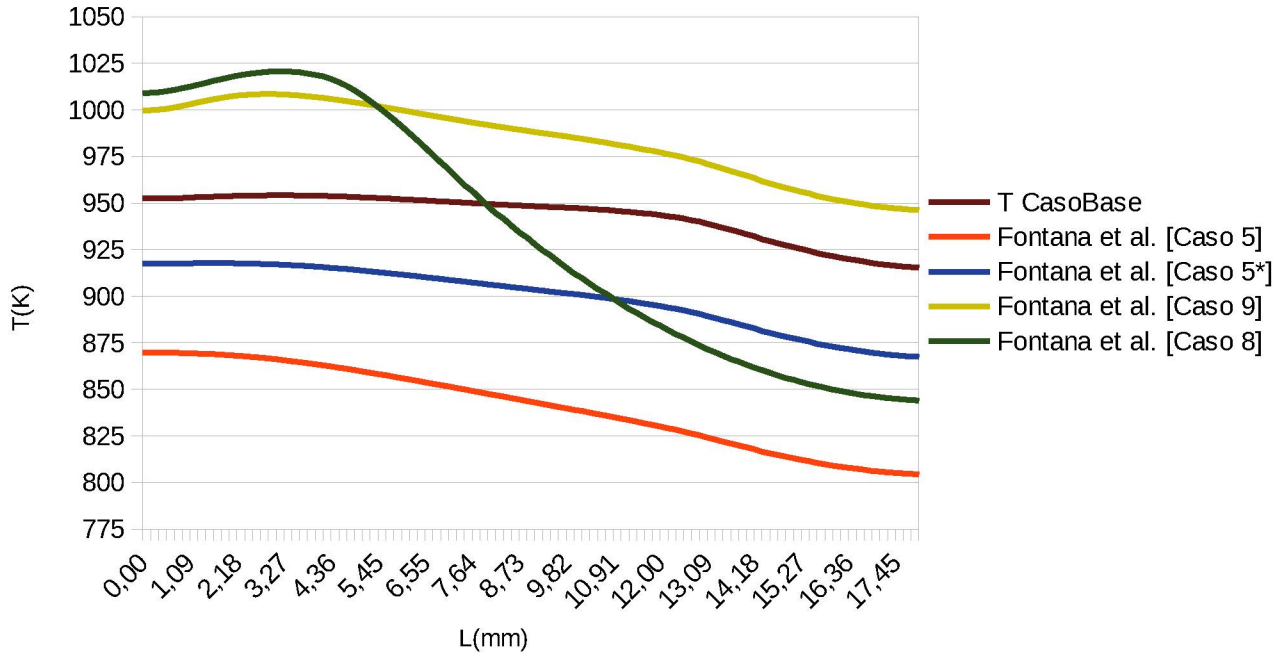
FONTE: O Autor (2020).

As figuras anteriores ilustram bem as condições de contorno utilizadas e auxiliam na interpretação dos resultados das radiações incidentes do caso base e nos próximos casos.

Os outros perfis de temperatura apresentados a seguir também foram extraídos do artigo de Fontana (2020). A radiação incidente analisada leva em conta apenas os perfis de temperatura em que Fontana (2020) altera a velocidade de alimentação em seu sistema, caso 5 ($U=4\text{m/s}$), caso 5* ($U=5\text{m/s}$), caso 9 ($U=6\text{m/s}$) e caso 8 ($U=6\text{m/s}$), esses perfis de temperatura são encontrados na Figura 29 e as radiações emitidas pela parede do microcombustor em função dos perfis de temperatura são encontradas na Figura 30.

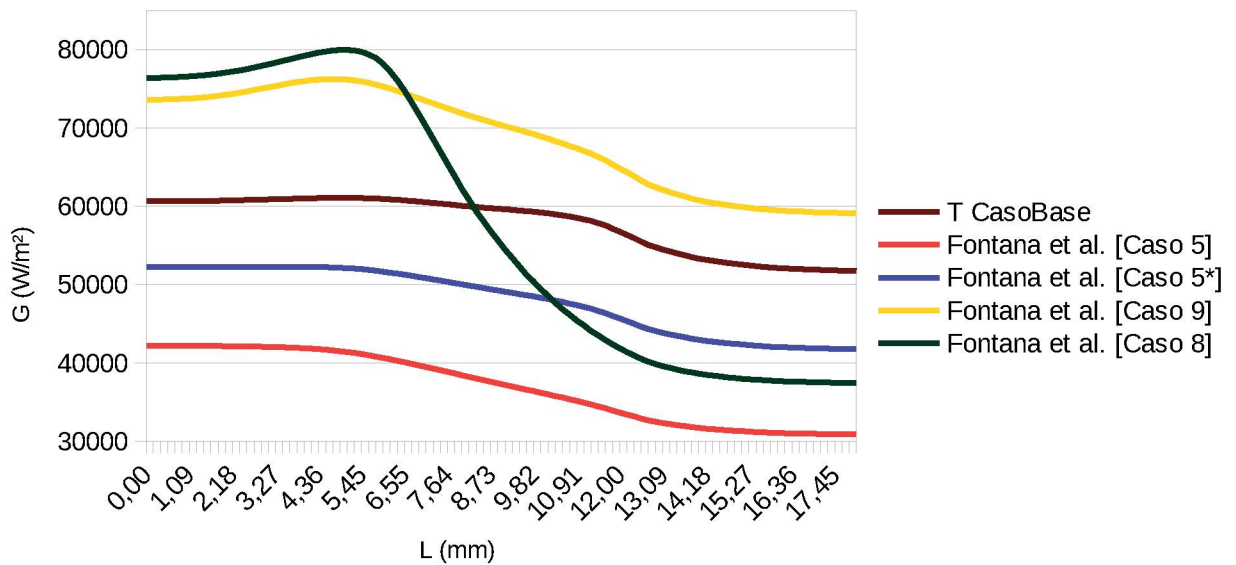
Uma situação ideal e objeto de grande interesse dos pesquisadores, seria aquela em que a radiação incidente mantivesse o perfil constante em toda a superfície da célula, essa hipótese torna-se improvável uma vez que a região interna do emissor não possui um dispositivo que faça com que a temperatura seja distribuída uniformemente em suas extremidades.

FIGURA 28: PERFIS DE TEMPERATURA DO EMISSOR UTILIZADOS POR FONTANA (2020)
 AVALIADO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE ALIMENTAÇÃO



FONTE: O Autor (2020).

FIGURA 29: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO EMITIDA PELA PAREDE DO
 EMISSOR PARA OS DIFERENTES PERFIS DE TEMPERATURA



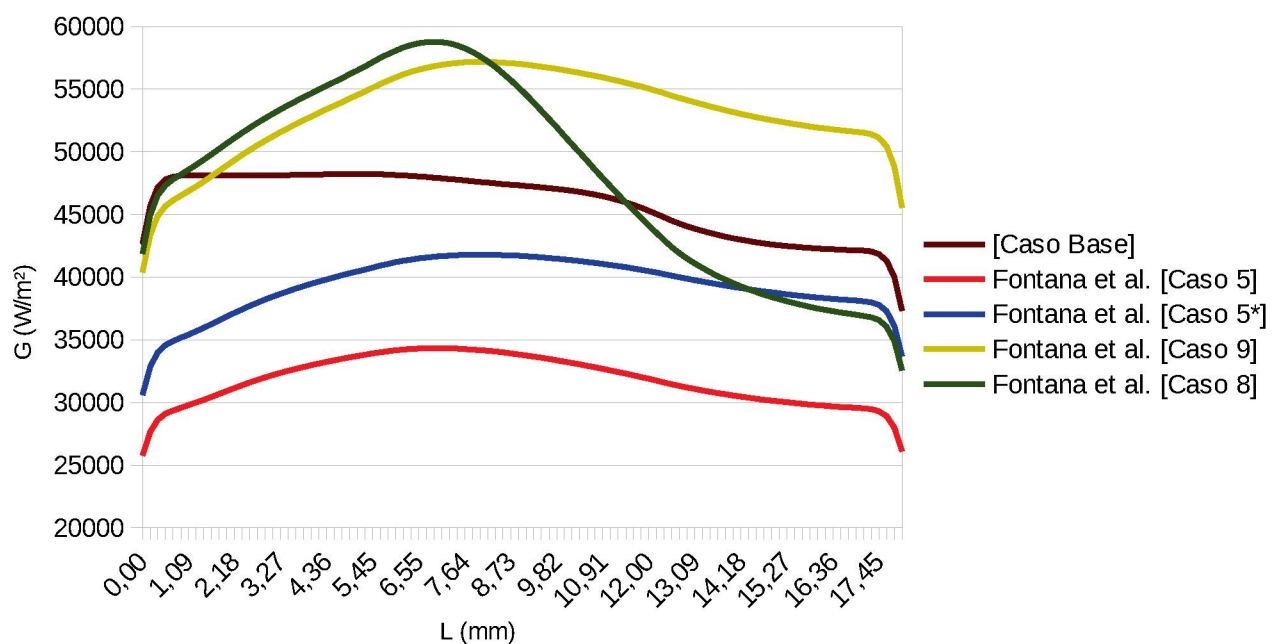
FONTE: O Autor (2020).

Um fato interessante de se observar é que os valores de G emitidos ao longo da parede do emissor são proporcionais as temperatura nesse emissor, porém, ao

avaliar a radiação que incide na célula TPV, existe uma sutil diferença na concentração de energia ao longo do comprimento da célula. Por exemplo, no caso 8 da figura 29, a temperatura mais alta ($T= 1020\text{K}$) é atingida no comprimento $L= 3,27\text{mm}$ do emissor, o valor de G nesse mesmo ponto é $78,33 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, enquanto que na célula TPV a radiação é $53,38 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ para $L= 3,27\text{mm}$. Contudo, os maiores valores de G nessa célula são encontrados quando $L= 6,91\text{mm}$ ($G= 58,77 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$) como mostra a Figura 31. Uma possível justificativa para esse fato é a difração fresnel onde os raios λ ao passar pelo filtro toma diferentes caminhos (diferentes trajetórias), fazendo com que haja um direcionamento para esse ponto da célula. Esse fato pode ser notado em outros casos também mas não tão evidentes quanto o caso citado anteriormente.

Os resultados da radiação incidente, dependentes dos perfis de temperatura que incidem sobre a célula TPV, também são mostrados na Figura 31 e dentre todas as análises executadas até o momento, essa variação nos perfis de temperatura, foi a que mais influenciou os resultados da radiação incidente sobre a célula TPV, o que era esperado, pois G é fortemente dependente de T .

FIGURA 30: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA RADIAÇÃO INCIDENTE, NA CÉLULA TPV, PARA OS DIFERENTES PERFIS DE TEMPERATURA



FONTE: O Autor (2020).

Nem sempre valores de G muito altos são vantajosos para o sistema, uma vez que a energia absorvida pela célula deve ser convertida em energia elétrica e não absorvida em forma de calor.

A aproximação das condições ideais T/G determina dentre os perfis analisados anteriormente, quais possuem melhor desempenho e são mostrados na Tabela 11.

TABELA 13: VALORES MÉDIOS PARA A RELAÇÃO T/G , NA CÉLULA TPV, PARA DIFERENTES PERFIS DE TEMPERATURA DO EMISSOR

Simulação	Valor de T/G
Caso Base	0,017 m ² K/W
Caso 5	0,023 m ² K/W
Caso 5*	0,019 m ² K/W
Caso 9	0,015 m ² K/W
Caso 8	0,017 m ² K/W

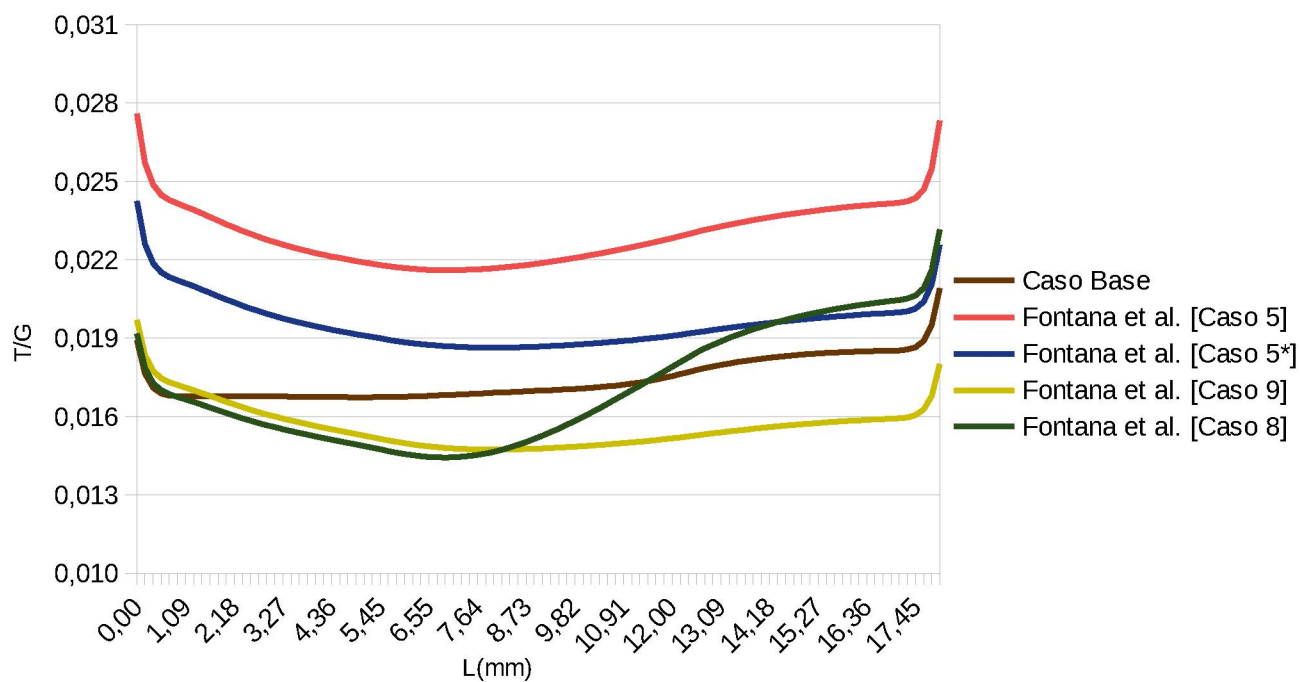
FONTE: O Autor (2020).

Para os casos apresentados na Tabela 11, destacam-se os perfis de temperatura do caso 9, caso base e caso 8. Analisando seus valores na relação T/G , em média, pode-se dizer que os três casos foram os que se mantiveram mais próximos de zero ao longo de todo o comprimento da célula TPV como mostra a Figura 32.

Apesar de o caso 8 apresentar um acréscimo no valor da relação T/G ao longo do comprimento da célula, seu valor em média foi melhor do que o caso 5 e 5*. Contudo, deve-se levar em conta que, as temperaturas de trabalho dos sistemas no caso 8 e 9, superaram o caso base em até 70K e 50K respectivamente.

Essas temperaturas mais elevadas em sistemas de pequena escala, são mais complicadas de controlar, dificultam o dimensionamento dos projetos e a distribuição uniforme das temperaturas ao longo da parede do emissor.

FIGURA 31: APROXIMAÇÃO DA CONDIÇÃO IDEAL PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO SÓLIDO SEMITRANSARENTE



FONTE: O Autor (2020).

Sendo assim, os resultados obtidos nos gráficos da análise dos perfis de temperatura são extremamente importantes não apenas para esse trabalho, mas também em trabalhos que envolvam o projeto de dimensionamento e construção dos microcombustores. Abaixo é apresentada a Tabela 12 com um resumo de todos os resultados dessa análise dos perfis de temperatura e as outras análises antecessoras a essa.

TABELA 14: RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DO SISTEMA MTPV

Condição	Gmax (W/m ²)	Gmin (W/m ²)	Gm (W/m ²)	T/Gm (m ² K/W)
L= 1mm	48,23.10 ³	37,31.10 ³	45,50.10 ³	17,23.10 ⁻³
L= 1,3mm	40,34.10 ³	31,50.10 ³	38,16.10 ³	19,65.10 ⁻³
L= 1,4mm	38,90.10 ³	30,39.10 ³	36,71.10 ³	20,23.10 ⁻³
L= 1,5mm	36,07.10 ³	28,29.10 ³	34,13.10 ³	21,37.10 ⁻³
L= 1,6mm	34,19.10 ³	26,88.10 ³	32,36.10 ³	22,24.10 ⁻³
U= 0,005m/s	48,23.10 ³	37,31.10 ³	45,50.10 ³	17,23.10 ⁻³
U= 0m/s	48,21.10 ³	37,28.10 ³	45,47.10 ³	17,24.10 ⁻³
U= 0,025m/s	48,37.10 ³	37,58.10 ³	45,72.10 ³	17,17.10 ⁻³
U= 0,25m/s	48,83.10 ³	39,13.10 ³	46,32.10 ³	16,99.10 ⁻³
U= 0,5m/s	48,24.10 ³	34,53.10 ³	45,26.10 ³	17,31.10 ⁻³
a= 10 ⁴ 1/m	48,23.10 ³	37,31.10 ³	45,50.10 ³	17,23.10 ⁻³
a= 10 ² 1/m	47,83.10 ³	40,84.10 ³	44,59.10 ³	18,06.10 ⁻³
a= 10 ⁶ 1/m	06,91.10 ³	06,43.10 ³	06,82.10 ³	72,47.10 ⁻³
a= 10 ⁸ 1/m	00,13.10 ³	00,13.10 ³	00,13.10 ³	13,91.10 ⁻¹
Caso Base	48,23.10 ³	37,31.10 ³	45,50.10 ³	17,23.10 ⁻³
Fontana et. al [Caso 5]	34,33.10 ³	25,76.10 ³	31,49.10 ³	22,72.10 ⁻³
Fontana et. al [Caso 5*]	41,79.10 ³	30,59.10 ³	38,95.10 ³	19,36.10 ⁻³
Fontana et. al [Caso 9]	57,17.10 ³	40,38.10 ³	52,66.10 ³	15,45.10 ⁻³
Fontana et. al [Caso 8]	58,77.10 ³	32,55.10 ³	47,78.10 ³	16,87.10 ⁻³

FONTE: O Autor (2020).

6 CONCLUSÃO

Os recursos de energia limpa são cada vez mais necessários e os dispositivos MTPV são promissores nesse aspecto, convertendo a energia térmica em energia elétrica. Esses dispositivos ainda não possuem muitas aplicações, devido a sua baixa eficiência. Contudo como apresentado, existem diferentes formas de variar a quantidade de energia que incidirá sobre as células TPV e conseqüentemente a eficiência desses sistemas.

A ferramenta utilizada para analisar e simular essas condições de variação energética foi o OpenFOAM. O software ainda possibilitou a geração de uma malha computacional similar a um microcombustor real e a partir dessa malha variar as condições do sistema e identificar as que apresentaram melhor desempenho.

O limitado conhecimento para criação de um código em C++ que fizesse com que o filtro abrangesse diferentes comprimentos de onda ocasionou a impossibilidade de precisar a quantidade de energia a ser convertida, mas não impediu a análise da quantidade de radiação incidente em comprimentos de onda específicos para diferentes variações no sistema.

Baseando-se nas informações acima e nos resultados encontrados é possível concluir que:

I. Dentre todos os casos analisados, a variação na temperatura foi a que apresentou as maiores concentrações de radiação incidente sobre a célula TPV, alcançando o valor de $58,77 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ para o caso 8. Porém, na aproximação da condição ótima (T/G), destaca-se o caso 9. Mesmo alcançando quantidades de energia incidente na célula inferior ao caso 8, seu perfil de temperatura é mais sutil, o que resultou em um melhor desempenho.

II. A variação no coeficiente de absorção (a^*) do filtro apresentou as maiores discrepâncias nos valores da radiação incidente, para $a^* \leq 10^4 \text{ m}^{-1}$, os índices de radiação incidente sobre a célula TPV foram de $47,83 \cdot 10^3$ a $48,23 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, enquanto que para valores de $a^* \geq 10^6 \text{ m}^{-1}$, a quantidade da radiação incidente cai drasticamente, chegando a 127 W/m^2 para $a^* = 10^8 \text{ m}^{-1}$. Nessa situação, o melhor sistema é aquele em que $a^* = 10^4 \text{ m}^{-1}$, pois o aumento do coeficiente de absorção no filtro faz com que haja uma seletividade maior na energia que alcançará a célula TPV.

III. Ocorrência na variação da velocidade, faz com que o fluido que escoar entre o emissor e o filtro ocasione uma sutil diferença em G_{\max} não excedendo $0,62 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$, porém, considerável em G_{\min} , aproximadamente $2 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$. Dessa forma, a melhor condição é utilizar a velocidade de escoamento do fluido $U = 0,25 \text{ m/s}$, apesar de ocasionar reduções de temperatura em um primeiro momento $x=0$, seu desempenho torna-se mais eficaz ao longo da célula, alcançando a valor de $48,83 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ de energia incidida na célula TPV e o valor de $16,99 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$ na relação T/G .

IV. Por fim, a distância entre o filtro e o emissor influencia os resultados de forma significativa, uma vez que a radiação é um fenômeno direcional, ou seja, quanto maior a distância menor a intensidade na célula TPV. Sendo assim, o melhor caso é utilizar 1mm entre as extremidades, essa condição apresentou valor de radiação incidente de $G_{\max} = 48,23 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ e de $G_{\min} = 37,31 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$.

Os casos analisados neste trabalho se limitam em avaliar as diferenças entre as condições do sistema, não abrange a combinação entre as condições que resultaram em melhores desempenhos, ficando a critério do leitor aplicar essas condições em seu trabalho e pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABBASSI, M. el; LAHAYE, D. J. P; VUIK, C. **MODELLING TURBULENT COMBUSTION COUPLED WITH CONJUGATE HEAT TRANSFER IN OPENFOAM** Naples, Italy, September - p. 4-5, 2017

AUNG, T. T.; TERADA, A.; HINO, R. **PRELIMINARY COMBUSTION ANALYSES USING OPENFOAM**. Japan Atomic Energy Agency – p. 7, 2019.

BASU, S. CHEN, B. Y., ZHANG, M. Z.. **MICROSCALE RADIATION IN THERMOPHOTOVOLTAIC DEVICES**. International Journal of Energy Research – p. 690, 700-701, 2006.

CASTRO, T. S. **ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GERAÇÃO ALTERNATIVA PARA SUPRIMENTO ENERGÉTICO DE CARROS ELÉTRICOS**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Guarantigueta - SP, 2018.

CHEN, J.; GAO X.; YAN L.; XU D. **EFFECT OF WALL THERMAL CONDUCTIVITY ON THE STABILITY OF CATALYTIC HEAT-RECIRCULATING MICRO-COMBUSTORS**. Elsevier – Applied Thermal Engineering – p. 852, 2017.

CHOU, S.K.; YANG, W.M. Li; J., Li, Z.W.. **POROUS MEDIA COMBUSTION FOR MICRO THERMOPHOTOVOLTAIC SYSTEM APPLICATIONS**. Elsevier Applied Energy – p. 2862, 2863, 2010.

DONOSO, P. J. **TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO**. Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos (IFSC) – p. 5, 2010.

MODEST, F. Michael. **RADIATIVE HEAT TRANSFER**. Second Edition - Elsevier Science (USA) – p. 2-7, 13-17, 20-24, 84-90, 96-98, 110, 414-418, 2003.

FONTANA, E.; CAPELETTO, A. C.; SANTOS, G. S. V.; GARBIN, E.; CUNHA, M. M.; LUZ, Jr. F. L. L. **NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT RECUPERATION IN MICRO-**

COMBUSTORS USING INTERNAL RECIRCULATION. Elsevier Chemical Engineering Science – p. 4, 2020.

GREENSHIELDS, J. C. **OPENFOAM – THE OPENFOAM FOUNDATION - USER GUIDE**, CFD Direct LTD, version 7. 10 th July – p. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, 2019.

INCROPERA, F. P.; DEWIT, D.P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA.** Rio de Janeiro : LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 6° ed. 2008.

JATOBA, L. **INTRODUÇÃO À CFD USANDO O OPENFOAM.** I Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional – UFRJ – p. 34, 2019

KLEIN, S. A. and ALVARADO, F. L. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and **THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATTER**, Vol. 3: **THERMAL CONDUCTIVITY**, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena and P. Hestermans, IFI/Plenun, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

LIMA, A. A.; MENEZES, N. P.; SANTOS, S.; AMORIM, B.; THOMAZI, F.; ZANELLA, F.; HEILMANN, A.; BURKARTER, E.; DARTORA, C. A. **UMA REVISÃO DOS PRINCÍPIOS DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA DE ENERGIA.** Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Engenharia Elétrica – DEE. Instituto Federal do Paraná – IFPR, 2019.

MALALASKERA, W.; VERSTEEG, H.K.. **AN INTRODUCTION TO COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS – The Finite Volume Method.** Second Edition. Pearson Education Limited – p. 9-11, 14, 16, 18, 136, 146, 212-213, 2007.

MUNIZ, L. A. R. **MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS APLICADOS À PROBLEMAS DE ESCOAMENTOS BIDIMENSIONAIS NA REGIÃO DE ENTRADA DE DUTOS CILÍNDRICOS.** Universidade Estadual de Campinas UNICAMP – Faculdade de Engenharia Química. Campinas – SP, 1995.

NACCACHE, M. F. **EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO E EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS**. Pontifícia Universidade Católica do Rio – PUCRJ, 2010.

OKUNO, E; YOSHIMURA, E. **FÍSICA DAS RADIAÇÕES**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, A. R. C.; GANANÇA, D. L. S.; SILVA, F. C.; MORAIS, G. T.; VERBURG, T. C. F. **ANALISE DOS GRADIENTES DE ENERGIA TÉRMICA COM O AUXÍLIO DA TERMOGRAFIA DURANTE ENSAIO DE TRAÇÃO**. Universidade Santa Cecília, Santos – SP, novembro 2018 – p. 15.

OpenFOAM: User Guide v 1912. **THE OPEN SOURCE CFD TOOLBOX**. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html>> acesso 20/05/2020.

OpenFOAM: User Guide v 1912. **THE OPEN SOURCE CFD TOOLBOX**. Disponível em: <<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-controldict/>> acesso 20/05/2020.

OpenFOAM. **THE OPEN SOURCE CFD TOOLBOX**. Disponível em <<https://www.openfoam.com/>> acesso em 20/05/2020.

SCHIRO, F.; BENATO, A.; STOPPATO, A.; DESTRO, N. **IMPROVING PHOTOVOLTAICS EFFICIENCY BY WATER COOLING: MODELLING AND EXPERIMENTAL APPROACH**. Energy, Volume 137, n. 15, p. 798 – 810. 2017.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R.. **THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER**. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Cleveland – Ohio. p. 19, 1971.

SIEGEL, Robert; HOWELL, R, John. **TERMAL RADIATION HEAT TRANSFER**. Third Edition – Hemisphere Publishing Corporation (USA) – p. 1-3, FALTA MAIS PAGINAS QUE EU VOU ESCREVER, 1992.

SIMWIKI. **CFD COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**. Disponível em: <https://www.simscale.com/forum/t/cfd-pimple-algorithm/81418>. Acesso em 11/2020.

SOUZA, L. F. S. **ESTUDO DE MÉTODOS ITERATIVOS NÃO-ESTACIONÁRIOS DE RESOLUÇÃO DE GRANDES SISTEMAS LINEARES ESPARSOS**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2002. p. 19.

STRINGASCI, D. M.; COURTEILLE, W. P. **A RADIAÇÃO DO CORPO NEGRO E SUA INFLUÊNCIA SOBRE OS ESTADOS DOS ÁTOMOS** – p. 2, 2014.

SUN7 ENERGIA SOLAR. **CÉLULA FOTOVOLTÁICA – EFEITO FOTOVOLTÁICO**. Disponível em: <<http://sun7energiasolar.com.br/celula-fotovoltaica/>> acesso em 20/05/2020.

PATANKAR, S. V. SPALDING, D. B. **A CALCULATION PROCEDURE FOR HEAT, MASS AND MOMENTUM TRANSFER IN THREE-DIMENSIONAL PARABOLIC FLOW**. Imperial College of Science and Technology. London - EN, 1972.

WELLER, H.; GREENSHIELDS, C.; JANSSENS, M.. **THE OPENFOAM FOUNDATION**. Disponível em: <<https://openfoam.org/release/1-0/>> acesso em 20/05/2020.

WOOLF, N. D.; KADLEC, A. E.; BETHKE, D.; GRINE, D. A.; NOGAN, J. J.; CEDERBERG, G. J.; BURCKEL, D. B.; LUK, S. T.; SHANER, A. E.; HENSLEY, M. J. **HIGH-EFFICIENCY THERMOPHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION ENABLED BY A METAMATERIAL SELECTIVE EMITTER**. Optica, vol 5 n° 2. February 2018, p. 216.

XING, J.; CHAO, X.; XUE, H.; XIAOZE, D.; GAOSHENG, W.; YONGSPING, Y. **A REVIEW OF THE CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC/THERMAL (CPVT) HYBRID SOLAR SYSTEMS BASED ON THE SPECTRAL BEAM SPLITTING TECHNOLOGY**. Elsevier – Applied Energy – p. 535, 2017.

YANG, W. M.; CHOU, S.K.; SHU, C.; Li, Z.W.; XUE, H.. **EXPERIMENTAL STUDY OF MICRO-THERMOPHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH DIFFERENT COMBUSTOR CONFIGURATIONS** . Energy Conversion & Management – p. 1, 2007.

YILMAZ, H.; CAM, O.; YILMAZ, I. **EFFECT OF MICRO COMBUSTOR GEOMETRY ON COMBUSTION AND EMISSION BEHAVIOR OF PREMIXED HYDROGEN/AIR FLAMES**. Elsevier – Energy p. 587, 2017.

VDOVIN, A.; GONZÁLEZ, A. O. **RADIATION HEAT TRANSFER IN OPENFOAM**. Chalmers University of Technology – Göteborg. p. 6. 2009.

VULLERS, R.; WANG, Z.; RENAUD, M.; VISSER, H.; OUDENHOVEN, J.; POP, V.. **MICROPOWER GENERATION: PRINCIPLES AND APPLICATIONS**. Imec/Holst Centre, Eindhoven, The Netherlands – Smart Sensor Systems: Emerging Technologies and Applications, p. 238, 2014.