

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Hugo Rodrigues Carlos Pedroso

POTENCIAL DA TECNOLOGIA TERMOFOTOVOLTAICA (TPV)
USANDO COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e as Irmãs Carmelitas Descalças Servas dos Pobres pelo imenso apoio prestado para que a conclusão desta graduação fosse possível, sem esta, dificilmente estaria nesta posição como autor deste trabalho. Faço questão também de estender tal gratidão principalmente a minha família, que sempre esteve do meu lado nos momentos mais difíceis e ao meu orientador, Florian Pradelle, que sempre se mostrou a disposição e empenhado a me direcionar e aconselhar quando preciso. Sem poder esquecer do meu melhor amigo e companheiro de todas as horas, meu cachorrinho Logan Vinícius, que sempre me mostra que a felicidade está nas coisas mais simples.

RESUMO

POTENCIAL DA TECNOLOGIA TERMOFOTOVOLTAICA (TPV) USANDO COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS

Nos últimos anos, as maiores potências econômicas mundiais acordaram políticas de sustentabilidade que visam diminuir entre 80 e 95% as emissões de gases de efeito estufa até 2050 em comparação com os níveis de 1990. Nesse contexto, a tecnologia fotovoltaica, juntamente com outras fontes renováveis, além da busca por maior eficiência energética, tem papel significativo para o cumprimento dessa meta. A tecnologia termofotovoltaica (TPV) na qual uma célula fotovoltaica convencional converte radiação térmica de fontes quentes como reaproveitamento da energia desperdiçada, permite aumentar a eficiência a níveis recordes através de ajustes que permitam a seleção da banda energética. Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento de uma simulação computacional do sistema termofotovoltaico, que fosse capaz de prever geração elétrica, eficiência energética e emissões a partir de diferentes combustíveis fósseis e renováveis, sendo estes: gasolina, etanol, diesel, gás natural, hidrogênio, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos sólidos urbanos, utilizando o software Matlab. A rotina inicia com o cálculo da temperatura de chama adiabática, com a qual é determinada o perfil espectral de radiação para diferentes materiais. Em seguida, é calculada a fração de energia aproveitada para cada tecnologia, visando definir o mais adequado para maximizar a eficiência do projeto. Para a comparação, foi considerado o uso de combustíveis fósseis e tecnologias clássicas como turbinas e motores de combustão interna, a fim de calcular a energia gerada e as emissões específicas. Tendo apresentado como resultado a grande diferença em questão de impacto ambiental e potencial energético, principalmente em relação ao Hidrogênio, Bagaço e aos Resíduos sólidos urbanos. Sendo o hidrogênio o combustível com emissão zero e melhor desempenho energético, permitindo números de eficiências em torno de 66% para o modelo ideal e 39% de forma aproximada quando associado a placas de trijunção compostas por GaInP/GaInAs/Ge, possuidoras do maior fator de aproveitamento espectral em relação aos outros materiais analisados.

Palavras chaves: Renováveis. Termofotovoltaico. Resíduo sólido urbano. Bagaço de cana-de-açúcar. Temperatura de chama adiabática. Espectro de Planck.

ABSTRACT

POTENTIAL OF THERMOPHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY (TPV) USING RENEWABLE FUELS

In recent years, the world's major economic powers have agreed on sustainability policies aiming to reduce greenhouse gas emissions by 80 to 95% by 2050 compared to 1990 levels. In this context, photovoltaic technology, along with other renewable sources, coupled with the pursuit of greater energy efficiency, plays a significant role in achieving this goal. Thermophotovoltaic technology (TPV), where a conventional photovoltaic cell converts thermal radiation from hot sources such as waste energy, allows for record-breaking efficiency through adjustments enabling bandgap selection. This project aimed to develop a computational simulation of the thermophotovoltaic system, predicting electrical generation, energy efficiency, and emissions from various fossil and renewable fuels – including gasoline, ethanol, diesel, natural gas, hydrogen, sugarcane bagasse, and urban solid waste – using Matlab software.

The routine begins with calculating the adiabatic flame temperature, determining the spectral radiation profile for different materials. The fraction of energy utilized for each technology is then calculated to define the most suitable one for maximizing project efficiency. For comparison, the use of fossil fuels and classical technologies such as turbines and internal combustion engines was considered to calculate generated energy and specific emissions. The results highlight significant differences in environmental impact and energy potential, particularly with Hydrogen, Bagasse, and Urban Solid Waste. Hydrogen emerges as a zero-emission fuel with superior energy performance, achieving efficiencies around 66% for the ideal model and approximately 39% when associated with triple-junction plates composed of GaInP/GaInAs/Ge, exhibiting the highest spectral utilization factor compared to other materials analyzed.

Keywords: Renewables. Thermophotovoltaic. Urban solid waste. Sugarcane bagasse. Adiabatic flame temperature. Planck spectrum.

SUMÁRIO

1 Introdução e objetivos	9
1.1. Contextualização	9
1.2. Objetivos	10
2 Revisão da literatura	12
2.1. Fundamentos teóricos sobre radiação	12
2.1.1. Radiação de um corpo negro	12
2.1.2. Radiação Incidente	14
2.2. Conversão Fotovoltaica	16
2.2.1. Materiais semi condutores	16
2.2.2. Geração de Energia	20
2.3. Sistema Termofotovoltaico (TPV)	22
2.3.1. Modelagem e eficiência	23
2.3.2. Estudos existentes	31
3 . Metodologia	33
3.1. Cálculo da temperatura adiabática de chama	33
3.2. Análise energética da Cana de açúcar e resíduos sólidos urbanos (RSU).	35
3.3. Espectro de Planck	36
3.4. Rendimento energético, geração e emissões	38
4 . Resultados e discussão	42
4.1. Validação do modelo	42
4.2. Comparação entre os combustíveis	43
4.3. Comparação com tecnologias tradicionais	46
5 . Conclusão	51
6 Revisão Bibliográfica	52
7 . Apêndice 1	55
8 . Apendice 2	56
9 . Apendice 3	57

Lista de figuras

Figura 1 - Distribuição de Planck (Incropera, 2002)	13
Figura 2 - Fluxo de radiação incidente sob uma superfície (Incropera, 2002)	14
Figura 3 - Reflexão, transmissão e absorção da radiação em superfícies semi-transparentes e opacas.....	15
Figura 4 - Exemplos de <i>bandgap</i> para materiais condutores, semi condutores e isolantes	17
Figura 5 - Processo de absorção descrito pela lei de Beer-Lambert.....	21
Figura 6 - Esboço de um sistema TPV (Nicholas, 2012).....	23
Figura 7- Esquematização de dispositivos TPV aberto e fechado	24
Figura 8 – Densidades de energia por faixas de emissão para diferentes filtros (Nicholas, 2012)	26
Figura 9 - Esquematização de controle espectral por emissor seletivo e superfície refletiva (Omair, 2019).....	27
Figura 10 - Esquema de reciclagem dos fótons sub-bandgap para uma placa de bandgap 0,75 eV. (Omair, 2019)	28
Figura 11 - Eficiência projetada para um dispositivo TPV em função da refletibilidade do espelho traseiro. (Omair, 2019).....	28
Figura 12 - Potência de saída para células modeladas com diferentes bandgaps em função de diferentes temperaturas (Nicholas, 2012).....	29
Figura 13 - Comportamento da célula TPV em função de diferentes bandgaps e controle espectral. (Nicholas, 2012)	30
Figura 14: Resposta espectral para alguns materiais semi condutores (Pasin, 2019)	37
Figura 15: Eficiência quântica para uma célula de tripla junção GaInP/GaInAs/Ge (Pasin, 2019).....	38
Figura 16: Discretização de curvas através do PegaPonto (UTFPR).....	39
Figura 17: Relação de temperatura máxima atingida e emissão em kg CO ₂ por hora para diferentes combustíveis	43
Figura 18: Eficiência energética para diferentes materiais - Gasolina.....	44
Figura 19: Eficiência energética para diferentes materiais - Etanol.....	44
Figura 20: Eficiência energética para diferentes materiais – Diesel	44
Figura 21: Eficiência energética para diferentes materiais – Gas natural	45
Figura 22: Eficiência energética para diferentes materiais - Hidrogênio	45

Figura 23: Eficiência energética para diferentes materiais - Bagaço.....	45
Figura 24: : Eficiência energética para diferentes materiais – RSU	45
Figura 25: Registros da evolução da eficiência para placas fotovoltaicas ao longo dos anos (NREL, 2023)	46
Figura 26: Eficiências do c-Si para diferentes combustíveis	46
Figura 27: Eficiências do mc-Si para diferentes combustíveis	47
Figura 28: Eficiências do CdTe para diferentes combustíveis.....	47
Figura 29: Eficiências do CIGS para diferentes combustíveis.....	48
Figura 30: Eficiências do GaInP/GaInAs/Ge para diferentes combustíveis.....	48
Figura 31: Emissão relativa para c-Si em função de diferentes combustíveis	49
Figura 32: Emissão relativa para mc-Si em função de diferentes combustíveis.....	49
Figura 33: Emissão relativa para CdTe em função de diferentes combustíveis	50
Figura 34: Emissão relativa para CIGS em função de diferentes combustíveis	50
Figura 35: Emissão relativa para GaInP/GaInAs/Ge em função de diferentes combustíveis	50

Lista de tabelas

Tabela 1 - Parametros e eficiências de artigos publicados sobre TPV	32
Tabela 2: Coeficientes empíricos dos produtos da reação (NASA, 1993).....	35
Tabela 3: Composição elementar para o bagaço da cana de açúcar e RSU brasileiro. (Furtado, 2023)	35
Tabela 4: Valores energéticos em base molar para o Bagaço e o RSU.	36
Tabela 5: Distribuição de aproveitamento espectral para diferentes materiais semicondutores.....	38
Tabela 6: Fatores de emissão para diferentes combustíveis	41
Tabela 7: Gereção e eficiencias de diferentes materiais a partir da queima de Gás Natural.....	42
Tabela 8: Emissão relativa para tecnologias tradicionais	49

1 Introdução e objetivos

1.1.Contextualização

De acordo com Fundação Certi, a transição energética é o conceito que abrange mudanças nas estruturas das matrizes energéticas dos países, migrando de um modelo composto em sua grande maioria por combustíveis fósseis – como petróleo, carvão mineral e gás natural – para uma matriz cada vez mais focada em fontes renováveis, a exemplo da solar, eólica, de biomassa, geotérmica e até mesmo nuclear.

Essa mudança é necessária para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e mitigar os impactos das mudanças climáticas, além de promover o desenvolvimento sustentável, a segurança energética e a diversificação da matriz elétrica. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a transição energética pode gerar benefícios socioeconômicos globais de US\$ 98 trilhões até 2050.

Ainda segundo a IRENA, entre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica se destaca pela sua capacidade de converter diretamente a luz solar em eletricidade, utilizando uma tecnologia baseada no efeito fotovoltaico, que ocorre naturalmente em alguns tipos de materiais semicondutores. Podendo ser gerada tanto em pequenas instalações residenciais ou comerciais, quanto em grandes usinas solares conectadas à rede elétrica.

A energia fotovoltaica apresenta diversas vantagens, como: ser uma fonte limpa, inesgotável e abundante; já apresentar uma economicidade comprovada; ter uma manutenção baixa e uma vida útil longa; ser modular e flexível; e contribuir para a geração distribuída e a democratização do acesso à energia. Por outro lado, alguns desafios ainda persistem, como: o custo inicial de instalação; a baixa eficiência quando comparada com a geração a partir de combustíveis fósseis; a necessidade de armazenamento ou integração com outras fontes; o espaço ocupado pelos painéis solares; e os possíveis impactos ambientais na produção e no descarte dos equipamentos.

No Brasil, a energia solar PV vem crescendo exponencialmente nos últimos anos, impulsionada pela redução dos preços dos equipamentos, pelos incentivos regulatórios e fiscais, pela alta incidência solar no território nacional e pela crise hídrica que afeta o setor elétrico. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil possui atualmente mais de 9 GW de potência

instalada provenientes dessa tecnologia, sendo 4,6 GW em geração distribuída e 4,4 GW em geração centralizada. A expectativa é que o país alcance a marca de 126 GW de capacidade instalada até 2050.

Além da tecnologia fotovoltaica convencional, existem outras formas de aproveitar o efeito fotovoltaico para gerar eletricidade, como a tecnologia termofotovoltaica (TPV), foco deste trabalho. Tendo como base o estudo de Colangelo (2003), a tecnologia TPV tem vantagens consideráveis se comparado com a tecnologia fotovoltaica clássica sendo talvez a principal, a não dependência de luz solar, uma vez que utiliza emissores de calor em altas temperaturas para providenciar energia radiativa incidente. Adicionalmente, há a possibilidade do aumento considerável de eficiência através do reaproveitamento do potencial energético dos fótons que não tenham sido aproveitados, redirecionando-os de forma a reaquecer a fonte emissora, ou selecionando as faixas de comprimento de onda com maior poder emissivo, coletando ao máximo a energia fornecida. Outras vantagens do TPV são: baixa geração de ruído, possibilidade de aplicação em cogeração em sistemas de calor e eletricidade; baixa poluição e alta versatilidade de combustíveis.

Ela, porém, ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento, mas pode representar uma alternativa promissora para aumentar a eficiência e a versatilidade da energia solar. Assim como a tecnologia fotovoltaica convencional, ela também contribui para a meta de descarbonização até 2050 que é um desafio e uma oportunidade para o Brasil e o mundo. Ao investir em fontes como a energia solar, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, aumenta a segurança energética, gera empregos e renda, preserva o meio ambiente e combate as mudanças climáticas. Para isso, é preciso superar as barreiras técnicas, econômicas, sociais e políticas que ainda limitam o avanço dessas iniciativas. É necessário também promover a inovação, a educação, a conscientização e a participação de todos os atores envolvidos no setor elétrico: governo, empresas, academia, sociedade civil e consumidores. Com o TPV podendo ser um grande aliado para o desenvolvimento sustentável do país e do planeta.

1.2. Objetivos

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo numérico de um sistema termofotovoltaico através do Matlab, que seja capaz de aproximar resultados de geração e eficiência energética em relação a um dispositivo TPV para diferentes

células associadas a combustíveis como hidrogênio, biogás, resíduos sólidos urbanos, bagaço de cana de açúcar entre outros. Essa simulação será feita considerando a extração da temperatura de chama adiabática através da combustão completa e obtendo da distribuição de Planck, o poder emissivo em função do comprimento de onda a ser associado ao tipo de TPV analisado, visando obter o potencial de energia elétrica gerada e consequentemente sua eficiência, através da aproximação da fração de energia recuperada para diferentes materiais. Em efeitos de comparação, serão analisadas as performances e emissões devido a combinação de cada combustível e material de célula, e por fim com tecnologias tradicionais como turbinas e motores de combustão interna.

2 Revisão da literatura

2.1.Fundamentos teóricos sobre radiação

De acordo com Incropera (2002), a irradiação consiste no processo de transmissão de calor a partir de ondas eletromagnéticas. Tendo seu pontapé inicial sido decorrente dos estudos de Planck e Einstein, que propuseram o conceito dos fótons sendo partículas quânticas de luz, com energia em função do seu comprimento de onda de acordo com a seguinte relação:

$$(Eq. 1) \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

Sendo o poder emissivo, E (W/m^2), a taxa na qual radiação é emitida de uma superfície por unidade de área em todos os comprimentos de onda e direções, tendo como variáveis a constante de Planck, h , ($6,6256 \times 10^{-34}$ J.s); a velocidade de propagação da luz no vácuo, c ; e o comprimento de ondas, sendo representado pelo λ , segundo Incropera (2002).

Segundo Duffie e Beckham (2013), a região do espectro eletromagnético entre aproximadamente 0,2 e 1000 μm corresponde aos comprimentos de onda associada a troca de calor e é chamada de radiação térmica.

2.1.1. Radiação de um corpo negro

Para melhor entendermos o mecanismo de transferência, é necessário definir o conceito de corpo negro, que segundo Incropera (2002), se trata de um corpo ideal com propriedades de absorver toda a radiação incidente, independente do seu comprimento de ondas e direção; além de também ter a maior capacidade de emissão de energia, sendo esta difusa, ou seja, independente de direção, resumindo, um receptor e emissor perfeito. Por se tratar de um modelo ideal, é utilizado como padrão de comparação para as propriedades de emissão e radiação de superfícies reais. Energia é emitida pelo corpo em virtude de sua temperatura não nula. A distribuição de radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de ondas descrita pela lei de Planck, encontrada abaixo.

$$(Eq 2) \quad E_{\lambda,b} = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc_0}{\lambda kT}) - 1]}$$

Sendo k , a constante de Boltzmann equivalente a $1,380649 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Resultando no diagrama ilustrado na Figura 1, que mostra o poder emissivo espectral em função da temperatura do corpo emissor e comprimento de ondas.

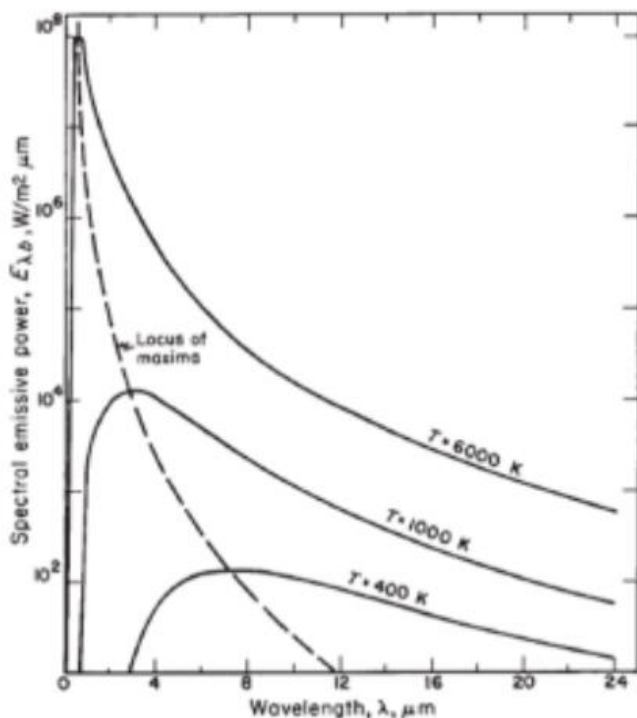


Figura 1 - Distribuição de Planck (Incropera, 2002)

Sendo a linha tracejada central, dada pela diferenciação das curvas e as igualando a zero, a fim de descobrir seus pontos de máximo, chamado lei de deslocamento de Wien. Ao integrar a Eq 2 sobre todos os comprimentos de onda, é possível obter a energia total emitida por unidade de área, a partir da equação de Stefan-Boltzmann:

$$(Eq\ 2) \quad E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b} d\lambda = \sigma T^4$$

De forma que ao manipulá-la, conseguimos obter a energia total emitida para qualquer intervalo de λ desejado.

Sendo essa radiação dependente da troca radiativa entre dois corpos, sendo ela a diferença de temperatura entre o meio e ambiente externo, uma vez que se a temperatura do objeto for maior que a do ambiente, possui taxa de emissão maior do que a de absorção. Se sua temperatura for menor do que a do ambiente, ele absorverá em maior quantidade do que emitirá; e em caso de equilíbrio térmico entre as superfícies, as taxas se igualam.

2.1.2. Radiação Incidente

Como destacado na seção anterior, apenas o conceito ideal de corpo negro consegue absorver de forma integral toda radiação incidente sobre ele, onde no cenário real, algumas outras variáveis serão adicionadas a este estudo. Onde de acordo com Incropera (2002), são elas: a emissividade ϵ , que tem como objetivo mensurar a propriedade do material de superfície e seu acabamento de emitir radiação térmica em comparação ao corpo negro, indo em uma escala de 0 a 1, onde 0 é um corpo que não emite (buraco negro) e 1 a emissão total (corpo negro). A absorvidade α , que é intimamente ligada a energia térmica contida no corpo, uma vez que modela a capacidade de absorção do mesmo, também em uma escala entre

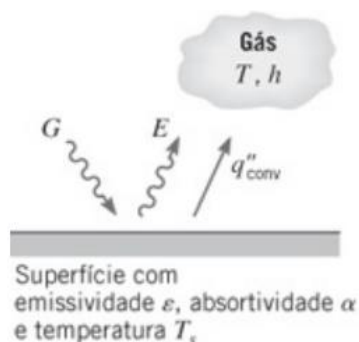


Figura 2 - Fluxo de radiação incidente sob uma superfície (Incropera, 2002)

0 e 1, seu índice traduz a condição do material de forma que se ele for igual a 1, toda irradiação é absorvida, menor do que isso, e a superfície sendo considerada opaca, porções de radiação são apenas refletidas, mas caso ela venha a ser semi-transparente, além da perda por reflexão, parte dela também é transmitida pelo corpo. E a radiação incidente G , sendo a soma das parcelas de energia emitida por radiação com origem na vizinhança que incide sobre a superfície do corpo, em uma área unitária, tais propriedades podem ser visualizadas de acordo com a Figura 2.

De forma a relacionar essas variáveis a troca de calor com a vizinhança, quando a radiação incide sobre um meio semi-transparente, ela é dividida em três parcelas: absorvida, transmitida e refletida. A transmissão se refere a radiação que consegue atravessar o meio, como por exemplo a luz do sol que passa por uma garrafa d'água e podemos enxergá-la no corpo que estiver ao lado dela. A absorção ocorre em decorrência de uma interação entre a energia, contida em uma faixa específica de comprimento de ondas, e as moléculas do mesmo, causando aumento

da energia interna por meio da energia térmica. A reflexão é a resultante das frações que não foram absorvidas ou transmitidas que é redirecionada para o ambiente externo, sem interferir no objeto em questão. Assim, define-se a refletividade ρ , como sendo a fração de G refletida; α a fração absorvida, como já visto e τ , a parcela transmitida, sendo conhecido como transmissividade (Incropera, 2002). Quando $\tau = 0$, o corpo é considerado opaco. Essas variáveis podem ser relacionadas pela seguinte proporção:

$$(Eq\ 3) \quad \alpha + \tau + \rho = 1$$

A partir desse entendimento, podemos definir o conceito de radiosidade, expresso pela letra J , que consiste em quantificar a parcela total de radiação que não foi absorvida pelo corpo. Ou seja, a soma das frações transmitidas, emitidas e refletidas para corpos semi-transparentes, e para corpos opacos considerando $\tau = 0$, como mostrado na Eq. 5.

$$(Eq\ 5) \quad J = E + G_{refletido} + G_{transmitido} = E + \rho G + \tau G$$

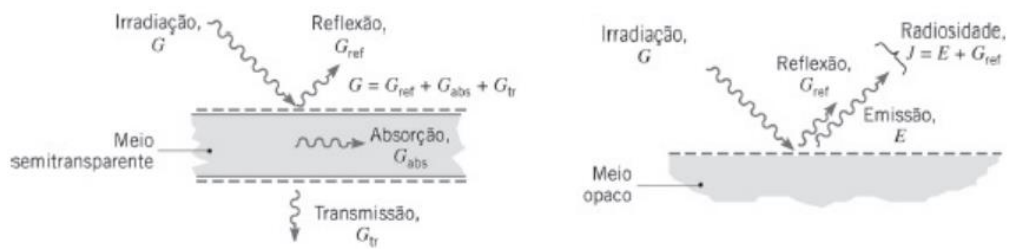
Definido esse conceito, possuímos o entendimento necessário para o tratamento do fluxo radiante líquido que atravessa a superfície, q''_{rad} , que nada mais é do que a diferença entre a entrada e saída de radiação, ou seja.

$$(Eq\ 6) \quad q''_{rad} = G - J$$

Onde podemos ampliá-la, para visualização das variáveis até aqui trabalhadas, da seguinte maneira:

$$(Eq\ 7) \quad q''_{rad} = G - J = G - (E + \rho G + \tau G) = \varepsilon \sigma T_s^4 - \alpha G$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, no valor de $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, e T_s a temperatura de superfície expressa em Kelvin.



2.2. Conversão Fotovoltaica

O potencial fotovoltaico, descoberto a quase 200 anos por Edmond Becquerel e aperfeiçoado por Charles Fritts, que desenvolveu e instalou as primeiras placas solares 40 anos mais tarde, sendo essas posicionadas em um telhado na cidade de Nova Iorque. Tem nos dias de hoje, uma grande expectativa a respeito de seu potencial, uma vez que é uma das formas de energia mais limpas e com maior abundância de recursos por depender apenas da luz solar para produzir energia. Nesta sessão, são apresentadas de forma mais aprofundada os princípios e as equações que regem o funcionamento de tal dispositivo, com o intuito de analisar as variáveis de interesse e entender as possíveis formas de melhoria na sua operação. Para descrevermos tal comportamento, o pontapé inicial é estudarmos como a luz e matéria interagem entre si, considerando as diferentes propriedades de materiais utilizados.

2.2.1. Materiais semi condutores

Como visto no começo do trabalho, pode-se enxergar a radiação solar como partículas discretas de unidades de energia, sendo essas conhecidas como fótons. Sendo sua energia dependente diretamente da frequência de radiação, velocidade da luz e da constante de Planck, como definido na Eq.1, com o princípio básico de, ao absorverem a radiação solar em função do comprimento de ondas, tendem, dependendo se a energia for alta o suficiente, a liberarem elétrons. Sendo esse fenômeno chamado de formação de pares de buracos e elétrons, que é resultante da lacuna deixada pelo elétron liberto durante a absorção de energia e agora fora da estrutura cristalina.

2.2.1.1. Bandas de energia em materiais semi condutores

Segundo Freundlich (2017), quando átomos individuais são reunidos em uma rede cristalina, bandas de energia são formadas no material e indicam os estados disponíveis de energia de elétrons sob as respectivas condições de ligação e condução, ou seja, o gap de energia (*bandgap*, em inglês) corresponde a energia necessária para um elétron pular da banda de valência até a banda de condução. A zero kelvin, os elétrons permanecem juntos aos átomos no menor estado de energia possível, chamada de banda de valência, E_v ; e onde através do ganho de quantidades discretas de energia, seu grau de agitação aumenta, possibilitando-o saltar do topo da banda de valência para a base da banda de condução E_c , onde passa a ser um elétron livre e podendo se movimentar para outros espaços vazios sob as forças de um campo elétrico ou difusão, e gerando então o buraco de elétron. Essa quantidade de energia necessariamente precisa ser maior do *bandgap* (E_g), que representa a diferença entre a quantidade presente nos estados de valência e condução, ou seja.

(Eq 8)
$$E_g = E_c - E_v$$

Ainda segundo o autor, o *bandgap* depende entre outras coisas da composição do material e sua temperatura. Para os materiais semicondutores comumente

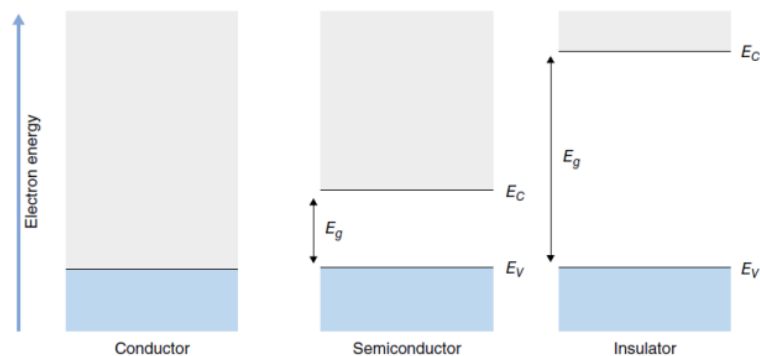


Figura 4 - Exemplos de *bandgap* para materiais condutores, semi condutores e isolantes

empregados como células PV, esse valor varia entre ~1,1 eV, para o silício, até ~2,5 eV para componentes III-V, que são materiais compostos por elementos presentes na terceira e quinta coluna da tabela periódica, como por exemplo o Arsenieto de Gálio (GaAs). É justamente com o conceito de *bandgap* que podemos diferenciar os semicondutores, dos isolantes e condutores.

Onde através da Figura 4, é possível notar que as características condutoras se dão pela sobreposição das bandas de valência e condução, ou seja, sem a existência do *bandgap*, permitindo que mesmo em baixas temperaturas os elétrons se movam livremente. Já no caso dos isolantes, a energia necessária para superar o *bandgap* seria extremamente alta, tornando-se inviável para tal aplicação; e para os semi condutores, essa diferença é baixa o suficiente para ser fornecida e alta o suficiente para não ser considerado condutor.

2.2.1.2. Principais tipos de células e materiais utilizados

Segundo Duffie (2006), o material mais largamente utilizado para a confecção das células é o silício monocristalino, mas tendo muitas variações de ligas que podem ser adotadas para o mesmo fim, e.g, Silício mono ou policristalino (Si), sulfeto de Cádmio (CdS), Arsenieto de Gálio (GaAs), e alguns outros semi-condutores, tendo posto isto e estruturado o conceito de *bandgaps*, buracos de elétrons e as diferenças entre tipos de materiais, é importante detalharmos de maneira sucinta as diferenças e particularidades de cada tipo de liga escolhida para a construção da célula. Tendo cada uma, aplicações e performances específicas, e podendo ser divididas em três gerações e categorizadas em função dos materiais utilizados, métodos de processamento adotados e nível de maturidade comercial.

Esse levantamento tem como base o artigo "*Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia*" publicado pela Revista Brasileira De Ensino De Física em 2022, onde apesar de algumas desvantagens em relação as outras gerações, como falta de flexibilidade mecânica, a primeira, tendo como base o silício, por conta de sua relativa alta eficiência na conversão de energia (15-20%), segue sendo a mais utilizada no mundo. Os parâmetros analisados para essa seleção dependem basicamente das características como absorvidade, *bandgap*, toxicidade, estabilidade, disponibilidade e também as condições ambientais de exposição do material.

2.2.1.2.1. Silício amorfo

Segundo o artigo em questão, foram as primeiras a serem fabricadas em quantidade industrial, da segunda geração, estando esse motivo atrelado a serem as melhores desenvolvidas desse grupo. Sua vantagem é o processamento em baixas temperaturas, o que permite o uso de diferentes substratos. E a desvantagem é a

baixa eficiência de conversão, entre 4% e 8%, causada pelo menor grau de liberdade dos portadores de carga devido aos defeitos e recombinações indesejáveis.

2.2.1.2.2. Wafers de Silício

Segundo o artigo, essa geração pode chegar a 90% das aplicações na matriz solar mundial e é a mais largamente utilizada nos dias de hoje, principalmente por possuírem uma boa eficiência de conversão e desempenho a longo prazo. Está dividida em basicamente duas categorias, silício mono e policristalinos, seu *bandgap* de $\sim 1,12$ eV e sua grande abundância na natureza, corroboram para esse emprego, além de ser estável e não-toxico. O uso do componente na configuração monocristalina possui a vantagem de possuir maior eficiência em relação a sua versão policristalina, porém, por conta de seu alto grau requerido de pureza, possui a desvantagem no maior custo de manufatura em decorrência do processo dos materiais.

2.2.1.2.3. Filmes Finos

Os autores enfatizam o destaque dessa categoria pela configuração da confecção dos painéis no formato de filmes finos, de forma a economizar com material, com camadas em torno de 1 μm podendo ser feita de CdTe e composições de cobre, índio, gálio e selênio. Possui alta flexibilidade, facilidade de instalação e baixo custo de processamento. Porém, por outro lado, possui baixos índices de eficiência. No caso do Telureto de Cádmio (CdTe), possui vantagens muito interessantes comercialmente, como alta eficiência de conversão, na ordem de 9% a 22%, um bom coeficiente de absorção e ainda baixo custo de manipulação e manufatura. Porém suas desvantagens são proporcionais, uma vez que a toxicidade do material é considerada alta, e consequentemente exigindo assim maior custo para sua manutenção e reciclagem. Já o arsenieto de gálio (GaAs) possui um grande destaque no mercado, uma vez que é conhecido pela sua alta eficiência, tendo nos dias de hoje placas com capacidade de converter até quase 32% de toda radiação recebida. Além disso, possui boa flexibilidade, leveza, boa resistência a temperaturas extremas e boa sensibilidade a baixa luz solar. Porém, sua desvantagem está no alto custo, podendo custar muito mais do que as placas de silício, pela dificuldade de processamento de materiais, uma vez que o gálio é escasso e arsênio tóxico. Outra desvantagem é sua fragilidade, aumentando a complexidade do projeto, uma vez que as vezes seja

necessário usá-lo no formato de filmes finos em um substrato, tendo relativa alta taxa de defeitos no processo de transformá-lo em células.

2.2.2. Geração de Energia

Novamente tendo como base o estudo de Freundlich (2017), a principal função de uma célula fotovoltaica é a geração de corrente e voltagem através da energia absorvida dos fótons, e esse processo se dá através do aumento de densidade de elétrons livres, buracos de elétrons ou ambos. E pra isso acontecer, parte da energia de geração é destinada para esse fim, normalmente sendo igual ao valor do bandgap, E_g . Ainda segundo Freundlich, normalmente, quatro processos básicos são responsáveis pela geração desses portadores livres de carga, são eles ionização por impacto, geração térmica, fotogeração e geração por meio de impurezas. Fazendo uma breve descrição de cada um, temos:

- **Ionização por impacto:** Portadores com energia cinética suficiente para levar um elétron da camada de valência para a de condução, através do choque entre eles, basicamente “arrancando-o” do seu átomo. Sendo para isso, necessária uma quantidade considerável de movimento.
- **Geração térmica:** Ocorre pelo aumento do grau de agitação da rede atômica. Dependendo se a temperatura for alta o suficiente ou o material possuir bandgap normalmente mais baixo, essa vibração térmica pode ser suficiente para libertar um elétron, criando um portador de carga.
- **Fotogeração:** Esse modo domina, e conseqüentemente é o mais importante na abordagem de geração de energia solar, e consiste basicamente em conseguir criar um par de buracos de elétrons a partir da energia fornecida pelo fóton absorvido pelo material.
- **Impurezas:** Pode gerar energias mínimas, através de zonas “fragilizadas” no *bandgap* do material, necessitando assim de quantidades muito menores de excitação para libertar um portador de carga.

A seguir, maior detalhes serão fornecidas sobre a fotogeração, por ser o mecanismo dominante nos dispositivos PV. Segundo exposto no estudo de Freundlich (2017), o primeiro passo para entendermos esse mecanismo de forma mais aprofundada, é como a intensidade ou fluxo de fótons varia com a energia e profundidade de uma amostra de material semi condutor. Assim, podemos ter o

embasamento necessário para calcular o grau de portadores fotogerados, G (EHP/cm^3s), por uma célula solar.

Considerando um volume de material com absortividade $\alpha(E)$, constante e a intensidade ou fluxo de radiação sendo I_0 ; em uma amostra infinitesimal dx , onde $\alpha(E)dx$ dos fótons são absorvidos, pode-se relacionar o ganho microscópico em função da intensidade e absortividade como:

$$(Eq\ 9) \quad \frac{dI_0}{I_0} = \alpha(E)dx$$

Ao resolver essa equação em função da intensidade, chega-se a equação conhecida de Beer-Lambert, descrevendo uma queda exponencial da intensidade em relação a espessura, sendo ela válida para unidades de intensidade ou fluxo.

$$(Eq\ 10) \quad I(E, x) = I_0(E)e^{-\alpha(E)x}$$

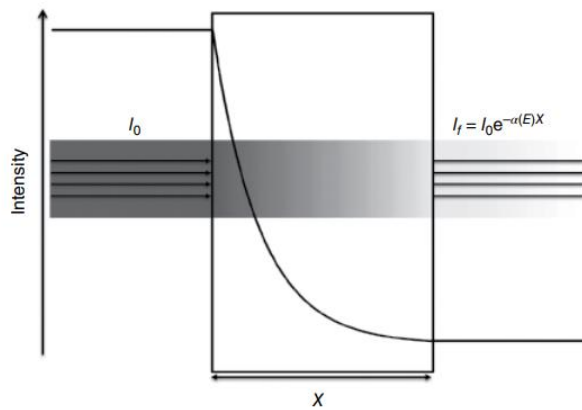


Figura 5 - Processo de absorção descrito pela lei de Beer-Lambert

O coeficiente de absorção está relacionado ao comprimento de ondas irradiado por meio da seguinte equação:

$$(Eq\ 11) \quad \alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda}$$

Onde λ representa o comprimento de onda em cm, e k é um fator adimensional tipicamente dependente de λ .

A taxa de fotogeração para uma energia específica E , e uma espessura de material x , pode ser dada pelo produto entre o fluxo de portadores de carga e o coeficiente de absorção, da seguinte forma.

$$(Eq\ 12) \quad g(E, x) = \alpha(\lambda)\Gamma(E, x)$$

Então, aplicando a lei de Beer-Lambert e contabilizando as perdas por reflexão da superfície frontal, temos:

$$(Eq\ 13) \quad g(E, x) = [1 - \rho] \alpha(\lambda)\Gamma(E, x)e^{-\alpha(E)x}$$

Com isso, a taxa total de energia gerada para todos os comprimentos de onda para qual a absortividade do material seja diferente de zero, é dada pela seguinte integração:

$$(Eq\ 14) \quad G(x) = \int_{E_g}^{\infty} [1 - \rho] \alpha(\lambda) \Gamma(E, x) e^{-\alpha(E)x} dE$$

Sendo o comprimento de absorção (L_a) uma medida extremamente útil para aplicações de energia solar, sendo a representação da espessura onde a intensidade da luz decai em um fator de e^{-1} .

2.3. Sistema Termofotovoltaico (TPV)

De acordo com Nicholas (2012), o princípio básico desse sistema é a utilização da energia térmica emitida por uma fonte de calor, em vez de radiação solar, para gerar eletricidade seguindo os mesmos princípios que na tecnologia PV tradicional. Um sistema TPV, normalmente é composto por quatro componentes: uma fonte emissora de calor, geralmente em ordens de temperatura entre 1000K e 1800K; um emissor seletivo e filtros para o controle de espectro, uma célula PV e um sistema de resfriamento. O autor ainda descreve as principais diferenças entre as duas tecnologias como sendo, as temperaturas mais baixas e a proximidade dos emissores, por parte do TPV, em relação a interação do sistema convencional que tem como fonte primária de calor a radiação solar. Trazendo a vantagem para o princípio aqui estudado pela maior densidade de potência (~5-60 W/cm² em comparação a 0,1 W/cm² no caso da radiação solar), considerando que em média a distância entre emissor e a célula em um sistema TPV é aproximadamente entre 1 e 10 cm, enquanto em um sistema PV clássico, esse valor equivale a distância do Sol a superfície da placa, passando da ordem de 10¹⁰ m. Além disso, diferentemente da tecnologia tradicional, o TPV permite a utilização de princípios e materiais que ocasionam um aumento da eficiência do mesmo como, a partir do controle do espectro emitido através de um filtro, de forma a maximizar a absorção da energia irradiada pela célula permitindo apenas a passagem de uma faixa de comprimentos de onda específica; ou através de uma superfície altamente reflexiva, de modo a redirecionar os fótons não utilizados na geração, de volta para a fonte, com intuito de reaquecê-la, como mostra a Figura 6.

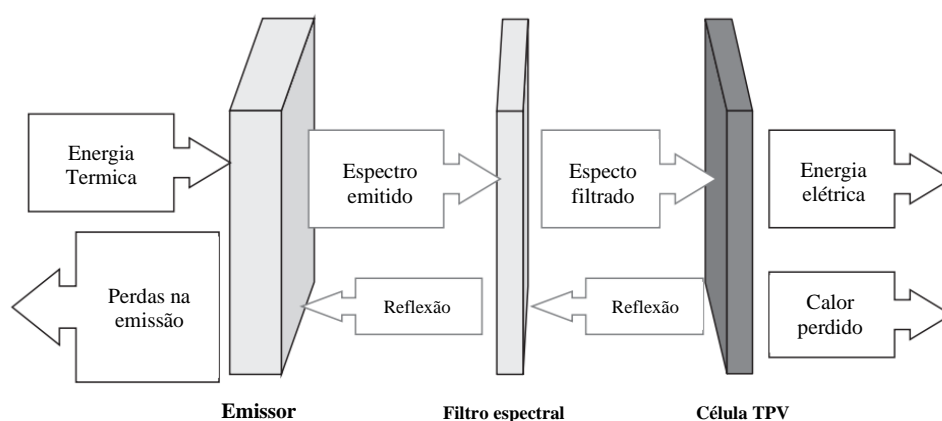


Figura 6 - Esboço de um sistema TPV (Nicholas, 2012)

Os sistemas TPV já foram propostos como fontes de para geração portátil de eletricidade e em aplicações onde a saída de calor também pode ser usada de forma útil, como em sistemas de geração combinados. As vantagens dos sistemas TPV incluem: leveza, dada a alta densidade de potência; otimização do uso de combustível; funcionamento com baixo ruído sonoros em partes móveis (e portanto baixa manutenção); e controlabilidade, permitindo que a oferta e a demanda estejam em fase.

2.3.1. Modelagem e eficiência

De acordo com Datas e Vaillon (2021), existem dois tipos de dispositivos termofotovoltaicos, conhecidos como abertos e fechados, que podem ser diferenciados um dos outros pelo posicionamento da fonte emissora de calor em relação aos outros componentes do sistema.

No caso dos classificados como abertos, a fonte de calor é externa e a energia térmica emitida, Q_{in} , adentra ao sistema a partir de uma fenda, que inevitavelmente acaba acarretando em uma perda adicional, Q_{out} ; um exemplo de dispositivo dessa natureza é o TPV que utiliza a concentração de raios solares como fonte emissora. Já sob a perspectiva do TPV fechado, o calor é produzido dentro do sistema, de forma que toda energia não aproveitada seja reabsorvida pelo mesmo, assim, não representando necessariamente uma fonte de perdas, reações exotérmicas como o decaimento de radioatividade e mudanças de fase são exemplos dessa categoria, como ilustrado pela Figura 7.

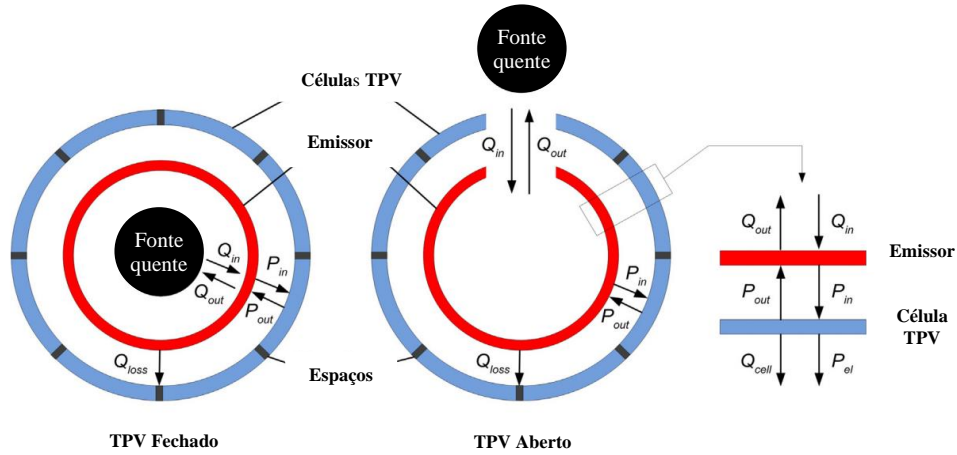


Figura 7- Esquematização de dispositivos TPV aberto e fechado

Uma vez aquecido, a fonte emissora troca potencial radiativo com as células ($P_{in} - P_{out}$), que ocorre na temperatura de equilíbrio determinada pelo balanço de energia entre o calor que entra e sai. Exemplificando a partir da Eq. 15, onde Q_{loss} representa a taxa de transferência de calor em decorrência da não idealidade da cavidade óptica formada entre fonte e célula.

$$(Eq\ 15) \quad Q_{in} - Q_{out} = Q_{loss} + P_{in} - P_{out},$$

Um balanço adicional pode ser feito para dispositivos dessa natureza, como na Eq. 16, onde Q_{cell} representa o calor liberado para o ambiente e P_{el} a potência elétrica.

$$(Eq\ 16) \quad P_{in} - P_{out} = Q_{cell} + P_{el}$$

Tendo em mãos esses dois balanços, Datas e Vaillon (2021) elaboram quatro equacionamentos principais em relação a conversão de energia por parte de um dispositivo TPV, são elas:

$$(Eq\ 17) \quad \eta_{TPV} = \frac{P_{el}}{P_{in} - P_{out}} = \frac{P_{el}}{P_{el} + Q_{cell}}$$

$$(Eq\ 18) \quad \eta_{cavity} = \frac{P_{el}}{Q_{in} - Q_{out}} = \frac{P_{el}}{P_{el} + Q_{cell} + Q_{loss}}$$

$$(Eq\ 19) \quad \eta_{open\ system} = \frac{P_{el}}{Q_{in}} = \eta_{cavity} \left(1 - \frac{P_{el}}{Q_{loss}}\right)$$

$$(Eq\ 20) \quad \eta_{closed\ system} = \eta_{cavity} = \frac{P_{el}}{Q_{in} - Q_{out}}$$

Desta forma, de acordo com a Equação 17, para melhorar a eficiência da célula TPV, é possível aumentar a energia radiante refletida de volta ao emissor P_{out} , desde que isso resulte em uma redução significativa do calor liberado pela célula Q_{cell} e não afete tanto a energia elétrica gerada P_{el} . De fato, reduzir a energia fornecida à célula

TPV pode aumentar a eficiência de conversão, desde que haja uma redução mais significativa na quantidade de calor liberado Q_{cell} . Esse objetivo pode ser alcançado por meio do controle espectral da energia radiante trocada, de modo a coincidir com a resposta espectral da célula TPV. Além disso, a eficiência da cavidade (Equação 18) deve ser levada em conta, uma vez que leva em consideração as perdas ópticas causadas pelo espaçamento entre as células interconectadas no conversor Q_{loss} e outras não consideradas na definição da célula TPV, como efeitos de borda da cavidade ou isolamento térmico não adiabático. Se Q_{loss} for igual a 0, a eficiência da cavidade será igual à eficiência do TPV perfeitamente fechado, mas é preciso estar atento a essas perdas que podem reduzir a eficácia do sistema. Já nos sistemas abertos, esse fator é um desafio a ser enfrentado, representando as perdas de calor através da abertura de entrada e calculando a eficiência por meio da equação $\eta = 1 - Q_{out} / Q_{in}$. A otimização desta parte do sistema exige um equilíbrio entre a entrada e perdas de calor, com o objetivo de capturar o máximo de energia possível e evitar que ela saia do sistema. Ainda segundo o estudo de Datas e Vaillon (2021), em muitos casos, maximizar a eficiência geral dos sistemas TPV abertos pode ser feito a partir da também escolha do material em função da temperatura.

2.3.1.1. Controle Espectral

De acordo com Nicholas (2012), a aplicação de controle espectral melhora significativamente o desempenho do sistema, suprimindo a grande quantidade de fótons de comprimento de onda longo e de bandgap menores do que o necessário para geração do par de buraco de elétrons, presentes no espectro de corpo negro. O controle espectral pode ser alcançado por meio do uso de um emissor seletivo, que tem uma emissividade reduzida nas partes indesejadas do espectro, ou pelo uso de um sistema de filtro refletor que pode retornar fótons inutilizáveis de volta à fonte de calor, e até por uma combinação dos dois. Isso leva a uma eficiência celular mais alta, pois a energia fornecida diminui sem que a potência de saída elétrica seja alterada.

Ainda segundo o autor, uma maior eficiência é necessária para diminuir os custos de operação do sistema, permitir um gerenciamento de calor mais fácil das células e, potencialmente, permitir temperaturas mais altas do emissor, uma vez que menos radiação total é emitida. No entanto, deve-se observar que a densidade de geração da célula não aumenta, já que o controle espectral está apenas removendo fótons inutilizáveis. Ainda segundo o autor, um emissor seletivo ou um único filtro

sozinho não é suficiente para controlar totalmente as propriedades espectrais do sistema, portanto, uma combinação de vários mecanismos de controle é frequentemente usada. Ao adotar vários componentes, os requisitos para qualquer uma das partes parte diminui, de modo que a supressão de fótons possa ser alcançada tendo resposta tanto de uma faixa estreita quanto ampla. Para fontes TPV típicas, isso significa que a parte ideal do espectro é a faixa de 1-2 μm .

Ainda com base no estudo proposto por Nicholas (2012), muitos emissores seletivos foram propostos e desenvolvidos, e a comparação entre alguns deles pode ser visualizada na Figura 8. Tais filtros podem ser de banda larga, suprimindo principalmente os fótons sub-bandgap, como por exemplo cerâmica incorporada com NiO e AR-Tungstênio; ou podem atuar como um filtro passa-banda, tendo como exemplo o manto de érbio, o que também reduz significativamente a passagem dos fótons acima do faixa de bandgap evitando uma perda térmica. No entanto, esse tipo de sistema também reduz a potência de saída disponível, então para que haja um aumento líquido na eficiência essa supressão precisa ser precisamente dimensionada.

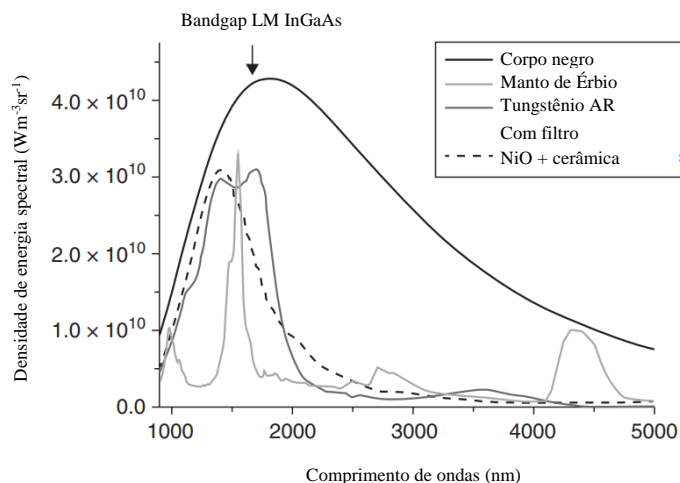


Figura 8 – Densidades de energia por faixas de emissão para diferentes filtros (Nicholas, 2012)

Além dos sistemas demonstrados na Figura 8, outros dispositivos podem ser citados como incluindo pilhas dielétricas combinadas com filtros de plasma (Rahmlow et al., 2007), arranjos ressonantes de antenas (Horne et al., 2005), cristais fotônicos (Mao e Ye, 2010) e redes de tungstênio (Seager et al., 2005).

A outra alternativa, apontada por Omair (2019), é o emprego de um filtro como uma espécie de espelho, dispensando a necessidade de um emissor com propriedades seletivas de espectro, com intuito de também reaproveitar os fótons não

absorvidos utilizando uma engenharia um pouco menos complexa. Na literatura em questão, no chamado TPV Regenerativo, o emissor quente é cercado por células fotovoltaicas e superfícies altamente refletivas que ajudam a coletar e redirecionar fótons não utilizados. Estes espelhos são responsáveis para fornecer um aumento na tensão, e reciclar a energia do fóton irradiado, cujo fica abaixo do bandgap, refletindo-o de volta para a fonte de calor, como mostra o esquemático comparativo entre as duas soluções na Figura 9.

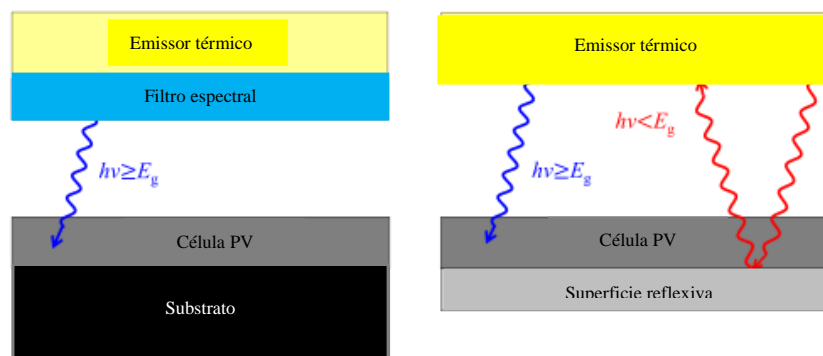


Figura 9 - Esquemática de controle espectral por emissor seletivo e superfície refletiva (Omair, 2019)

Sendo a refletibilidade do dispositivo o parâmetro chave para um melhor aproveitamento da energia fornecida, uma vez que quanto maior essa característica, melhor seu desempenho. Ocasionalmente maiores fluxos de fótons sub-bandgap redirecionados a fonte, com o intuito de reaquecê-la e consequentemente apresentando um aumento na eficiência do sistema como um todo, uma vez que as perdas são consideravelmente reduzidas, vide Figura 10. Onde é possível enxergar proporcionalmente o aproveitamento da energia fornecida pelo espectro de Planck para uma placa com bandgap de 0,75 eV e fonte a 1200 °C, sendo apenas a área azul a parcela de energia útil para geração elétrica líquida, de forma que todo restante seria desperdiçado. Porém, é possível observar que o TPV Regenerativo age justamente suprimindo essas perdas, através da reciclagem da energia destacada pela área rosa do espectro, restringindo o não aproveitamento dos fótons às eficiências individuais dos componentes do modelo.

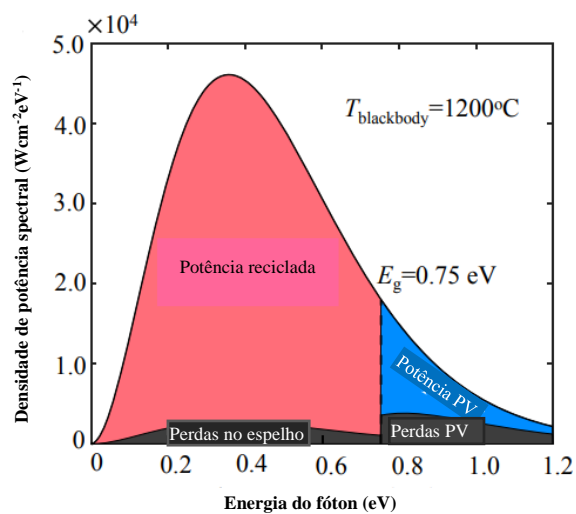


Figura 10 - Esquema de reciclagem dos fótons sub-bandgap para uma placa de bandgap 0,75 eV. (Omair, 2019)

Ainda segundo o estudo publicado por Omair, é possível analisar os resultados propostos pelo autor para validar as vantagens de tal dispositivo. Uma vez que o mesmo modelou uma projeção para a eficiência de conversão do seu protótipo TPV, considerando a fonte emissora sendo grafite e células InGaAS, para avaliar a sensibilidade de tal parâmetro em função da refletibilidade e bandgap da placa, como mostra a Figura 11. Constatando um aumento do bandgap ideal que maximiza a eficiência de conversão proporcionalmente a qualidade do espelho. O autor ainda enfatiza que caso não fosse adotada essa técnica, o pico de eficiência alcançado seria de 8,5%.

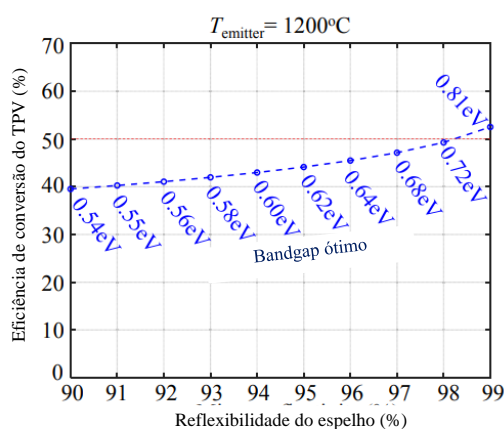


Figura 11 - Eficiência projetada para um dispositivo TPV em função da refletibilidade do espelho traseiro. (Omair, 2019)

2.3.1.2. Desempenho das células TPV para diferentes emissões

Tendo como base o artigo proposto por Nicholas (2012), que modelou fontes de emissão para TPV variando de 1000 a 1800 K, e adotando hipóteses como resfriamento das células até um pouco acima da temperatura ambiente considerada como 303 K e a potência incidente sobre o TPV sendo emitida a partir de uma fonte planar aproximada a um corpo negro, é possível analisar o comportamento do sistema para diferentes fontes e formas de emissão.

Como mostra a Figura 12, a potência de saída pode aumentar significativamente em relação ao aumento da temperatura do emissor, resultando em uma potência incidente maior, e pela diminuição do bandgap da célula, permitindo que uma maior faixa do espectro seja absorvida de forma a compensar as perdas térmicas.

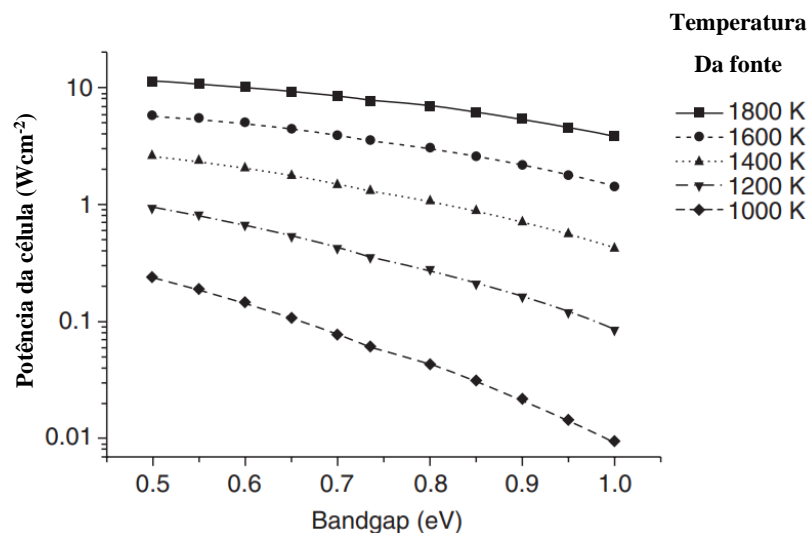


Figura 12 - Potência de saída para células modeladas com diferentes bandgaps em função de diferentes temperaturas (Nicholas, 2012)

O TPV ideal portanto, terá uma alta densidade de potência de saída e uma alta eficiência. No entanto, na prática, o equilíbrio entre estes depende dos detalhes do sistema e o custo dos componentes, como o controle espectral e a qualidade dos materiais empregados.

O estudo feito por Nicholas (2012) considerou os sistemas ideais para fins de comparação e análise das eficiências, utilizando um modelo simplificado de controle espectral para descrever a radiação entrando na célula, sendo adotada a emissividade de 1 para energias acima do bandgap e ϵ_{BBG} entre 0 e 1 para as incidências abaixo do bandgap, qualquer reflexão das células foi assumida como inclusa neste modelo de controle espectral.

O uso de um emissor seletivo com essas características não deve afetar a saída de energia elétrica, como a emissividade é 1 para fótons acima do bandgap, então a potência de saída é quase inalterada em relação ao caso de um corpo negro mostrado na Figura 12.

A baixa emissividade para os casos abaixo do bandgap suprime a radiação que não pode ser utilizada, diminuindo a potência incidente na célula e aumentando a eficiência, conforme mostrado na Figura 13a, fazendo também que seu pico mova em direção a bandgaps mais altos, pois quando a perda de fótons abaixo do bandgap é minimizada, bandgaps mais altos são melhores opções uma vez que uma porcentagem menor do calor fornecido necessitará ser dissipado.

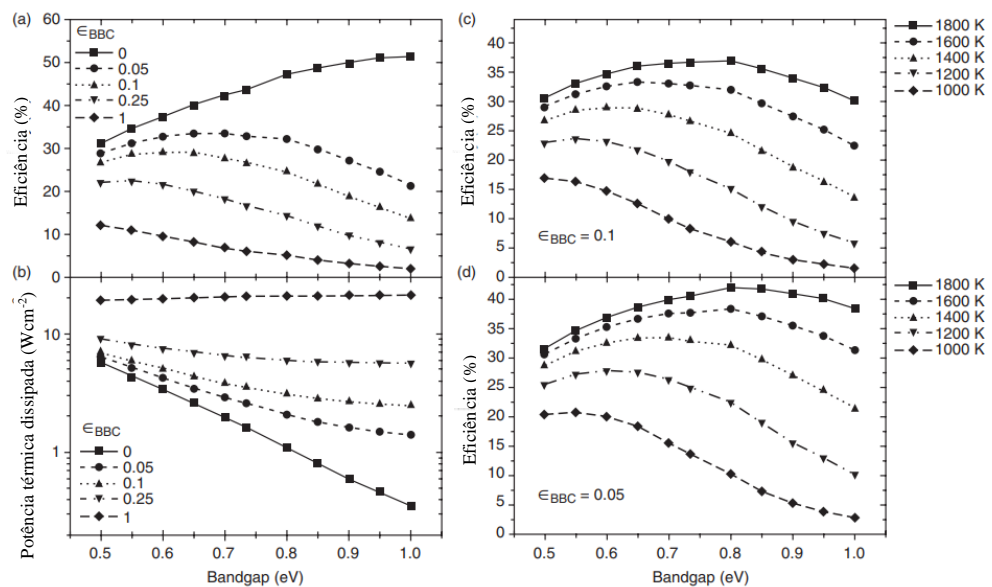


Figura 13 - Comportamento da célula TPV em função de diferentes bandgaps e controle espectral. (Nicholas, 2012)

Segundo (Nicholas, 2012), um esquema diferente de emissor seletivo que reduz adicionalmente a emissão de fótons ligeiramente acima do bandgap diminuiriam as perdas térmicas, mas reduziria a densidade de potência de saída, e para $\epsilon_{BBC} \geq 0,05$ não leva a um ganho significativo em eficiência. O ganho de eficiência de uma redução em ϵ_{BBC} é muito sensível quando próximo de zero, especialmente em bandgaps altos, devido à grande proporção da energia abaixo do bandgap no espectro de corpo negro. É importante notar que a eficiência ótima geralmente não ocorre no mesmo bandgap que a densidade de potência de saída ideal.

Células de bandgap inferior com este esquema de emissor seletivo resultam em maiores densidades de energia incidente na célula do que em um sistema de bandgap superior equivalente, portanto, embora densidades de potência de saída elétrica mais

altas possam ser produzidas, a potência térmica a ser extraída da célula também é significativamente maior, como mostra a Figura 13b.

O efeito de um emissor seletivo para uma faixa de temperaturas da fonte é mostrado na Figura 13c-d. Enfatizando a mudança no pico de eficiência em direção a bandgaps mais altos, tanto para a melhora de qualidade do emissor seletivo, quanto para o aumento de temperatura da fonte. Isso mostra que, para fontes de alta temperatura, um bandgap maior do que o ótimo convencional (Coutts, 1999) de ~0,5–0,6 eV pode ser necessário, da mesma forma que a eficiência pode ser mais importante quando as densidades de potência mais altas tornam o resfriamento da célula mais difícil. Portanto, InGaAs com correspondência de rede (0,74 eV) ou mesmo InGaAsP com um bom emissor seletivo poderia ser uma escolha melhor neste caso.

2.3.2. Estudos existentes

Tendo os conceitos técnicos sido definidos e exposto tamanho desafio, é coerente fazer um levantamento de trabalhos prévios e comparações, principalmente a respeito de parâmetros como o material utilizado para a célula fotovoltaica, temperatura atingida na máxima eficiência do sistema, densidade de potência e obviamente a máxima eficiência alcançada. Segundo Nicholas (2012), as células de silício para uso com radiação solar foram inicialmente investigadas para uso em fontes de alta temperatura com emissores seletivos devido à sua viabilidade econômica. No entanto, o alto bandgap do silício limitou a eficiência elétrica a cerca de 2% na maioria dos trabalhos de TPV. As células de germânio com bandgap de 0,66 eV foram desenvolvidas, mas apresentaram dificuldades em passivar a superfície por conta da maior massa efetiva de seus elétrons e, portanto, resultando em uma tensão de circuito aberto geralmente menor. Embora sejam vantajosas em termos de custo, as células de germânio oferecem eficiências de cerca de 10% apenas quando combinadas a uma reflexão da superfície traseira de 85%. A maioria das pesquisas se concentrou em materiais baseados em GaSb (0,73 eV) ou InGaAs em substratos de InP (bandgap de 0,74 eV quando combinado com a rede cristalina). As células de GaSb apresentaram alta eficiência em altas densidades de corrente, mas ligeiramente inferior em comparação com as células InGaAs em um sistema. Outros materiais, podem ser combinados com a rede cristalina de GaSb, como GaInAsSb, com bandgap entre 0,29 e 0,73 eV. Atualmente, os substratos de GaSb são mais caros do que os

substratos de InP (embora essa disparidade seja em parte devido ao menor volume de GaSb produzido). Como pode ser visto na Tabela 1, diversos pesquisadores desenvolveram células InGaAs de alta qualidade para TPV, tanto com células de InGaAs de 0,74 eV de rede cristalina correspondente, como com células mal ajustadas. Esses dispositivos apresentaram níveis de saída de até 3,5 W/cm² e eficiência de 15% em altas temperaturas. A maioria dos estudos focou em bandgaps em torno de 0,6 eV, tendo sido esse material também utilizado em aplicações espaciais com fontes de calor a partir de radioisótopos, em que o peso e a confiabilidade eram mais importantes do que o custo. Eficiências de até 23% e geração de energia de 12 W/kg foram relatadas nessas aplicações. No caso do projeto de Omair et al. (2019) e LaPotin et al. (2022), pudemos ver um salto significativo de eficiência, se comparado aos anteriores. No caso do primeiro, uma célula também de InGaAs foi utilizada em conjunto com uma superfície refletiva de ouro com refletividade de 94% e uma fonte emissora de grafite, com foco em estudar a aplicabilidade da tecnologia em motores automobilísticos híbridos. O segundo obteve a maior eficiência entre os artigos aqui levantados e utilizou um conjunto de duas células do mesmo material, porém com bandgap mais alto, entre 1,0 eV e 1,4 eV, e temperaturas também mais elevadas, da ordem de 1900°C a 2400°C; obtendo o resultado de 41,1% de eficiência sob a máxima temperatura e utilizando também o ouro como superfície de reflexão traseira.

Alguns desses exemplos foram disponibilizados na tabela 1 para fins de comparação.

Tabela 1 - Parâmetros e eficiências de artigos publicados sobre TPV

Autor	Material	Eg [eV]	Temperatura [K]*	Densidade de potencia [A/cm ²]	Eficiência [%]
Wernsman et al., 2004	InGaAS	0,6	1039	2,84	23,6
Wanlass et al., 1996	InGaAS	0,74	AM ₀	0,06	12,8
Wilt et al., 1994	InGaAS	0,74	AM ₀	0,057	11,2
Wanlass et al., 1991	InGaAS	0,95	50 × AM ₀	0,532	9
Dharmarasu et al., 2001	InGaAS	0,95	AM ₀	0,053	16,5
Steiner et al., 2009	InGaAS	0,98	AM ₀	0,018	8,2
Steiner et al., 2009	InGaAS	0,98	45 × AM ₀	0,82	9,5
Omair et al., 2019	InGaAS	0,75	1480,15	0,918	29,1
LaPotin et al., 2022	2 x InGaAS	1,4 1,2	2673,15	2,39	41,1
* AM ₀ se refere às condições de iluminação solar fora da atmosfera para uma incidência perpendicular (Cunha, 2021)					

3. Metodologia

O projeto proposto consiste na modelagem termodinâmica do sistema, utilizando o software Matlab, a partir de diferentes combustíveis, tanto fósseis quanto renováveis, sendo eles: a gasolina, etanol, diesel, gás natural, hidrogênio, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos sólidos urbanos. Onde com o cálculo da temperatura adiabática de chama, será possível obter o perfil de radiação em função do comprimento de ondas para diferentes materiais. E então será calculada a fração de energia recuperada para cada tipo de material, de acordo com a distribuição de Planck, com propósito de analisa-los e adotar o mais adequado a maximizar a eficiência do projeto. Serão considerados para a comparação tecnologias clássicas como turbinas e motores de combustão interna, a fim de obter uma razão que nos permita mensurar com clareza, a quantidade de CO₂ emitido a partir de maneiras convencionais e utilizando a tecnologia TPV por unidade de geração de energia.

3.1. Cálculo da temperatura adiabática de chama

Na engenharia, principalmente no ramo termodinâmico, muito se é utilizado de princípios químicos para inúmeras finalidades. Um dos mais importantes se trata da combustão, utilizado na grande maioria dos ciclos geradores de potência. Se trata basicamente da interação entre combustível e comburente, envolvendo uma rápida oxidação dos elementos que compõe o combustível, podendo ser escrito na forma de equação, resultando na liberação de energia em forma de calor.

A temperatura adiabática de chama consiste na temperatura máxima dos produtos que uma determinada reação de combustão consegue atingir, pois por se tratar de uma aproximação adiabática as perdas de calor são desconsideradas.

A partir da primeira lei da termodinâmica, aplicada a um volume de controle devidamente selecionado, pode se descrever a obtenção desse valor. Para as equações abaixo foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Regime permanente
- Trabalho desprezível
- Energias cinética e potencial desprezíveis
- Dados de referência (T=25 °C e 1 atm), correspondente ao estado dos reagentes

$$(Eq\ 21) \quad Q_{VC} + H_{Reagentes} = H_{Produtos}$$

$$(Eq\ 22) \quad Q_{VC} + \sum_{Reag} n_{entrada} \bar{h}_{Reagentes} = \sum_{Prod} n_{saída} \bar{h}_{Produtos}$$

$$(Eq\ 23) \quad Q_{VC} = \sum_{Produtos} n_{saída} (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{saída} - \sum_{Reagentes} n_{entrada} (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{entrada}$$

Sendo n a quantidade de matéria de cada espécie, \bar{h}_f^0 a entalpia de formação, $\Delta \bar{h}$ a entalpia referente a diferença de temperatura e pressão em relação ao estado de referência e H_{Rp} , a entalpia da reação. Para o cálculo da temperatura adiabática de chama, temos $Q_{VC} = 0$, logo:

$$(Eq\ 24) \quad \sum_{Reag} n_{entrada} (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{entrada} = \sum_{Prod} n_{saída} (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_{saída}$$

Onde podemos aproximar $\Delta \bar{h}$ pela soma das contribuições de calor específico à pressão constante para o intervalo entre temperatura de referência e máxima, como descrito pela Eq. 25:

$$(Eq\ 25) \quad \Delta \bar{h} = \int_{T_{ref}}^{T_{AC}} n \cdot C_p(T) dT$$

Partindo do pressuposto que as condições de entrada do combustível em questão sejam as definidas como condições de referência e que a reação ocorre sem a presença de impurezas, temos $\Delta \bar{h}_{entrada} = 0$; e podemos simplificar e desenvolver a Eq. 25 da seguinte maneira apresentada na Eq. 26.

$$(Eq\ 26) \quad \sum_{Combustível} n_{entrada} (\bar{h}_f^0)_{Combustível} = \sum_{Prod} n_{saída} (\bar{h}_f^0 + \int_{T_{ref}}^{T_{AC}} C_p(T) dT)_{saída}$$

Sendo T_{AC} e C_p , o valor da temperatura adiabática de chama em Kelvin e o calor específico em função da temperatura, respectivamente. Tal relação foi modelada no software Matlab, considerando como comburente, para todas os combustíveis analisados, ar atmosférico seco com uma composição volumétrica aproximada de 21% de O_2 e 79% de N_2 e mistura ar-combustível estequiométrica.

O C_p foi modelado com a correlação expressa de acordo com NASA (MCBRIDE; GORDON; RENO, 1993), definida como:

$$(Eq\ 27) \quad C_p(T) = c_1 + c_2 T + c_3 T^2 + c_4 T^3 + c_5 T^4$$

Sendo c_1, c_2, c_3, c_4 e c_5 constantes definidas para cada elemento ou composto de interesse. Como neste estudo é considerada apenas a condição de combustão completa, os produtos das reações serão os mesmos para todos os combustíveis (H_2O , CO_2 e N_2). De forma que os o balanço energético completo da reação para cada combustível pode ser encontrado no Apendice 1.

Tabela 2: Coeficientes empíricos dos produtos da reação (NASA, 1993)

Produto da combustão	C1 [x10 ⁻⁵]	C2 [x10 ⁻⁵]	C3 [x10 ⁻³]	C4 [x10 ⁻⁵]	C5
H ₂ O	0,33363	0,26790	2,6105	0,088960	1169,00
CO ₂	0,29730	0,34540	1,4280	0,264000	588,00
N ₂	0,29105	0,086149	1,7016	0,0010347	909,79

3.2. Análise energética da Cana de açúcar e resíduos sólidos urbanos (RSU).

Utilizando como base o estudo publicado por Furtado (2023), que analisou o poder energético de ambos os recursos, com o intuito de geração de energia elétrica em usinas com cogeração, quantificando e comparando amostras de bagaço e resíduos sólidos urbanos, a composição elementar para os combustíveis renováveis analisados por este manuscrito foram definidas como mostrado na Tabela 3, tendo como abordagem inicial os combustíveis secos e o RSU adaptado as condições lixo brasileiro, segundo o autor.

Tabela 3: Composição elementar para o bagaço da cana de açúcar e RSU brasileiro. (Furtado, 2023)

Amostra	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	O [%]	Cinzas [%]
Bagaço	22,1	3,0	-	-	-	20,2	0,7
RSU	27,6	3,49	0,15	0,06	0,64	19,7	16,6

Assim, através de uma simples conversão mássica para obtenção da fórmula química molar, chegamos nos respectivos arranjos relativos para o bagaço e RSU, CH_{1,67}O_{0,67} e CH_{1,56}O_{0,56}, não considerando na estrutura a composição de nitrogênio e enxofre por resultarem em uma parcela molar desprezível nesta composição amostral.

Os valores de \bar{h}_f^0 para os combustíveis fósseis foram extraídos da literatura (Van Wylen, 1995). A determinação da entalpia de formação dos combustíveis renováveis, tem como base (Zainal et al, 2001), que possibilita a determinação da entalpia de formação dos compostos da forma CH_xO_y, a partir do seguinte sistema de equações químicas.

$$(Eq. 28) \quad C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad \Delta H_{c1} = -393509 \frac{kJ}{kmol}$$

$$(Eq. 29) \quad \frac{x}{2}H_2 + \frac{y}{2}O_2 \rightarrow \frac{x}{2}H_2O \quad \Delta H_{c2} = \frac{x}{2}(-241818) \frac{kJ}{kmol}$$

$$(Eq. 30) \quad CO_2 + \frac{x}{2}H_2O \rightarrow CH_xO_y + \left(2 + \frac{x}{2} - y\right)O_2 \quad \Delta H_{c3} = PM * HHV * 1000 \frac{kJ}{kmol}$$

$$(Eq. 31) \quad C + \frac{x}{2}H_2 + \frac{y}{2}O_2 \rightarrow CH_xO_y \quad \Delta H_f = \sum_{i=1}^3 \Delta H_{ci}$$

. Onde HHV, também conhecido como Poder Calorífico Superior, pode ser calculado através da equação de Dulong (Channiwala et al, 2002) expressa pela Eq. 32, sendo PM o peso molecular da substância em questão.

$$(Eq. 32) \quad HHV = 0,341C + 1,323H + 0,0685 - 0,0153A - 0,1194(O + N)) \frac{MJ}{kg}$$

Através da metodologia descrita, foram calculadas as respectivas entalpia de formação descritas pela Tabela 4.

Tabela 4: Valores energéticos em base molar para os combustíveis analisados.

Amostra	Entalpia de formação [kJ/kmol]
Gasolina	-250105
Etanol	-277380
Diesel	-174000
Gás Natural	-74873
Hidrogênio	0
Bagaço	-372502,43
RSU	-325173,84

3.3. Espectro de Planck

Tendo definidas as informações referentes as temperaturas das fontes emissoras, é necessária a modelagem do espectro que descreve a distribuição da energia radiativa emitida em função dos comprimentos de onda, ou seja, o Espectro de Planck. Para tal aproximação, também foi utilizado o software MatLab, para o cálculo e obtenção do perfil referente as temperaturas máximas atingidas pelos combustíveis analisados, através da Eq.2, tendo como parâmetros de entrada o valor da temperatura adiabática de chama correspondente e o intervalo de comprimento de onda analisado, que foi definido com valores entre 0,1 e 100 nm, de forma que seja

possível o esboço de um gráfico em escala logarítmica capaz de descrever a fração de energia disponível para qualquer intervalo de λ através do cálculo integral. Com a intenção de determinar e comparar a capacidade total de energia absorvida por cada tipo de placa, seu rendimento energético, energia elétrica líquida e a emissão por cada kWh gerado.

Para tal análise, se faz necessário o embasamento de acordo com a sensibilidade espectral de cada material, utilizando como base o trabalho publicado por Buhler (2007), que possibilita a extração dos dados de respectivos aproveitamentos energéticos por faixa de trabalho, através das Figuras 14 e 15 e compilados na Tabela 2. Onde no caso particular da Figuras 15, ilustra a porção abrangida por uma placa de tripla junção, que segundo Pasin (2019) corresponde a uma combinação das respostas individuais de cada um dos materiais utilizados, no caso GaInP/GaInAs/Ge podendo assim, ser observados de forma independente, sendo representados respectivamente pelas curvas azul, verde e vermelho, sendo a eficiência quântica a razão entre fóton incidente e convertido em energia elétrica, indicando a quantidade de corrente que a célula produzirá quando irradiada por fótons de um determinado comprimento de onda. .

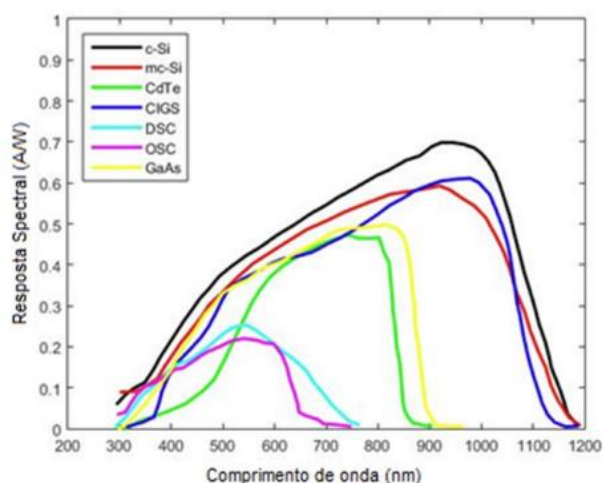


Figura 14: Resposta espectral para alguns materiais semi condutores (Pasin, 2019)

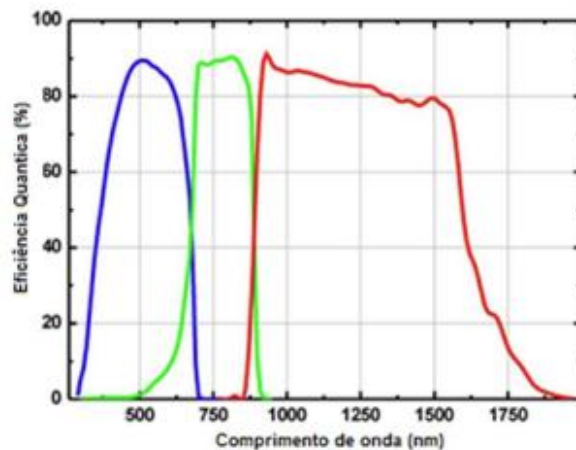


Figura 15: Eficiência quântica para uma célula de tripla junção GaInP/GaInAs/Ge (Pasin, 2019)

Assim, podemos extrair de forma aproximada a partir das Figuras 14 e 15 a distribuição de aproveitamento por comprimento de ondas de cada material, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Distribuição de aproveitamento espectral para diferentes materiais semicondutores

Célula	λ_{\min} [nm]	λ_{\max} [nm]
c-Si	300	1200
mc-Si	300	1200
CdTe	300	900
CIGS	300	1200
DSC	300	750
OSC	300	750
GaAs	300	900
GaInP	280	700
GaInAs	500	950
Ge	850	1900

3.4. Rendimento energético, geração e emissões

Para o cálculo do rendimento térmico, foram selecionadas alguns dos materiais mais utilizados em projetos de células termofotovoltaicas e suas respectivas faixas do espectro que melhor são aproveitados, de forma que seja possível quantificar de forma aproximada o rendimento energético máximo que cada matriz consegue alcançar, através da razão entre a energia disponível no determinado intervalo $[\lambda_1:\lambda_2]$

e a energia total emitida pelo combustível, sendo a placa considerada ideal e sem perdas, sendo definido o rendimento teórico através da Eq. 2.

$$(Eq\ 33) \quad \eta_{teorico} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hC_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} d\lambda}{\sigma A T^4}$$

Consequentemente, a capacidade ideal de geração total da placa nada mais é do que o produto entre o fator de rendimento teórico e a energia total disponível.

Calculou-se o rendimento real, η_{real} , através da discretização das curvas de resposta espectral para que fosse possível a integração de cada definida pela total faixa de trabalho em intervalos de 100 em 100nm, de forma a maximizar a sensibilidade do modelo em relação a captura de energia radiativa para diferentes partes do espectro.

Para tal método, foi utilizado o software PegaPonto, desenvolvido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que possibilita a discretização de uma determinada curva através de uma imagem, onde após o usuário definir informações referentes a localização da origem e escalas dos eixos X e Y, calcula coordenadas proporcionais para os pontos gerados a partir de cliques sob o gráfico a ser discretizado, como mostra a Figura 16.

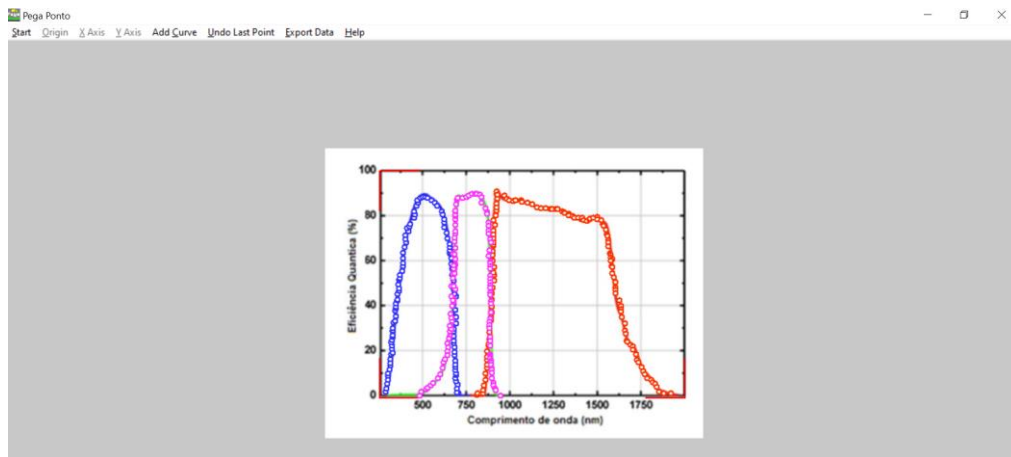


Figura 16: Discretização de curvas através do PegaPonto (UTFPR)

A partir de tais dados relativos a todos os materiais estudados, os mesmos foram exportados e tratados no software Microsoft Excel de modo que fosse executado o cálculo proposto pelo método de somatório de trapézios.

Para cada intervalo de 100nm dentro da faixa de trabalho definida pela Tabela 5, foi definido um fator de aproveitamento local, ϵ , sendo a razão da área total do

respectivo trapézio pela diferença dos comprimentos de onda em questão, como mostra a Eq. 34, para um intervalo genérico A e B.

$$(Eq\ 34) \quad \varepsilon_{A-B} = \frac{\frac{f(A) + f(B)}{2} (B - A)}{(B - A)}$$

Tal fator permite quantificar aproximadamente o quanto da energia emitida pela mesma faixa a partir do Espectro de Planck, transformada em eletricidade pela célula, de forma que a fração de energia local para a mesma faixa genérica seja em uma dada quantidade de tempo:

$$(Eq\ 35) \quad w_1 = \varepsilon_{A-B} * \Delta t * \int_A^B \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hC_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} d\lambda$$

E conseqüentemente, a eletricidade total gerada pela placa é o somatório de todas as contribuições locais, de acordo com a Eq 36.

$$(Eq\ 36) \quad \dot{W}_e = \sum_{i=1}^n w_i$$

Finalmente sendo possível determinar o rendimento real do mecanismo a partir da Eq. 37, sendo esse estudo fazendo a análise para o funcionamento durante 1 hora de placas com área igual a 1 m².

$$(Eq\ 37) \quad \eta_{real} = \frac{\dot{W}_e}{\sigma AT^4}$$

A emissão final em decorrência a combustão foi calculada a partir da determinação da quantidade de combustível necessária para geração de energia térmica máxima, a partir da temperatura adiabática de chama, durante 1 hora através da razão entre tal valor e o PCI do respectivo composto utilizado, da seguinte maneira:

$$(Eq\ 38) \quad \dot{m} = \frac{\sigma AT^4}{PCI}$$

Segundo IPCC (Guideline, 2006), uma primeira aproximação para estimar a emissão de CO₂ é dada pela equação abaixo.

$$(Eq\ 39) \quad \theta_{CO_2} = \text{Consumo de combustível} * \text{Fator de emissão} * \text{tempo}$$

Onde θ_{CO_2} é a quantidade de CO₂ gerado [kg] e o fator de emissão é o valor atribuído para cada combustível dado pela EPE (*Empresa de Pesquisa Energética, 2022*), podendo ser observado na Tabela 3. Assim, a emissão total por cada kWh produzido, associada ao uso final, pode ser calculada pela Eq. 40, onde $\phi_{emissão}$ é o valor específico em kg CO₂/kWh.

$$(Eq\ 40) \quad \phi_{emissão} = \frac{\theta_{CO_2}}{\dot{W}_{el}}$$

Tabela 6: Fatores de emissão para diferentes combustíveis (EPE, 2022)

Combustível	Fator de emissão	Unidade
Gasolina	69300	[kg CO ₂ /TJ]
Gás Natural	56100	[kg CO ₂ /TJ]
Diesel	74100	[kg CO ₂ /TJ]
Etanol	0	[kg CO ₂ /TJ]
Hidrogênio	0	[kg CO ₂ /TJ]
Bagaço de cana-de-açúcar	0	[kg CO ₂ /TJ]
Resíduos urbanos	54074,9	[kg CO ₂ /TJ]

Após a conclusão das metodologias a serem seguidas, as relações e equações esmiuçadas previamente foram desenvolvidas no Matlab e Excel de modo que fosse possível obter um panorama geral em relação a cada tipo de placa utilizada, para mais detalhes veja o código disponibilizado no APÊNDICE 2, sendo possível então fazer uma comparação cruzada do comportamento energético de cada dispositivo para cada fonte emissora. A validação dos resultados foi conduzida mediante a comparação sistemática com referências literárias pertinentes. Este procedimento proporcionando uma avaliação crítica da consistência e concordância dos resultados obtidos em relação aos dados previamente publicados na literatura especializada.

4. Resultados e discussão

4.1. Validação do modelo

Iniciando pela metodologia de cálculo da temperatura adiabática de chama, tendo condições de entrada do combustível a temperatura e pressão de entrada a 273,15 K e 1 atm, utilizando como exemplo o Gás Natural (CH₄), que atingiu uma temperatura máxima de 2327,2 K, que ao analisar em relação a publicações anteriores, é percebida uma defasagem de 6%. Law (2006), Baukal (2000), Reed (2016) e Segeler (1956) tiveram resultados entre 1917 e 2227 K, resultando em uma média de 2180 K. Por não ser uma variação muito expressiva, pode-se atribuir a causa ao erro propagado em decorrência das correlações e casas decimais utilizadas durante o cálculo, de modo que a temperatura máxima aproximada seja satisfatoriamente determinada.

Para a validação das eficiências, será utilizado o resultado obtido para o mesmo combustível em diferentes materiais, como mostra a Tabela 7, o resultado detalhado para todos os combustíveis para cada faixa de 100 nm pode ser visto no Apêndice 3. Segundo Freundlich (2017), as células de silício cristalino e multi-cristalino normalmente atingem intervalos de eficiência entre 12%-19% e 10%-14%, respectivamente, enquanto o Telureto de Cádmio (CdTe) e a liga de Cádmio, Índio, Galio e Selênio (CIGS) apresentam em torno de 7% e 17%. Tais valores são próximos aos obtidos, sendo a diferença podendo ser justificada pelo refino do modelo, uma vez que as técnicas empregadas para a determinação do fator de aproveitamento a partir dos gráficos de resposta espectral de cada material foram calculadas para intervalos relativamente grandes (100 nm).

Tabela 7: Geração e eficiências de diferentes materiais a partir da queima de Gás Natural.

Combustível		Gás natural	
Temperatura adiabática de chama [K]		2327,2	
Energia total [kW]		1.66E+03	
Célula	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência aproximada [%]
c-Si	181,9714	23%	11%
mc-Si	148,6644	23%	9%
CdTe	41,70613	8%	3%
CIGS	144,7653	23%	9%

4.2. Comparação entre os combustíveis

De acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, a quantidade de energia emitida é diretamente proporcional a temperatura atingida pelo combustível, porém, de forma distribuída pelo espectro de Planck, e partindo do pressuposto que cada material possui sua faixa ótima de absorção, nem sempre essa lógica pode ser empregada se tratando do aproveitamento, visto que também depende fortemente da fase entre ambos.

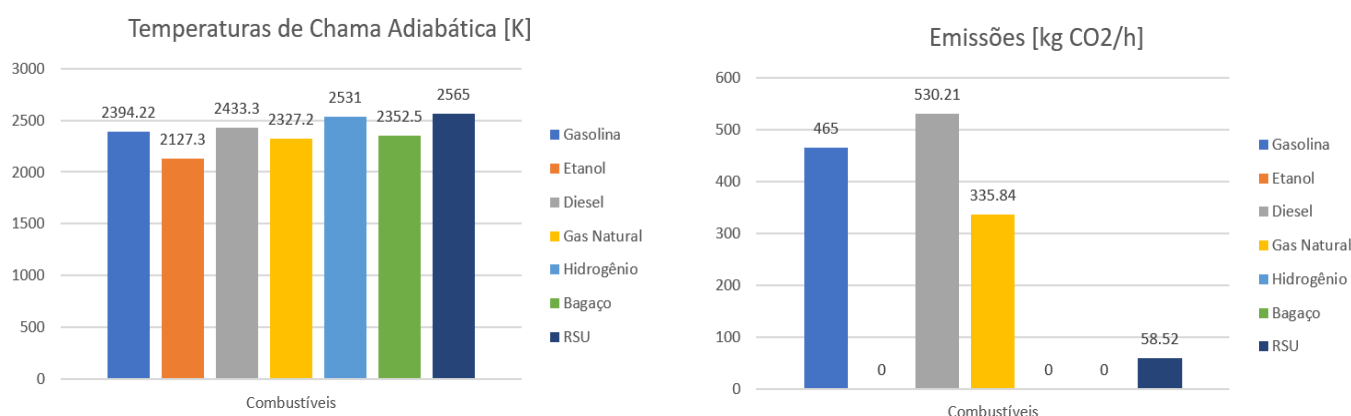


Figura 17: Relação de temperatura máxima atingida e emissão em kg CO2 por hora para diferentes combustíveis

Para tal comparação, gráficos foram gerados com o intuito de tornar a análise mais visual, de forma a facilitá-la, como pode ser visto abaixo.

A Figura 17 mostra o desempenho isolado para a queima de cada combustível, tendo o Hidrogênio a melhor performance, uma vez que além de atingir a maior temperatura, possui taxa zero de emissão de GEE e valendo enfatizar que a temperatura obtida para o RSU é com a hipótese de material seco, sendo um fato completamente utópico na realidade, uma vez que a maior parte do combustível em questão é água. O bagaço e o Etanol também atingiram emissão nula durante a combustão, porém, possuem contribuições residuais referentes a cadeia produtiva e logística, de forma que, diferentemente do hidrogênio, também possuem contribuição de emissão. O Diesel atingiu a terceira maior temperatura em 2433,3 K, seguido pela gasolina, gás natural e etanol, respectivamente com 2324,22 K, 2327,2 K e 2127,3 K, mantendo a mesma ordem no quesito emissão.

Já para o desempenho das células, o fator determinante é a distância entre intervalo onde se encontra o pico de absorção do material e o pico de energia emitida pelo combustível, uma vez que quanto mais próximos, maior é a contribuição e consequentemente a eficiência local. Através das Figuras abaixo, é possível observar

a performance em termos de eficiência para cada tecnologia em relação aos combustíveis propostos, considerando tanto a abordagem aproximada quanto ideal.

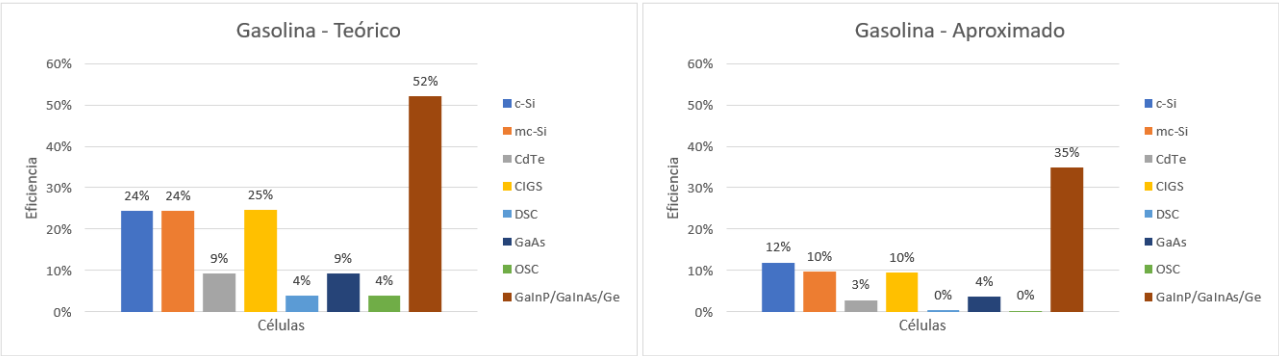


Figura 18: Eficiência energética para diferentes materiais - Gasolina

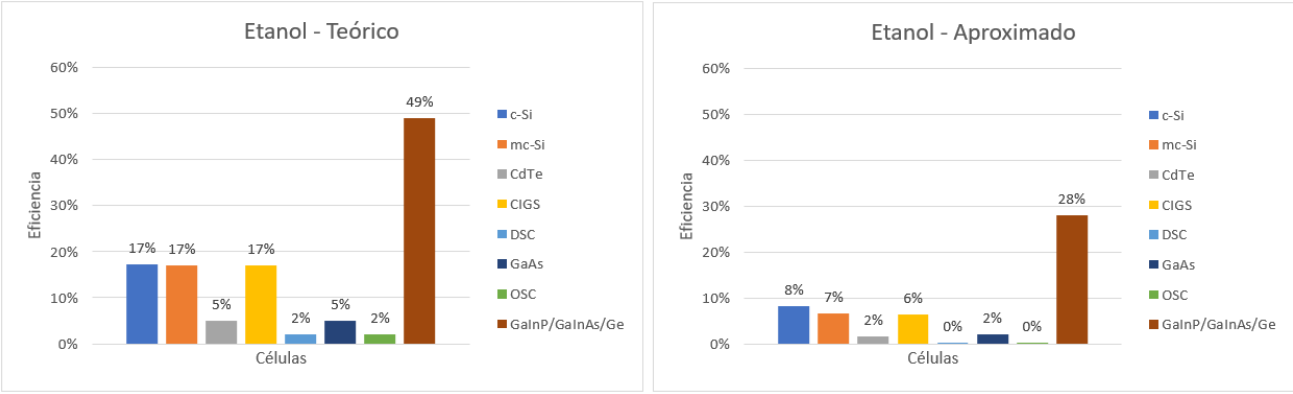


Figura 19: Eficiência energética para diferentes materiais - Etanol

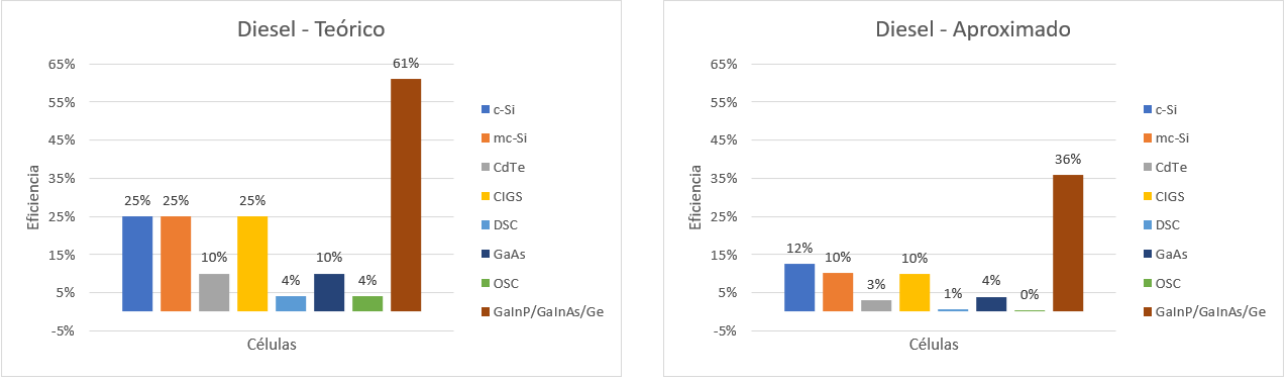


Figura 20: Eficiência energética para diferentes materiais – Diesel

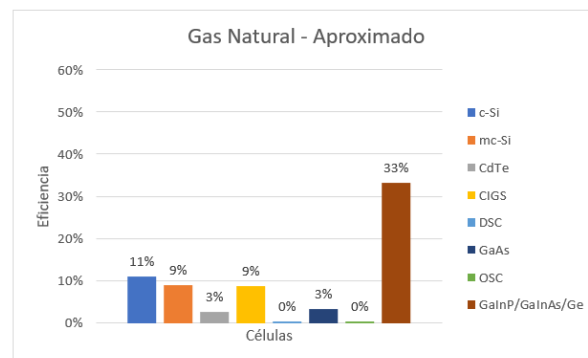
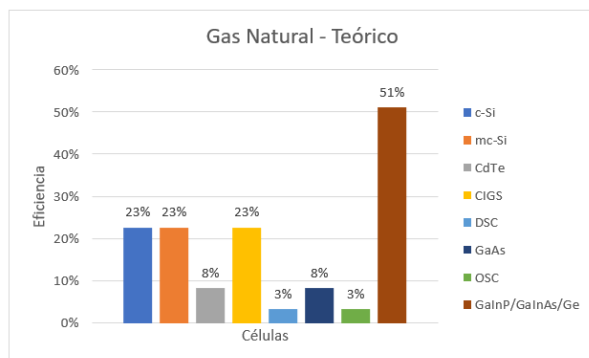


Figura 21: Eficiência energética para diferentes materiais – Gas natural

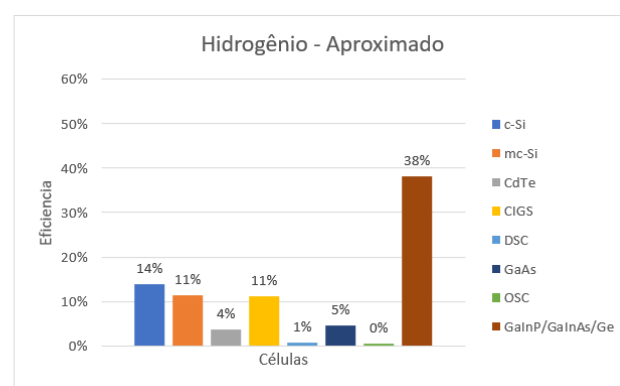
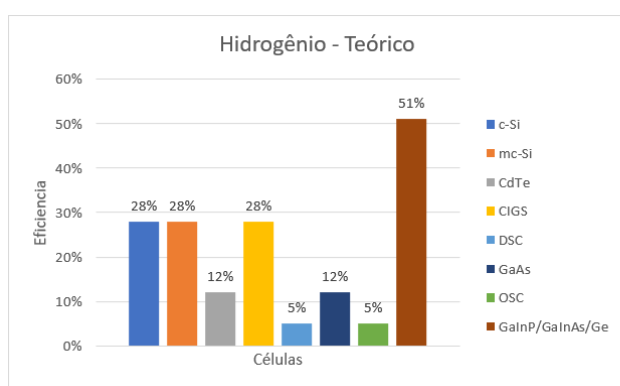


Figura 22: Eficiência energética para diferentes materiais - Hidrogênio

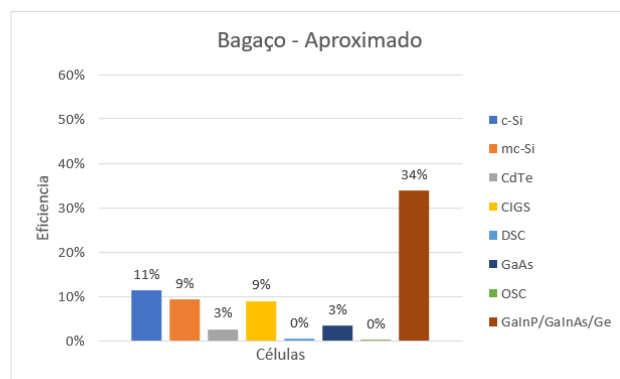
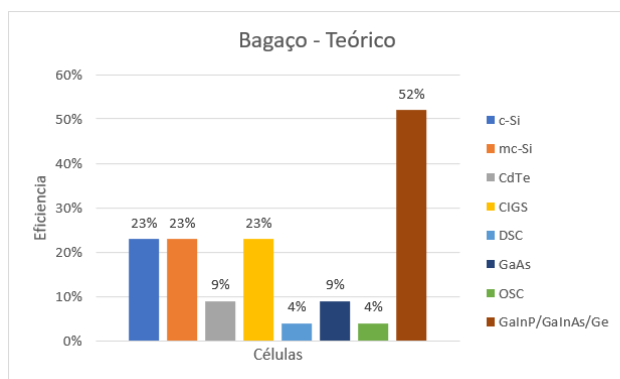


Figura 23: Eficiência energética para diferentes materiais - Bagaço

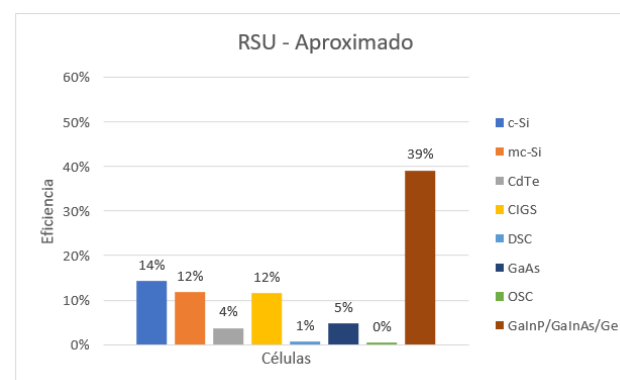
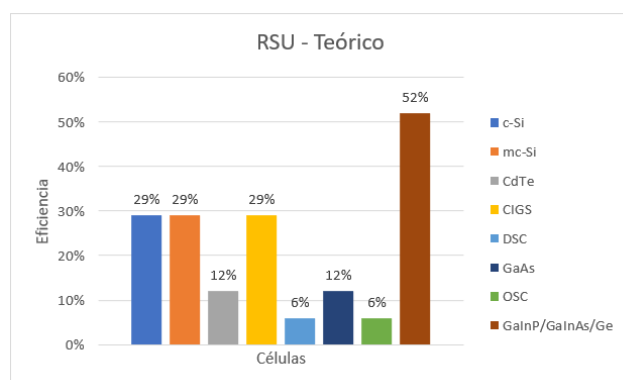


Figura 24: : Eficiência energética para diferentes materiais – RSU

4.3.Comparação com tecnologias tradicionais

Nesta seção, os resultados apresentados serão comparados com tecnologias já existentes, com foco principalmente em analisar quantitativamente o desempenho calculado para os dispositivos aqui explicitados em relação a eficiência e emissões específicas.

No caso da primeira grandeza, será utilizado como comparativo o diagrama disponibilizado pela (NREL,2023) que mostra a evolução das eficiências das tecnologias fotovoltaicas ao decorrer do tempo, tendo registros datados entre 1975 até o atual ano de 2023, como mostra a Figura 25.

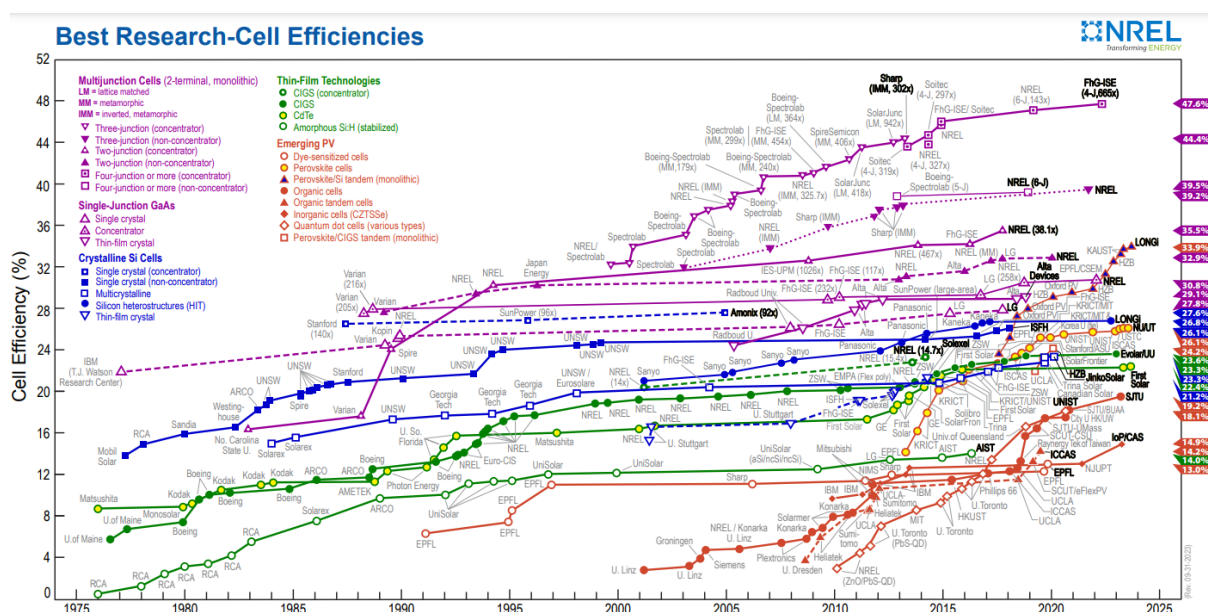


Figura 25: Registros da evolução da eficiência para placas fotovoltaicas ao longo dos anos (NREL, 2023)

Iniciando pela célula de silício cristalino, temos para cada combustível, os seguintes rendimentos teóricos e aproximados mostrados na Figura 26.

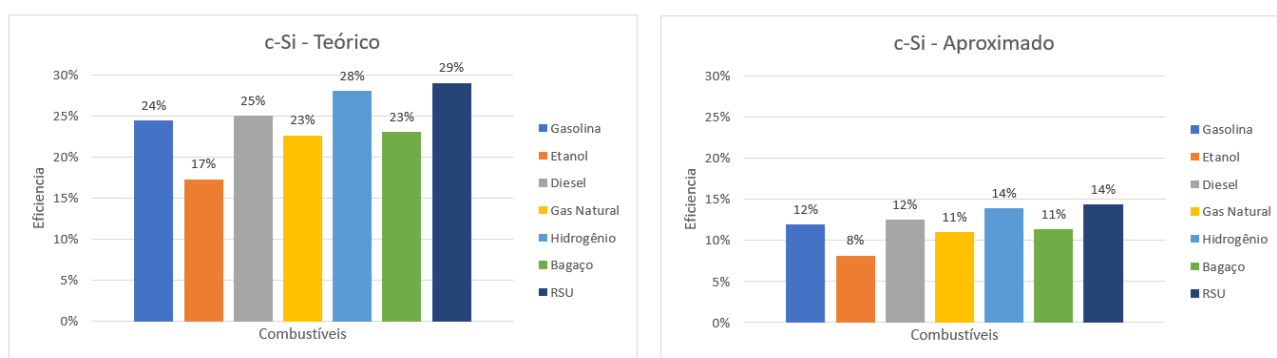


Figura 26: Eficiências do c-Si para diferentes combustíveis

Onde, de acordo com a Figura 25, atualmente a tecnologia mais eficiente empregando células PV deste material conta com uma eficiência de 27,6% e 26,1% com e sem uso de concentrador de fótons, respectivamente. Sendo muito maiores

que o arranjo modelado neste trabalho, sendo equivalente a aproximadamente o dobro de eficiência, sendo equiparável apenas ao resultado obtido a partir da análise teórica, onde 100% da faixa de trabalho foi considerada aproveitada.

A próxima amostra analisada será o silício multicristalino, sendo representado na Figura 27, e também apresenta rendimento aproximado na ordem da metade em relação a utilização tecnologia mais atual para placas de mc-Si, uma vez que segundo a (NREL,2023) há registro de dispositivos de tal natureza nos dias de hoje com eficiência de 23,3%.

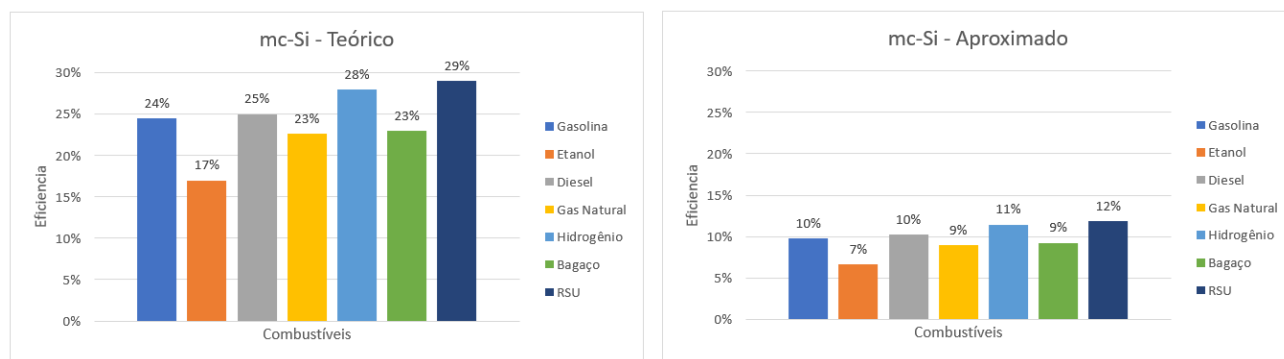


Figura 27: Eficiências do mc-Si para diferentes combustíveis

Já para o Telureto de Cádmio, que segundo a literatura, atualmente está na ordem de 22,4% de eficiência, foi encontrado através da modelagem matemática e dados da bibliografia as respectivas eficiências mostradas na Figura 28. Tendo um rendimento muito abaixo da tecnologia atual, nas duas abordagens. Sendo em média 50% menor ao desconsiderar perdas e atingindo uma diferença de até 1150% ao comparar com a pior eficiência aproximada obtida, como é possível ver na Figura 28.

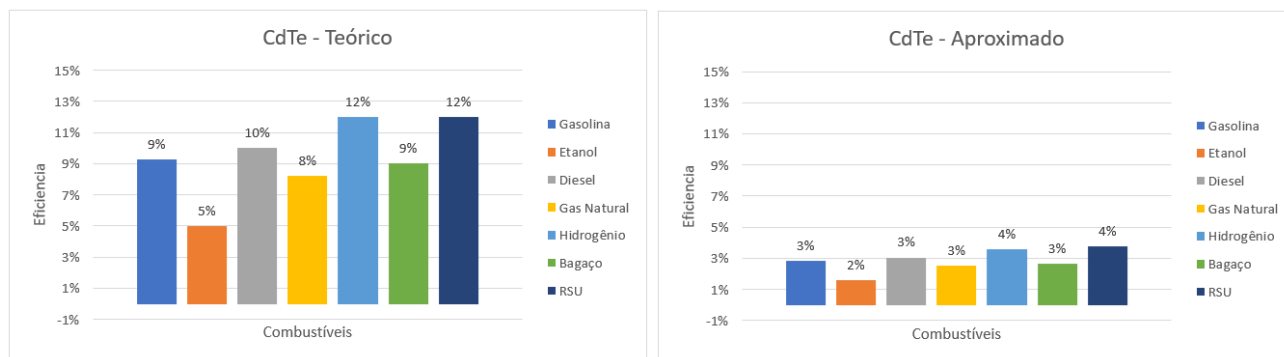


Figura 28: Eficiências do CdTe para diferentes combustíveis

O mesmo cenário é válido para a célula composta pela liga de Cádmio, Índio, Gálio e Selênio (CIGS), como mostra a Figura 29, porém não tendo uma diferença tão intensa quanto o caso do CdTe, ficando com uma defasagem de em média 13,6%, uma vez que o modelo mais eficiente registrou aproveitamento de 23,6% de toda

energia fornecida, enquanto o simulado neste trabalho obteve um aproveitamento máximo de 12% de toda energia vinda da queima do RSU. Ficando próximo apenas quando comparado ao rendimento teórico, que previu uma média de aproveitamento da ordem de 25%, ou seja, menos de 2 pontos percentuais de diferença em relação ao dispositivo apresentado pela NREL.

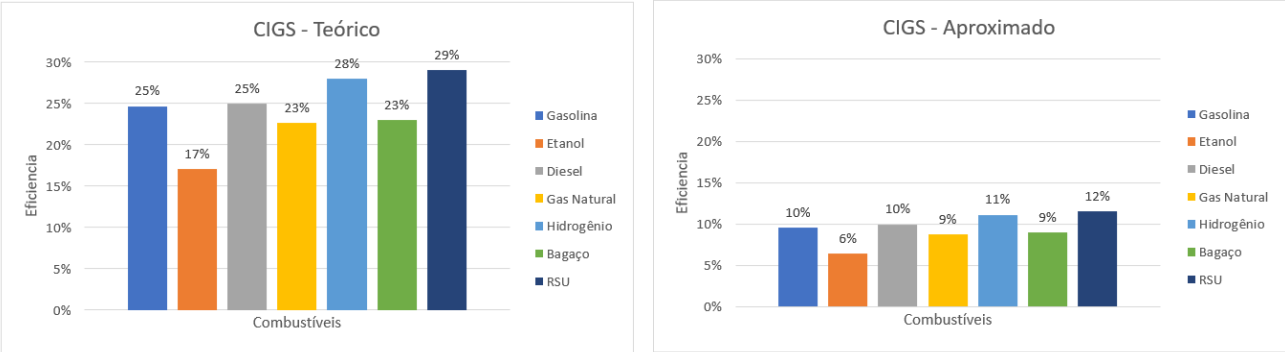


Figura 29: Eficiências do CIGS para diferentes combustíveis

O único dispositivo que atingiu um valor de rendimento aproximado próximo a literatura, foi a placa de junção tripla GaInP/GaInAs/Ge, ilustrado pela Figura 30, que obteve um resultado médio de 35%, variando 4,5% em relação a placa desenvolvida pela própria NREL de mesma natureza, tendo 39,5% de eficiência. E ainda superando de forma considerável quando se tratando do rendimento teórico, tendo obtido uma média de 54% de conversão.

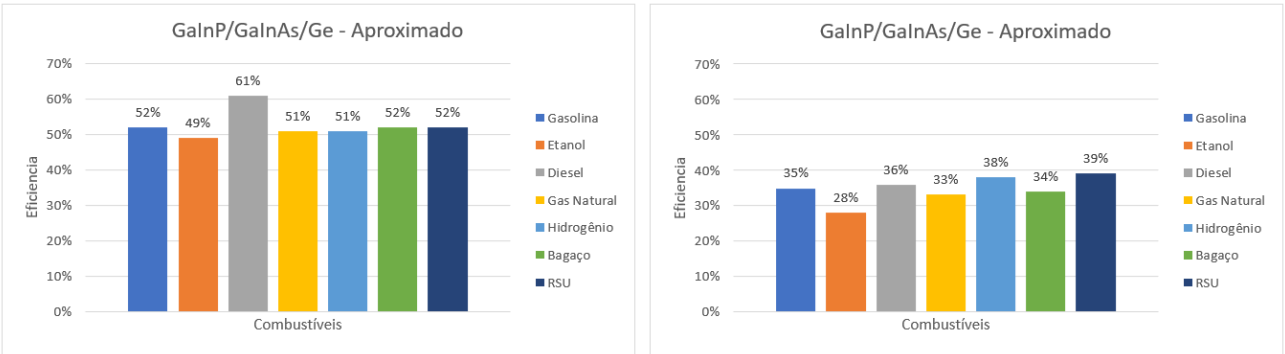


Figura 30: Eficiências do GaInP/GaInAs/Ge para diferentes combustíveis

Para o caso das emissões, de acordo com (UK Parliament, 2015) a razão de emissão em dióxido de carbono por kWh elétrico gerada para algumas das tecnologias mais tradicionais de conversão da energia de combustão em eletricidade na atualidade, pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8: Emissão relativa para tecnologias tradicionais

Combustível	kg CO ₂ / kWh
Centrais eléctricas alimentadas a carvão	0,790
Turbinas a gás de ciclo combinado.	0,354
Turbinas a gás de ciclo aberto	0,460
Motores alternativos a diesel	0,602
Motores alternativos a gás	0,497

A primeira célula a ser comparada será a de silício cristalino, através da Figura 31.

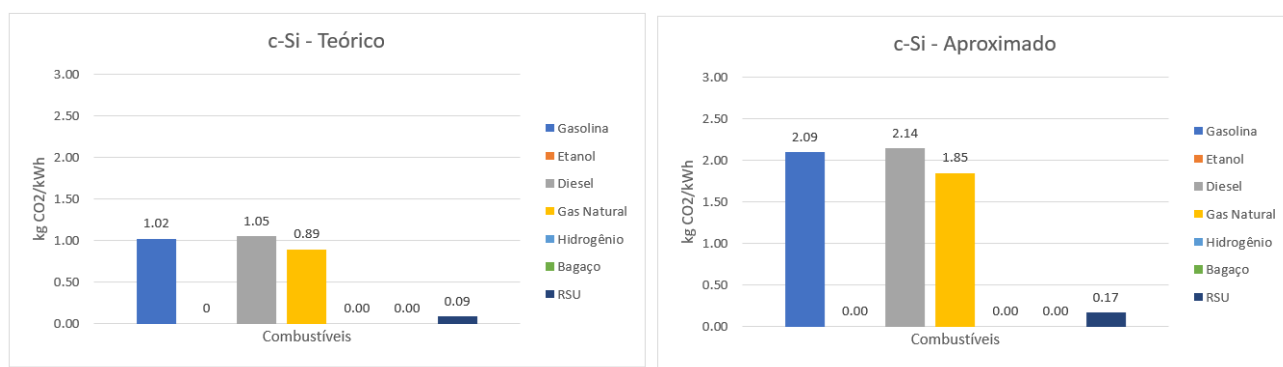


Figura 31: Emissão relativa para c-Si em função de diferentes combustíveis

Sendo possível notar que para todos os combustíveis, em exceção os renováveis e o RSU, a emissão aproximada excede consideravelmente as tecnologias abordadas, isso significa que o dispositivo possui uma eficiência mais baixa do que os exemplos mostrados na Tabela 8, sendo este argumento também válido para o resultado teórico, onde mesmo de em pouca quantidade, também atingiu taxas de emissão maiores. O mesmo ocorre para o silício multicristalino, telureto de cádmio e a para o CIGS, respectivamente nas Figuras 32, 33 e 34.

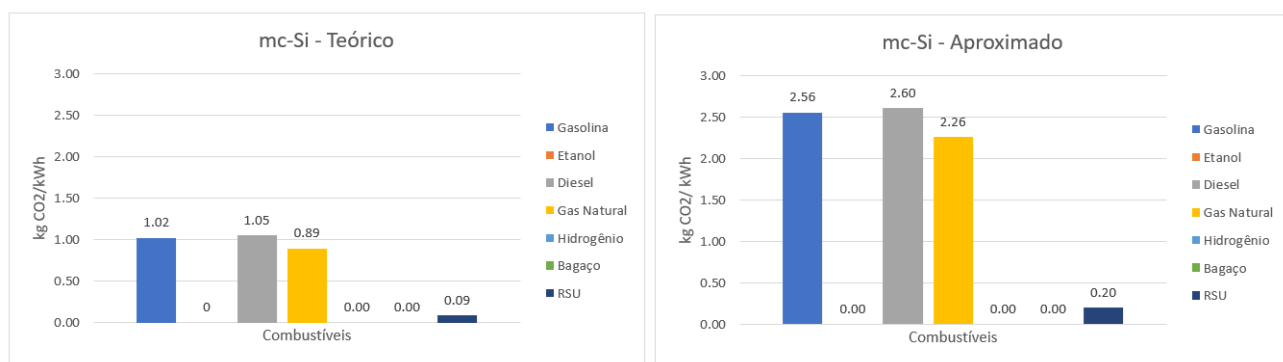


Figura 32: Emissão relativa para mc-Si em função de diferentes combustíveis

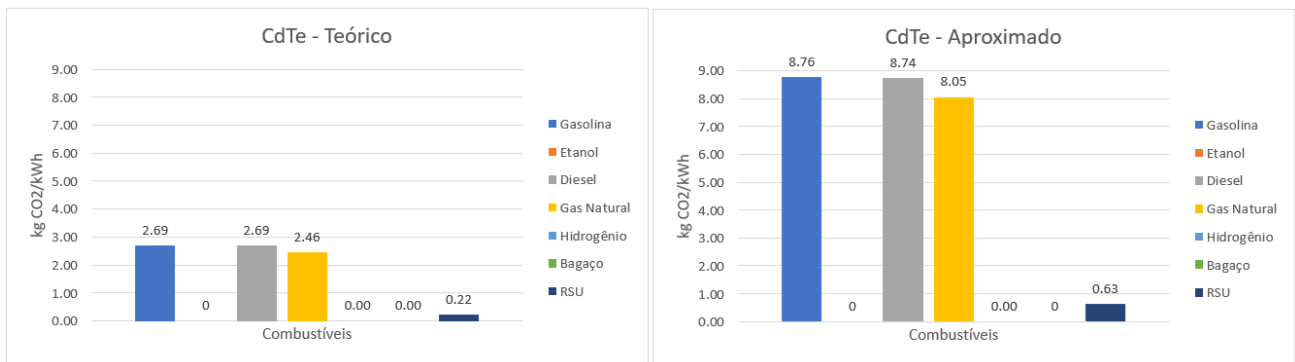


Figura 33: Emissão relativa para CdTe em função de diferentes combustíveis

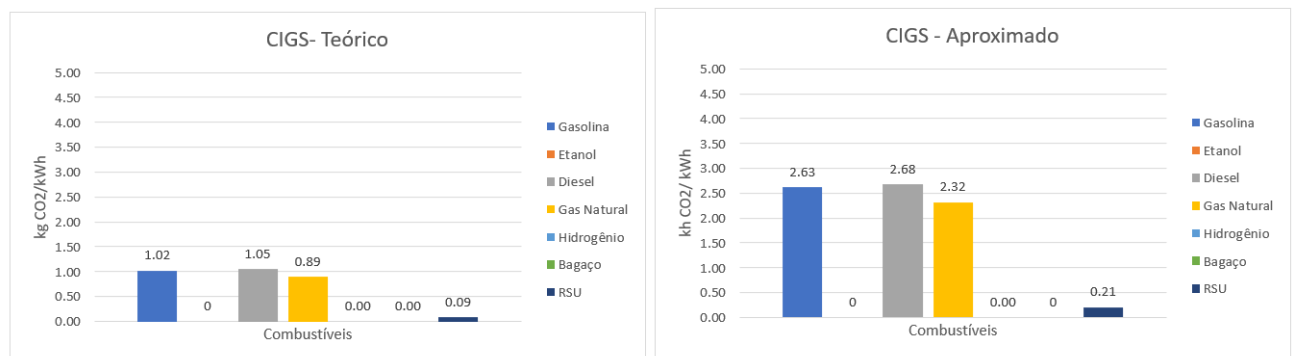


Figura 34: Emissão relativa para CIGS em função de diferentes combustíveis

Já a placa de junção tripla de GaInP/GaInAs/Ge atinge um rendimento de forma que seja equiparável as tecnologias já existentes e empregadas no quesito ambiental, como pode ser visto na Figura 35.

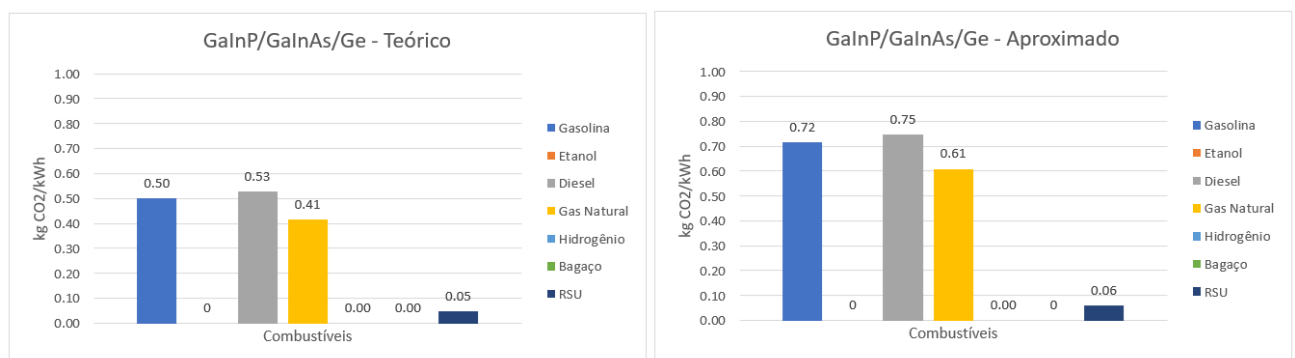


Figura 35: Emissão relativa para GaInP/GaInAs/Ge em função de diferentes combustíveis

Tendo além da energia aproximadamente limpa gerada pelos renováveis e a baixa emissão do RSU, uma alta eficiência ambiental para os demais combustíveis, com destaque para o Gás natural, gerando a quantidade de carbono equivalente ao motor a diesel e menor que as centrais de carvão para a abordagem aproximada, que inclusive se mostra equivalente a pegada de carbono deixada pelos outros hidrocarbonetos analisados.

5. Conclusão

Desta forma, concluímos que a metodologia abordada se trata de uma aproximação quantitativa eficiente no quesito da modelagem de um sistema termofotovoltaico, de maneira que através de uma análise simplificada é possível alcançar resultados satisfatórias dada a alta complexidade do sistema e não linearidade. Para as células e combustíveis estudados, ficou validado o potencial da tecnologia estudada por meio de comparações com resultados empíricos fornecidos pela literatura, de forma que foi possível observar eficiências aproximadas de 39% na combinação entre a combustão de resíduos sólidos urbanos com a placa de junção tripla de GaInP/GaInAs/Ge, sendo a associação com maior aproveitamento em termos de energia. No quesito das emissões, a utilização da mesma célula para a conversão do espectro proveniente da combustão do hidrogênio se mostrou a melhor solução quando levado em conta a análise ambiental, uma vez que não gera nenhuma taxa de emissão e ainda mantendo uma eficiência energética aproximada de 38%, o mesmo material ainda foi o único capaz de obter números satisfatórios para os demais combustíveis quando comparado as tecnologias clássicas e placas fotovoltaicas atuais, visto que as outras opções analisadas emitiam muito mais dióxido de carbono por kWh produzido, fato diretamente associado a baixa eficiência atingida.

Para trabalhos futuros é pertinente um maior refino na malha adotada no modelo para resultados mais precisos, análise exergética e econômica e além do estudo de sensibilidade da variação de temperatura com o teor de umidade para as biomassas.

6 Revisão Bibliográfica

1. OMAIR Z, SCRANTON G, PAZOS L, XIAO T., STEINER M., GANAPATI V., PETERSON P., HOLZRICHTER, J., ATWATER Harry & YABLONOVITCH E. (2019). Ultraefficient thermophotovoltaic power conversion by band-edge spectral filtering. Proceedings of the National Academy of Sciences. 116. 201903001..
2. DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A. (2006) Solar Engineering of Thermal Processes. 3rd Edition, Wiley, Hoboken.
3. REINDERS, A., VERLINDEN, P., VAN SARK, W., & FREUNDLICH, A. (2017). Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications. John Wiley & Sons.
4. R.J. NICHOLAS, R.S. TULEY, 4 - Thermophotovoltaic (TPV) devices: introduction and modelling, Editor(s): John A. Kilner, Stephen J. Skinner, Stuart J.C. Irvine, Peter P. Edwards, In Woodhead Publishing Series in Energy, Functional Materials for Sustainable Energy Applications, Woodhead Publishing, 2012, Woodhead Publishing.
5. DATAS, A., and VAILLON, R. (2021). "Thermophotovoltaic Energy Conversion," in Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion (Amsterdam, Netherlands: Elsevier).
6. COLANGELO, G., DE RISI, A., & LAFORGIA, D. (2003). New approaches to the design of the combustion system for thermophotovoltaic applications. Semiconductor science and technology, 18(5), S262.
7. BERGMAN, T. L., and FRANK P. Incropera. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Seventh edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. MLA (8th ed.)
8. LIMA, A. A., MENEZES, N. P., SANTOS, S., AMORIM, B., THOMAZI, F., ZANELLA, F., HEILMANN, A., BURKARTER, E., & DARTORA, C. A.. (2020). Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. Revista Brasileira De Ensino De Física, 42(Rev. Bras. Ensino Fís., 2020 42), e20190191.
9. CERTI. Centro de referência em tecnologias inovadoras. 2020. Transição energética: rumo ao desenvolvimento sustentável. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/transicao-energetica/>.
10. MINISTÉRIO BRASILEIRO DE MINAS E ENERGIA. Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/10/brasil-e-referencia-no-campo-da-energia-limpa-e-renovavel>.

11. ENGIE. Transição energética: conceito vai muito além da energia. 2022. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/transicao-energetica-muito-alem-da-energia/>.

12. WERNSMAN, B., SIERGIEJ, R. R., LINK, S. D., MAHORTER, R. G., PALMISIANO, M. N., WEHRER, R. J., SCHULTZ, R. W., SCHMUCK, G. P., MESSHAM, R. L., MURRAY, S., MURRAY, C. S., NEWMAN, F., TAYLOR, D., DEPOY, D. M. and RAHMLOW, T. (2004), Greater than 20 conversion efficiency of a thermophotovoltaic radiator/module system using reflective spectral control, IEEE Transactions on Electron Devices , 51(3), 512–515.

13. WANLASS, M. W., COUTSS, T. J., WARD, J. S., EMERY K. A., ALJASSIM, M. M., and JONES, K. M. (1996), GaIn_{1-x}As thermophotovoltaic converters, Solar Energy Materials and Solar Cells , 41–42, 405–417

14. WANLASS, M. W., COUTSS, T. J., WARD, J. S., EMERY, K. A., GESSERT, T. A. and OSTERWALD, C. R. (1991), Advanced high-efficiency concentrator tandem solar cells, in Twenty Second Photovoltaic Specialists Conference , Vol. 1, IEEE, Las Vegas, p. 38.

15. WILT, D. M., FATEMI, N. S., HOFFMAN, R. W., JENKINS, P. P., BRINKER, D. J., SCHEIMAN, D., LOWE, R., FAUER, M. and JAIN, R. K. (1994), High-efficiency indium gallium-arsenide photovoltaic devices for thermophotovoltaic power-systems, Applied Physics Letters , 64(18), 2415–2417.

16. DHARMARASU, N., YAMAGUCHI, M., KHAN, A., YAMADA, T., TANABE, T., TAKAGISHI, S., TAKAMOTO, T., OHSHIMA, T., ITOH, H., IMAIZUMI, M. and MATSUDA, S. (2001), High-radiation-resistant InGaP, InGaAsP, and InGaAs solar cells for multijunction solar cells, Applied Physics Letters , 79(15), 2399–2401.

17. STEINER, M. A., WANLASS, M. W., CARAPELLA, J. J., DUDA, A., WARD, J. S., MORIARTY, T. E. and EMERY, K. A. (2009), A monolithic three-terminal GaInAsP/GaInAs tandem solar cell, Progress in Photovoltaics: Research and Applications , 17(8), 587–593.

18. VAN WYLEN, G. T., Sontag, Fundamentos da termodinâmica Clássica, Ed, Edgard Blucher Ltda, Quarta Edição Americana, 1995.

19. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2 Energy – 2006, Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

20. EPE. Brazilian Energy Balance. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. (Ministry of Mines and Energy – MME). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de->

21. BUHLER, A. J. Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

22. PASIN, D.G. RESPOSTA ESPECTRAL E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO. 2019. Dissertação (Mestrado em m Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

23. ZAINAL, Z. A. et al. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. Energy conversion and management, v. 42, n. 12, p. 1499-1515, 2001.

24. MCBRIDE, B. J.; GORDON, S.; RENO, M. A. Coefficients of calculating thermodynamic and transport properties of individual species. NASA Technical Memorandum, NASA Scientific and Technical Information Program

25. SA CHANNIWALA, PP. Parikh. "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels". Fuel, 81 (2002), pp. 1051-1063

26. BAUKAL, C. E. Oxygen-Enhanced Combustion. Boca Raton: CRC Press, 2000.

27. LAW, C. K. Combustion Physics. Cambridge: Cambridge Press, 2006

28. REED, R. J. North American Combustion Handbook. 3ª. ed. Cleaveland: Fives North American Combustion Inc, v. I, 2016

29. SEGELER, C. G. Gas Engineers Handbook. New York: Industrial Press, v. I, 1956.

30. SHARAF O. Z.; ORHAN M. F. 2014. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32: 810-853.

31. BEST research-cell efficiency chart. NREL, [S. I.], c2023. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 4 jun. 2023.

32. UK Parliament. (2015). Fossil Fuelled Power Stations: Carbon Emissions and Nitrogen Oxides. Disponível em: <https://questions-statements.parliament.uk/written-questions/detail/2015-11-26/17799>

7. Apêndice 1

Hipoteses: Mistura de combustão estequiométrica com temperatura e pressão de entrada a 25°C e 0,1 Mpa
Composição do comburente (Ar): 21% O2 + 79% N2

Combustível:	Gasolina líquida(C8H18)								
Equação:	C8H18 + 12,5 (O2 + 3,76 N2) → 8 CO2 + 9 H2O + 47 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
C8H8	1	-250105	0	-250105	CO2	8	-393522	Cp (CO2)	-393522 + Cp (CO2)
O2	12.5	0	0	0	H2O	9	-241826	Cp (H2O)	-241826 + Cp (H2O)
N2	47	0	0	0	N2	47	0	Cp (N2)	Cp (N2)
Somatório total				-250105	Somatório total				-250105

Combustível:	Etanol líquido (C2H5OH)								
Equação:	C2H5OH + 3,5 (O2 + 3,76 N2) → 2 CO2 + 3 H2O + 13,16 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
C2H5OH	1	-277380	0	-277380	CO2	2	-393522	Cp (CO2)	-393522 + Cp (CO2)
O2	3.5	0	0	0	H2O	3	-241826	Cp (H2O)	-241826 + Cp (H2O)
N2	13.16	0	0	0	N2	13.16	0	Cp (N2)	Cp (N2)
Somatório total				-277380	Somatório total				-277380

Combustível:	Diesel líquido (C14.4H24.9)								
Equação:	C14.4H24.9 + 13.425 (O2 + 3,76 N2) → 7.2 CO2 + 12.45 H2O + 50.478 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
C14.4H24.9	1	-174000	0	-174000	CO2	7.2	-393522	Cp (CO2)	nCO2*(-393522 + Cp (CO2))
O2	13.425	0	0	0	H2O	12.45	-241826	Cp (H2O)	nH2O*(-241826 + Cp (H2O))
N2	50.478	0	0	0	N2	50.478	0	Cp (N2)	nN2*Cp (N2)
Somatório total				-174000	Somatório total				-174000

Combustível:	Gás Natural (CH4)								
Equação:	CH4 + 2 (O2 + 3,76 N2) → CO2 + 2 H2O + 7.52 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
CH4	1	-74873	0	-74873	CO2	1	-393522	Cp (CO2)	nCO2*(-393522 + Cp (CO2))
O2	2	0	0	0	H2O	2	-241826	Cp (H2O)	nH2O*(-241826 + Cp (H2O))
N2	7.52	0	0	0	N2	7.52	0	Cp (N2)	nN2*Cp (N2)
Somatório total				-74873	Somatório total				-74873

Combustível:	Hidrogenio (H2)								
Equação:	H2 + 1/2 (O2 + 3,76 N2) → H2O + 1.88 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
CH4	1	0	0	0	CO2	0	-393522	Cp (CO2)	nCO2*(-393522 + Cp (CO2))
O2	0.5	0	0	0	H2O	1	-241826	Cp (H2O)	nH2O*(-241826 + Cp (H2O))
N2	1.88	0	0	0	N2	1.88	0	Cp (N2)	nN2*Cp (N2)
Somatório total				0	Somatório total				0

Combustível:	Bagaço de cana seco								
Equação:	C3H5O2 + 4.25 (O2 + 3,76 N2) → 2.5 H2O + 3 CO2 + 15.98 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
C3H5O2	1	-372502.43	0	-372502.43	CO2	3	-393522	115779	nCO2*(-393522 + Cp (CO2))
O2	1	0	0	0	H2O	2.5	-241826	93741	nH2O*(-241826 + Cp (H2O))
N2	2.47	0	0	0	N2	2.47	0	70640	nN2*Cp (N2)
Somatório total				-372502.43	Somatório total				-372502.43

Combustível:	RSU seco								
Equação:	C16H25O9 + 17.75 (O2 + 3.76 N2) → 12.5 H2O + 16 CO2 + 66.74 N2								
Reagentes					Produtos				
	n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{reagente} [kJ]		n [mol]	h _{formação} [kJ/kmol]	Δh [kJ/kmol]	H _{produto} [kJ]
CH4	1	-420185	0	-420185	CO2	16	-393522	115779	nCO2*(-393522 + Cp (CO2))
O2	1	-241826	0	-241826	H2O	12.5	-241826	93741	nH2O*(-241826 + Cp (H2O))
N2	13.4	0	0	0	N2	13.4	0	70640	nN2*Cp (N2)
Somatório total				-662011	Somatório total				-662011

8. Apendice 2

c-Si	X		F(X)	Integral	mc-Si	X		F(X)	Integral	CIGS	X		F(X)	Integral	CdTe	X		F(X)	Integral		
	2.94E+02	6.56E-02		397.56		3.04E+02	8.13E-02		342.77		3.12E+02	6.25E-03		315.05		3.17E+02	9.38E-03		146.59		
	2.97E+02	6.88E-02	médio	Rendimento		3.14E+02	9.06E-02	médio	Rendimento		3.22E+02	9.38E-03		Rendimento		3.29E+02	9.38E-03		Rendimento		
	3.02E+02	8.13E-02		0.46		3.32E+02	1.03E-01		0.39		3.36E+02	1.88E-02		0.36		3.39E+02	1.56E-02		0.25		
	3.17E+02	9.06E-02	λ = [300:400]	Integral		3.54E+02	1.09E-01	λ = [300:400]	Integral		3.56E+02	2.50E-02	λ = [300:400]	Integral		3.61E+02	3.13E-02	λ = [300:400]	Integral		
	3.24E+02	1.00E-01		13.72		3.61E+02	1.16E-01		11.18		3.64E+02	3.44E-02		5.77		3.86E+02	4.06E-02		3.16		3.16
	3.39E+02	1.06E-01		Rendimento		3.76E+02	1.31E-01		Rendimento		3.69E+02	5.31E-02		Rendimento		3.96E+02	5.00E-02		Rendimento		0.03
	3.44E+02	1.19E-01		0.14		3.84E+02	1.56E-01		0.11		3.74E+02	7.50E-02		0.06		4.16E+02	5.63E-02		Integral		
	3.59E+02	1.34E-01	λ = [400:500]	Integral		3.91E+02	1.69E-01	λ = [400:500]	Integral		3.84E+02	9.38E-02	λ = [400:500]	Integral		4.36E+02	6.88E-02	λ = [400:500]	Integral		
	3.61E+02	1.50E-01		33.71		3.99E+02	1.84E-01		27.28		3.86E+02	1.19E-01		20.66		4.41E+02	7.81E-02		8.91		8.91
	3.66E+02	1.63E-01		Rendimento		4.08E+02	2.00E-01		Rendimento		3.94E+02	1.38E-01		Rendimento		4.46E+02	8.75E-02		Rendimento		0.09
	3.79E+02	1.72E-01		0.34		4.16E+02	2.22E-01		0.27		4.08E+02	1.63E-01		0.21		4.61E+02	1.03E-01		Integral		
	3.81E+02	1.91E-01	λ = [500:600]	Integral		4.26E+02	2.41E-01	λ = [500:600]	Integral		4.21E+02	1.66E-01	λ = [500:600]	Integral		4.70E+02	1.13E-01	λ = [500:600]	Integral		
	3.91E+02	2.06E-01		46.31		4.41E+02	2.66E-01		44.20		4.31E+02	1.88E-01		40.15		4.78E+02	1.22E-01		28.58		28.58
	3.99E+02	2.22E-01		Rendimento		4.51E+02	2.75E-01		Rendimento		4.48E+02	2.06E-01		Rendimento		4.83E+02	1.28E-01		Rendimento		0.29
	4.11E+02	2.44E-01		0.46		4.68E+02	2.97E-01		0.44		4.66E+02	2.25E-01		0.40		4.90E+02	1.44E-01		Integral		
	4.18E+02	2.53E-01	λ = [600:700]	Integral		4.88E+02	3.06E-01	λ = [600:700]	Integral		4.75E+02	2.50E-01	λ = [600:700]	Integral		5.03E+02	1.63E-01	λ = [600:700]	Integral		
	4.28E+02	2.69E-01		45.87		4.90E+02	3.28E-01		54.48		4.78E+02	2.69E-01		39.81		5.15E+02	1.84E-01		43.51		43.51
	4.36E+02	2.84E-01		Rendimento		5.00E+02	3.41E-01		Rendimento		4.85E+02	2.84E-01		Rendimento		5.15E+02	2.00E-01		Rendimento		0.44
	4.46E+02	3.00E-01		0.46		5.23E+02	3.69E-01		0.54		4.90E+02	3.13E-01		0.40		5.23E+02	2.25E-01		Integral		
	4.53E+02	3.19E-01	λ = [700:800]	Integral		5.33E+02	3.88E-01	λ = [700:800]	Integral		5.00E+02	3.25E-01	λ = [700:800]	Integral		5.25E+02	2.41E-01	λ = [700:800]	Integral		
	4.66E+02	3.31E-01		62.71		5.42E+02	3.91E-01		47.36		5.08E+02	3.41E-01		50.60		5.33E+02	2.66E-01		49.02		49.02
	4.70E+02	3.41E-01		Rendimento		5.70E+02	4.06E-01		Rendimento		5.28E+02	3.59E-01		Rendimento		5.40E+02	2.91E-01		Rendimento		0.49
	4.80E+02	3.59E-01		0.63		5.97E+02	4.22E-01		0.47		5.40E+02	3.75E-01		0.51		5.52E+02	3.13E-01		Integral		
	4.88E+02	3.72E-01	λ = [800:900]	Integral		6.12E+02	4.50E-01	λ = [800:900]	Integral		5.57E+02	3.81E-01	λ = [800:900]	Integral		5.62E+02	3.28E-01	λ = [800:900]	Integral		
	5.03E+02	3.84E-01		64.87		6.29E+02	4.63E-01		56.06		5.57E+02	3.81E-01		56.22		5.62E+02	3.28E-01		13.40		13.40
	5.13E+02	4.00E-01		Rendimento		6.54E+02	4.75E-01		Rendimento		5.90E+02	4.00E-01		Rendimento		5.80E+02	3.59E-01		Rendimento		0.13
	5.33E+02	4.06E-01		0.65		6.69E+02	4.94E-01		0.56		6.07E+02	4.06E-01		0.56		5.90E+02	3.72E-01				
	5.33E+02	4.19E-01	λ = [900:1000]	Integral		6.94E+02	5.06E-01	λ = [900:1000]	Integral		6.34E+02	4.09E-01	λ = [900:1000]	Integral		5.95E+02	3.81E-01				
	5.55E+02	4.31E-01		68.93		7.24E+02	5.22E-01		60.47		6.44E+02	4.19E-01		66.99		6.00E+02	3.97E-01				
	5.65E+02	4.44E-01		Rendimento		7.36E+02	5.28E-01		Rendimento		6.57E+02	4.22E-01		Rendimento		6.14E+02	4.06E-01				
	5.82E+02	4.53E-01		0.69		7.48E+02	5.34E-01		0.60		6.74E+02	4.28E-01		0.67		6.32E+02	4.19E-01				
	5.90E+02	4.66E-01	λ = [1000:1100]	Integral		7.61E+02	5.44E-01	λ = [1000:1100]	Integral		6.84E+02	4.34E-01	λ = [1000:1100]	Integral		6.49E+02	4.34E-01				
	6.09E+02	4.78E-01		51.09		7.78E+02	5.53E-01		31.05		6.89E+02	4.38E-01		30.99		6.69E+02	4.38E-01				
	6.24E+02	4.91E-01		Rendimento		8.10E+02	5.66E-01		Rendimento		7.01E+02	4.53E-01		Rendimento		6.96E+02	4.47E-01				
	6.52E+02	5.06E-01		0.51		8.28E+02	5.69E-01		0.31		7.11E+02	4.56E-01		0.31		7.01E+02	4.53E-01				
	6.37E+02	4.97E-01	λ = [1100:1200]	Integral		8.43E+02	5.75E-01	λ = [1100:1200]	Integral		7.31E+02	4.63E-01	λ = [1100:1200]	Integral		7.34E+02	4.59E-01				
	6.62E+02	5.19E-01		11.95		8.58E+02	5.78E-01		10.68		7.36E+02	4.69E-01		3.87		7.41E+02	4.66E-01				
	6.69E+02	5.31E-01		Rendimento		8.82E+02	5.88E-01		Rendimento		7.53E+02	4.88E-01		Rendimento		7.48E+02	4.66E-01				
	6.86E+02	5.38E-01		0.12		8.97E+02	5.91E-01		0.11		7.71E+02	4.94E-01		0.04		7.58E+02	4.66E-01				
	6.99E+02	5.47E-01				9.07E+02	5.94E-01				7.81E+02	5.09E-01				7.78E+02	4.63E-01				
	7.11E+02	5.56E-01				9.37E+02	5.84E-01				7.96E+02	5.19E-01				7.86E+02	4.63E-01				
	7.19E+02	5.66E-01				9.52E+02	5.59E-01				8.05E+02	5.28E-01				7.91E+02	4.63E-01				
	7.29E+02	5.78E-01				9.62E+02	5.50E-01				8.18E+02	5.38E-01				7.93E+02	4.63E-01				
	7.43E+02	5.81E-01				9.69E+02	5.50E-01				8.28E+02	5.41E-01				8.08E+02	4.34E-01				
	7.58E+02	5.91E-01				9.89E+02	5.31E-01				8.50E+02	5.63E-01				8.08E+02	4.34E-01				
	7.73E+02	6.00E-01				1.02E+03	5.00E-01				8.60E+02	5.78E-01				8.15E+02	4.16E-01				
	7.88E+02	6.13E-01				1.02E+03	4.88E-01				8.77E+02	5.88E-01				8.18E+02	3.91E-01				
	8.05E+02	6.28E-01				1.03E+03	4.75E-01				9.05E+02	5.97E-01				8.18E+02	3.63E-01				
	8.23E+02	6.34E-01				1.03E+03	4.56E-01				9.20E+02	6.03E-01				8.25E+02	3.44E-01				
	8.38E+02	6.41E-01				1.04E+03	4.34E-01				9.52E+02	6.03E-01				8.25E+02	3.28E-01				
	8.48E+02	6.50E-01				1.05E+03	4.00E-01				9.72E+02	6.06E-01				8.23E+02	3.22E-01				
	8.58E+02	6.56E-01				1.06E+03	3.97E-01				9.87E+02	6.06E-01				8.28E+02	2.84E-01				
	8.67E+02	6.63E-01				1.07E+03	3.56E-01				9.97E+02	6.00E-01				8.33E+02	2.72E-01				
	8.82E+02	6.66E-01				1.08E+03	3.13E-01				1.02E+03	5.66E-01				8.33E+02	2.22E-01				
	8.97E+02	6.78E-01				1.09E+03	2.91E-01				1.03E+03	5.44E-01				8.35E+02	2.47E-01				
	9.05E+02	6.91E-01				1.10E+03	2.56E-01				1.03E+03	5.31E-01				8.38E+02	1.88E-01				

<u>9.17E+02</u>	<u>6.97E-01</u>	<u>1.11E+03</u>	<u>2.25E-01</u>	<u>1.04E+03</u>	<u>4.88E-01</u>	<u>8.38E+02</u>	<u>1.81E-01</u>
<u>9.34E+02</u>	<u>7.03E-01</u>	<u>1.12E+03</u>	<u>2.03E-01</u>	<u>1.05E+03</u>	<u>4.59E-01</u>	<u>8.48E+02</u>	<u>1.53E-01</u>
<u>9.62E+02</u>	<u>7.00E-01</u>	<u>1.12E+03</u>	<u>1.69E-01</u>	<u>1.06E+03</u>	<u>4.34E-01</u>	<u>8.50E+02</u>	<u>1.38E-01</u>
<u>9.77E+02</u>	<u>6.91E-01</u>	<u>1.13E+03</u>	<u>1.44E-01</u>	<u>1.06E+03</u>	<u>4.06E-01</u>	<u>8.50E+02</u>	<u>1.19E-01</u>
<u>1.00E+03</u>	<u>6.75E-01</u>	<u>1.13E+03</u>	<u>1.22E-01</u>	<u>1.06E+03</u>	<u>3.53E-01</u>	<u>8.48E+02</u>	<u>9.69E-02</u>
<u>1.02E+03</u>	<u>6.56E-01</u>	<u>1.14E+03</u>	<u>9.38E-02</u>	<u>1.06E+03</u>	<u>3.19E-01</u>	<u>8.50E+02</u>	<u>7.19E-02</u>
<u>1.02E+03</u>	<u>6.41E-01</u>	<u>1.15E+03</u>	<u>7.81E-02</u>	<u>1.07E+03</u>	<u>3.00E-01</u>	<u>8.60E+02</u>	<u>3.75E-02</u>
<u>1.03E+03</u>	<u>6.16E-01</u>	<u>1.16E+03</u>	<u>6.56E-02</u>	<u>1.08E+03</u>	<u>2.56E-01</u>	<u>8.65E+02</u>	<u>2.81E-02</u>
<u>1.05E+03</u>	<u>5.97E-01</u>	<u>1.17E+03</u>	<u>4.69E-02</u>	<u>1.09E+03</u>	<u>2.25E-01</u>	<u>8.75E+02</u>	<u>2.19E-02</u>
<u>1.05E+03</u>	<u>5.81E-01</u>	<u>1.17E+03</u>	<u>4.06E-02</u>	<u>1.09E+03</u>	<u>1.94E-01</u>	<u>8.95E+02</u>	<u>1.25E-02</u>
<u>1.05E+03</u>	<u>5.56E-01</u>	<u>1.19E+03</u>	<u>1.88E-02</u>	<u>1.10E+03</u>	<u>1.66E-01</u>	<u>9.07E+02</u>	<u>1.25E-02</u>
<u>1.05E+03</u>	<u>5.34E-01</u>	<u>1.19E+03</u>	<u>1.88E-02</u>	<u>1.10E+03</u>	<u>1.41E-01</u>		
<u>1.07E+03</u>	<u>4.94E-01</u>			<u>1.10E+03</u>	<u>1.16E-01</u>		
<u>1.06E+03</u>	<u>5.22E-01</u>			<u>1.11E+03</u>	<u>9.69E-02</u>		
<u>1.06E+03</u>	<u>4.81E-01</u>			<u>1.12E+03</u>	<u>6.88E-02</u>		
<u>1.07E+03</u>	<u>4.53E-01</u>			<u>1.13E+03</u>	<u>3.75E-02</u>		
<u>1.08E+03</u>	<u>4.34E-01</u>			<u>1.14E+03</u>	<u>1.56E-02</u>		
<u>1.08E+03</u>	<u>4.22E-01</u>			<u>1.16E+03</u>	<u>1.56E-02</u>		
<u>1.08E+03</u>	<u>3.94E-01</u>			<u>1.17E+03</u>	<u>1.25E-02</u>		
<u>1.09E+03</u>	<u>3.81E-01</u>			<u>1.18E+03</u>	<u>1.25E-02</u>		
<u>1.09E+03</u>	<u>3.63E-01</u>						
<u>1.10E+03</u>	<u>3.41E-01</u>						
<u>1.10E+03</u>	<u>3.19E-01</u>						
<u>1.11E+03</u>	<u>2.97E-01</u>						
<u>1.12E+03</u>	<u>2.78E-01</u>						
<u>1.12E+03</u>	<u>2.69E-01</u>						
<u>1.12E+03</u>	<u>2.44E-01</u>						
<u>1.12E+03</u>	<u>2.25E-01</u>						
<u>1.12E+03</u>	<u>2.06E-01</u>						
<u>1.13E+03</u>	<u>1.88E-01</u>						
<u>1.14E+03</u>	<u>1.63E-01</u>						
<u>1.14E+03</u>	<u>1.31E-01</u>						
<u>1.15E+03</u>	<u>1.19E-01</u>						
<u>1.16E+03</u>	<u>1.06E-01</u>						
<u>1.16E+03</u>	<u>8.75E-02</u>						
<u>1.17E+03</u>	<u>5.94E-02</u>						
<u>1.17E+03</u>	<u>4.69E-02</u>						

GaAs	X		F(X)		DSC	X		F(X)		OSC	X		F(X)		GainP	X		F(X)		
	<u>3.12E+02</u>	<u>9.38E-03</u>	médio	<u>194.78</u>		<u>2.99E+02</u>	<u>6.25E-03</u>	médio	<u>64.93</u>		<u>3.27E+02</u>	<u>1.25E-02</u>	médio	<u>47.81</u>		<u>276.12</u>	<u>2.5381</u>	médio	<u>26790.36</u>	
	<u>3.34E+02</u>	<u>3.44E-02</u>		<u>Rendimento</u>		<u>3.12E+02</u>	<u>2.19E-02</u>		<u>Rendimento</u>		<u>3.49E+02</u>	<u>1.88E-02</u>		<u>Rendimento</u>		<u>2.76E+02</u>	<u>3.5533</u>		<u>Rendimento</u>	
	<u>3.39E+02</u>	<u>5.31E-02</u>		<u>0.30</u>		<u>3.19E+02</u>	<u>3.13E-02</u>		<u>0.14</u>		<u>3.74E+02</u>	<u>3.13E-02</u>		<u>0.12</u>		<u>2.89E+02</u>	<u>6.0914</u>		<u>0.62</u>	
	<u>3.54E+02</u>	<u>6.88E-02</u>	$\lambda =$ [300:400]	<u>Integral</u>		<u>3.27E+02</u>	<u>5.00E-02</u>	$\lambda =$ [300:400]	<u>Integral</u>		<u>3.74E+02</u>	<u>4.38E-02</u>	$\lambda =$ [300:400]	<u>Integral</u>		<u>2.89E+02</u>	<u>8.1218</u>	$\lambda = [280:300]$	<u>Integral</u>	
	<u>3.64E+02</u>	<u>8.75E-02</u>		<u>8.54</u>		<u>3.29E+02</u>	<u>5.94E-02</u>		<u>9.24</u>		<u>3.76E+02</u>	<u>6.25E-02</u>		<u>4.64</u>		<u>2.89E+02</u>	<u>10.66</u>		<u>228.71</u>	
	<u>3.84E+02</u>	<u>1.16E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>3.39E+02</u>	<u>7.50E-02</u>		<u>Rendimento</u>		<u>3.76E+02</u>	<u>7.19E-02</u>		<u>Rendimento</u>		<u>2.96E+02</u>	<u>12.69</u>		<u>Rendimento</u>	
	<u>3.89E+02</u>	<u>1.28E-01</u>		<u>0.09</u>		<u>3.49E+02</u>	<u>7.81E-02</u>		<u>0.09</u>		<u>3.81E+02</u>	<u>9.38E-02</u>		<u>0.05</u>		<u>3.02E+02</u>	<u>14.721</u>		<u>0.08</u>	
	<u>4.13E+02</u>	<u>1.56E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>3.61E+02</u>	<u>1.03E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>3.86E+02</u>	<u>1.13E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>3.02E+02</u>	<u>17.766</u>		<u>Integral</u>	
	<u>4.28E+02</u>	<u>1.91E-01</u>		<u>26.41</u>		<u>3.89E+02</u>	<u>1.31E-01</u>		<u>16.47</u>		<u>3.94E+02</u>	<u>1.31E-01</u>		<u>15.75</u>		<u>3.09E+02</u>	<u>20.812</u>		<u>4466.59</u>	
	<u>4.36E+02</u>	<u>2.16E-01</u>	$\lambda =$ [400:500]	<u>Rendimento</u>		<u>3.99E+02</u>	<u>1.34E-01</u>	$\lambda =$ [400:500]	<u>Rendimento</u>		<u>4.06E+02</u>	<u>1.44E-01</u>	$\lambda =$ [400:500]	<u>Rendimento</u>		<u>3.09E+02</u>	<u>22.335</u>	$\lambda = [300:400]$	<u>Rendimento</u>	
	<u>4.38E+02</u>	<u>2.25E-01</u>		<u>0.26</u>		<u>4.08E+02</u>	<u>1.41E-01</u>		<u>0.16</u>		<u>4.21E+02</u>	<u>1.53E-01</u>		<u>0.16</u>		<u>3.15E+02</u>	<u>24.365</u>		<u>0.45</u>	
	<u>4.48E+02</u>	<u>2.50E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>4.18E+02</u>	<u>1.44E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>4.46E+02</u>	<u>1.53E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>3.22E+02</u>	<u>27.411</u>		<u>Integral</u>	
	<u>4.70E+02</u>	<u>2.69E-01</u>	$\lambda =$ [500:600]	<u>35.78</u>		<u>4.33E+02</u>	<u>1.63E-01</u>	$\lambda =$ [500:600]	<u>24.57</u>		<u>4.61E+02</u>	<u>1.63E-01</u>	$\lambda =$ [500:600]	<u>21.45</u>		<u>3.28E+02</u>	<u>29.442</u>	$\lambda = [400:500]$	<u>8633.99</u>	
	<u>4.80E+02</u>	<u>2.88E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>4.46E+02</u>	<u>1.69E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>4.85E+02</u>	<u>1.72E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>3.35E+02</u>	<u>31.98</u>		<u>Rendimento</u>	
	<u>4.93E+02</u>	<u>3.09E-01</u>		<u>0.36</u>		<u>4.53E+02</u>	<u>1.75E-01</u>		<u>0.25</u>		<u>4.93E+02</u>	<u>1.88E-01</u>		<u>0.21</u>		<u>3.35E+02</u>	<u>36.041</u>		<u>0.86</u>	
	<u>5.15E+02</u>	<u>3.31E-01</u>	$\lambda =$ [600:700]	<u>Integral</u>		<u>4.73E+02</u>	<u>1.94E-01</u>	$\lambda =$ [600:700]	<u>Integral</u>		<u>5.03E+02</u>	<u>1.97E-01</u>	$\lambda =$ [600:700]	<u>Integral</u>		<u>3.35E+02</u>	<u>39.086</u>	$\lambda = [500:600]$	<u>Integral</u>	
	<u>5.40E+02</u>	<u>3.53E-01</u>		<u>39.30</u>		<u>4.83E+02</u>	<u>2.13E-01</u>		<u>13.26</u>		<u>5.30E+02</u>	<u>2.09E-01</u>		<u>5.73</u>		<u>3.41E+02</u>	<u>41.117</u>		<u>8900.00</u>	
	<u>5.50E+02</u>	<u>3.63E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>5.00E+02</u>	<u>2.22E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>5.40E+02</u>	<u>2.09E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>3.41E+02</u>	<u>43.147</u>		<u>Rendimento</u>	
	<u>5.65E+02</u>	<u>3.78E-01</u>		<u>0.39</u>		<u>5.20E+02</u>	<u>2.34E-01</u>		<u>0.13</u>		<u>5.57E+02</u>	<u>2.09E-01</u>		<u>0.06</u>		<u>3.48E+02</u>	<u>46.193</u>		<u>0.89</u>	
	<u>5.77E+02</u>	<u>3.81E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>5.30E+02</u>	<u>2.34E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>5.70E+02</u>	<u>2.06E-01</u>		<u>Integral</u>		<u>3.54E+02</u>	<u>48.731</u>		<u>Integral</u>	
	<u>6.12E+02</u>	<u>3.97E-01</u>		<u>51.91</u>		<u>5.45E+02</u>	<u>2.44E-01</u>		<u>1.38</u>		<u>5.85E+02</u>	<u>1.97E-01</u>		<u>0.23</u>		<u>3.61E+02</u>	<u>49.746</u>		<u>4561.07</u>	
	<u>6.39E+02</u>	<u>4.13E-01</u>	$\lambda =$ [700:800]	<u>Rendimento</u>		<u>5.50E+02</u>	<u>2.44E-01</u>	$\lambda =$ [700:750]	<u>Rendimento</u>		<u>6.09E+02</u>	<u>1.75E-01</u>	$\lambda =$ [700:750]	<u>Rendimento</u>		<u>3.61E+02</u>	<u>52.284</u>	$\lambda = [600:700]$	<u>Rendimento</u>	
	<u>6.62E+02</u>	<u>4.31E-01</u>		<u>0.52</u>		<u>5.65E+02</u>	<u>2.31E-01</u>		<u>0.03</u>		<u>6.12E+02</u>	<u>1.69E-01</u>		<u>0.00</u>		<u>3.68E+02</u>	<u>55.33</u>		<u>0.46</u>	
	<u>6.71E+02</u>	<u>4.41E-01</u>		<u>Integral</u>																
	<u>6.89E+02</u>	<u>4.50E-01</u>	$\lambda =$ [800:900]	<u>32.85</u>		<u>5.85E+02</u>	<u>2.16E-01</u>				<u>6.17E+02</u>	<u>1.63E-01</u>				<u>3.74E+02</u>	<u>60.914</u>			
	<u>7.04E+02</u>	<u>4.59E-01</u>		<u>Rendimento</u>		<u>5.92E+02</u>	<u>2.03E-01</u>				<u>6.19E+02</u>	<u>1.44E-01</u>				<u>3.87E+02</u>	<u>64.467</u>			
	<u>7.36E+02</u>	<u>4.78E-01</u>		<u>0.33</u>		<u>6.09E+02</u>	<u>1.91E-01</u>				<u>6.24E+02</u>	<u>1.31E-01</u>				<u>3.87E+02</u>	<u>67.513</u>			
	<u>7.38E+02</u>	<u>4.88E-01</u>				<u>6.24E+02</u>	<u>1.78E-01</u>				<u>6.27E+02</u>	<u>1.19E-01</u>				<u>4.00E+02</u>	<u>70.051</u>			
	<u>7.61E+02</u>	<u>4.94E-01</u>				<u>6.32E+02</u>	<u>1.69E-01</u>				<u>6.32E+02</u>	<u>1.00E-01</u>				<u>4.07E+02</u>	<u>73.096</u>			
	<u>7.61E+02</u>	<u>4.94E-01</u>				<u>6.37E+02</u>	<u>1.66E-01</u>				<u>6.34E+02</u>	<u>7.81E-02</u>				<u>4.13E+02</u>	<u>75.127</u>			
	<u>7.78E+02</u>	<u>4.97E-01</u>				<u>6.47E+02</u>	<u>1.50E-01</u>				<u>6.42E+02</u>	<u>6.88E-02</u>				<u>4.20E+02</u>	<u>77.665</u>			
	<u>8.10E+02</u>	<u>4.97E-01</u>				<u>6.74E+02</u>	<u>1.28E-01</u>				<u>6.52E+02</u>	<u>4.06E-02</u>				<u>4.26E+02</u>	<u>79.695</u>			
	<u>8.23E+02</u>	<u>4.94E-01</u>				<u>6.84E+02</u>	<u>1.03E-01</u>				<u>6.54E+02</u>	<u>4.06E-02</u>				<u>4.46E+02</u>	<u>82.741</u>			
	<u>8.38E+02</u>	<u>4.94E-01</u>				<u>6.91E+02</u>	<u>8.13E-02</u>				<u>6.64E+02</u>	<u>3.75E-02</u>				<u>4.59E+02</u>	<u>84.772</u>			
	<u>8.50E+02</u>	<u>4.81E-01</u>				<u>7.09E+02</u>	<u>5.63E-02</u>				<u>6.79E+02</u>	<u>1.88E-02</u>				<u>4.92E+02</u>	<u>88.325</u>			
	<u>8.53E+02</u>	<u>4.66E-01</u>				<u>7.16E+02</u>	<u>4.69E-02</u>				<u>7.04E+02</u>	<u>9.38E-03</u>				<u>5.05E+02</u>	<u>89.34</u>			
	<u>8.58E+02</u>	<u>4.47E-01</u>				<u>7.29E+02</u>	<u>3.13E-02</u>				<u>7.19E+02</u>	<u>9.38E-03</u>				<u>5.31E+02</u>	<u>87.817</u>			
	<u>8.60E+02</u>	<u>4.38E-01</u>				<u>7.41E+02</u>	<u>2.19E-02</u>				<u>7.29E+02</u>	<u>9.38E-03</u>				<u>5.70E+02</u>	<u>85.279</u>			
	<u>8.60E+02</u>	<u>4.16E-01</u>				<u>7.51E+02</u>	<u>1.56E-02</u>									<u>5.76E+02</u>	<u>83.756</u>			
	<u>8.60E+02</u>	<u>4.03E-01</u>														<u>5.96E+02</u>	<u>81.218</u>			
	<u>8.60E+02</u>	<u>3.94E-01</u>														<u>6.09E+02</u>	<u>76.142</u>			
	<u>8.63E+02</u>	<u>3.59E-01</u>														<u>6.09E+02</u>	<u>73.096</u>			
	<u>8.63E+02</u>	<u>3.41E-01</u>														<u>6.29E+02</u>	<u>69.036</u>			
	<u>8.63E+02</u>	<u>3.41E-01</u>														<u>6.35E+02</u>	<u>64.975</u>			
	<u>8.70E+02</u>	<u>3.06E-01</u>														<u>6.42E+02</u>	<u>60.406</u>			
	<u>8.72E+02</u>	<u>3.03E-01</u>														<u>6.48E+02</u>	<u>57.868</u>			
	<u>8.75E+02</u>	<u>2.63E-01</u>														<u>6.55E+02</u>	<u>52.792</u>			
	<u>8.75E+02</u>	<u>2.38E-01</u>														<u>6.68E+02</u>	<u>49.239</u>			
	<u>8.77E+02</u>	<u>2.06E-01</u>														<u>6.68E+02</u>	<u>46.193</u>			
	<u>8.82E+02</u>	<u>1.78E-01</u>														<u>6.68E+02</u>	<u>43.147</u>			
	<u>8.82E+02</u>	<u>1.53E-01</u>														<u>6.74E+02</u>	<u>39.594</u>			
	<u>8.85E+02</u>	<u>1.34E-01</u>																		

<u>9.39E+02</u>	<u>1.25E-02</u>
<u>9.57E+02</u>	<u>1.25E-02</u>

<u>6.88E+02</u>	<u>16.244</u>
<u>6.94E+02</u>	<u>14.213</u>
<u>6.94E+02</u>	<u>10.66</u>
<u>7.01E+02</u>	<u>7.1066</u>
<u>7.01E+02</u>	<u>4.5685</u>
<u>7.07E+02</u>	<u>1.0152</u>

GalnAs		médio	Integral
X	F(X)		22019.55
<u>4.79E+02</u>	<u>1.5228</u>		<u>Rendimento</u>
<u>5.11E+02</u>	<u>3.0457</u>		<u>0.47</u>
<u>5.31E+02</u>	<u>5.0761</u>		<u>Integral</u>
<u>5.50E+02</u>	<u>7.1066</u>	$\lambda = [500:600]$	<u>856.85</u>
<u>5.76E+02</u>	<u>9.6447</u>		<u>Rendimento</u>
<u>6.09E+02</u>	<u>12.69</u>		<u>0.09</u>
<u>6.16E+02</u>	<u>14.213</u>	$\lambda = [600:700]$	<u>Integral</u>
<u>6.35E+02</u>	<u>20.812</u>		<u>4561.05</u>
<u>6.48E+02</u>	<u>26.396</u>		<u>Rendimento</u>
<u>6.48E+02</u>	<u>30.457</u>	$\lambda = [700:800]$	<u>0.46</u>
<u>6.48E+02</u>	<u>33.503</u>		<u>Integral</u>
<u>6.48E+02</u>	<u>38.071</u>		<u>9854.67</u>
<u>6.55E+02</u>	<u>46.193</u>	$\lambda = [800:900]$	<u>Rendimento</u>
<u>6.55E+02</u>	<u>49.746</u>		<u>0.99</u>
<u>6.61E+02</u>	<u>53.807</u>		<u>Integral</u>
<u>6.61E+02</u>	<u>59.391</u>	$\lambda = [900:950]$	<u>6825.01</u>
<u>6.61E+02</u>	<u>67.005</u>		<u>Rendimento</u>
<u>6.74E+02</u>	<u>70.558</u>		<u>0.68</u>
<u>6.68E+02</u>	<u>76.65</u>		<u>Integral</u>
<u>6.68E+02</u>	<u>81.218</u>		<u>881.59</u>
<u>6.81E+02</u>	<u>85.279</u>		<u>Rendimento</u>
<u>6.88E+02</u>	<u>87.31</u>		<u>0.18</u>
<u>7.01E+02</u>	<u>87.31</u>		
<u>7.20E+02</u>	<u>88.325</u>		
<u>7.85E+02</u>	<u>89.34</u>		
<u>8.12E+02</u>	<u>89.34</u>		
<u>8.18E+02</u>	<u>85.787</u>		
<u>8.31E+02</u>	<u>84.264</u>		
<u>8.38E+02</u>	<u>81.726</u>		
<u>8.57E+02</u>	<u>78.68</u>		
<u>8.64E+02</u>	<u>76.65</u>		
<u>8.64E+02</u>	<u>75.127</u>		
<u>8.70E+02</u>	<u>68.528</u>		
<u>8.83E+02</u>	<u>65.99</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>61.421</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>58.883</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>54.822</u>		
<u>9.03E+02</u>	<u>50.254</u>		
<u>8.83E+02</u>	<u>47.716</u>		
<u>8.90E+02</u>	<u>44.67</u>		
<u>8.90E+02</u>	<u>41.117</u>		
<u>8.90E+02</u>	<u>35.533</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>32.487</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>30.964</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>27.919</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>24.365</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>20.812</u>		
<u>8.96E+02</u>	<u>18.782</u>		
<u>9.03E+02</u>	<u>14.721</u>		
<u>9.10E+02</u>	<u>11.675</u>		
<u>9.10E+02</u>	<u>9.1371</u>		
<u>9.16E+02</u>	<u>7.1066</u>		
<u>9.29E+02</u>	<u>3.5533</u>		
<u>9.42E+02</u>	<u>2.5381</u>		

Ge		médio	Integral
X	F(X)		63892.98
<u>8.64E+02</u>	<u>2.0305</u>		<u>Rendimento</u>
<u>8.57E+02</u>	<u>6.0914</u>		<u>0.59</u>
<u>8.57E+02</u>	<u>9.1371</u>		<u>Integral</u>
<u>8.57E+02</u>	<u>13.706</u>	$\lambda = [850:1000]$	<u>10571.70</u>
<u>8.64E+02</u>	<u>17.259</u>		<u>Rendimento</u>
<u>8.77E+02</u>	<u>21.827</u>		<u>0.70</u>
<u>8.83E+02</u>	<u>26.904</u>	$\lambda = [1000:1100]$	<u>Integral</u>
<u>8.83E+02</u>	<u>29.949</u>		<u>8413.43</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>31.98</u>		<u>Rendimento</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>36.548</u>	$\lambda = [1100:1200]$	<u>0.84</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>39.086</u>		<u>Integral</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>42.132</u>		<u>9328.48</u>
<u>8.83E+02</u>	<u>50.761</u>	$\lambda = [1200:1300]$	<u>Rendimento</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>51.777</u>		<u>0.93</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>54.315</u>		<u>Integral</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>58.376</u>	$\lambda = [1300:1400]$	<u>6950.15</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>62.437</u>		<u>Rendimento</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>65.482</u>		<u>0.70</u>
<u>8.90E+02</u>	<u>68.02</u>	$\lambda = [1400:1500]$	<u>Integral</u>
<u>9.03E+02</u>	<u>70.558</u>		<u>4252.81</u>
<u>9.10E+02</u>	<u>73.096</u>		<u>Rendimento</u>
<u>9.10E+02</u>	<u>76.142</u>	$\lambda = [1500:1600]$	<u>0.43</u>
<u>9.23E+02</u>	<u>81.726</u>		<u>Integral</u>
<u>9.23E+02</u>	<u>83.756</u>		<u>4057.40</u>
<u>9.29E+02</u>	<u>88.832</u>	$\lambda = [1600:1700]$	<u>Rendimento</u>
<u>9.49E+02</u>	<u>89.848</u>		<u>0.41</u>
<u>9.68E+02</u>	<u>86.802</u>		<u>Integral</u>
<u>1.01E+03</u>	<u>85.279</u>	$\lambda = [1700:1800]$	<u>6515.66</u>
<u>1.07E+03</u>	<u>86.802</u>		<u>Rendimento</u>
<u>1.11E+03</u>	<u>84.772</u>		<u>0.65</u>
<u>1.13E+03</u>	<u>84.772</u>	$\lambda = [1800:1900]$	<u>Integral</u>
<u>1.15E+03</u>	<u>84.264</u>		<u>4410.68</u>
<u>1.18E+03</u>	<u>83.756</u>		<u>Rendimento</u>
<u>1.22E+03</u>	<u>82.741</u>		<u>0.44</u>
<u>1.25E+03</u>	<u>82.234</u>		<u>Integral</u>
<u>1.26E+03</u>	<u>82.234</u>		<u>1249.52</u>
<u>1.30E+03</u>	<u>80.203</u>		<u>Rendimento</u>
<u>1.30E+03</u>	<u>80.203</u>		<u>0.12</u>
<u>1.39E+03</u>	<u>79.188</u>		<u>Integral</u>
<u>1.45E+03</u>	<u>77.157</u>		<u>541.78</u>
<u>1.45E+03</u>	<u>77.665</u>		<u>Rendimento</u>
<u>1.46E+03</u>	<u>78.173</u>		<u>0.05</u>
<u>1.48E+03</u>	<u>78.173</u>		
<u>1.50E+03</u>	<u>76.142</u>		
<u>1.54E+03</u>	<u>76.142</u>		
<u>1.55E+03</u>	<u>73.604</u>		
<u>1.56E+03</u>	<u>70.051</u>		
<u>1.57E+03</u>	<u>65.99</u>		
<u>1.59E+03</u>	<u>62.944</u>		
<u>1.60E+03</u>	<u>59.391</u>		
<u>1.60E+03</u>	<u>55.838</u>		
<u>1.62E+03</u>	<u>50.254</u>		
<u>1.62E+03</u>	<u>47.208</u>		
<u>1.62E+03</u>	<u>44.162</u>		
<u>1.62E+03</u>	<u>41.624</u>		

<u>1.67E+03</u>	<u>35.025</u>
<u>1.67E+03</u>	<u>33.503</u>
<u>1.68E+03</u>	<u>30.457</u>
<u>1.69E+03</u>	<u>26.396</u>
<u>1.71E+03</u>	<u>22.335</u>
<u>1.72E+03</u>	<u>21.827</u>
<u>1.73E+03</u>	<u>20.812</u>
<u>1.72E+03</u>	<u>19.797</u>
<u>1.73E+03</u>	<u>15.736</u>
<u>1.76E+03</u>	<u>13.198</u>
<u>1.78E+03</u>	<u>12.183</u>
<u>1.80E+03</u>	<u>10.152</u>
<u>1.81E+03</u>	<u>8.1218</u>
<u>1.82E+03</u>	<u>5.5838</u>
<u>1.86E+03</u>	<u>2.5381</u>
<u>1.91E+03</u>	<u>2.0305</u>
<u>1.95E+03</u>	<u>1.5228</u>

Combustível					Gasolina		
Temperatura adiabática de chama [K]					2394.22		
Emissão Total [kg CO2/h]					465		
Energia total [kW]					1.86E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	0.35	0.05	221.98	24%	12%	2.09
	400-500	3.54	1.19				
	500-600	13.73	6.36				
	600-700	31.34	14.37				
	700-800	52.25	32.77				
	800-900	71.66	46.49				
	900-1000	86.57	59.67				
	1000-1100	96.05	49.07				
	1100-1200	100.50	12.01				
mc-Si	300-400	0.35	0.04	181.98	24%	10%	2.56
	400-500	3.54	0.97				
	500-600	13.73	6.07				
	600-700	31.34	17.07				
	700-800	52.25	24.75				
	800-900	71.66	40.17				
	900-1000	86.57	52.35				
	1000-1100	96.05	29.83				
	1100-1200	100.50	10.73				
CdTe	300-400	0.35	0.01	53.11	9%	3%	8.76
	400-500	3.54	0.32				
	500-600	13.73	3.92				
	600-700	31.34	13.64				
	700-800	52.25	25.61				
	800-900	71.66	9.60				
CIGS	300-400	0.35	0.02	177.12	25%	10%	2.63
	400-500	3.54	0.73				
	500-600	13.73	5.51				
	600-700	31.34	12.48				
	700-800	52.25	26.44				
	800-900	71.66	40.29				
	900-1000	86.57	57.99				
	1000-1100	96.05	29.77				
	1100-1200	100.50	3.89				
DSC	300-400	0.35	0.03	8.80	4%	0%	52.87
	400-500	3.54	0.58				
	500-600	13.73	3.37				
	600-700	31.34	4.15				
	700-750	23.51	0.65				
OSC	300-400	0.35	0.02	5.42	4%	0%	85.72
	400-500	3.54	0.56				
	500-600	13.73	2.95				
	600-700	31.34	1.80				
	700-750	23.51	0.11				
GaAs	300-400	0.35	0.03	68.85	9%	4%	6.75
	400-500	3.54	0.93				
	500-600	13.73	4.91				
	600-700	31.34	12.32				
	700-800	52.25	27.12				
	800-900	71.66	23.54				
GaInP	280-300	0.0038	0.00	649.52	52%	35%	0.72
	300-400	0.35	0.16				
	400-500	3.54	3.06				
	500-600	13.73	12.22				
GaInAs			0.00				
	600-700	31.34	14.29				
	700-800	52.25	51.49				
	800-900	71.66	48.91				
Ge	850-1000	124.59	87.81				
	1000-1100	96.05	80.81				
	1100-1200	100.50	93.75				
	1200-1300	100.94	70.15				
	1300-1400	98.46	41.87				
	1400-1500	94.06	38.16				
	1500-1600	88.50	57.66				
	1600-1700	82.36	36.33				
	1700-1800	76.05	4.12				
	1800-1900	69.82	8.72				

Combustível					Etanol		
Temperatura adiabática de chama [K]					2127.3		
Emissão Total [kg CO2/h]					0		
Energia total [kW]					1.16E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	0.05	0.01	94.60	17%	8%	0.00
	400-500	0.70	0.23				
	500-600	3.55	1.64				
	600-700	9.89	4.54				
	700-800	19.16	12.02				
	800-900	29.51	19.14				
	900-1000	39.09	26.94				
	1000-1100	46.72	23.87				
	1100-1200	51.99	6.21				
mc-Si	300-400	0.05	0.01	76.47	17%	7%	0.00
	400-500	0.70	0.19				
	500-600	3.55	1.57				
	600-700	9.89	5.39				
	700-800	19.16	9.07				
	800-900	29.51	16.54				
	900-1000	39.09	23.64				
	1000-1100	46.72	14.51				
	1100-1200	51.99	5.55				
CdTe	300-400	0.05	0.00	18.73	5%	2%	0
	400-500	0.70	0.06				
	500-600	3.55	1.01				
	600-700	9.89	4.30				
	700-800	19.16	9.39				
	800-900	29.51	3.96				
CIGS	300-400	0.05	0.00	74.47	17%	6%	0
	400-500	0.70	0.14				
	500-600	3.55	1.43				
	600-700	9.89	3.94				
	700-800	19.16	9.69				
	800-900	29.51	16.59				
	900-1000	39.09	26.19				
	1000-1100	46.72	14.48				
	1100-1200	51.99	2.01				
DSC	300-400	0.05	0.00	2.53	2%	0%	0
	400-500	0.70	0.11				
	500-600	3.55	0.87				
	600-700	9.89	1.31				
	700-750	8.30	0.23				
OSC	300-400	0.05	0.00	1.48	2%	0%	0
	400-500	0.70	0.11				
	500-600	3.55	0.76				
	600-700	9.89	0.57				
	700-750	8.30	0.04				
GaAs	300-400	0.05	0.00	24.98	5%	2%	0
	400-500	0.70	0.18				
	500-600	3.55	1.27				
	600-700	9.89	3.89				
	700-800	19.16	9.95				
	800-900	29.51	9.69				
GaInP	280-300	0.00	0.00	324.77	49%	28%	0
	300-400	0.05	0.02				
	400-500	0.70	0.60				
	500-600	3.55	3.16				
GaInAs							
	600-700	9.89	4.51				
	700-800	19.16	18.88				
	800-900	29.51	20.14				
Ge	850-1000	55.14	38.86				
	1000-1100	46.72	39.31				
	1100-1200	51.99	48.50				
	1200-1300	54.96	38.20				
	1300-1400	55.99	23.81				
	1400-1500	55.50	22.52				
	1500-1600	53.92	35.13				
	1600-1700	51.60	22.76				
	1700-1800	48.82	2.64				
	1800-1900	45.80	5.72				

Combustível					Diesel		
Temperatura adiabática de chama [K]					2433.3		
Emissão Total [kg CO2/h]					530.21		
Energia total [kW]					1.99E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	0.46	0.06	247.80	25%	12%	2.14
	400-500	4.35	1.47				
	500-600	16.30	7.55				
	600-700	36.28	16.64				
	700-800	59.35	37.22				
	800-900	80.20	52.03				
	900-1000	95.76	66.01				
	1000-1100	105.25	53.78				
	1100-1200	109.29	13.06				
mc-Si	300-400	0.46	0.05	203.54	25%	10%	2.60
	400-500	4.35	1.19				
	500-600	16.30	7.21				
	600-700	36.28	19.77				
	700-800	59.35	28.11				
	800-900	80.20	44.96				
	900-1000	95.76	57.91				
	1000-1100	105.25	32.68				
	1100-1200	109.29	11.67				
CdTe	300-400	0.46	0.01	60.69	10%	3%	8.74
	400-500	4.35	0.39				
	500-600	16.30	4.66				
	600-700	36.28	15.79				
	700-800	59.35	29.09				
	800-900	80.20	10.75				
CIGS	300-400	0.46	0.03	198.03	25%	10%	2.68
	400-500	4.35	0.90				
	500-600	16.30	6.54				
	600-700	36.28	14.44				
	700-800	59.35	30.03				
	800-900	80.20	45.09				
	900-1000	95.76	64.15				
	1000-1100	105.25	32.62				
	1100-1200	109.29	4.23				
DSC	300-400	0.46	0.04	10.32	4%	1%	51.40
	400-500	4.35	0.72				
	500-600	16.30	4.01				
	600-700	36.28	4.81				
	700-750	26.82	0.74				
OSC	300-400	0.46	0.02	6.41	4%	0%	82.76
	400-500	4.35	0.69				
	500-600	16.30	3.50				
	600-700	36.28	2.08				
	700-750	26.82	0.12				
GaAs	300-400	0.46	0.04	78.43	10%	4%	6.76
	400-500	4.35	1.15				
	500-600	16.30	5.83				
	600-700	36.28	14.26				
	700-800	59.35	30.81				
	800-900	80.20	26.34				
GaInP	280-300	0.01	0.00	711.28	61%	36%	0.75
	300-400	0.46	0.20				
	400-500	4.35	3.76				
	500-600	16.30	14.51				
GaInAs							
	600-700	36.28	16.55				
	700-800	59.35	58.49				
	800-900	80.20	54.74				
Ge	850-1000	138.19	97.39				
	1000-1100	105.25	88.55				
	1100-1200	109.29	101.95				
	1200-1300	109.05	75.79				
	1300-1400	105.80	44.99				
	1400-1500	100.59	40.81				
	1500-1600	94.26	61.42				
	1600-1700	87.42	38.56				
	1700-1800	80.47	4.36				
	1800-1900	73.69	9.21				

Combustível					Gas natural		
Temperatura adiabática de chama [K]					2327.2		
Emissão Total [kg CO2/h]					335.84		
Energia total [kW]					1.66E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	0.22	0.03	181.97	23%	11%	1.85
	400-500	2.43	0.82				
	500-600	10.05	4.65				
	600-700	24.02	11.02				
	700-800	41.47	26.01				
	800-900	58.41	37.89				
	900-1000	72.07	49.68				
	1000-1100	81.35	41.56				
	1100-1200	86.33	10.31				
mc-Si	300-400	0.22	0.02	148.66	23%	9%	2.26
	400-500	2.43	0.66				
	500-600	10.05	4.44				
	600-700	24.02	13.09				
	700-800	41.47	19.64				
	800-900	58.41	32.75				
	900-1000	72.07	43.58				
	1000-1100	81.35	25.26				
	1100-1200	86.33	9.22				
CdTe	300-400	0.22	0.01	41.71	8%	3%	8.05
	400-500	2.43	0.22				
	500-600	10.05	2.87				
	600-700	24.02	10.45				
	700-800	41.47	20.33				
	800-900	58.41	7.83				
CIGS	300-400	0.22	0.01	144.77	23%	9%	2.32
	400-500	2.43	0.50				
	500-600	10.05	4.04				
	600-700	24.02	9.56				
	700-800	41.47	20.98				
	800-900	58.41	32.84				
	900-1000	72.07	48.28				
	1000-1100	81.35	25.21				
	1100-1200	86.33	3.34				
DSC	300-400	0.22	0.02	6.59	3%	0%	50.99
	400-500	2.43	0.40				
	500-600	10.05	2.47				
	600-700	24.02	3.18				
	700-750	18.50	0.51				
OSC	300-400	0.22	0.01	4.01	3%	0%	83.72
	400-500	2.43	0.38				
	500-600	10.05	2.16				
	600-700	24.02	1.38				
	700-750	18.50	0.09				
GaAs	300-400	0.22	0.02	54.41	8%	3%	6.17
	400-500	2.43	0.64				
	500-600	10.05	3.60				
	600-700	24.02	9.44				
	700-800	41.47	21.53				
	800-900	58.41	19.19				
GaInP	280-300	0.00	0.00	551.79	51%	33%	0.61
	300-400	0.22	0.10				
	400-500	2.43	2.10				
	500-600	10.05	8.94				
GaInAs							
	600-700	24.02	10.96				
	700-800	41.47	40.87				
	800-900	58.41	39.86				
Ge	850-1000	103.24	72.76				
	1000-1100	81.35	68.44				
	1100-1200	86.33	80.53				
	1200-1300	87.73	60.97				
	1300-1400	86.43	36.76				
	1400-1500	83.27	33.79				
	1500-1600	78.92	51.42				
	1600-1700	73.91	32.60				
	1700-1800	69.63	3.77				
	1800-1900	63.32	7.91				

Combustível					Hidrogênio		
Temperatura adiabática de chama [K]					2531		
Emissão Total [kg CO2/h]					0		
Energia total [kW]					2.33E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	0.84	0.12	322.79	28%	14%	0.00
	400-500	7.13	2.40				
	500-600	24.56	11.37				
	600-700	51.44	23.59				
	700-800	80.41	50.43				
	800-900	104.92	68.06				
	900-1000	121.83	83.98				
	1000-1100	130.93	66.90				
	1100-1200	133.46	15.94				
mc-Si	300-400	0.84	0.09	266.41	28%	11%	0.00
	400-500	7.13	1.95				
	500-600	24.56	10.86				
	600-700	51.44	28.02				
	700-800	80.41	38.09				
	800-900	104.92	58.82				
	900-1000	121.83	73.67				
	1000-1100	130.93	40.66				
	1100-1200	133.46	14.25				
CdTe	300-400	0.84	0.03	83.55	12%	4%	0.00
	400-500	7.13	0.64				
	500-600	24.56	7.02				
	600-700	51.44	22.38				
	700-800	80.41	39.42				
	800-900	104.92	14.06				
CIGS	300-400	0.84	0.05	258.89	28%	11%	0.00
	400-500	7.13	1.47				
	500-600	24.56	9.86				
	600-700	51.44	20.48				
	700-800	80.41	40.69				
	800-900	104.92	58.99				
	900-1000	121.83	81.61				
	1000-1100	130.93	40.57				
	1100-1200	133.46	5.16				
DSC	300-400	0.84	0.08	15.12	5%	1%	0.00
	400-500	7.13	1.17				
	500-600	24.56	6.04				
	600-700	51.44	6.82				
	700-750	36.75	1.02				
OSC	300-400	0.84	0.04	9.55	5%	0%	0.00
	400-500	7.13	1.12				
	500-600	24.56	5.27				
	600-700	51.44	2.95				
	700-750	36.75	0.17				
GaAs	300-400	0.84	0.07	107.16	12%	5%	0.00
	400-500	7.13	1.88				
	500-600	24.56	8.79				
	600-700	51.44	20.22				
	700-800	80.41	41.74				
	800-900	104.92	34.46				
GaInP	280-300	0.01	0.00	885.89	51%	38%	0.00
	300-400	0.84	0.38				
	400-500	7.13	6.16				
	500-600	24.56	21.86				
GaInAs							
	600-700	51.44	23.46				
	700-800	80.41	79.24				
	800-900	104.92	71.61				
Ge	850-1000	176.91	124.68				
	1000-1100	130.93	110.16				
	1100-1200	133.46	124.50				
	1200-1300	131.15	91.15				
	1300-1400	125.59	53.41				
	1400-1500	118.10	47.92				
	1500-1600	109.62	71.42				
	1600-1700	100.83	44.47				
	1700-1800	92.14	4.99				
	1800-1900	83.84	10.48				

Combustível					Bagaço		
Temperatura adiabática de chama [K]					2352.5		
Emissão Total [kg CO2/h]					0		
Energia total [kW]					1.74E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	0.26	0.04	196.33	23%	11%	0.00
	400-500	2.80	0.94				
	500-600	11.32	5.24				
	600-700	26.60	12.20				
	700-800	45.30	28.41				
	800-900	63.17	40.98				
	900-1000	77.31	53.29				
	1000-1100	86.70	44.30				
	1100-1200	91.50	10.93				
mc-Si	300-400	0.26	0.03	160.60	23%	9%	0.00
	400-500	2.80	0.76				
	500-600	11.32	5.00				
	600-700	26.60	14.49				
	700-800	45.30	21.46				
	800-900	63.17	35.42				
	900-1000	77.31	46.75				
	1000-1100	86.70	26.92				
	1100-1200	91.50	9.77				
CdTe	300-400	0.26	0.01	45.74	9%	3%	0
	400-500	2.80	0.25				
	500-600	11.32	3.24				
	600-700	26.60	11.57				
	700-800	45.30	22.21				
	800-900	63.17	8.47				
CIGS	300-400	0.26	0.02	156.36	23%	9%	0
	400-500	2.80	0.58				
	500-600	11.32	4.55				
	600-700	26.60	10.59				
	700-800	45.30	22.92				
	800-900	63.17	35.52				
	900-1000	77.31	51.79				
	1000-1100	86.70	26.87				
	1100-1200	91.50	3.54				
DSC	300-400	0.26	0.02	7.36	4%	0%	0
	400-500	2.80	0.46				
	500-600	11.32	2.78				
	600-700	26.60	3.53				
	700-750	20.30	0.56				
OSC	300-400	0.26	0.01	4.50	4%	0%	0
	400-500	2.80	0.44				
	500-600	11.32	2.43				
	600-700	26.60	1.52				
	700-750	20.30	0.09				
GaAs	300-400	0.26	0.02	59.53	9%	3%	0
	400-500	2.80	0.74				
	500-600	11.32	4.05				
	600-700	26.60	10.45				
	700-800	45.30	23.51				
	800-900	63.17	20.75				
GaInP	280-300	0.00	0.00	587.14	52%	34%	0
	300-400	0.26	0.12				
	400-500	2.80	2.42				
	500-600	11.32	10.07				
GaInAs							
	600-700	26.60	12.13				
	700-800	45.30	44.64				
	800-900	63.17	43.11				
Ge	850-1000	110.94	78.19				
	1000-1100	86.70	72.94				
	1100-1200	91.50	85.36				
	1200-1300	92.57	64.34				
	1300-1400	90.85	38.64				
	1400-1500	87.24	35.40				
	1500-1600	82.45	53.72				
	1600-1700	77.03	33.98				
	1700-1800	71.40	3.87				
	1800-1900	65.73	8.21				

Combustível					RSU		
Temperatura adiabática de chama [K]					2565		
Emissão Total [kg CO2/h]					58.52		
Energia total [kW]					2.45E+03		
Célula	Faixa de trabalho λ [nm]	Energia Elétrica Teórica [kWh]	Energia Elétrica Real [kWh]	Energia Elétrica total [kWh]	Eficiência teórica [%]	Eficiência real [%]	Emissão [kg CO2/kWh]
c-Si	300-400	1.04	0.14	352.51	29%	14%	0.17
	400-500	8.40	2.83				
	500-600	28.13	13.03				
	600-700	57.74	26.48				
	700-800	88.91	55.76				
	800-900	114.67	74.39				
	900-1000	131.94	90.94				
	1000-1100	140.74	71.91				
	1100-1200	142.60	17.03				
mc-Si	300-400	1.04	0.12	291.41	29%	12%	0.20
	400-500	8.40	2.29				
	500-600	28.13	12.43				
	600-700	57.74	31.46				
	700-800	88.91	42.11				
	800-900	114.67	64.29				
	900-1000	131.94	79.78				
	1000-1100	140.74	43.71				
	1100-1200	142.60	15.22				
CdTe	300-400	1.04	0.03	92.90	12%	4%	0.63
	400-500	8.40	0.75				
	500-600	28.13	8.04				
	600-700	57.74	25.12				
	700-800	88.91	43.59				
	800-900	114.67	15.37				
CIGS	300-400	1.04	0.06	283.05	29%	12%	0.21
	400-500	8.40	1.74				
	500-600	28.13	11.29				
	600-700	57.74	22.98				
	700-800	88.91	44.99				
	800-900	114.67	64.47				
	900-1000	131.94	88.39				
	1000-1100	140.74	43.62				
	1100-1200	142.60	5.52				
DSC	300-400	1.04	0.10	17.18	6%	1%	3.41
	400-500	8.40	1.38				
	500-600	28.13	6.91				
	600-700	57.74	7.65				
	700-750	40.78	1.13				
OSC	300-400	1.04	0.05	10.90	6%	0%	5.37
	400-500	8.40	1.32				
	500-600	28.13	6.03				
	600-700	57.74	3.31				
	700-750	40.78	0.19				
GaAs	300-400	1.04	0.09	118.88	12%	5%	0.49
	400-500	8.40	2.22				
	500-600	28.13	10.07				
	600-700	57.74	22.69				
	700-800	88.91	46.15				
	800-900	114.67	37.67				
GaInP	280-300	0.02	0.00	960.08	52%	39%	0.06
	300-400	1.04	0.46				
	400-500	8.40	7.25				
	500-600	28.13	25.04				
GaInAs							
	600-700	57.74	26.34				
	700-800	88.91	87.62				
	800-900	114.67	78.26				
Ge	850-1000	192.00	135.32				
	1000-1100	140.74	118.41				
	1100-1200	142.60	133.02				
	1200-1300	139.41	96.89				
	1300-1400	132.94	56.54				
	1400-1500	124.55	50.53				
	1500-1600	125.25	81.61				
	1600-1700	105.72	46.63				
	1700-1800	96.38	5.22				
	1800-1900	87.52	10.94				

9. Apendice 3

Calculo da energia disponível em função dos combustíveis

```
clc
clear all
CALCULO DAS TEMPERATURAS ADIABÁTICAS DE CHAMA [K]
Tref = 298.15;
hfagua = -241826000 ;
hfco2 = -393522000;
```

Coeficientes para determinação dos calores específicos a qualquer temperatura K

(Fonte: NASA)

Produtos em geral: CO₂, H₂O, N₂

CO₂

```
c1co2 = 4.63659493;
c2co2 = 2.74131991e-3;
c3co2 = -9.95828531e-7;
c4co2 = 1.60373011e-10;
c5co2 = -9.16103468e-15;
```

H₂O

```
c1h2o = 2.67703787;
c2h2o = 2.97318329e-3;
c3h2o = -7.7376969e-7;
c4h2o = 9.44336689e-11;
c5h2o = -4.26900959e-15;
```

N₂

```
c1n2 = 2.95257626;
c2n2 = 1.39690057e-3;
c3n2 = -4.92631691e-7;
c4n2 = 7.86010367e-11;
c5n2 = -4.60755321e-15;
```

Temperatura adiabática de chama - GASOLINA (C₈H₁₈) - Produtos: 8 CO₂ + 9 H₂O +

47 N₂

```
hfgasolina = -250105000; %Van Wylen
Nco2Gas = 8*8.313*1000;
Nh2oGas = 9*8.313*1000;
Nn2Gas = 47*8.313*1000;
hprodGas = @(TGas) (Nco2Gas*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(TGas-Tref) +
(c2co2/2)*(TGas^2-Tref^2) + (c3co2/3)*(TGas^3-Tref^3) + (c4co2/4)*(TGas^4-
Tref^4) + (c5co2/5)*(TGas^5-Tref^5)) ...
+ Nh2oGas*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(TGas-Tref) + (c2h2o)/2*(TGas^2-
Tref^2) + (c3h2o/3)*(TGas^3-Tref^3) + (c4h2o)/4*(TGas^4-Tref^4) +
(c5h2o/5)*(TGas^5-Tref^5))...
+ Nn2Gas*(c1n2*(TGas-Tref) + (c2n2/2)*(TGas^2-Tref^2) +
(c3n2/3)*(TGas^3-Tref^3) + (c4n2/4)*(TGas^4-Tref^4) + (c5n2/5)*(TGas^5-Tref^5))
- hfgasolina);

initial = 2000;
Tgasolina = fzero(hprodGas,initial);
display(Tgasolina)
```


Temperatura adiabática de chama - ETANOL (C₂H₅OH) - Produtos: 2 CO₂ + 3 H₂O +

13.16 N₂

```
hfetanol = -277380000;  
Nco2etanol = 2*8.313*1000;  
Nh2oetanol = 3*8.313*1000;  
Nn2etanol = 13.16*8.313*1000;  
hprodetanol = @(tetanol)(Nco2etanol*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(tetanol-Tref)  
+ (c2co2/2)*(tetanol^2-Tref^2) + (c3co2/3)*(tetanol^3-Tref^3) +  
(c4co2/4)*(tetanol^4-Tref^4) + (c5co2/5)*(tetanol^5-Tref^5)))...  
+ (Nh2oetanol*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(tetanol-Tref) +  
(c2h2o/2)*(tetanol^2-Tref^2) + (c3h2o/3)*(tetanol^3-Tref^3) +  
(c4h2o/4)*(tetanol^4-Tref^4) + (c5h2o/5)*(tetanol^5-Tref^5)))...  
+ (Nn2etanol*(c1n2*(tetanol-Tref) + (c2n2/2)*(tetanol^2-Tref^2) +  
(c3n2/3)*(tetanol^3-Tref^3) + (c4n2/4)*(tetanol^4-Tref^4) +  
(c5n2/5)*(tetanol^5-Tref^5)))-hfetanol ;  
Tetanol = fzero(hprodetanol,initial);  
display(Tetanol)
```

Temperatura adiabática de chama - DIESEL (C_{14.4}H_{24.9}) - Produtos: 7.2 CO₂ + 12.45

H₂O + 50.478 N₂

```
hfdiesel = -174000000;  
Nco2diesel = 7.2*8.313*1000;  
Nh2odiesel = 12.45*8.313*1000;  
Nn2diesel = 50.478*8.313*1000;  
hproddiesel = @(tdiesel) (Nco2diesel*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(tdiesel-Tref)  
+ (c2co2/2)*(tdiesel^2-Tref^2) + (c3co2/3)*(tdiesel^3-Tref^3) +  
(c4co2/4)*(tdiesel^4-Tref^4) + (c5co2/5)*(tdiesel^5-Tref^5)))...  
+ (Nh2odiesel*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(tdiesel-Tref) +  
(c2h2o/2)*(tdiesel^2-Tref^2) + (c3h2o/3)*(tdiesel^3-Tref^3) +  
(c4h2o/4)*(tdiesel^4-Tref^4) + (c5h2o/5)*(tdiesel^5-Tref^5)))...  
+ (Nn2diesel*(c1n2*(tdiesel-Tref) + (c2n2/2)*(tdiesel^2-Tref^2) +  
(c3n2/3)*(tdiesel^3-Tref^3) + (c4n2/4)*(tdiesel^4-Tref^4) +  
(c5n2/5)*(tdiesel^5-Tref^5))-hfdiesel) ;  
Tdiesel = fzero(hproddiesel,initial);  
display(Tdiesel)
```

Temperatura adiabática de chama - GAS NATURAL (CH₄) - Produtos: 1 CO₂ + 2 H₂O

+ 7.52 N₂

```
hfGN = -74873000;  
Nco2GN = 1*8.313*1000;  
Nh2oGN = 2*8.313*1000;  
Nn2GN = 7.52*8.313*1000;  
hprodGN = @(tGN)(Nco2GN*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(tGN-Tref) +  
c2co2/2*(tGN^2-Tref^2) + c3co2/3*(tGN^3-Tref^3) + c4co2/4*(tGN^4-Tref^4) +  
c5co2/5*(tGN^5-Tref^5))) ...  
+ (Nh2oGN*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(tGN-Tref) + c2h2o/2*(tGN^2-Tref^2)  
+ c3h2o/3*(tGN^3-Tref^3) + c4h2o/4*(tGN^4-Tref^4) + c5h2o/5*(tGN^5-Tref^5)))...  
+ (Nn2GN*(c1n2*(tGN-Tref) + c2n2/2*(tGN^2-Tref^2) + c3n2/3*(tGN^3-Tref^3)  
+ c4n2/4*(tGN^4-Tref^4) + c5n2/5*(tGN^5-Tref^5))-hfGN) ;  
  
Tgasnatural = fzero(hprodGN,initial);  
display(Tgasnatural)
```

Temperatura adiabática de chama - HIDROGENIO (H2) - Produtos: 0 CO2 + 1 H2O +

1.88 N2

```
hfH2 = 0;
Nco2H2 = 0;
Nh2oH2 = 1*8.313*1000;
Nn2H2 = 1.88*8.313*1000;
hprodH2 = @(tH2)(Nco2H2*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(tH2-Tref) +
c2co2/2*(tH2^2-Tref^2) + c3co2/3*(tH2^3-Tref^3) + c4co2/4*(tH2^4-Tref^4) +
c5co2/5*(tH2^5-Tref^5))) ...
+ (Nh2oH2*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(tH2-Tref) + c2h2o/2*(tH2^2-
Tref^2) + c3h2o/3*(tH2^3-Tref^3) + c4h2o/4*(tH2^4-Tref^4) + c5h2o/5*(tH2^5-
Tref^5)))...
+ (Nn2H2*(c1n2*(tH2-Tref) + c2n2/2*(tH2^2-Tref^2) + c3n2/3*(tH2^3-
Tref^3) + c4n2/4*(tH2^4-Tref^4) + c5n2/5*(tH2^5-Tref^5))) ;
Thidrogenio = fzero(hprodH2,initial);
display(Thidrogenio)
```

Temperatura adiabática de chama - BAGAÇO de cana-de-açúcar (C3H5O2) - Produtos:

3.5 H2O + 3 CO2 + 2.47 N2

Determinação do PCI [kJ/kmol]

```
cbag=22.1
hbag=3
obag=20.2
abag=0.7
pesomolbag = 24.39
PCSbag = pesomolbag*1000*(0.341*cbag + 1.323*hbag - 0.1194*obag -
0.0153*abag + 0.0685)
PCIbag = -393509 + (1.67/2)*(-241818) + PCSbag
hfc3h5o2 = PCIbag*1000;
Nco2bagaco = 3*8.313*1000;
Nh2obagaco = 2.5*8.313*1000;
Nn2bagaco = 12.22*8.313*1000;
hprodBag = @(tbag)(Nco2bagaco*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(tbag-Tref) +
c2co2/2*(tbag^2-Tref^2) + c3co2/3*(tbag^3-Tref^3) + c4co2/4*(tbag^4-Tref^4) +
c5co2/5*(tbag^5-Tref^5))) ...
+ (Nh2obagaco*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(tbag-Tref) +
c2h2o/2*(tbag^2-Tref^2) + c3h2o/3*(tbag^3-Tref^3) + c4h2o/4*(tbag^4-Tref^4) +
c5h2o/5*(tbag^5-Tref^5)))...
+ (Nn2bagaco*(c1n2*(tbag-Tref) + c2n2/2*(tbag^2-Tref^2) +
c3n2/3*(tbag^3-Tref^3) + c4n2/4*(tbag^4-Tref^4) + c5n2/5*(tbag^5-Tref^5)) -
hfc3h5o2) ;
Tcana = fsolve(hprodBag,initial);
display(Tcana)
```

Temperatura adiabática de chama - RSU (C16H25O9) - Produtos: 13.5 H2O + 16 CO2 +

13.49 N2

```
crsu=27.6
hrsu=3.49
orsu=20.3
arsu=16.6
pesomolrsu = 22.52
PCSrsu = pesomolrsu*1000*(0.341*crsu + 1.323*hrsu - 0.1194*orsu -
0.0153*arsu + 0.0685)
PCIrsu = -393509 + (1.67/2)*(-241818) + PCSrsu
```

```

hfc16h25o9 = PCIrsu*1000;
Nco2rsu = 16*8.313*1000;
Nh2orsu = 12.5*8.313*1000;
Nn2rsu = 70.5*8.313*1000;
hprodrsu = @(trsu)(Nco2rsu*(hfco2/(1000*8.31) + c1co2*(trsu-Tref) +
c2co2/2*(trsu^2-Tref^2) + c3co2/3*(trsu^3-Tref^3) + c4co2/4*(trsu^4-Tref^4) +
c5co2/5*(trsu-Tref^5))) ...
+ (Nh2orsu*(hfagua/(1000*8.31) + c1h2o*(trsu-Tref) + c2h2o/2*(trsu^2-
Tref^2) + c3h2o/3*(trsu^3-Tref^3) + c4h2o/4*(trsu^4-Tref^4) + c5h2o/5*(trsu^5-
Tref^5)))...
+ (Nn2rsu*(c1n2*(trsu-Tref) + c2n2/2*(trsu^2-Tref^2) + c3n2/3*(trsu^3-
Tref^3) + c4n2/4*(trsu^4-Tref^4) + c5n2/5*(trsu^5-Tref^5)) - (hfc16h25o9 +
hfagua)) ;
Trsu = fzero(hprodrsu,initial);
display(Trsu)

```

Calculo da energia disponível em função dos combustíveis

**CALCULOS PARA DETERMINAR ENERGIA ELÉTRICA GERADA [kWh],
EFICIÊNCIA [%] E EMISSÃO [kg CO2]**

Definindo constantes

```

h = 6.6256e-34; %Cte de Planck
c = 299792458; %Velocidade de prop. da luz no vacuo
k = 1.380649e-23; %Cte de Boltzmann
s = 5.6697e-8; %Cte de Stefan Boltzmann
A = 1; %m
lambda = 0.2:0.1:100; %micro-m
loglambda = log(lambda)/log(10);

```

GASOLINA

```

FEgasolina = 69300; %[kgCO2/TJ]
Egasolina = (2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tgasolina))-
1));
graphGas = (2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tgasolina))-
1));
figure;
loglog(lambda, graphGas,'b-')
xlabel('Comprimento de onda (nm)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)');
title('Espectro de Planck - Gasolina');
Egas = s*(Tgasolina^4)*A %Wh
EmissaoGasolina = Egas*FEgasolina*3.6e-9 %kg CO2

```

Curva discretizada - Gasolina:

```

display('Discretização da curva de energia - Gasolina')
GAS_280a300 = (integral(Egasolina,280e-3,300e-3))
GAS_300a400 = (integral(Egasolina,300e-3,400e-3))
GAS_400a500 = (integral(Egasolina,400e-3,500e-3))
GAS_500a600 = (integral(Egasolina,500e-3,600e-3))
GAS_600a700 = (integral(Egasolina,600e-3,700e-3))
GAS_700a750 = (integral(Egasolina,700e-3,750e-3))
GAS_700a800 = (integral(Egasolina,700e-3,800e-3))

```

```

GAS_800a900 = (integral(Egasolina,800e-3,900e-3))
GAS_850a1000 = (integral(Egasolina,850e-3,1000e-3))
GAS_900a1000 = (integral(Egasolina,900e-3,1000e-3))
GAS_900a950 = (integral(Egasolina,900e-3,950e-3))
GAS_1000a1100 = (integral(Egasolina,1000e-3,1100e-3))
GAS_1100a1200 = (integral(Egasolina,1100e-3,1200e-3))
GAS_1200a1300 = (integral(Egasolina,1200e-3,1300e-3))
GAS_1300a1400 = (integral(Egasolina,1300e-3,1400e-3))
GAS_1400a1500 = (integral(Egasolina,1400e-3,1500e-3))
GAS_1500a1600 = (integral(Egasolina,1500e-3,1600e-3))
GAS_1600a1700 = (integral(Egasolina,1600e-3,1700e-3))
GAS_1700a1800 = (integral(Egasolina,1700e-3,1800e-3))
GAS_1800a1900 = (integral(Egasolina,1800e-3,1900e-3))

```

ETANOL

```

Eetanol = @(lambda)
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tetanol))-1));
graphEetanol =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tetanol))-1));
loglog(lambda, graphEetanol, 'r-');
xlabel('Comprimento de onda (nm)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)');
title('Espectro de Planck - Etanol')
%FEetanol = %Fator de emissão (IPCC) [tCO2/TJ]
Eet = s*(Tetanol^4)*A

```

Curva discretizada - Etanol:

```

display('Discretização da curva de energia - Etanol')
ETANOL_280a300 = (integral(Eetanol,280e-3,300e-3))
ETANOL_300a400 = (integral(Eetanol,300e-3,400e-3))
ETANOL_400a500 = (integral(Eetanol,400e-3,500e-3))
ETANOL_500a600 = (integral(Eetanol,500e-3,600e-3))
ETANOL_600a700 = (integral(Eetanol,600e-3,700e-3))
ETANOL_700a800 = (integral(Eetanol,700e-3,800e-3))
ETANOL_700a750 = (integral(Eetanol,700e-3,750e-3))
ETANOL_800a900 = (integral(Eetanol,800e-3,900e-3))
ETANOL_850a1000 = (integral(Eetanol,850e-3,1000e-3))
ETANOL_900a1000 = (integral(Eetanol,900e-3,1000e-3))
ETANOL_900a950 = (integral(Eetanol,900e-3,1000e-3))
ETANOL_1000a1100 = (integral(Eetanol,1000e-3,1100e-3))
ETANOL_1100a1200 = (integral(Eetanol,1100e-3,1200e-3))
ETANOL_1200a1300 = (integral(Eetanol,1200e-3,1300e-3))
ETANOL_1300a1400 = (integral(Eetanol,1300e-3,1400e-3))
ETANOL_1400a1500 = (integral(Eetanol,1400e-3,1500e-3))
ETANOL_1500a1600 = (integral(Eetanol,1500e-3,1600e-3))
ETANOL_1600a1700 = (integral(Eetanol,1600e-3,1700e-3))
ETANOL_1700a1800 = (integral(Eetanol,1700e-3,1800e-3))
ETANOL_1800a1900 = (integral(Eetanol,1800e-3,1900e-3))

```

DIESEL

```

Ediesel = @(lambda)
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tdiesel))-1));

```

```

graphDiesel =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tdiesel))-1));
figure;
loglog(lambda, graphDiesel, 'g-');
xlabel('Comprimento de onda (nm)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)')
title('Espectro de Planck - Diesel')
FEdiesel = 74100; %[kg CO2/TJ]
Edie = s*(Tdiesel^4)*A
EmissaoDiesel = Edie*3.6e-9*FEdiesel

```

Curva discretizada - Diesel:

```
display('Discretização da curva de energia - Diesel')
```

```

DIESEL_280a300 = (integral(Ediesel,280e-3,300e-3))
DIESEL_300a400 = (integral(Ediesel,300e-3,400e-3))
DIESEL_400a500 = (integral(Ediesel,400e-3,500e-3))
DIESEL_500a600 = (integral(Ediesel,500e-3,600e-3))
DIESEL_600a700 = (integral(Ediesel,600e-3,700e-3))
DIESEL_700a800 = (integral(Ediesel,700e-3,800e-3))
DIESEL_700a750 = (integral(Ediesel,700e-3,750e-3))
DIESEL_800a900 = (integral(Ediesel,800e-3,900e-3))
DIESEL_850a1000 = (integral(Ediesel,850e-3,1000e-3))
DIESEL_900a1000 = (integral(Ediesel,900e-3,1000e-3))
DIESEL_900a950 = (integral(Ediesel,900e-3,950e-3))
DIESEL_1000a1100 = (integral(Ediesel,1000e-3,1100e-3))
DIESEL_1100a1200 = (integral(Ediesel,1100e-3,1200e-3))
DIESEL_1200a1300 = (integral(Ediesel,1200e-3,1300e-3))
DIESEL_1300a1400 = (integral(Ediesel,1300e-3,1400e-3))
DIESEL_1400a1500 = (integral(Ediesel,1400e-3,1500e-3))
DIESEL_1500a1600 = (integral(Ediesel,1500e-3,1600e-3))
DIESEL_1600a1700 = (integral(Ediesel,1600e-3,1700e-3))
DIESEL_1700a1800 = (integral(Ediesel,1700e-3,1800e-3))
DIESEL_1800a1900 = (integral(Ediesel,1800e-3,1900e-3))

```

GAS NATURAL

```

Egasnatural =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tgasnatural))-1));
graphgasnatural =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tgasnatural))-1));
figure;
loglog(lambda, graphgasnatural, 'm-');
xlabel('Comprimento de onda (nm)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)')
title('Espectro de Planck - Gas Natural')
FEgn = 56100 %[kg CO2/TJ]
Egn = s*(Tgasnatural^4)*A
EmissaoGN = Egn*3.6e-9*FEgn

```

Curva discretizada - Gas Natural:

```
display('Discretização da curva de energia - Gas Natural')
```

```
GN_280a300 = (integral(Egasnatural,280e-3,300e-3))
```

```

GN_300a400 = (integral(Egasnatural,300e-3,400e-3))
GN_400a500 = (integral(Egasnatural,400e-3,500e-3))
GN_500a600 = (integral(Egasnatural,500e-3,600e-3))
GN_600a700 = (integral(Egasnatural,600e-3,700e-3))
GN_700a800 = (integral(Egasnatural,700e-3,800e-3))
GN_700a750 = (integral(Egasnatural,700e-3,750e-3))
GN_800a900 = (integral(Egasnatural,800e-3,900e-3))
GN_850a1000 = (integral(Egasnatural,850e-3,1000e-3))
GN_900a1000 = (integral(Egasnatural,900e-3,1000e-3))
GN_900a950 = (integral(Egasnatural,900e-3,950e-3))
GN_1000a1100 = (integral(Egasnatural,1000e-3,1100e-3))
GN_1100a1200 = (integral(Egasnatural,1100e-3,1200e-3))
GN_1200a1300 = (integral(Egasnatural,1200e-3,1300e-3))
GN_1300a1400 = (integral(Egasnatural,1300e-3,1400e-3))
GN_1400a1500 = (integral(Egasnatural,1400e-3,1500e-3))
GN_1500a1600 = (integral(Egasnatural,1500e-3,1600e-3))
GN_1600a1700 = (integral(Egasnatural,1600e-3,1700e-3))
GN_1700a1800 = (integral(Egasnatural,1700e-3,1800e-3))
GN_1800a1900 = (integral(Egasnatural,1800e-3,1900e-3))

```

HIDROGENIO

```

Ehidrogenio = @(lambda)
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Thidrogenio))-1));
graphhidrogenio =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Thidrogenio))-1));
figure;
loglog(lambda, graphhidrogenio,'c-');
xlabel('Comprimento de onda (nm)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)');
title('Espectro de Planck - Hidrogenio')
%FEhidrogenio = %Fator de emissão (IPCC) [tCO2/TJ]
Eh2 = s*(Thidrogenio^4)*A

```

Curva discretizada - Hidrogenio

```

display('Discretização da curva de energia - Hidrogenio')
H2_280a300 = (integral(Ehidrogenio,280e-3,300e-3))
H2_300a400 = (integral(Ehidrogenio,300e-3,400e-3))
H2_400a500 = (integral(Ehidrogenio,400e-3,500e-3))
H2_500a600 = (integral(Ehidrogenio,500e-3,600e-3))
H2_600a700 = (integral(Ehidrogenio,600e-3,700e-3))
H2_700a800 = (integral(Ehidrogenio,700e-3,800e-3))
H2_700a750 = (integral(Ehidrogenio,700e-3,750e-3))
H2_800a900 = (integral(Ehidrogenio,800e-3,900e-3))
H2_850a1000 = (integral(Ehidrogenio,850e-3,1000e-3))
H2_900a1000 = (integral(Ehidrogenio,900e-3,1000e-3))
H2_900a950 = (integral(Ehidrogenio,900e-3,950e-3))
H2_1000a1100 = (integral(Ehidrogenio,1000e-3,1100e-3))
H2_1100a1200 = (integral(Ehidrogenio,1100e-3,1200e-3))
H2_1200a1300 = (integral(Ehidrogenio,1200e-3,1300e-3))
H2_1300a1400 = (integral(Ehidrogenio,1300e-3,1400e-3))
H2_1400a1500 = (integral(Ehidrogenio,1400e-3,1500e-3))

```

```
H2_1500a1600 = (integral(Ehidrogenio,1500e-3,1600e-3))
H2_1600a1700 = (integral(Ehidrogenio,1600e-3,1700e-3))
H2_1700a1800 = (integral(Ehidrogenio,1700e-3,1800e-3))
H2_1800a1900 = (integral(Ehidrogenio,1800e-3,1900e-3))
```

BAGAÇO DE CANA DE AÇUCAR

```
Ecana = @(lambda)
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tcana))-1));
graphcana =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Tcana))-1));
figure;
loglog(lambda, graphcana,'b-.');
xlabel('Comprimento de onda (micro-m)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)');
title('Espectro de Planck - Bagaço de Cana de açúcar');
%FECana = %Fator de emissão (IPCC) [tCO2/TJ]
Ebag = s*(Tcana^4)*A
```

Curva discretizada - Bagaço

```
display('Discretização da curva de energia - Bagaço')
BAGACO_280a300 = (integral(Ecana,280e-3,300e-3))
BAGACO_300a400 = (integral(Ecana,300e-3,400e-3))
BAGACO_400a500 = (integral(Ecana,400e-3,500e-3))
BAGACO_500a600 = (integral(Ecana,500e-3,600e-3))
BAGACO_600a700 = (integral(Ecana,600e-3,700e-3))
BAGACO_700a800 = (integral(Ecana,700e-3,800e-3))
BAGACO_700a750 = (integral(Ecana,700e-3,750e-3))
BAGACO_800a900 = (integral(Ecana,800e-3,900e-3))
BAGACO_850a1000 = (integral(Ecana,850e-3,1000e-3))
BAGACO_900a1000 = (integral(Ecana,900e-3,1000e-3))
BAGACO_900a950 = (integral(Ecana,900e-3,950e-3))
BAGACO_1000a1100 = (integral(Ecana,1000e-3,1100e-3))
BAGACO_1100a1200 = (integral(Ecana,1100e-3,1200e-3))
BAGACO_1200a1300 = (integral(Ecana,1200e-3,1300e-3))
BAGACO_1300a1400 = (integral(Ecana,1300e-3,1400e-3))
BAGACO_1400a1500 = (integral(Ecana,1400e-3,1500e-3))
BAGACO_1500a1600 = (integral(Ecana,1500e-3,1600e-3))
BAGACO_1600a1700 = (integral(Ecana,1600e-3,1700e-3))
BAGACO_1700a1800 = (integral(Ecana,1700e-3,1800e-3))
BAGACO_1800a1900 = (integral(Ecana,1800e-3,1900e-3))
```

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - RSU

```
Ersu = @(lambda)
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Trsu))-1));
graphrsu =
(2*pi*h*c^2*10^24)./(lambda.^5).*(1./(exp((h*c*10^6)./(lambda*k*Trsu))-1));
figure;
loglog(lambda, graphrsu,'m-.');
xlabel('Comprimento de onda (micro-m)');
ylabel('Intensidade espectral (W/m^2/nm)');
title('Espectro de Planck - RSU');
FErsu = 0.36; %[kg CO2/kg RSU]
ERSU = s*(Trsu^4)*A
```



```
MassaRSU = (ERSU/abs(PCIRsu/(pesomolrsu))) %Precisa ser em base massica  
EmissaoRSU = MassaRSU*Fersu
```

Curva discretizada - RSU

```
display('Discretização da curva de energia - Bagaço')
```

```
RSU_280a300 = (integral(Ersu,280e-3,300e-3))  
RSU_300a400 = (integral(Ersu,300e-3,400e-3))  
RSU_400a500 = (integral(Ersu,400e-3,500e-3))  
RSU_500a600 = (integral(Ersu,500e-3,600e-3))  
RSU_600a700 = (integral(Ersu,600e-3,700e-3))  
RSU_700a800 = (integral(Ersu,700e-3,800e-3))  
RSU_700a750 = (integral(Ersu,700e-3,750e-3))  
RSU_800a900 = (integral(Ersu,800e-3,900e-3))  
RSU_850a1000 = (integral(Ersu,850e-3,1000e-3))  
RSU_900a1000 = (integral(Ersu,900e-3,1000e-3))  
RSU_900a950 = (integral(Ersu,900e-3,950e-3))  
RSU_1000a1100 = (integral(Ersu,1000e-3,1100e-3))  
RSU_1100a1200 = (integral(Ersu,1100e-3,1200e-3))  
RSU_1200a1300 = (integral(Ersu,1200e-3,1300e-3))  
RSU_1300a1400 = (integral(Ersu,1300e-3,1400e-3))  
RSU_1400a1500 = (integral(Ersu,1400e-3,1500e-3))  
RSU_1500a1600 = (integral(Ersu,1500e-3,1600e-3))  
RSU_1600a1700 = (integral(Ersu,1600e-3,1700e-3))  
RSU_1700a1800 = (integral(Ersu,1700e-3,1800e-3))  
RSU_1800a1900 = (integral(Ersu,1800e-3,1900e-3))
```