

UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

VICENTE PERUZZI MOREIRA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE
CONCENTRADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS E TERMICOS (CPV/T) PARA UM
PRÉDIO RESIDENCIAL NA REGIÃO DE MACAÉ**

MACAÉ

2018

VICENTE PERUZZI MOREIRA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE
CONCENTRADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS E TERMICOS (CPV/T) PARA UM
PRÉDIO RESIDENCIAL NA REGIÃO DE MACAÉ**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção do
grau de Graduado em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ORIENTADOR: DIEGO MALAGUETA

MACAÉ

2018

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE
CONCENTRADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS E TERMICOS (CPV/T) PARA UM
PRÉDIO RESIDENCIAL NA REGIÃO DE MACAÉ

VICENTE PERUZZI MOREIRA

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção do
grau de Graduado em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Examinado por:

Professor Diego Cunha Malagueta, D.Sc (UFRJ)

Professora Elisa Pinto da Rocha, D.Sc (UFRJ)

Professor Bruno Soares Moreira Cesar Borba, D.Sc (UFF)

Engenheiro Lucas Oliveira Araujo

MACAÉ

2018

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos que me acompanharam nessa jornada, em especial aos meus pais Antônio José e Jo, minhas irmãs Anna e Manuela e meu irmão Joaquim que me deram todo suporte que precisei.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a todos os meus professores do ensino fundamental, médio e superior que me deram as ferramentas necessárias para que pudesse chegar até aqui. Em especial meu orientador Diego Malagueta que me deu todo suporte possível para a conclusão desse projeto e durante a faculdade como um todo.

Agradeço também a minha família, meus pais Antônio e Jo, minhas irmãs Anna e Manuela, meu irmão Joaquim, minhas avós Teresinha e Judith, minhas tias Nina, Tolha e Batice que sempre me apoiaram incondicionalmente.

Agradeço aos meus amigos, que tiveram comigo durante toda a faculdade, nos momentos bons e ruins, em especial Henrique Ligeiro, Arthur Belmont e Bruna Rubim.

RESUMO

O desenvolvimento e pesquisa em fontes de energia renovável no mundo vem crescendo. Um dos campos que mais se destaca é o referente a energia solar. O Brasil possui um enorme potencial de geração de energia solar em diferentes locais espalhados pelo território nacional. Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo de dimensionamento para a instalação de painéis concentradores fotovoltaico e térmico (CPV/T) em um prédio residencial na região de Macaé. Foram utilizados dados históricos de temperatura fornecidos pelo Laboratório de Metrologia da Universidade Estadual Norte Fluminense, dos anos de 2004 a 2015. Além disso são apresentadas as etapas do dimensionamento, desde o estudo do potencial da região, passando pelo cálculo das temperaturas atingidas no processo, chegando a quantidade de painéis que são viáveis atender a demanda o prédio. Serão analisados três regimes de escoamento diferentes, dois laminares e um turbulento. Estima-se que para atender a demanda diária de utilização de água sejam necessários, de acordo com os regimes de escoamento propostos, 18 módulos de painéis CPV/T, para o regime mais lento, 13 módulos, para o regime intermediário e 8 para o regime mais rápido.

Palavras Chave: Energia Solar; Concentradores Solar Fotovoltaico e Térmico; Prédio Residencial

ABSTRACT

The research and development of renewable energy sources in the world has been growing. One of the fields that stands out is the solar energy. Brazil has a huge potential for generating solar energy in different locations throughout the country. The objective of this work is to carry out a design study for the installation of photovoltaic and thermal concentrator panels (CPV / T) in a residential building in the Macaé region. Historical temperature data provided by the Metrology Laboratory of the Universidade Estadual Norte Fluminense from 2004 to 2015 were used. In addition, the sizing steps are presented, from the study of the potential of the region to the calculation of the temperatures reached in the process, arriving to the amount of panels that are feasible to meet the buildings demand. Three different flow regimes, two laminar and one turbulent, will be analyzed. It is estimated that, in order to meet the daily demand for water use, 18 CPV / T panels modules are required, according to the proposed flow regimes, for the slower regimen, 13 modules for the intermediate regime and 8 for the system.

Keywords: Solar Energy; Photovoltaic and Thermal Solar Concentrators; Residential building

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| RESUMO | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE TABELAS | xi |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Contextualização do Tema | 1 |
| 1.2 Justificativa..... | 1 |
| 1.3 Motivação | 2 |
| 1.4 Objetivo geral | 2 |
| 1.5 Objetivos específicos | 2 |
| 1.6 Estrutura do Trabalho | 3 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.4 Energia Fotovoltaica | 4 |
| 2.4.1 Energia Fotovoltaica Concentrada (CPV) | 6 |
| 2.4.2 Coletores Fotovoltaicos e Térmicos (PV/T) | 7 |
| 2.4.3 Energia Fotovoltaica e Térmica Concentrada (CPV/T)..... | 9 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 12 |
| 3.1 Irradiância Solar Direta..... | 12 |
| 3.2 Metodologia | 14 |
| 3.2.1 Etapa 1 – Definição do local de instalação do equipamento. | 14 |
| 3.2.2 Etapa 2 – Nível de seleção | 15 |
| 3.2.3 Etapa 3 – Definição da irradiância direta..... | 15 |
| 3.2.4 Etapa 4 – Carga..... | 20 |
| 3.2.5 Etapa 5 – Componentes | 21 |
| 3.2.6 Etapa 6 – Temperatura e eficiência da célula | 22 |
| 3.2.7 Etapa 7 – Energia Elétrica | 24 |
| 3.2.8 Etapa 8 – Energia térmica..... | 26 |
| 3.2.9 Etapa 9 - Temperatura do fluido | 28 |
| 3.2.10 Etapa 10 – Eficiências | 29 |
| 3.2.11 Definição de quantidades..... | 30 |
| 4. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS | 32 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Resultado – Etapa 1: Definição do local de instalação do equipamento..... | 32 |
| 4.2 Resultado – Etapa 2: Nível de seleção..... | 33 |
| 4.3 Resultado – Etapa 3: Definição da irradiância direta | 34 |
| 4.4 Resultado – Etapa 4: Carga | 38 |
| 4.5 Resultado – Etapa 5: Componentes | 39 |
| 4.6 Resultado – Etapa 6: Temperatura e eficiência da célula..... | 40 |
| 4.7 Resultado – Etapa 7: Energia Elétrica | 44 |
| 4.8 Resultado – Etapa 8: Energia Térmica | 47 |
| 4.9 Resultado – Etapa 9: Temperatura do Fluido | 49 |
| 4.10 Resultado Etapa 10..... | 52 |
| 4.11 Dimensionamento Final..... | 54 |
| 5. CONCLUSÕES | 56 |
| REFERÊNCIAS | 59 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Momentos Históricos no desenvolvimento da energia solar fotovoltaica..... | 4 |
| Figura 2. Tendência de evolução da capacidade elétrica solar..... | 5 |
| Figura 3. Sistema fotovoltaico ligado a rede de transmissão..... | 6 |
| Figura 4. Concentrador Solar Fotovoltaico | 7 |
| Figura 5. Tipos de coletores solares | 8 |
| Figura 6. Protótipo híbrido de PV/T..... | 9 |
| Figura 7. Esquematização de um sistema CPV/T..... | 10 |
| Figura 8. Fluxograma de etapas de projeto..... | 13 |
| Figura 9. Insolação diária, média anual..... | 14 |
| Figura 10. Ângulos de Zenith e de elevação solar..... | 16 |
| Figura 11. Horário Local Meridiano..... | 18 |
| Figura 12. Modelo do prédio residencial..... | 20 |
| Figura 13. Localização de Macaé | 32 |
| Figura 14. Esquematização do Dispositivo | 45 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Dados da localidade | 33 |
| Tabela 2. Horário Local Meridiano | 35 |
| Tabela 3. Condições do Problema | 38 |
| Tabela 4. Índices de Consumo | 39 |
| Tabela 5. Volume de Armazenamento. | 39 |
| Tabela 6. Eficiência Ótica..... | 39 |
| Tabela 7. Dados para Cálculo do Fator de Concentração | 40 |
| Tabela 8. Célula de Referência | 43 |

LISTA DE SÍMBOLOS

I_D - Irradiância Direta
AM – Air Mass
a - Constante
h - Altura Local em relação ao nível do mar
 Θ - Ângulo de Zenith
 α - Ângulo de elevação solar
 δ – Ângulo de declínio solar
 φ – Latitude local
HRA – *Hour Angle*
LST – *Local solar time*
LT – *Local Time*
TC – Fator de correção de hora
LMST – *Local Meridian Standard Time*
EoT – Equação do tempo
 ΔT_{GMT} – Fuso Horário local
 β – Fator de correção
d – Dias
Vconsumo - Volume de Consumo
Varmazenamento – Volume de armazenamento
Tconsumo – Temperatura de consumo
Tarmaz – Temperatura de armazenamento
Tamb – Temperatura ambiente
Tc – Temperatura da célula
To – Temperatura ambiente
Voc – Tensão de circuito aberto
 $\beta(C)$ – Coeficiente térmico de tensão
C – Fator de concentração
 η_c – Eficiência da Célula
 η_r – Eficiência de Referência
 η_{ot} – Eficiência ótica

A_c – Área da Célula
 G_{dir} – Irradiância direta
 f – Fator de imperfeições
 P_c – Potência da Célula
 k_t – Coeficiente térmico de Potência
 σ_t – Coeficiente de temperatura da célula
 $P_{c,r}$ – Potencia elétrica real da célula
 P_{mod} – Potência do Módulo
 n_c – Número de células
 η_{mod} – Eficiência do Módulo
 p_{par} – Fator de perda dependente da radiação
 P_{par} – Perdas por correntes parasitas
 η_{inv} – Eficiência do inversor
 $P_{mod,r}$ – Potência real do módulo
 $Q_{th,id}$ – Calor ideal
 η_{pv} – Eficiência global do módulo fotovoltaico
 $Q_{th,l}$ – Calor Perdido
 \bar{h}_c – Coeficiente convectivo médio
 ε_c – Emissividade
 σ – Constante de Stefan-Boltzmann
 $Q_{th,g}$ – Calor gerado
 $Q_{th,r}$ – Calor Real
 L – Espessura da placa de alumínio
 k – condutividade térmica
 T_p – Temperatura da placa
 \dot{m} – Vazão mássica
 $h_{\acute{a}gua}$ – Coeficiente convectivo
 A_{tub} – Área da tubulação
 T_{in} – Temperatura de Entrada do fluido
 T_{out} – Temperatura de Saída do fluido
 Nu_d – Nusselt
 Re_d – Reynolds

Pr - Prandtl

d – Diâmetro do tubo

η_{th} - Eficiência Térmica

V_{prod} - Volume produzido

h_{op} – Horas de Operação

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Tema

Energia é essencial para o crescimento e desenvolvimento social e econômico de qualquer nação. A qualidade de vida está fortemente ligada ao consumo de energia per capita, que vem crescendo constantemente nas últimas décadas (Martins et al., 2008). Segundo Suhail Abdul Hamid e col (2014) prevê-se que energia será um dos maiores desafios e obstáculos no futuro. Estima-se que no ano de 2050, a concentração de CO_2 na atmosfera chegará a 380 partes por milhão o que é maior que o índice de segurança (i. e. 350 partes por milhão) para evitar graves mudanças climáticas, além disso os atuais níveis de emissões de gases de efeito estufa não são vistos há pelo menos 800 000 anos (Mokri e Emziane, 2011). Uma das formas de combater esse aumento é com a utilização de energias renováveis. Em 2006, energia renovável era responsável por 13,3% das necessidades primárias de energia mundial. Essa porcentagem ainda é considerada baixa, no entanto estima-se que em 2030 atinja 38% (Hamid e col, 2014). Dentre todas as energias renováveis, uma que se opõe a emissão de dióxido de carbono e seus males referentes a mudanças climáticas é a utilização de energia solar. Por comparação energia solar, hoje tem uma importância muito pequena no cenário energético mundial, representando cerca de 1% da geração de energia mundial (MIT, 2015). A energia solar continua a crescer nos setores residenciais, comerciais, agrícolas e industriais. Para a geração de energia elétrica, usa-se principalmente os painéis fotovoltaicos e concentradores solares térmicos na conversão da radiação térmica em energia utilizável. O desenvolvimento desses equipamentos solares envolve um amplo estudo na área de ciência dos materiais e engenharia, assim como soluções criativas para melhorar a eficiência e reduzir os custos (Saver et al., 2013).

1.2 Justificativa

Segundo MacCarthy et al., (2017) o reconhecimento crescente da velocidade e magnitude das mudanças climáticas, somados com as crescentes preocupações acerca do uso e disponibilidade de combustíveis fósseis, despertam o interesse cada vez maior em energias provenientes de fontes renováveis (apud Mackay, 2009).

O sol é o fornecedor inextinguível de energia gratuita, energia solar, para o planeta. Estima-se que cerca de quatro milhões de exajoules ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) de energia solar chega à

terra anualmente. Estima-se ainda que 5×10^4 EJ podem ser explorados de maneira a se tornarem úteis para a espécie humana. Mesmo com a grande disponibilidade e o aumento da atenção constante com relação ao meio ambiente e a utilização de fontes renováveis a contribuição da energia solar no cenário mundial de abastecimento de energia ainda é ínfimo. (Kabir et al., 2018).

Portanto, há uma necessidade urgente pelo desenvolvimento de tecnologias envolvendo energias renováveis, para assim lidar com desafios políticos, econômicos e ambientais envolvendo a geração de eletricidade (Sampaio et al., 2017).

1.3 Motivação

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho veio a partir da leitura da defesa de monografia apresentada pelo aluno Lucas Araujo, como o trabalho de conclusão do curso de graduação em engenharia mecânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro. O trabalho tinha como objetivo verificar a viabilidade técnico-econômica da utilização de um sistema de aquecimento d'água em um edifício residencial.

Do interesse constante nas diversas tecnologias renováveis, alinhado com a inspiração de um problema proposto por Araujo, veio a ideia de combinar tanto a geração de energia na forma de calor como a energia elétrica, por meio dos já conhecidos concentradores solares fotovoltaicos e térmicos.

O esforço coletivo para a preservação do meio ambiente assim como da espécie humana, hoje, depende do constante desenvolvimento de novas tecnologias, dentre elas o desenvolvimento de fontes de energia renovável, de forma a desfazer os desastres causados por inventos que antes não tinham um viés ecológico. Portanto devem ser constantes os esforços para que tornem esses avanços uma realidade acessível a todos e em escala mundial.

1.4 Objetivo geral

Analisar e dimensionar, por meio de dados históricos da região e cálculos matemáticos para avaliação da quantidade disponível de radiação direta, o potencial de instalação de painéis concentradores fotovoltaico e térmico (CPV/T) em um prédio residencial na região de Macaé.

1.5 Objetivos específicos

- Analisar o potencial de radiação direta disponível na região da cidade de Macaé, localizada no litoral do estado do Rio de Janeiro;
- Dimensionar a demanda de água aquecida necessária para atender um prédio residencial de 6 andares contendo 5 apartamentos por pavimento totalizando 30 apartamentos, contendo 4 pessoas em cada apartamento;
- Dimensionar um reservatório de água aquecida que atendesse a demanda;
- Verificar a temperatura de saída da água nos módulos CPV/T de maneira a atender a temperatura adequada para o armazenamento;
- Dimensionar a quantidade necessária de módulos para atender a demanda de aquecimento e vazão de água.

1.6 Estrutura do Trabalho

No capítulo 1 o contexto do trabalho é introduzido. Também nesse capítulo é exposto a justificativa e a motivação para a realização do mesmo além de serem apresentados os objetivos gerais do trabalho, assim como os objetivos mais específicos que pretende chegar com a realização desse estudo.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica do tema, se iniciando com uma abordagem mais simples explicando a energia fotovoltaica e se aprofundando no tema, até chegar ao modelo no qual está sendo realizado esse estudo, o CPV/T.

No capítulo 3 são apresentadas as metodologias que foram utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 4 é feita a análise dos dados calculados, além do dimensionamento do sistema.

No capítulo 5 é feita a conclusão do trabalho assim como as considerações finais pertinentes, também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.4 Energia Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Becquerel em 1839 enquanto estudava os efeitos da luz em células eletrolíticas. No entanto, foi necessário um longo período de tempo para que atingissem níveis satisfatórios de eficiência. Nos anos 1950, houve um rápido desenvolvimento de células fotovoltaicas graças a corrida espacial e a necessidade de se utilizar energia solar em satélites espaciais. Os anos 1970 também marcaram a pesquisa e desenvolvimento da energia fotovoltaica devido à crise energética mundial (Razykov et al, 2011). A figura 1 a seguir traça um breve histórico de momentos de grande relevância no desenvolvimento da energia solar fotovoltaica.

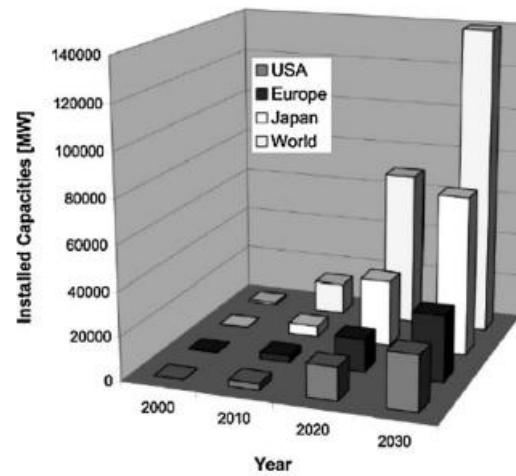
Figura 1. Momentos Históricos no desenvolvimento da energia solar fotovoltaica.

| Cientistas e Inovações | Ano |
|--|------|
| Becquerel descobre o efeito fotovoltaico | 1839 |
| Adams e Day percebem o efeito fotovoltaico no selenium | 1876 |
| Planck reivindica a natureza quântica da luz | 1900 |
| Wilson propõe a teoria quântica de sólidos | 1930 |
| Mott e Schottky desenvolvem a teoria de retificador de estado sólido (diodo) | 1940 |
| Bardeen, Brattain e Shockley inventam o transistor | 1949 |
| Charpin, Fuller e Pearson anunciam célula solar de 6% de eficiência | 1954 |
| Reynolds et al. realiza células solares baseadas em cadmium sulphide | 1954 |
| Primeiro uso de células solares no satélite orbitante Vanguard 1 | 1958 |

Fonte: Chaar, 2011

É uma estimativa da Agência Internacional de Energia (IEA) que em 2050, energia solar seja responsável por cerca de 11% da produção mundial de eletricidade. Em contrapartida isso dependerá de programas de incentivos de inúmeros países nos próximos 5 a 10 anos de maneira a garantir a redução dos custos de investimentos em energia solar. Alemanha, Japão e Estados Unidos foram os principais contribuintes para o crescimento do mercado fotovoltaico. A figura 2 mostra a tendência de evolução da capacidade elétrica solar até 2030 (Dinçer, 2010).

Figura 2. Tendência de evolução da capacidade elétrica solar.

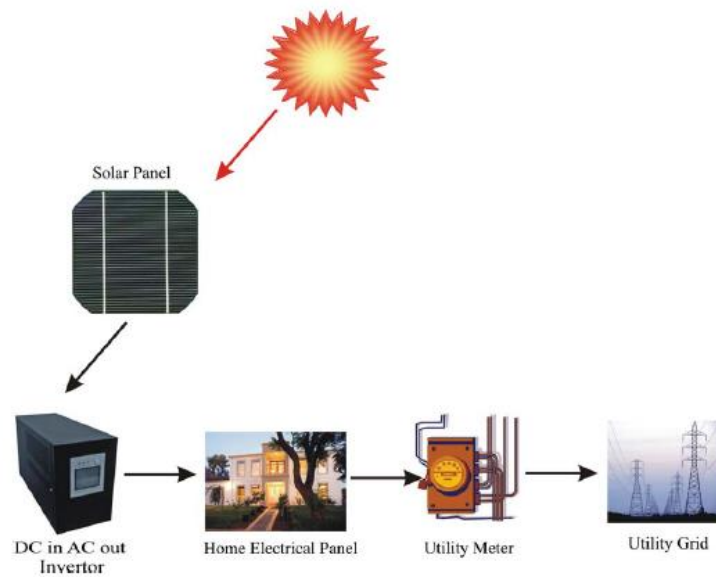


Fonte: Japanese, US e EPIA roadmap

Segundo Beyer et al, 2004, o Brasil, em particular é bem cotado para a aplicação de instalações fotovoltaicas conectadas a rede devido a sua considerável disponibilidade do recurso solar e o alto valor que pode ser economizado com a instalação de painéis fotovoltaicos em áreas comerciais e centros urbanos.

Os equipamentos mais comuns de geração de energia elétrica através da energia solar são os painéis fotovoltaicos (Simioni, 2017). Um módulo fotovoltaico converte diretamente a luz solar capturada pelo painel para energia elétrica em corrente direta pelo efeito fotoelétrico. Esse produto é utilizado especificamente para geração de energia elétrica (Hamid et al, 2014). Para integrar os painéis fotovoltaicos a rede, um dos principais componentes utilizado é o inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada (Panwar et al., 2011). A figura 3 abaixo mostra a configuração de um sistema fotovoltaico e sua ligação com a rede.

Figura 3. Sistema fotovoltaico ligado a rede de transmissão



Fonte: Panwar, 2011

Os módulos fotovoltaicos geram a eletricidade sem emissões de gases poluentes, ruídos ou vibrações. Por mais que a luz solar esteja disponível de forma gratuita, para convertê-la em energia utilizável é necessário um investimento relativamente alto. Um dos grandes problemas dos painéis fotovoltaicos é sua baixa densidade energética, ou seja, necessitam de uma grande área para uma baixa produção de energia (Panwar et al., 2011).

2.4.1 Energia Fotovoltaica Concentrada (CPV)

A tecnologia presente nos concentradores fotovoltaicos (CPV) utiliza de princípios de ótica para concentrar a luz solar numa célula fotovoltaica de multijunções. (Haysom, et al., 2014). A ideia do CPV é simples: dispositivos baratos e de fácil acesso no mercado como lentes e espelhos, são utilizados para concentrar luz numa célula fotovoltaica pequena e com alta eficiência. Como resultado disso, esses sistemas operam exclusivamente com a radiação solar direta (Vivar, et al., 2010). Os modelos CPV atingem eficiências muito além daquelas alcançadas com as tradicionais placas planas fotovoltaicas, e ainda se espera que alcancem patamares ainda mais altos de eficiência no futuro, abrindo o caminho para significativas reduções de custo no sistema (Philips, et al., 2015). A figura 4 abaixo ilustra um modelo de sistema de concentrador fotovoltaico que utiliza lentes Fresnel para concentrar a luz solar.

Figura 4. Concentrador Solar Fotovoltaico



Fonte: Phillips, 2015

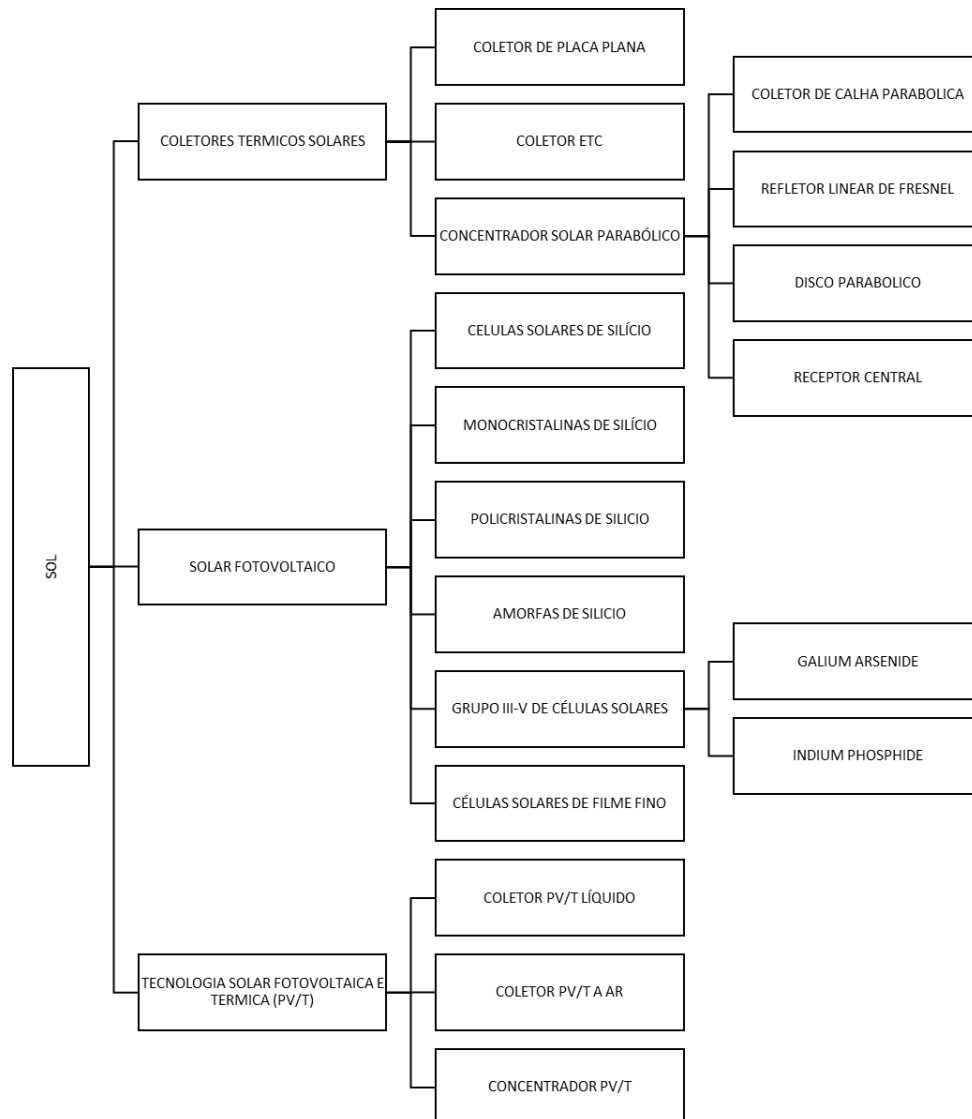
Através de inúmeras pesquisas relacionadas à tecnologia CPV, em 2014 eram produzidos cerca de 99,3 MW provenientes de equipamentos CPV instalados ao redor do mundo. No entanto o mercado desse tipo de equipamento ainda tende a crescer ao longo dos anos, com projeções para atingir o patamar de 4,7 GW em 2020 (García-Domingo, et al., 2014).

2.4.2 Coletores Fotovoltaicos e Térmicos (PV/T)

Painéis fotovoltaicos convertem, dependendo do tipo de célula, de 5% à 15% da radiação solar incidente em energia elétrica, com o restante da porcentagem em energia sendo convertida para energia térmica (Tripanagnostopoulos, 2007). Além disso, Armstrong e Hurley (2010) afirmam que os painéis geram seu próprio calor devido a ação fotovoltaica e também aquecem devido a energia radiada no comprimento de onda infravermelho do espectro solar. Segundo Kalogirou (2006), para células solares de silício monocristalinas e policristalinas, a queda de eficiência é cerca de 0,45% para cada grau de temperatura aumentado, já para células solares de silício amorfas, a queda de eficiência é em torno de 0,25% por grau de temperatura aumentado.

Uma das maneiras para aproveitar esse calor que ao mesmo tempo prejudica a eficiência elétrica das células, podendo inclusive causar danos irreversíveis as mesmas é, Segundo Touni (2007), utilizando o painel fotovoltaico/térmico (PV/T), que recupera parte desse calor por meio de um fluido e disponibiliza-o para utilizações práticas, simultaneamente mantendo a temperatura de operação a níveis satisfatórios de eficiência elétrica. A figura 5 mostra os tipos de equipamentos solares.

Figura 5. Tipos de coletores solares



Fonte: Autor, inspiração Tyagi, 2010.

Um coletor fotovoltaico e térmico (PV/T) é um equipamento onde a placa fotovoltaica produz energia e também há presença de um coletor solar capaz de absorver parte do calor adquirido pela placa, dessa forma garantindo a produção de dois tipos de energia útil: eletricidade e calor. Assim é lógica a integração de uma placa fotovoltaica com um coletor solar, uma vez que num simples dispositivo onde só há presença de placas fotovoltaicas, todo calor gerado era desperdiçado no ambiente sem nenhuma aplicação secundária, e num coletor solar somente era gerada calor (Tyagi, et al, 2010). A figura 6 abaixo mostra um protótipo de um painel PV/T.

Figura 6. Protótipo híbrido de PV/T.



Fonte: Tyagi, 2011

Algumas vantagens de um sistema PV/T, segundo Hasan e Sumathy, 2010, podem ser citadas:

- Sua dupla produção tanto elétrica quanto de calor;
- Sua eficiência combinada é sempre maior que utilizando os equipamentos de forma independente. Sendo principalmente atrativas para construções integradas com painéis solares (BIPV) em que o espaço disponível no telhado é reduzido;
- O calor de saída pode ser tanto utilizado para aquecer, quanto para resfriar, dependendo da estação do ano, também podendo ser utilizado em aplicações domésticas;
- Pode ser facilmente integrado numa construção, sem grandes modificações.

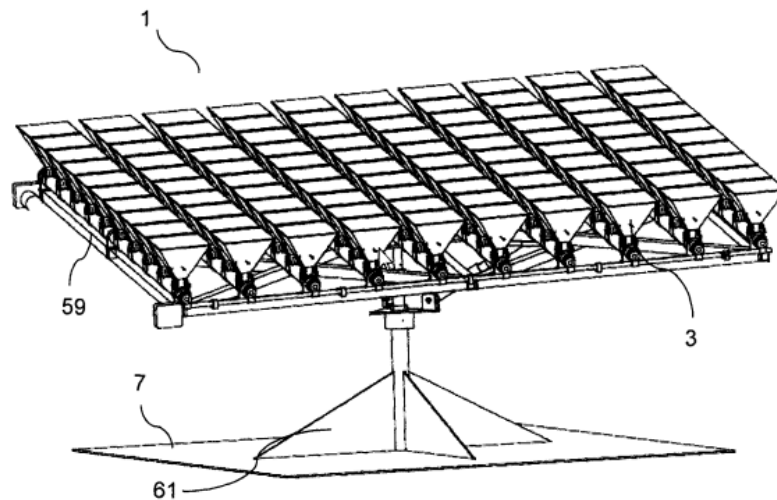
Zhang, et al., 2012, afirma que os equipamentos PV/T são arquitetonicamente adaptáveis e tem um potencial de serem padronizados esteticamente atraente para o mercado, se tornando um produto comercialmente viável. Além disso é esperado que seu potencial seja alto em comparação com painéis solares fotovoltaicos convencionais devido a suas várias vantagens em relação aos sistemas simples.

2.4.3 Energia Fotovoltaica e Térmica Concentrada (CPV/T)

Segundo Arab, et al. (2012), detentor da patente de um sistema concentrador fotovoltaico e térmico (CPV/T), ele descreve o mesmo como sendo um sistema contendo um conjunto receptor fotovoltaico que produz energia solar altamente concentrada, resultando numa maior eficiência na conversão de energia e com uma menor quantidade de receptores

fotovoltaicos do que aqueles que carecem de um dispositivo de concentração. O conjunto compreende um elemento ótico que concentra a luz da fonte (geralmente o sol) em um receptor de energia eletromagnética e uma unidade dissipadora de energia térmica. A figura 7 exemplifica o design do sistema.

Figura 7. Esquemática de um sistema CPVT.



Fonte: Aplicação de patente n. 13/578,331

Para Kong, et al. (2013) o principal problema de sistemas fotovoltaicos é o preço das células solares, então uma possível maneira de reduzir esse custo é concentrando a radiação solar dessa forma minimizando a área da célula receptora para uma mesma saída. Mas isso tem o efeito colateral de superaquecer as células solares, portanto algum método de refrigeração se faz necessário, dessa forma prevenindo danos térmicos permanentes na célula e mantendo sua eficiência. O sistema CPV/T é um sistema híbrido de geração de energia fotovoltaica e térmica, capaz de gerar energia na forma de calor e elétrica, aumentando assim a eficiência geral do sistema.

Os estudos envolvendo a combinação da tecnologia fotovoltaica, energia solar térmica, e concentradores solares refletores ou refratores se iniciaram no final da década de 1970, início dos anos 1980. Os resultados desses estudos mostram que sistemas CPV/T possuem um alto potencial de penetração no mercado de geração de energia devido as suas características únicas (Omar, et al., 2015).

O desenvolvimento de concentradores solares híbridos ainda é uma tecnologia emergente, portanto ainda há ceticismo acerca do seu desenvolvimento e viabilidade no mercado. Um dos maiores desafios referentes a essa tecnologia é a falta de um padrão de teste aceito internacionalmente. (Affolter et al., 2004)

Mittelman et al (2009) afirma que a eficiência do coletor CPV/T depende do nível de concentração ao qual o mesmo foi projetado. Para níveis de concentração mais baixos impactam em menores eficiências térmicas e elétricas. No entanto, esse ainda é um importante fator a ser levado em consideração, uma vez que usando lentes mais simples, consequentemente diminuiria no custo do projeto. Ele ainda afirma que as células disponíveis para CPV não tendem a ter sua eficiência alterada na faixa de concentração entre 200 – 500 sois, podendo ainda ter uma eficiência pior em concentrações mais altas. Buonomano et al. (2013), afirma que, em condições normais de operação, um coletor CPV/T possui a capacidade de atingir uma eficiência térmica na faixa de 45-58%.

Em um sistema CPV/T, tecnologias de CPV se unem com as de PV/T com o objetivo de criar um híbrido superior. E para ilustrar esse conceito é importante entender os principais problemas que afetam tanto o CPV quanto o PV/T. Para o CPV o principal problema é a temperatura em que a célula atinge, causadas pelas intensa radiações, já no caso do PV/T há dois principais problemas, a primeira a necessidade de uma grande quantidade de células e o segundo uma baixa temperatura de saída o que limita a usabilidade do dispositivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é explicitado o método de determinação de irradiância solar direta na região de Macaé e feita uma modelagem do estudo de dissipação térmica presente no equipamento proposto. São explicitados os equacionamentos matemáticos feitos que geraram os resultados da pesquisa. Podendo dessa forma compreender de maneira clara o problema assim como seus resultados.

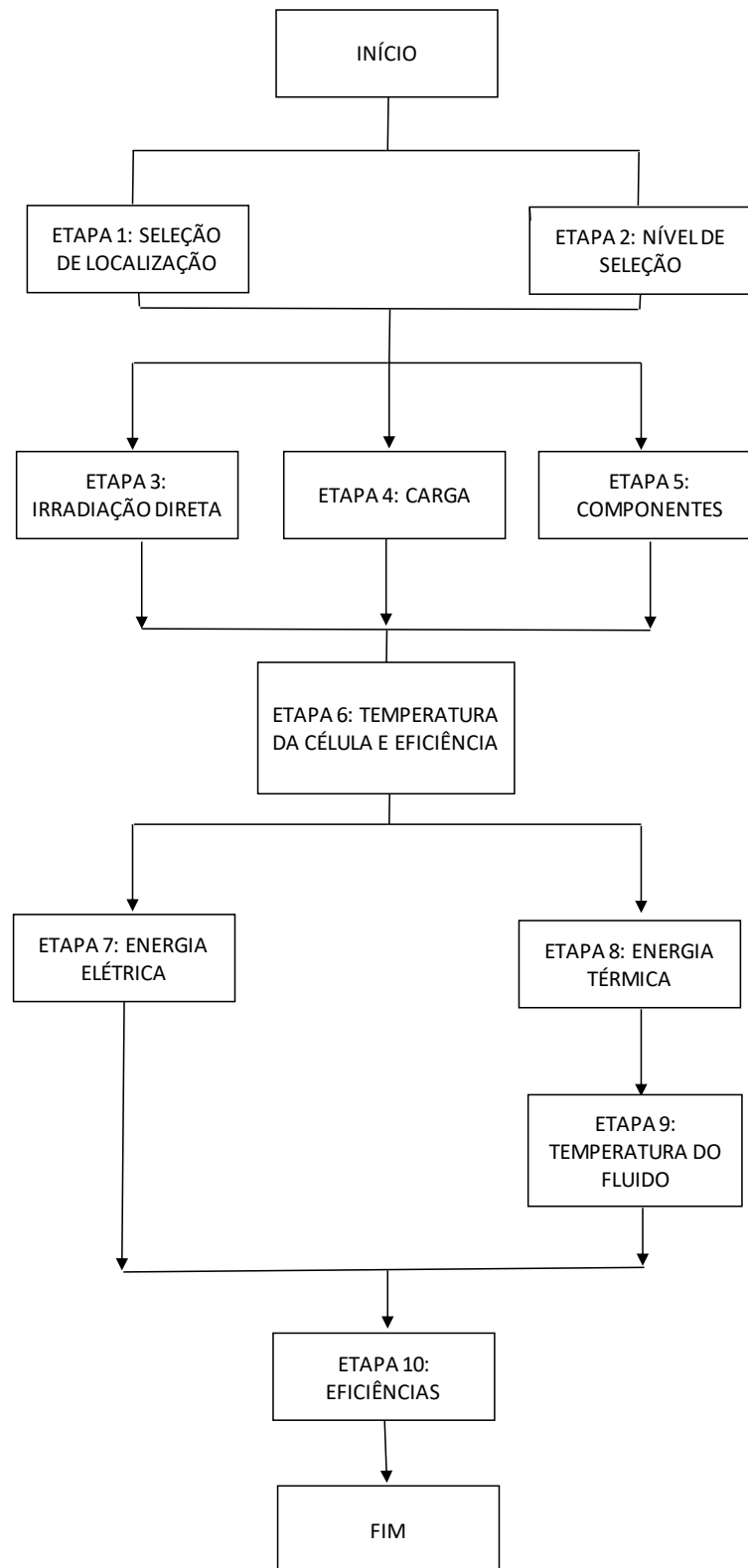
3.1 Irradiância Solar Direta

O dimensionamento de um sistema de concentrador solar depende diretamente da irradiância solar direta disponível na região onde será instalado o dispositivo. Para conseguirmos calcular este dado é necessário saber quais são os principais ângulos (Declinação solar, elevação solar, “hour angle”, ângulo beta, ângulo de Zenith) e conseqüentemente por meio destes conseguir calcular o valor de “air mass” para então determinar a irradiância normal direta incidente.

O artigo “*Design and modeling of concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application*” de Carlo Renno e Fabio Petito, 2013, foi utilizado de referência para o desenvolvimento dos cálculos feitos para o dimensionamento. A figura 8 ilustra o passo a passo utilizado na modelagem de um sistema de concentrador solar fotovoltaico e térmico.

O projeto se divide em 10 etapas. Iniciando-se na definição do local de utilização e finalizando com a definição das eficiências assim como a quantidade de energia economizada.

Figura 8. Fluxograma de etapas de projeto.



Fonte: Autor, inspiração Renno, 2013.

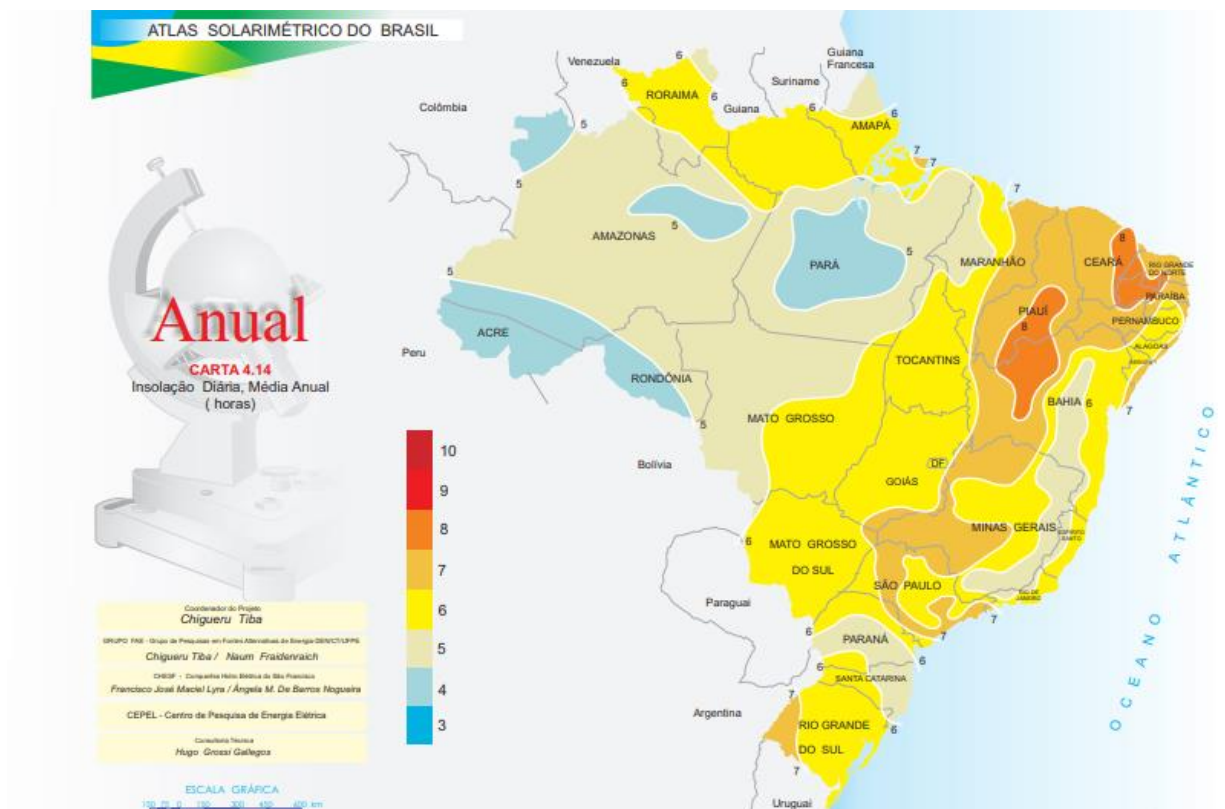
3.2 Metodologia

3.2.1 Etapa 1 – Definição do local de instalação do equipamento.

A primeira etapa do desenvolvimento da solução do problema consiste em determinar o local onde será realizado a instalação do painel CPV/T. Uma vez definido o local consegue-se determinar precisamente os dados como a longitude, latitude e altitude, que são utilizados mais a frente para determinar a quantidade de irradiância solar que chega no local.

Esta é uma importante etapa, pois o clima da região também influencia de maneira significativa no dimensionamento. É necessário saber o potencial no qual a região tem de produção, para aí então determinar a viabilidade do investimento. A figura 9 mostra, numa visão macro, como varia a quantidade de insolação que diferentes regiões do Brasil estão sujeitas.

Figura 9. Insolação diária, média anual.



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil.

3.2.2 Etapa 2 – Nível de seleção

A segunda etapa é utilizada para a determinação dos níveis de detalhamento desejado, uma vez que podem ser utilizados dados anuais, mensais, diários ou de algum horário específico. Quanto mais detalhado a distribuição de tempo maior será a quantidade de dados extraído e mais específico o projeto, no entanto, é necessário também dados com a temperatura ambiente, que é utilizada em cálculos que serão explicitados mais à frente, nesse mesmo nível de detalhamento, o que pode nem sempre estar disponível, ou que seja de fácil coleta.

3.2.3 Etapa 3 – Definição da irradiância direta

A terceira etapa pode ser considerada a mais crucial para a definição de viabilidade do projeto em determinada região, uma vez que ela estima a quantidade de irradiância direta que estará disponível para o CPV/T ao longo do ano. Esta parte possui vários subníveis para a determinação dessa informação.

A determinação da irradiância solar que chega a superfície terrestre é dada pela equação

1

Equação 1

$$I_D = 1,353 \cdot [(1 - a \cdot h) * 0,7^{AM^{0,678}} + a \cdot h]$$

Onde I_D é a irradiância solar direta dado em kW/m², AM é o coeficiente denominado “Air mass”, 1,353 kW/m² é a constante solar, 0,7 represente, por meio de estudos, que cerca de 70% da irradiância incidente na atmosfera é transferida para a superfície, 0,678 é um ajuste empírico para os dados observados e leva em conta as não uniformidades das camadas da atmosfera, a é uma constante igual a 0,14 e h represente a altura do local em relação ao nível do mar.

Portanto se inicia o processo de determinação da irradiância no índice “Air mass” que é o caminho que a luz leva através da atmosfera normalizado até o caminho mais curto possível. O “Air mass” quantifica a redução do poder da luz ao passar pela atmosfera. Ele é definido como a equação 2:

Equação 2

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0,50572 * (96,07995 - \theta) - 1,6364}$$

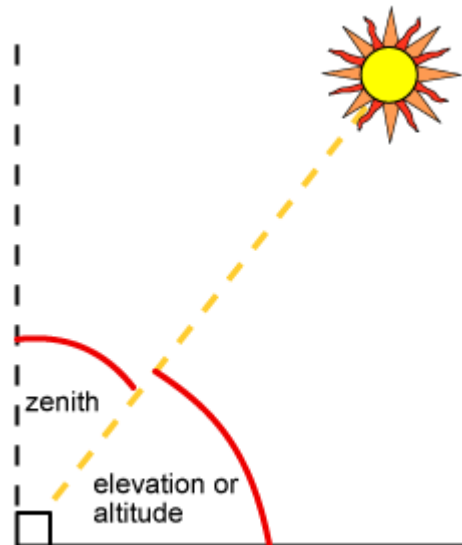
Onde θ é o ângulo de Zenith, que é o ângulo entre o sol e a vertical. Para determinarmos o ângulo de zenith temos a seguinte equação 3:

Equação 3

$$\theta = 90^\circ - \alpha$$

Temos que o α é um termo que representa o ângulo de elevação solar, similar ao ângulo de Zenith, no entanto é medido pela referência horizontal, conforme observamos na figura 10.

Figura 10. Ângulos de Zenith e de elevação solar



Fonte: PV Education

O ângulo de elevação solar pode também ser determinado pela equação 4, exposta a seguir:

Equação 4

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(\text{sen}(\delta) * \text{sen}(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(HRA))$$

Na equação exposta acima é composta de diversos termos, são eles δ que é o ângulo de declínio solar, φ é a latitude do local de interesse (para locais no hemisfério norte utiliza-se valores positivos, já para locais no hemisfério sul utiliza-se valores negativos) e HRA é o termo conhecido como “Hour Angle” que é a ferramenta utilizada para converter a Hora Local Solar (Local Solar Time – LST) no número de graus no qual o sol move através do céu. Por definição ao meio dia sola esse valor deverá ser 0° , uma vez que o sol percorre 15° por hora a cada hora em que se afasta ou se aproxima do meio dia solar. No período da manhã esse valor é negativo, já no período da tarde temos que esse valor é positivo. A equação 5 determina o HRA e é apresentada a seguir.

Equação 5

$$HRA = 15^\circ * (LST - 12)$$

O LST é encontrado utilizando a equação 6, que será apresentada em sequência.

Equação 6

$$LST = LT + \frac{TC}{60}$$

Na equação 6 é apresentada os termos LT que representa a hora na localidade que está sendo estudada e TC é um fator de correção de hora (Time Correction Factor – TC) que é dado em minutos. Ele é responsável pela variação da LST dentro de um determinado fuso horário devido às variações de longitude dentro desse fuso. O Fator de correção pode ser determinado pela equação 7.

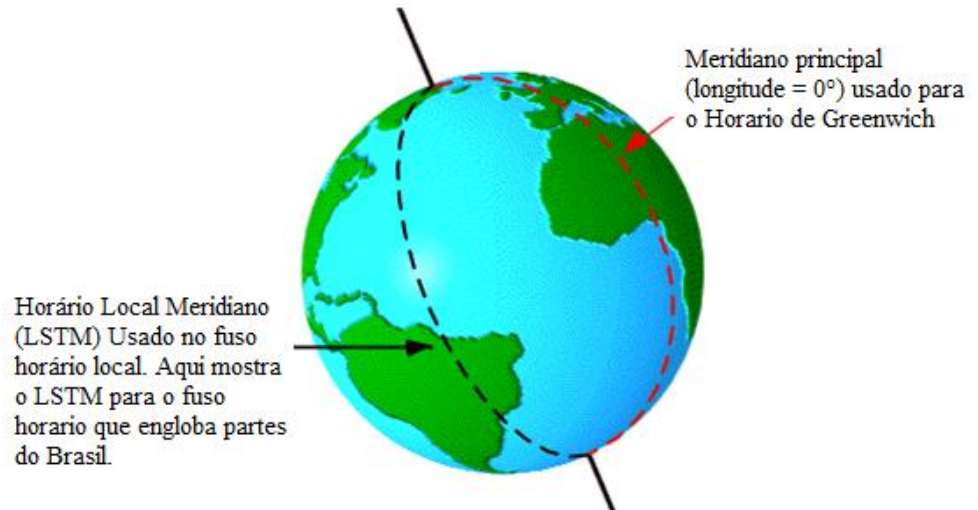
Equação 7

$$TC = 4 * (Longitude - LSTM) + EoT$$

Nessa equação são apresentados os termos LSTM que representa o Horário Local Meridiano (Local Standard Meridian Time) que é um meridiano de referência usado para um

fuso horário específico. Ele é semelhante ao meridiano principal, que é usado para o horário de Greenwich. A figura 11 ilustra o LSTM.

Figura 11. Horário Local Meridiano.



Fonte: PV Education

Ele pode ser determinado pela equação 8 apresentada a seguir:

Equação 8

$$LSMT = 15^\circ * \Delta T_{GMT}$$

Em que ΔT_{GMT} é o fuso horário da localidade para qual o estudo está sendo feito.

Além disso, também é apresentada o termo EoT que representa a Equação do Tempo (Equation of time), que é uma equação empírica que corrige a excentricidade da órbita da Terra e sua inclinação axial. Ela pode ser calculada pela equação 9, apresentada em sequência.

Equação 9

$$EoT = 9,87 * \text{sen}(2\beta) - 7,53 * \text{cos}(\beta) - 1,5 * \text{sen}(\beta)$$

Onde β , que representa um fator de correção, é calculado utilizando a equação 10.

Equação 10

$$\beta = \frac{360}{365}(d - 81)$$

O termo d apresentado na equação acima é o número de dias desde o começo do ano sendo no dia primeiro de janeiro $d = 1$.

Com o auxílio dessas formulações matemáticas conseguimos determinar o HRA, que é utilizado na equação de determinação do ângulo de elevação solar. No entanto, para conseguirmos calcular completamente o ângulo de elevação solar, falta ainda determinar o termo δ , que é o ângulo de declinação solar. Ele pode ser encontrado utilizando a equação 11, que será vista a seguir.

Equação 11

$$\delta = -23,45^\circ * \cos\left(\frac{360}{365} * (d + 10)\right)$$

Sendo d também o número de dias desde o começo do ano. Outro fator importante que deve ser considerado nessa etapa é o horário de pôr e nascer do sol, que por mais que não estejam expressados diretamente no equacionamento do cálculo da irradiância direta, são cruciais para o dimensionamento, pois nos períodos onde não a presença do sol não há irradiância solar. Para determinação desses valores utiliza-se as equações 12 e 13 apresentadas a seguir.

Equação 12

$$\text{nascer do sol} = 12 - \frac{1}{15^\circ} * \cos^{-1}(-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) - \frac{TC}{60}$$

Equação 13

$$\text{pôr do sol} = 12 + \frac{1}{15^\circ} * \cos^{-1}(-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) - \frac{TC}{60}$$

Onde todos os termos da equação são conhecidos.

3.2.4 Etapa 4 – Carga

Como explicado acima, o sistema deverá ser dimensionado para um prédio residencial com 6 andares, em cada pavimento 5 apartamentos representando um total de 30 apartamentos cada um com uma família de 4 pessoas totalizando 120 pessoas e uma área disponível de 272 m². Este problema foi inspirado no trabalho de dissertação “Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar para edifícios residenciais na cidade do Rio de Janeiro”, de Lucas Oliveira Araujo, onde nele é dimensionado um sistema de aquecimento solar para um prédio residencial de 20 apartamentos e com uma mesma área disponível. O prédio a ser estudado é semelhante ao apresentado na figura 12 apresentado abaixo.

Figura 12. Modelo do prédio residencial



Fonte: Lucas Araujo, 2018

Além disso é necessário dimensionar o tamanho do reservatório e a demanda de água quente total necessária. A fim de termos esses valores, será utilizada a norma NBR 15569:2008 que estabelece os requisitos de um sistema de aquecimento solar.

Para determinar a quantidade de água que será consumida é necessário saber o volume de cada ponto de utilização, a vazão que ele exige (Q_{pu}), o tempo que este é utilizado (T_u) e a frequência com que é acionado. Isso pode ser estabelecido pela equação 14 apresentada abaixo.

Equação 14

$$V_{consumo} = \sum (Q_{pu} * T_u * \text{Frequência de uso})$$

Uma vez calculado o volume de consumo, deve-se dimensionar o volume do reservatório, para isso leva-se em consideração também a temperatura de consumo, junto com a temperatura ambiente e a temperatura de armazenamento. A equação 15 abaixo explicita matematicamente como deve ser feito o dimensionamento do volume de armazenamento.

Equação 15

$$V_{armazenamento} = V_{consumo} * \left(\frac{T_{consumo} - T_{amb}}{T_{armaz} - T_{amb}} \right)$$

A temperatura de armazenamento é considerada como uma média da temperatura de saída do fluido ao longo de todo ano nos horários de operação (considerado entre 5:00am e 7:00pm), calculada na etapa 9, uma vez que considera-se desprezíveis as perdas até o volume de armazenamento e que esse volume também seja um volume médio necessário para atender toda demanda do prédio ao longo de todo ano.

Com esses dados de entrada disponíveis conseguimos obter a demanda elétrica e de aquecimento que será necessária no prédio residencial, dessa forma fazendo um dimensionamento preciso para a situação problema.

3.2.5 Etapa 5 – Componentes

Nesta etapa os estudos se concentram nos equipamentos relevantes no painel solar. São eles os componentes óticos referentes as lentes que estão envolvidas na concentração do raio

solar o que acarreta num estudo para o fator de concentração e a célula fotovoltaica que será usada.

As imperfeições presentes nas lentes causam uma perda de cerca de 6-12% da luz solar incidente, dependendo do tipo de lente e do quão limpa a mesma estará. Além disso uma transmissão imperfeita na parte da frente do módulo fotovoltaico pode ser causada devido a refletividade do vidro ou da camada transparente que protege as células fotovoltaicas do ambiente, mesmo sendo projetada para baixa refletividade pode ocorrer uma perda de 2-4%. Com isso a eficiência ótica total considerada deverá ser de $\eta_{ot} = 85\%$ (Kiribus et al, 2006).

A célula fotovoltaica que compõe o modulo CPV/T é uma que célula de multijunções InGaP/InGaAs/Ge (índium-gallium-phosphide/índium-gallium-arsenide/germanium).

O fator de concentração consiste na razão entra a área da lente e a área da célula, conforme na equação 16 abaixo.

Equação 16

$$\text{Fator de Concentração} = \frac{\text{Área da lente}}{\text{Área da célula}}$$

Uma vez definidos os componentes fotovoltaicos assim como o fator de concentração que será utilizado e as etapas anteriores podemos prosseguir os estudos para a próxima etapa do dimensionamento.

3.2.6 Etapa 6 – Temperatura e eficiência da célula

A sexta etapa do dimensionamento do sistema consiste no input de dados como a temperatura ambiente e a eficiência de referência dado o fator de concentração escolhido e com isso consegue-se obter os dados de voltagem de circuito aberto, a temperatura da célula e a sua eficiência.

Segundo Renno, 2013 pode se considerar que a temperatura da célula de é dependente da voltagem de circuito aberto e do coeficiente térmico de tensão, e pode ser encontrada pelo seguinte equação 17:

Equação 17

$$T_c = T_o + \frac{V_{oc}(T_c, C) - V_{oc}(T_o, C_o)}{\beta(C)}$$

Onde T_c é a temperatura da célula, T_o a temperatura ambiente, $V_{oc}(T_c, C)$ é a voltagem de circuito aberto na temperatura da célula e com fator de concentração C , $V_{oc}(T_o, C_o)$ é a voltagem de circuito aberto na temperatura ambiente e com o fator de concentração igual a 1 e $\beta(C)$ é o coeficiente térmico de tensão.

No entanto essa expressão não é usada, uma vez que ela exige dados obtidos de forma empírica. Portanto decidiu-se usar dados a partir de análises gráficas de estudos previamente feitos. Os estudos ao qual estamos nos referindo são “*III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics*” de H. Cotal, et al, para a definição de equações da voltagem de circuito aberto dependente somente do fator de concentração. Já para a definição da equação do coeficiente térmico de tensão que só dependesse do fator de concentração utilizou-se a análise gráfica do estudo feito por M.A. Steiner et al, cujo título é “*Temperature-dependent measurements of an inverted metamorphic multijunction (IMM) solar cell*”. Dessa forma chegou-se as seguintes equações 18 e 19:

Equação 18

$$V_{oc}(C) = 2,51 + 0,092 * \ln(C)$$

E

Equação 19

$$\beta(C) = -0,0064 + 0,0003 * \ln(C)$$

Logo, como consequência dessas premissas obtém-se a seguinte equação 20 para encontrar a temperatura da célula:

Equação 20

$$T_c = T_o + \frac{V_{oc}(C) - V_{oc}(C_o)}{|\beta(C)|}$$

O equacionamento para definição da eficiência da célula não é possível de maneira teórica, dessa forma foi feito uma análise dos dados apresentados também no estudo de Steiner. Com isso chegamos a seguinte equação 21 apresenta a seguir.

Equação 21

$$\eta_c - \eta_r = \frac{d\eta}{dT} * (T_c - T_r)$$

Temos na equação apresentada que os termos η_c e η_r representam as eficiências da célula e a eficiência de referência correspondente ao fator de concentração escolhido respectivamente. Já os termos T_c e T_r representa as temperaturas da célula e a temperatura de referência, que é igual a 25°C. A taxa de variação $\frac{d\eta}{dT}$ para fatores de concentração acima de 30 e de acordo com os gráficos analisados, nos artigos de referência, pode ser representada pela equação 22 a seguir.

Equação 22

$$\frac{d\eta}{dT} = -0,077 + 0,0036 * \ln(C)$$

3.2.7 Etapa 7 – Energia Elétrica

O estudo referente a quantidade de potência elétrica gerada pelas células deve ser feito em conjunto com os estudos da quantidade térmica na qual a célula está sujeita, uma vez que a temperatura afeta diretamente o desempenho dessa célula no seu potencial de geração de energia. No entanto, neste trabalho, iremos separar essas duas partes em duas etapas diferentes, que devem ser feitas simultaneamente.

Dessa forma, inicia-se os estudos da parte elétrica com o cálculo da potência de uma única célula, que pode ser equacionado conforme apresentado a seguir na equação 23.

Equação 23

$$P_c = \eta_c * \eta_{ot} * A_c * C * G_{dir} * f$$

Onde η_c e η_{ot} representam, respectivamente, as eficiências da célula e a eficiência ótica do sistema, já A_c é a área de uma única célula, C é o fator de concentração, G_{dir} é a quantidade de irradiância por metro quadrado calculada anteriormente e f é o fator considerado pelas imperfeições de um sistema de rastreamento, onde foi considerado que isso implica numa

redução de 10% na potência produzida por uma única célula, dessa forma seu valor deve ser de 0,9.

A determinação da potência elétrica real entregue por uma célula é dependente do coeficiente térmico de potência, que indica a porcentagem de decréscimo de fornecimento de eletricidade pelo sistema CPV/T numa dada temperatura de operação. Esse coeficiente é representado por k_t , e é calculado utilizando o a equação 24.

Equação 24

$$k_t = 1 + \sigma_t * (T_c - 25)$$

Onde σ_t é o coeficiente de temperatura dependente do tipo de célula e do material da mesma. De acordo com a literatura utilizada de referência, no qual nela é feita uma pesquisa com diversos *data sheets* e fornecedores diferentes, o valor utilizado para esse termo no estudo utilizado é de 16%.

Com o coeficiente térmico determinado e a potência elétrica também calculada, então temos que a potência elétrica real apresentada pela célula é apresentada conforme a equação 25.

Equação 25

$$P_{c,r} = k_t * P_c$$

Uma vez calculada a potência da célula, conseguimos expandir o cálculo para o módulo inteiro, levando em consideração o número de células envolvidas e as ineficiências do módulo em si. Assim iniciaremos este equacionamento através da equação 26 apresentada a frente.

Equação 26

$$P_{mod} = P_{c,r} * n_c * \eta_{mod}$$

Nesta equação, temos como novos termos o n_c , que representa no número de células presentes em um módulo e a eficiência do módulo, representada por módulo, representada por η_{mod} , que através da referência bibliográfica utilizada foi fixada no valor de 90%.

É necessária também realizar o cálculo das perdas referentes as correntes parasitas geradas no módulo, conforme no estudo que está sendo usado de referência. O equacionamento para o cálculo dessas correntes é explicitado a seguir na equação 27.

Equação 27

$$P_{par} = p_{par} * G_{dir} * A_c * C * n_c$$

Aqui é apresentado o termo p_{par} , que é o fator de perda dependente da irradiância. O valor analisado, conforme referência, é de 0,0023. Além disso também é considerado, para o cálculo da potência real entregue pelo modulo, levando em consideração todas as ineficiências e perdas, a eficiência do inversor, que segundo referência é de 90%. Assim chega-se a equação 28 a seguir.

Equação 28

$$P_{mod,r} = (P_{mod} - P_{par}) * \eta_{inv}$$

Assim encerra-se a etapa de dimensionamento elétrico.

3.2.8 Etapa 8 – Energia térmica

O estudo do dimensionamento da parte térmica, se inicia com a quantidade ideal de calor no qual o módulo CPV/T está sujeito. Já é sabido, com base nas etapas anteriores, a quantidade de radiação proveniente do sol que chega ao módulo. Dessa forma a equação 29 é proposta para o cálculo dessa quantidade de calor.

Equação 29

$$Q_{th,id} = (1 - \eta_{pv}) * \eta_{ot} * C * (G_{dir} * f) * A_c * n_c$$

Nesse equacionamento um novo termo é apresentado, no qual se refere a eficiência global do módulo fotovoltaico e para o cálculo da mesma é sugerido utilizado a equação 30, apresentada a seguir.

Equação 30

$$\eta_{pv} = \eta_c * \eta_{mod} * k_t$$

Onde todos os fatores presentes no equacionamento já foram explicitados anteriormente em outras etapas de cálculo.

Outra parte do cálculo que é importante ser levada em consideração são as perdas envolvendo os efeitos convectivos e de radiação envolvendo o módulo. Dessa forma podemos equacionar essas perdas conforme a expressão matemática 31.

Equação 31

$$Q_{th,l} = [\bar{h}_c * (T_c - T_o) + \varepsilon_c * \sigma * (T_c^4 - T_o^4)] * A_c * n_c$$

A convecção aqui considerada trata-se de convecção forçada. Considera-se também um coeficiente convectivo médio para célula (\bar{h}_c), uma vez que a mesma é composta de materiais diferente. Além disso são apresentados os termos referentes ao coeficiente de emissividade da célula (ε_c) e a constante de Stefan-Boltzmann (σ). É importante citar também que a quantidade de calor relativa as perdas representam cerca de 1-3% do total que é gerado.

Uma vez calculada a quantidade de calor que é perdido e sabendo a quantidade de calor que o módulo é capaz de entregar, conseguimos fazer por completo o balanço total de energia no qual o sistema está sujeito. Assim temos que, conforme a equação 32.

Equação 32

$$Q_{th,r} = Q_{th,id} - Q_{th,l} + Q_{th,g}$$

O termo apresentado como a quantidade de calor gerada ($Q_{th,g}$) será considerado como zero, pois não há geração de calor interna de calor significativa. O calor no qual o equipamento está sujeito se deve apenas a aquele proveniente das radiações solares.

Com os parâmetros da quantidade de calor que o sistema está sujeito conseguimos determinar a temperatura de saída do fluido que estará disponível e será feita uma avaliação se é possível a utilização da mesma em atividades domésticas, como num banho. Para isso o cálculo é conduzido primeiramente determinando a temperatura da placa que separa as células do fluido refrigerante esse cálculo é pela equação de condutividade mostrada na equação 33.

Equação 33

$$Q_{th,r} = k * A_c * n_c \frac{(T_c - T_p)}{L}$$

Onde a condutividade térmica é representada pelo k dando em (W/m*K) e T_p é a temperatura da placa. Foi considerado a condutividade térmica de uma placa de alumínio com espessura de 4mm, conforme apresentado em no artigo “*Desgin and simlation of a low concentrating photovoltaic/thermal system*” de Rossel, et al. Foi escolhido usar esse artigo como referência para a coleta desses dados uma vez que o artigo principal que é usado como base não fornece esses dados.

3.2.9 Etapa 9 - Temperatura do fluido

Com a temperatura da placa definida, consegue-se prosseguir com o cálculo para determinar a temperatura de saída do fluido. Para isso é proposto utilizar um equacionamento convectivo conforme equação 34. Nos casos onde o regime é laminar pode se considerar o Nusselt como constante 3,66, já no caso de regime turbulento é necessário o cálculo do número de Nusselt, conforme equação 35.

Equação 34

$$Q_{th,r} = \dot{m} * C * (T_{out} - T_{in}) = h_{\acute{a}gua} * A_{tub} * \frac{(T_{out} - T_{in})}{\ln\left(\frac{T_p - T_{in}}{T_p - T_{out}}\right)}$$

Equação 35

$$Nu_d = 0,023 * Re_d^{4/5} * Pr^{2/5}$$

Foi considerado nesse caso que a temperatura da placa absorvente é uniforme. Para determinarmos o coeficiente convectivo ($h_{\acute{a}gua}$) é necessário determinar o número de Nusselt e para isso também é necessário determinar tanto o número de Prandtl quanto o de Reynolds. Para o número de Prandtl é um valor tabelado, que varia de acordo com a temperatura média

que por meio de interações consegue-se determinar o valor exato para cada situação. Dessa forma foram feitas interpolações para determinar cada Prandtl para cada temperatura. Já o Reynolds é possível determinar conforme equação 36 explicitada abaixo.

Equação 36

$$Re_d = \frac{4 * \dot{m}}{\mu * \pi * d}$$

Uma vez determinados o número de Reynolds e Prandtl, conseguimos determinar o Nusselt e determinando este conseguimos determinar o coeficiente convectivo da água conforme equação 37 apresentada.

Equação 37

$$h_{\text{água}} = \frac{Nu_d * k}{d}$$

Onde o termo de condutividade térmica é representado pelo k , o d representa o diâmetro da tubulação, tanto na equação que determina o coeficiente convectivo quanto na que determina o número de Reynolds.

Com todos os valores definidos, e fixando a temperatura de entrada do fluido é possível calcular a temperatura de saída do fluido. Assim finaliza-se a parte de dimensionamento térmico do sistema CPV/T.

3.2.10 Etapa 10 – Eficiências

Uma vez calculados todos os valores de dimensionamento podemos então analisar as eficiências do sistema. Fazendo um comparativo entre as quantidades ideais e as quantidades reais atingidas. Consegue-se então, segundo Zhao et al. (2011), expressar numericamente a eficiência térmica conforme mostrado nas equações 38 a seguir.

Equação 38

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} * c_p * (T_{out} - T_{in})}{I_D * A_c * n_c}$$

E assim avalia se o sistema é viável ou não para instalação no local desejado. Finalizando por completo as etapas de dimensionamento do sistema.

3.2.11 Definição de quantidades

Essa é a parte final, uma vez que as anteriores foram necessárias para o dimensionamento de um único módulo. Agora combinaremos a informação da demanda com o potencial desse único módulo, e assim determinarmos a quantidade de módulos necessários e a área que os mesmos vão ocupar, de maneira a atender a demanda do prédio. Para isso iniciaremos o cálculo com a quantidade de água que um módulo entrega no período de operação. Isso é possível pela equação 39 mostrada abaixo.

Equação 39

$$V_{prod} = \dot{m} * h_{op}$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica de água, h_{op} as horas de operação do dispositivo. Com isso e sabendo a demanda diária conseguimos dimensionar quantos módulos serão necessárias. Isso é feito utilizando a equação 40 apresentada abaixo.

Equação 40

$$Quantidade\ de\ módulos = \frac{V_{consumo}}{V_{prod}}$$

Além disso sabendo a área que um módulo ocupa podemos calcular a área que essa quantidade exige e compara-la com a que se tem disponível no prédio. Isso é feito pela equação 41.

Equação 41

$$Área\ Total = Área\ unitária * Quantidade\ de\ módulos$$

Lembrando que no dimensionamento deverá haver um espaço disponível para que tenha espaço para o reservatório e também que os painéis não serão instalados um do lado do outro, uma vez que isso geraria problemas de sombreamento entre eles.

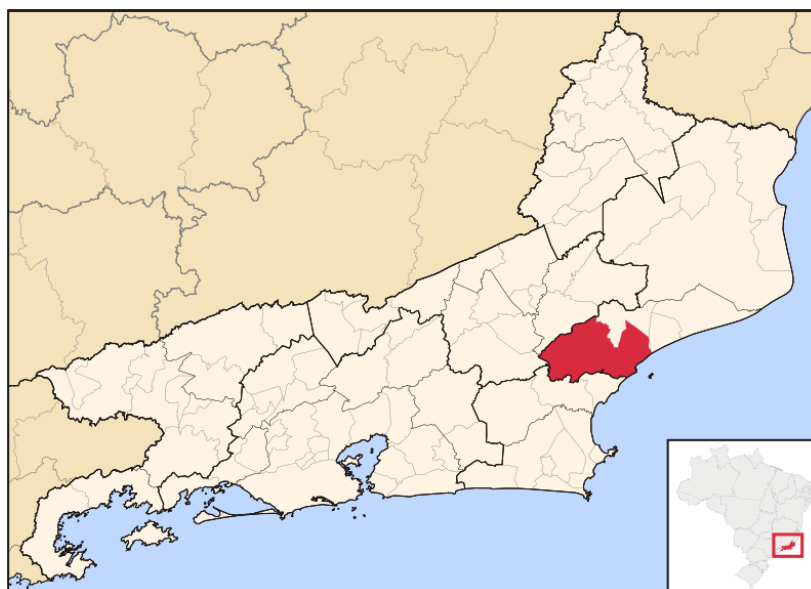
4. RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de cada etapa do dimensionamento apresentados na 4.2. Os resultados de cada etapa estarão expostos de modo a seguir o passo a passo do dimensionamento. Foram utilizadas diversas fontes de referências para a composição dos resultados, no entanto a que compõe o esqueleto da análise de dados é a o estudo de Renno et al. (2013). Também é necessário citar que a situação proposta que inspirou o desenvolvimento desse trabalho é proveniente do TCC de Lucas Araujo (2018), da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

4.1 Resultado – Etapa 1: Definição do local de instalação do equipamento.

No presente estudo, escolheu-se a cidade de Macaé, localizada no Norte do estado do Rio de Janeiro conforme mostrado na figura 13. Cidades próximas como a de Armação de Búzios recebem recursos públicos e privados para o desenvolvimento de práticas sustentáveis e isso pode servir de incentivo para a cidade de Macaé investir no mesmo.

Figura 13. Localização de Macaé



Fonte: Wikipédia

A cidade está localizada a 7m acima do nível do mar e possui coordenadas de 22°22'15" S, 41°47'13" W. É uma cidade litorânea e com construções relativamente baixas, isso faz com

que vento seja um fator importante a ser levado em consideração no projeto. Ela possui um clima predominantemente tropical, podendo atingir altas temperaturas em diversas épocas do ano.

Os dados referentes a região escolhida podem ser encontrados de maneira resumida na tabela 1, abaixo.

Tabela 1: Dados da localidade

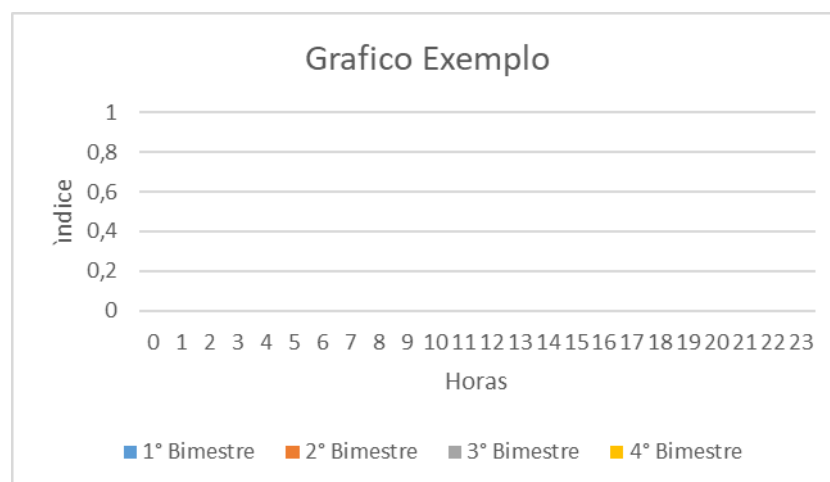
| Índice | Sigla | Valor | Unidade |
|------------------------------|------------------|-------|---------|
| Fuso Horário da localidade | ΔT_{gmt} | -3 | h |
| Longitude | Long | 41,78 | ° |
| Latitude | φ | 22,37 | ° |
| Altura acima do nível do mar | h | 0 | km |

Fonte: Autor

4.2 Resultado – Etapa 2: Nível de seleção

Os dados colhidos e obtidos nesse estudo foram diários e com variação horária de todos os dias do ano.

Gráfico 1. Gráfico Exemplo.



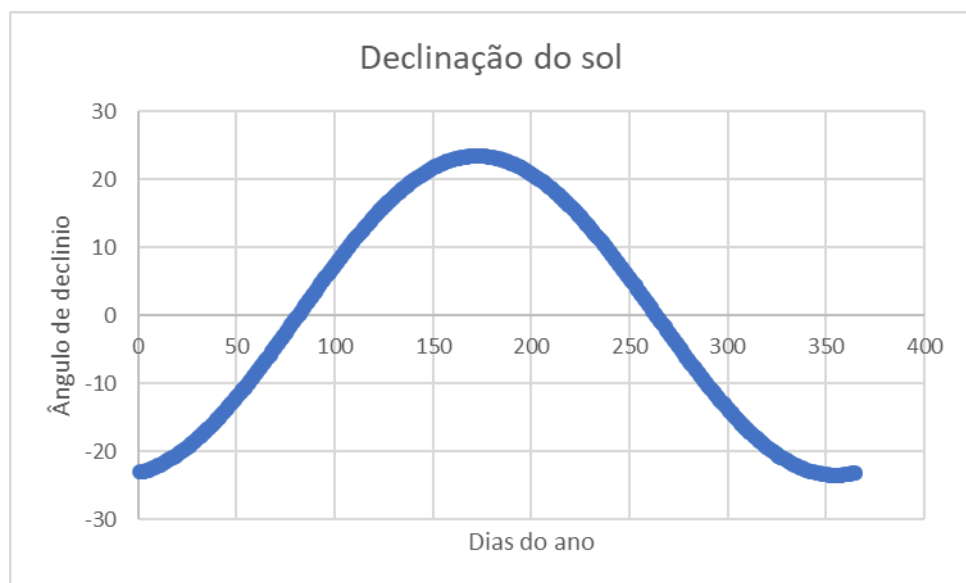
Fonte: Autor

No entanto, para uma análise serão utilizados os valores médios para os quatro bimestres do ano, uma vez que dessa forma é possível uma visualização gráfica melhor, como exemplificada no gráfico 1 acima.

4.3 Resultado – Etapa 3: Definição da irradiância direta

Nesta etapa, iniciaremos mostrando da parte mais básica, até chegarmos ao resultado final que é a irradiância direta encontrada. Assim iniciamos os cálculos determinando o ângulo de declinação solar, dessa forma podemos ver no gráfico 2 que o declínio varia de acordo com a estação do ano devido a terra estar levemente inclinada em relação ao eixo de rotação do sol. Caso a terra não estivesse inclinada, seu eixo fosse paralelo ao eixo do sol, então esse valor seria constantemente zero, o que na realidade só ocorre nos equinócios de primavera e de outono.

Gráfico 2. Declinação do Sol.



Fonte: Autor

Agora que temos esses valores é necessário determinar o HRA, para isso foi calculada a equação do tempo e o fator de correção de hora para cada dia, levando em consideração o fator β . Para o cálculo do fator de correção de hora foi determinado o LSMT, assim chegamos ao valor apresentado na tabela 2.

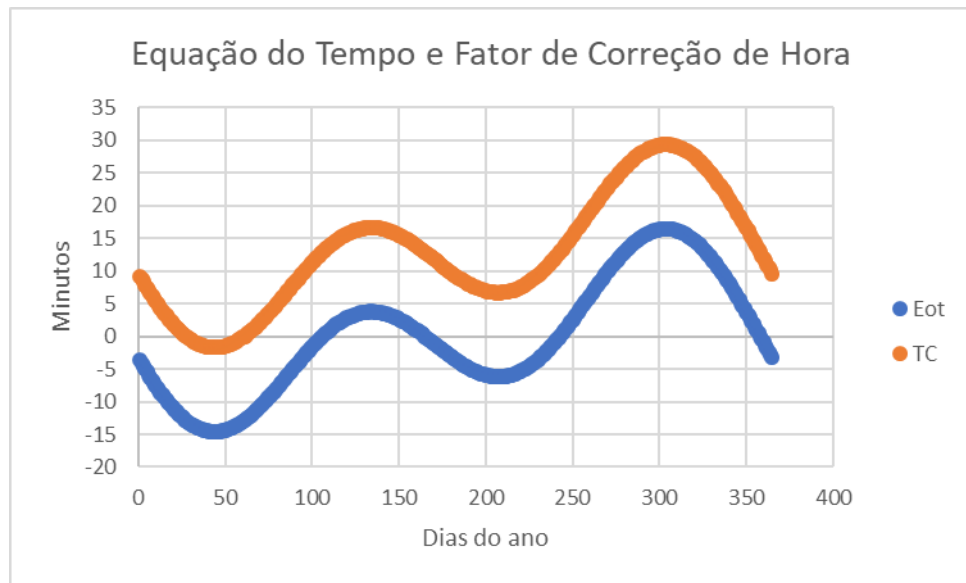
Tabela 2. Horário Local Meridiano

| Índice | Sigla | Valor | Unidade |
|-------------------------|-------|-------|---------|
| Horário Local Meridiano | LSMT | -45 | ° |

Fonte: Autor

Com isso chegamos a representação gráfica explicitada no gráfico 3.

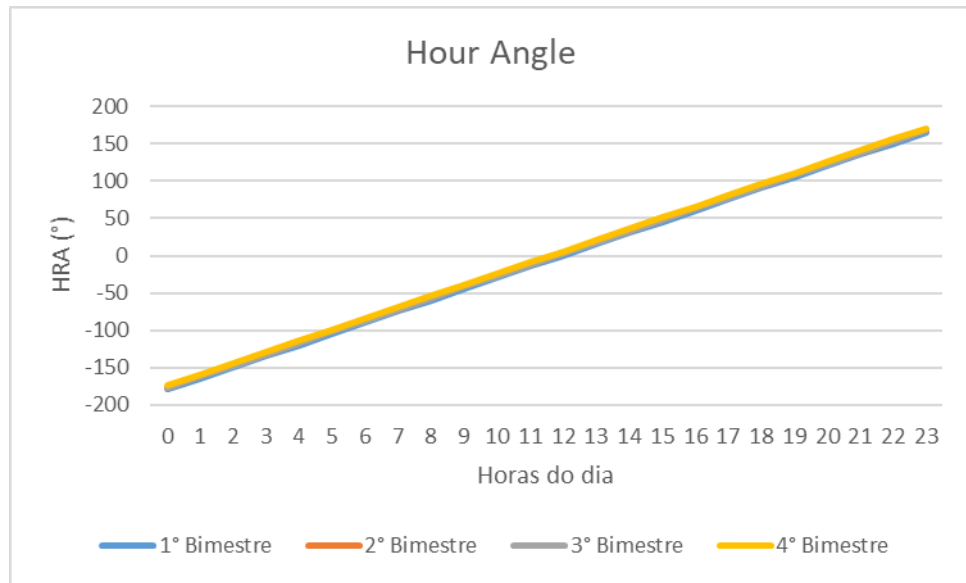
Gráfico 3. Equação do tempo e fator de correção de hora.



Fonte: Autor

O gráfico apresentado condiz com o que é apresentado pela literatura. E com ambos índices apresentados no gráfico calculados conseguimos determinar a Hora Local Solar (LST) e conseqüentemente os valores de HRA, assim podemos converter a hora local solar em um valor representado em graus no qual o sol se move no céu. Conseguimos analisar graficamente os valores calculados no gráfico 4 apresentado a seguir.

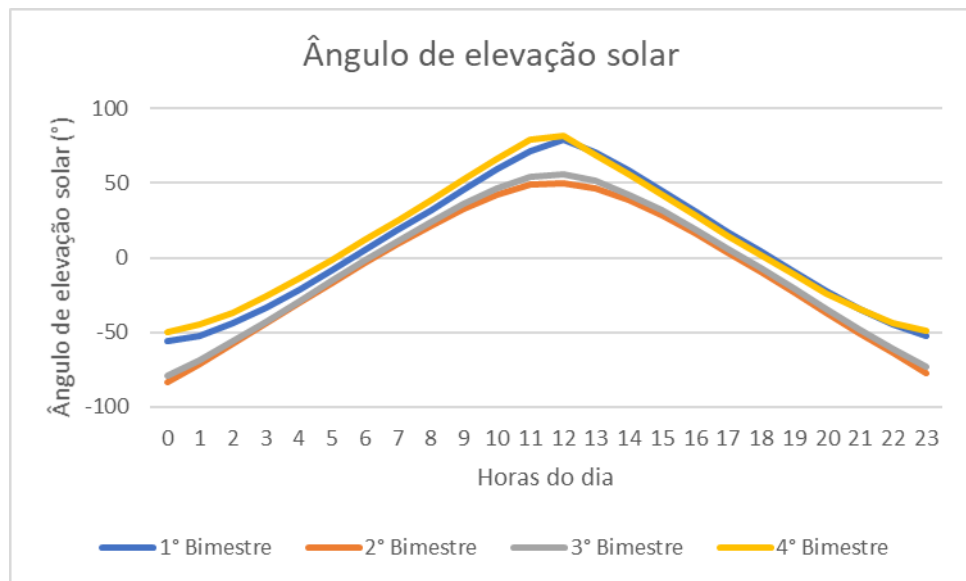
Gráfico 4 Hour Angle.



Fonte: Autor

O próximo passo é o cálculo do ângulo de elevação solar, que agora com os valores de HRA, de latitude e o ângulo de declinação solar encontrados, conseguimos então determinar. A análise pode ser feita pelo gráfico 5 que será apresentado.

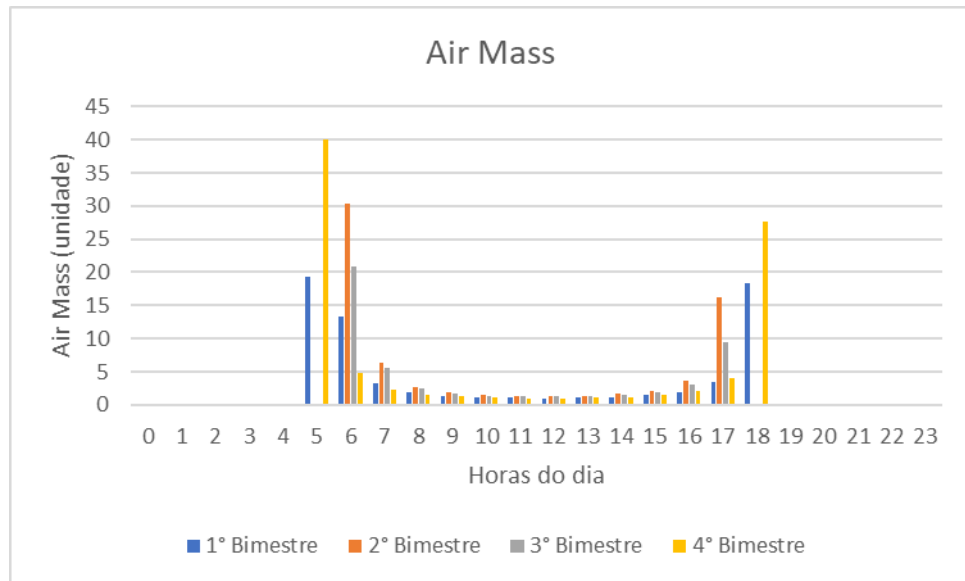
Gráfico 5. Ângulo de elevação solar.



Fonte: Autor

Como já se sabe o ângulo de Zenith e o de elevação solar são complementares, portanto também conseguimos determinar o ângulo de Zenith, que é utilizado para a determinação do coeficiente “Air mass” para cada dia. Uma análise gráfica desses dados que foram gerados pode ser vista no gráfico 6 mostrado a seguir.

Gráfico 6. Air Mass

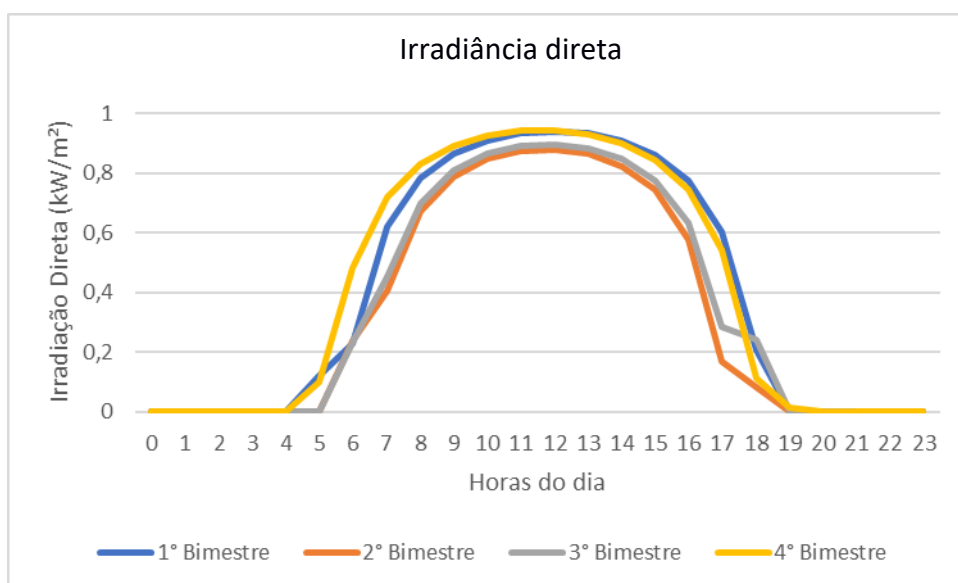


Fonte: Autor

O gráfico faz sentido uma vez que o coeficiente “Air Mass” representa o comprimento do caminho ótico direto através da atmosfera da Terra, logo apresenta valores maiores quando o sol está no horizonte e valores menores quanto mais próximo ao meio dia. Além disso, esse valor só deve aparecer nos períodos entre o nascer e pôr do sol, por isso não há representação gráfica dos horários onde não tem presença do sol.

Com o coeficiente “Air Mass” determinado, conseguimos determinar a irradiância média direta, vale ressaltar que a nível de projeto não foi considerado nos cálculos o efeito negativo no qual as nuvens podem afetar no nível de irradiância direta, uma vez que foi citado pela referência dos cálculos “PV education” que esses dados não são utilizados no design detalhado de um sistema para uma localização específica. Assim foram gerados os dados apresentados no gráfico 7.

Gráfico 7 irradiância direta



Fonte: Autor

O gráfico nos mostra, o que já é possível prever, que os níveis de irradiância direta vão crescendo à medida que o dia vai se iniciando, atingindo o pico de irradiância em média ao longo do meio dia e novamente vai caindo à medida que começa o anoitecer.

4.4 Resultado – Etapa 4: Carga

Nessa etapa é mostrado qual a demanda do prédio. Os dados de entrada que resumem a quantidade de pessoas que deveram ser atendidas, além das temperaturas ambientes e de consumo são exemplificadas na tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Condições do Problema

| Projeto Prédio Residencial | | |
|---|-------|----------------|
| Índice | Valor | Unidade |
| Pessoa/Unidade | 4 | |
| Nº Unidades | 30 | |
| Demanda diária de água quente | 19,44 | m ³ |
| Temperatura Ambiente Média Anual Local | 23,53 | °C |
| Temperatura de Consumo | 40 | °C |
| Temperatura do Reservatório Média Anual | 62,54 | °C |

Fonte: Autor

A temperatura média anual do reservatório foi calculada com base apenas nas horas de operação do dispositivo. Além disso esse valor é superior ao encontrado no trabalho do Lucas

Araujo, pelo fato de serem usadas lentes que concentram a radiação num único ponto, dessa forma, aumentando a temperatura desse ponto e assim elevando a média.

Além disso são apresentados na tabela 4, os volumes de consumo que serão exigidos.

Tabela 4. Índices de Consumo

| Volume consumido | | |
|------------------------------|-------|----------------|
| Índice | Valor | Unidade |
| Chuveiro | 150 | (L/pessoa/dia) |
| Torneira | 6 | (L/pessoa/dia) |
| Pia | 6 | (L/pessoa/dia) |
| Total por pessoa | 162 | (L/dia) |
| Total diário por apartamento | 4860 | (L) |
| Total diário para o edifício | 19440 | (L) |

Fonte: Autor

Logo podemos concluir que o volume de armazenamento necessário para atender a demanda do prédio, considerando as condições de entrada, é apresentado na tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Volume de Armazenamento.

| Índice | Regime | Valor | Unidade |
|----------------|------------|-------|----------------|
| Varmazenamento | Turbulento | 10,79 | m ³ |
| Varmazenamento | Laminar 1 | 6,21 | m ³ |
| Varmazenamento | Laminar 2 | 6,65 | m ³ |

Fonte: Autor

4.5 Resultado – Etapa 5: Componentes

As características óticas das lentes estão explicitadas na tabela 6, que será apresentada a seguir.

Tabela 6. Eficiência Ótica

| Índice | Sigla | Valor | Unidade |
|------------------|-------------|-------|---------|
| Eficiência Ótica | η_{ot} | 85 | % |

Elaboração: Autor

Fonte: Kiribus et al, 2006

Além disso, foi dimensionado uma lente circular de raio de aproximadamente 8,65cm, além disso a célula onde será concentrado os raios solares possui 9mm de lado. Com isso temos o valor do fator de concentração calculado conforme a tabela 7 apresentada.

Tabela 7. Dados para Cálculo do Fator de Concentração

| Índice | Valor | Unidade |
|-----------------------|-------|-----------------|
| Área da lente | 234,9 | cm ² |
| Área da célula | 0,81 | cm ² |
| Fator de concentração | 290 | |

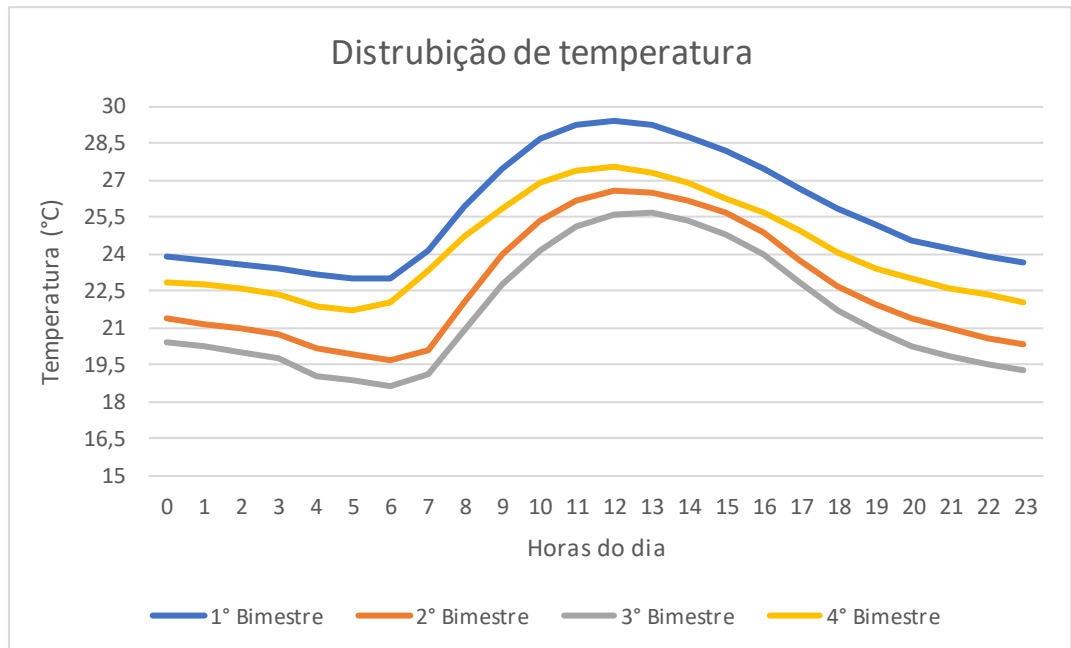
Fonte: Autor

Com isso encerramos essa etapa e podemos prosseguir para a próxima etapa de cálculos.

4.6 Resultado – Etapa 6: Temperatura e eficiência da célula

Nessa etapa é feito o cálculo da temperatura e da eficiência da célula, para isso foi necessário obter um histórico de temperaturas ambientes. Esse histórico foi conseguido com o Laboratório de Metrologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, que forneceu um histórico dos dados de temperatura hora a hora de todos os dias do ano, do ano de 2004 ao ano de 2005. Com isso foi feito uma média histórica de cada dia, construindo um compilado médio anula das temperaturas diárias, expostas hora a hora. Assim no gráfico 8 podemos ver o comportamento da temperatura média em cada época do ano, distribuídas hora a hora.

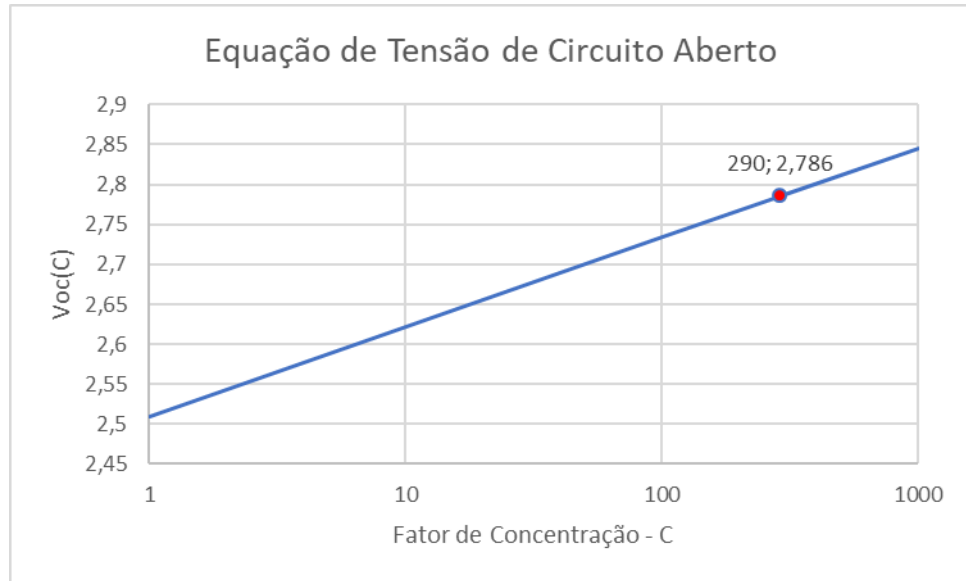
Gráfico 8. Distribuição de Temperatura Ambiente



Fonte: Autor

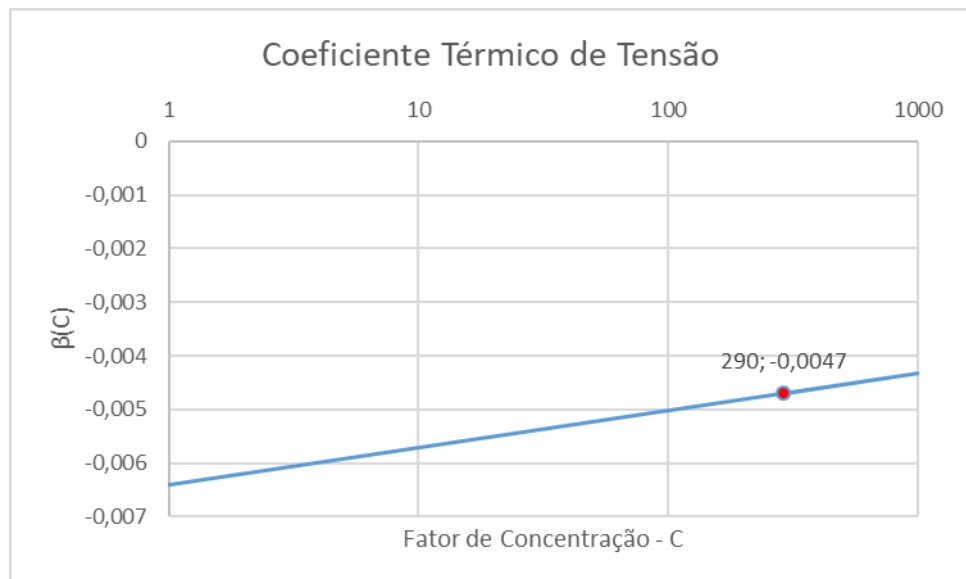
Feito o cálculo da distribuição média de temperatura ambiente, pode se iniciar a etapa de análise dos valores de tensão de circuito aberta e do coeficiente térmico de tensão, assim foram gerados os gráficos e analisados para o fator de concentração determinado na etapa 5. Pode ser feita essa análise nos gráficos 9 e 10 apresentados abaixo.

Gráfico 9. Equação de Tensão de Circuito Aberto



Fonte: Autor

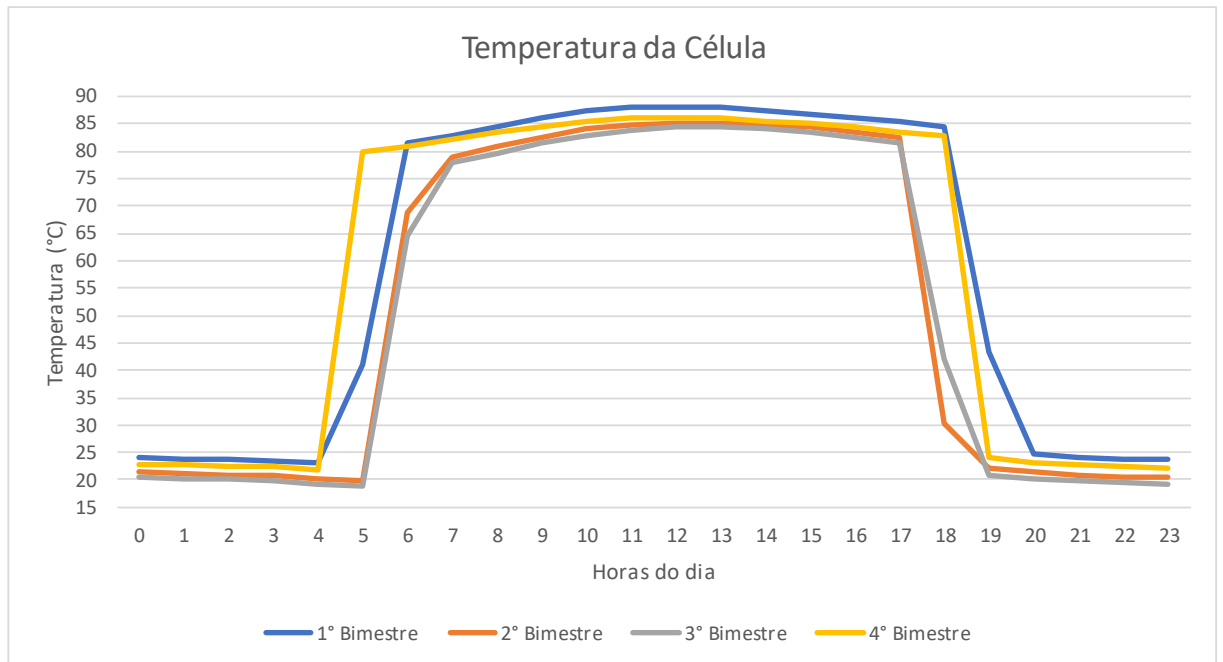
Gráfico 10. Coeficiente Térmico de Tensão



Fonte: Autor

Com isso conseguimos por completo determinar a temperatura na qual a célula atinge antes da passagem do fluido refrigerante, com isso geramos o seguinte gráfico 11.

Gráfico 11. Temperatura da Célula



Fonte: Autor

Além disso foi analisado o comportamento da variação da eficiência da célula ao longo do dia com essa distribuição de temperatura. Dessa forma foi necessário determinar a eficiência de referência, para isso utilizou-se de referência o artigo “*High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast*” de Pérez-Higueras et al. (2010). A tabela 8 abaixo mostra o modelo ao qual decidiu-se utilizar. Vale ressaltar que como no artigo a concentração referente a eficiência é de 300, no entanto como a concentração utilizada nesse estudo é de 290, julgou-se plausível utilizar o mesmo valor de eficiência.

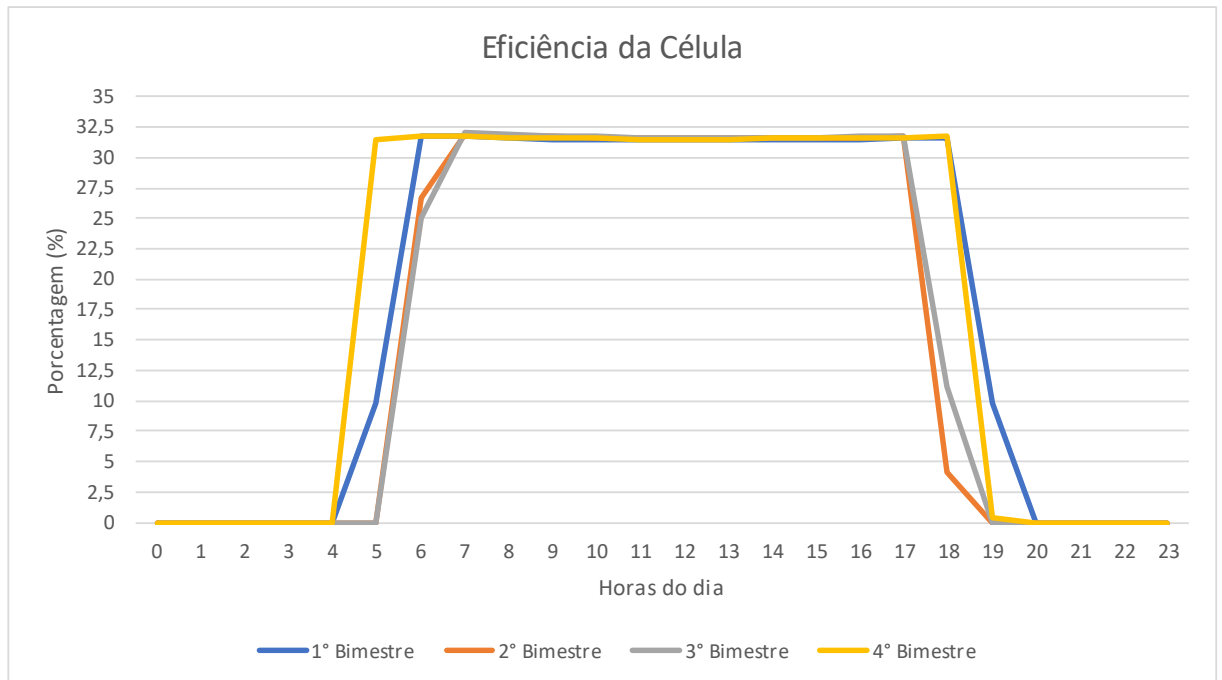
Tabela 8. Célula de Referência

| Fabricante | Tipo | Pais | Concentração | Descrição | Eficiência |
|------------|---------------|----------|--------------|-------------------|------------|
| Azur Space | Multijunction | Alemanha | 300 | www.azurspace.com | 35% |

Fonte: Azur Space

Com isso a distribuição de eficiência média da célula ao longo do dia em cada época do ano se deu da seguinte forma apresentada no gráfico 12.

Gráfico 12. Eficiência da Célula



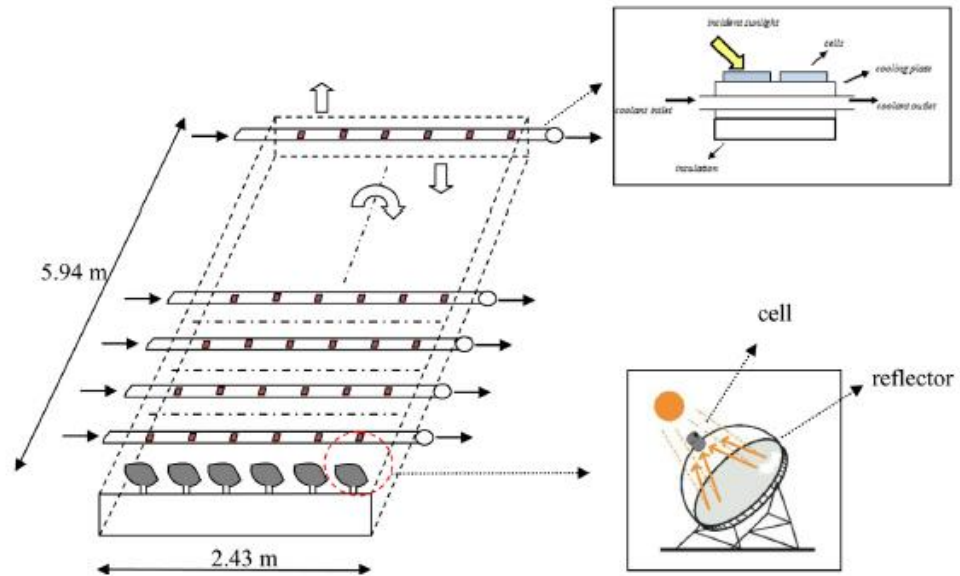
Fonte: Autor

O índice zero de eficiência nas primeiras horas assim como nas horas finais são iguais a zero pois nesse momento não há luz, deixando então de haver produção de energia elétrica por meio das células fotovoltaicas. O comportamento constante demonstrado pela eficiência faz sentido uma vez que pouco varia a temperatura da célula durante as horas em que há luz solar.

4.7 Resultado – Etapa 7: Energia Elétrica

O design do modelo pelo qual está sendo realizado este dimensionamento desse sistema está representado na figura 14.

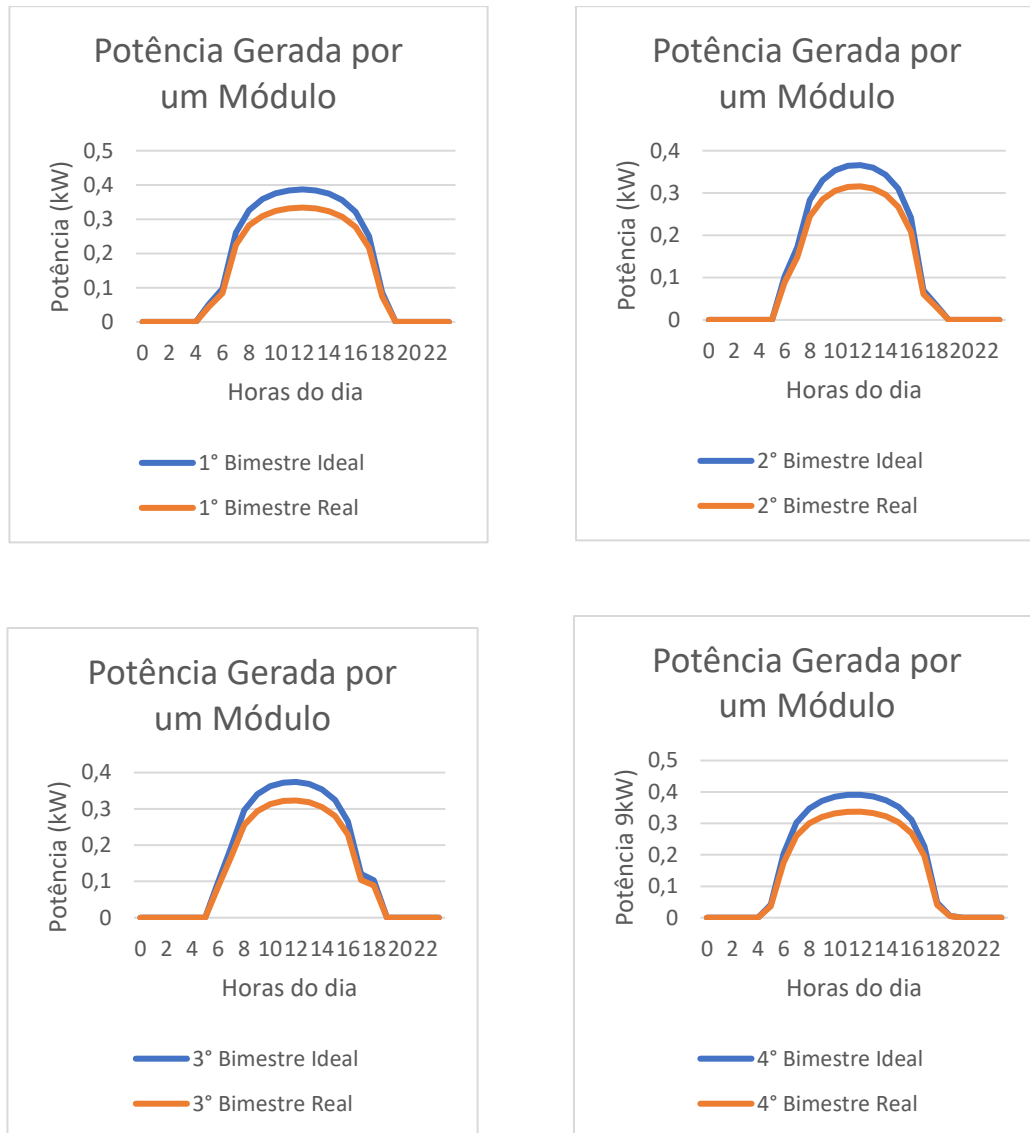
Figura 14. Esquematização do Dispositivo



Fonte: Renno 2013

Este configura um único módulo, que contém 90 células fotovoltaicas. Seguindo os cálculos mostrados no capítulo 4 de metodologias, na subseção 4.2.7 que trata do dimensionamento elétrico, calculamos tanto a potência ideal quanto a potência real na qual o módulo é capaz de produzir. No entanto, por não se tratar do foco desse estudo, não foi feita uma análise da demanda elétrica no qual o prédio poderia necessitar, sendo assim fazendo um comparativo apenas entre as potências ideal de entrada e depois considerando as perdas provenientes das ineficiências e das correntes parasíticas. Assim chegamos na análise gráfica exibida nos gráficos 13.

Gráfico 13. Potência Gerada no Módulo por Bimestre



Fonte: Autor

Os resultados obtidos estão conforme esperados, pois como há perdas é de se esperar que a quantidade real seja menor que a quantidade ideal. É também de se esperar que a maior quantidade de geração de potência dos painéis esteja presente nos horários onde há maior intensidade de irradiância solar, ou seja, nos horários mais próximos ao meio dia. Assim foram calculados o valor médio por dia de potência por metro quadrado conforme tabela 9.

Tabela 9. Potência Média produzida

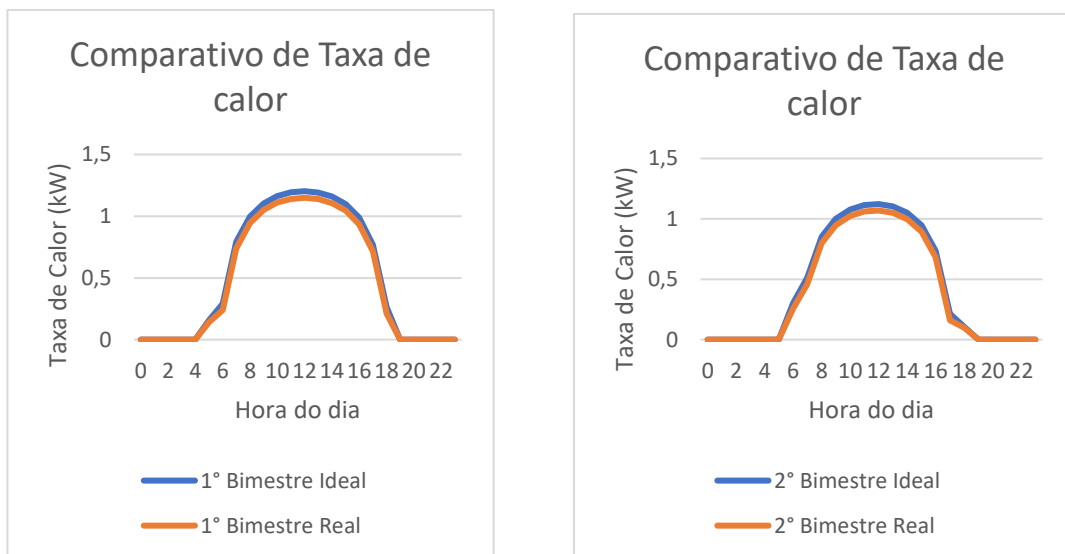
| Potência média diária por | | |
|---------------------------|----------------|--------------------|
| Bimestre | m ² | Unidade |
| 1° | 0,25 | kWh/m ² |
| 2° | 0,21 | kWh/m ² |
| 3° | 0,22 | kWh/m ² |
| 4° | 0,26 | kWh/m ² |

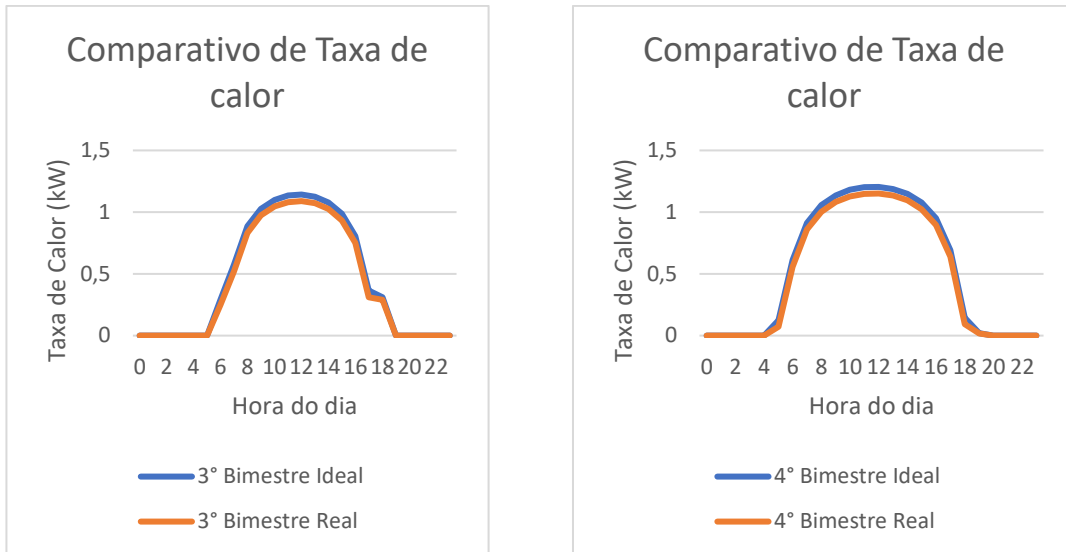
Fonte: Autor

4.8 Resultado – Etapa 8: Energia Térmica

Nessa etapa foi feita a análise do balanço de energia do sistema proposto. Assim como na parte do dimensionamento elétrico, nesse também foi feito uma análise da quantidade da taxa de calor ideal e depois, desconsiderando as perdas, foi determinada a quantidade da taxa de calor real. Dessa forma podemos fazer um comparativo entre ambos. Pode-se notar nessa análise que o resultado foi dentro do esperado uma vez que o ideal é maior que o real como é visto nos gráficos 14.

Gráfico 14. Comparativo da Taxa de Calor por Bimestre



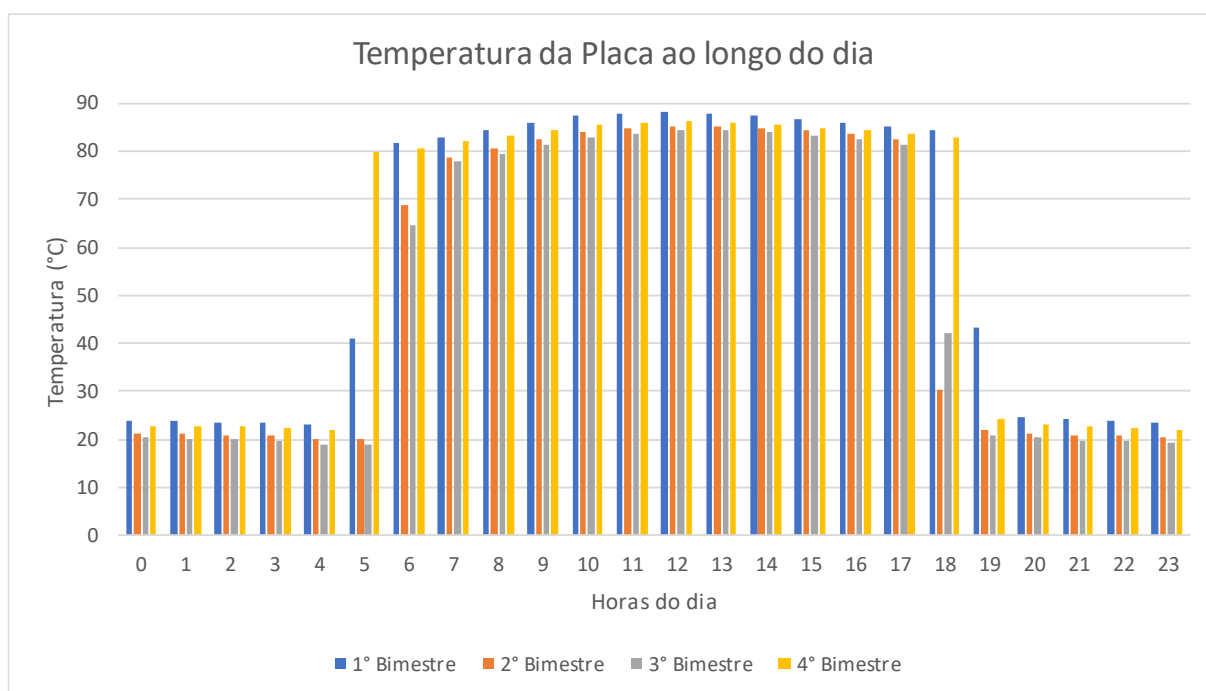


Fonte: Autor

Os resultados observados apresentam uma taxa de transferência de calor maior nos períodos onde há maior taxa de irradiação solar direta. Nas primeiras horas do dia a taxa de transferência de calor vai subindo gradualmente, atingindo seu pico nos horários próximos ao meio dia, e voltam a cair gradualmente a medida que o dia vai chegando ao seu fim.

Dando sequência ao dimensionamento, foi considerada que a temperatura da célula fosse a mesma da parte superior da placa que fica entre o a célula e o duto onde passa a água, uma vez que a célula possui uma espessura desprezível. Como foi dito no capítulo 4, o material escolhido para qual a placa fosse feita é de alumínio possuindo uma espessura de 4mm. Com isso temos que o comportamento da temperatura na porção inferior da placa, que está em contato com o duto, ao longo do dia está exposto no gráfico 15.

Gráfico 15. Temperatura da placa ao longo do dia – sem considerar passagem de fluido



Fonte: Autor

Pode notar que nas primeiras horas do dia a temperatura se mantém conforme a temperatura do ambiente, já quando o sol começa se expor, as temperaturas das células vão aumentando e consequentemente aumentando a temperatura da placa, já ao final do dia os valores tendem a cair.

4.9 Resultado – Etapa 9: Temperatura do Fluido

Com a temperatura da placa definida conseguimos calcular, por meio das equações de transferência de calor, a temperatura de saída do fluido. Lembrando que foi considerado desprezível para efeito de cálculo a espessura da tubulação. Assim temos compilados os dados de entrada na tabela 10 apresentada

Tabela 10. Dados de Entrada para cálculo da temperatura do fluido

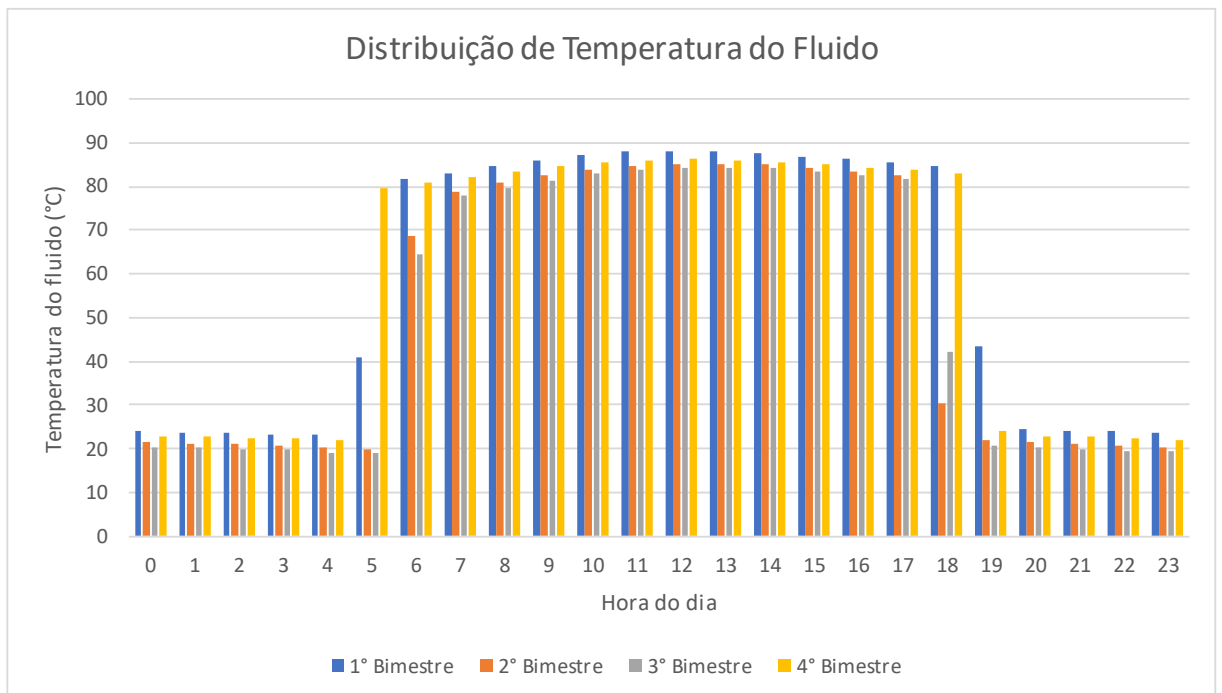
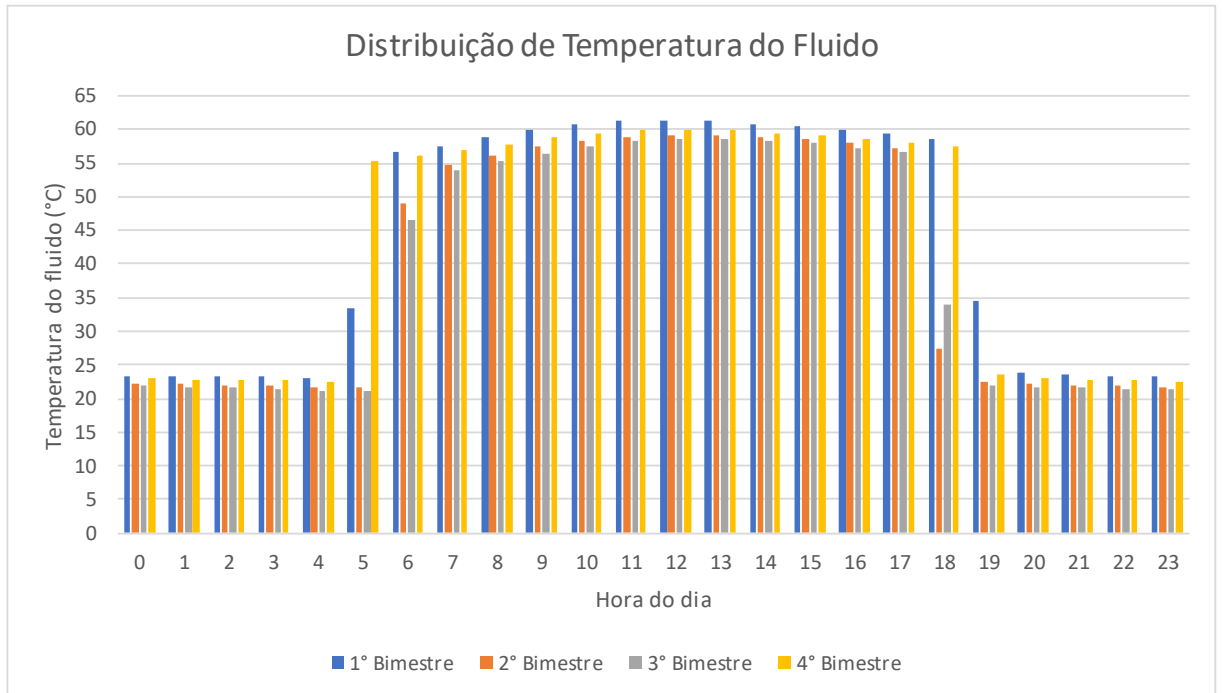
| Índice | Valor | Unidade |
|--|--------|---------|
| Vazão de um único tubo | 0,0046 | L/s |
| Vazão de um módulo (Regime Turbulento) | 0,055 | L/s |
| Vazão de um módulo (Regime Laminar 1) | 0,003 | L/s |
| Vazão de um módulo (Regime Laminar 2) | 0,03 | L/s |
| Temperatura de entrada do fluido | 23 | °C |

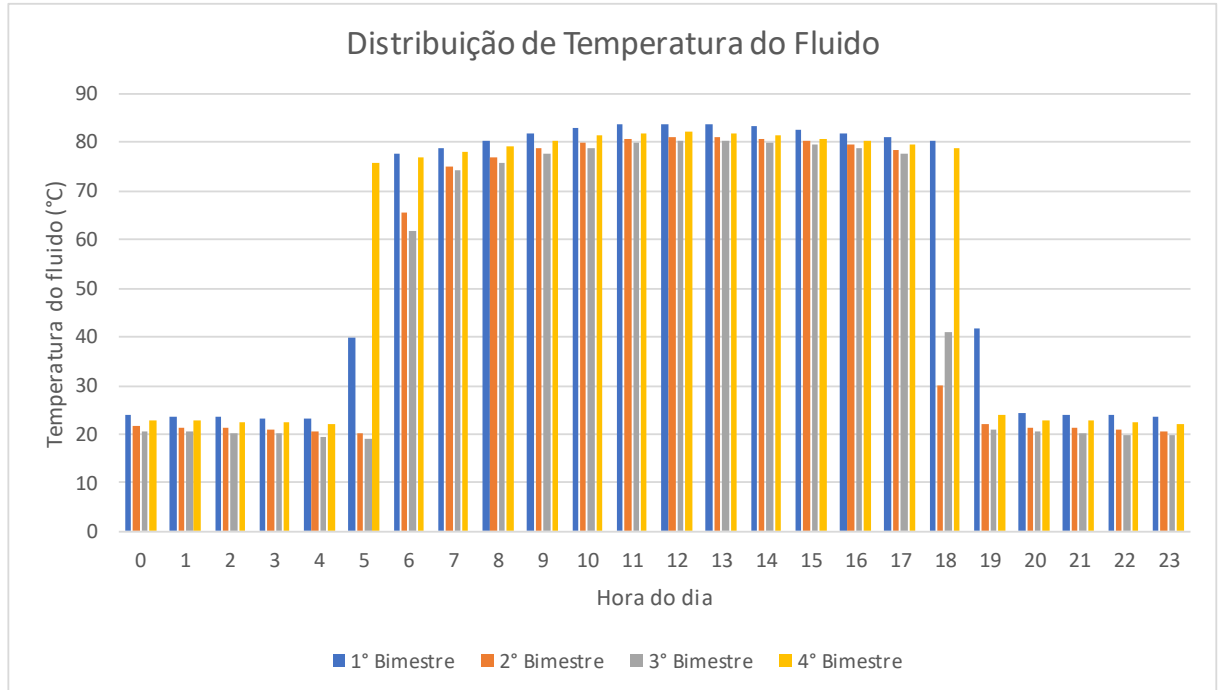
| | | |
|----------------------------|------|-------|
| Calor específico do fluido | 4200 | J/kgK |
| Diâmetro do tubo | 0,05 | m |
| Comprimento | 2,43 | m |

Fonte: Autor

Uma vez definidos os dados de entradas, foram colocadas em execução nas equações matemáticas, assim chegando a distribuição apresentada no gráfico 16 a seguir.

Gráfico 16. Distribuição de Temperatura do Fluido – Modelo de aquecimento de fluido – Regime Turbulento, Laminar 1 e Laminar 2 respectivamente.





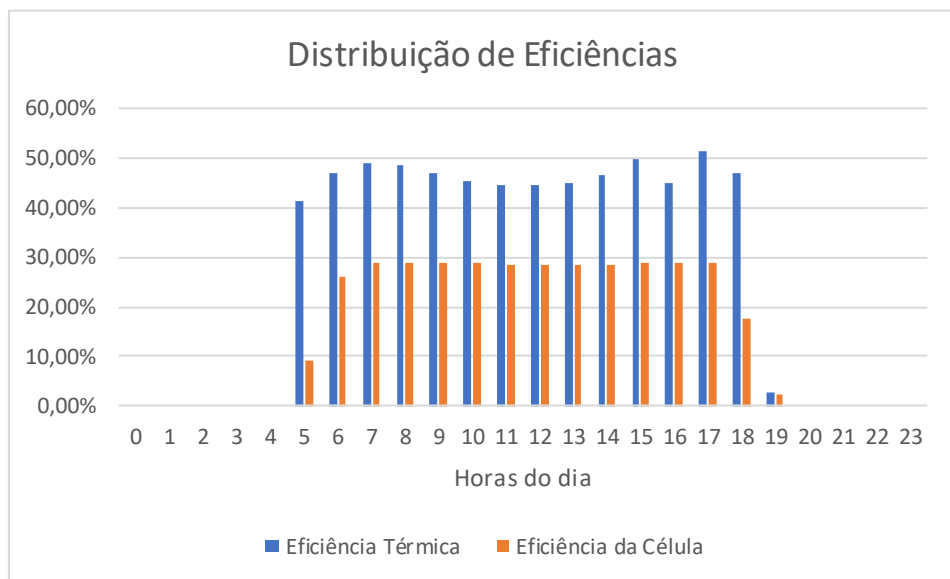
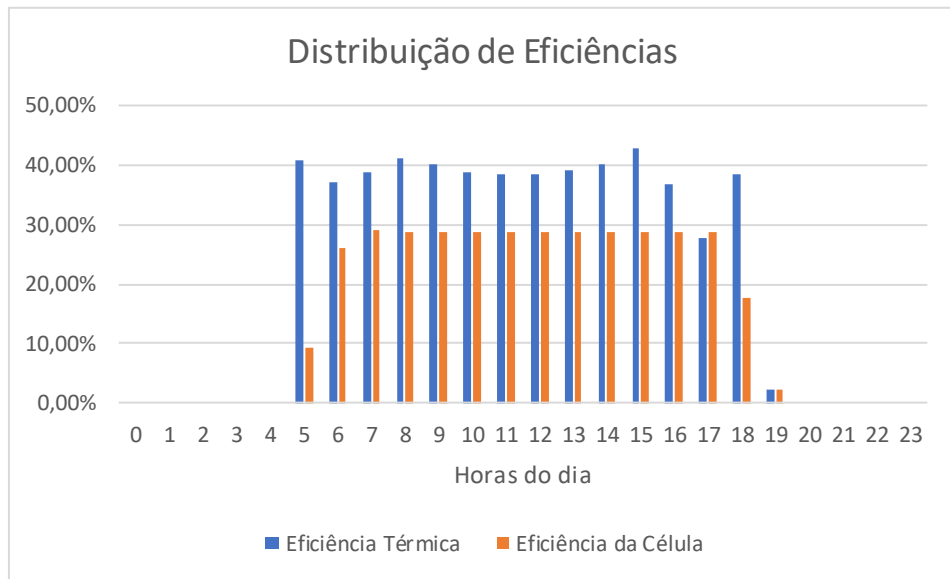
Fonte: Autor

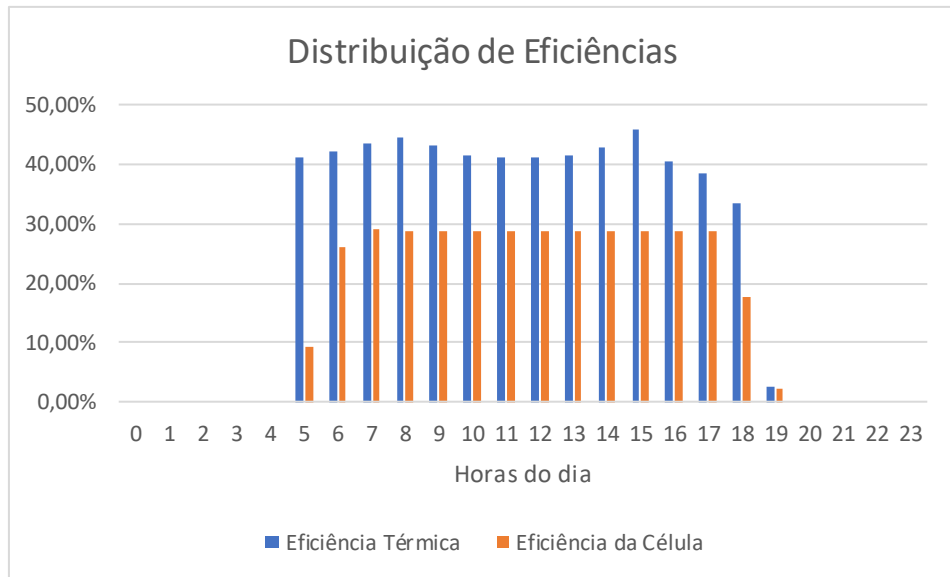
A apresentação desse gráfico, sugere uma análise em que sistema de aquecimento deverá ter um horário fixo de funcionamento, uma vez que será necessária a utilização de bombas para a circulação da água pelas tubulações que envolvem os módulos. E como para o acionamento dessas bombas requer uma demanda energética, vendo que a água só atinge valores consideráveis no período do dia, então esse deverá ser o horário de funcionamento da água. Além disso, segundo Mittelman et al (2009), a temperatura da placa é geralmente de 10-30°C mais alto do que a temperatura de saída do fluido refrigerante e comparando os dois gráficos 15 e 16 podemos notar esse comportamento.

4.10 Resultado Etapa 10

Na última etapa do dimensionamento é feito um estudo comparativo das eficiências do sistema que está sendo projetado. Essa análise foi feita utilizando uma média anual das diferenças de temperatura. O comparativo está exposto no gráfico 17 mostrado abaixo.

Gráfico 17. Distribuição de eficiências – Regime Turbulento, Regime Laminar 1 e Regime Laminar 2 respectivamente.





Fonte: Autor

Não foi calculada a eficiência elétrica por não fazer parte do objetivo desse trabalho. Foi considerado com zero as eficiências no horário onde o dispositivo estaria desligado. A eficiência tem um comportamento predominantemente constante, variando levemente nas primeiras horas de sol e nas horas finais do sol. Isso ocorre pelo fato da diminuição da irradiância solar, diminuindo assim a taxa de transferência de calor.

4.11 Dimensionamento Final

Até o momento neste capítulo foram feitas as análises de cada etapa do dimensionamento, culminando no fim com a temperatura de saída do fluido, assim como um comparativo das eficiências. Com esses resultados chegou-se aos seguintes dimensionamentos do sistema, mostrado na tabela 11, 12 e 13 abaixo.

Tabela 11. Dimensionamento – Regime Turbulento

| Índice | Valor | unidade |
|-----------------------------------|----------|----------------|
| Vazão de um módulo | 0,055 | L/s |
| Litros aquecidos em um dia/módulo | 1400,00 | L |
| Volume Consumido | 19440,00 | L |
| Quantidade de Módulos | 14 | Unidades |
| Área Disponível | 272,00 | m ² |

| | | |
|--------------------------------|--------|----------------|
| Área de um módulo | 14,43 | m ² |
| Área ocupada pelo sistema | 115,47 | m ² |
| Área ocupada pelo Reservatório | 4,52 | m ² |
| Altura do Reservatório | 2,38 | m ² |
| Volume do Reservatório | 10,79 | m ³ |

Fonte: Autor

Tabela 12. Dimensionamento – Regime Laminar 1

| Índice | Valor | unidade |
|-----------------------------------|----------|----------------|
| Vazão de um módulo | 0,003 | L/s |
| Litros aquecidos em um dia/módulo | 1400,00 | L |
| Volume Consumido | 19440,00 | L |
| Quantidade de Módulos | 18 | Unidades |
| Área Disponível | 272,00 | m ² |
| Área de um módulo | 14,43 | m ² |
| Área ocupada pelo sistema | 259,81 | m ² |
| Área ocupada pelo Reservatório | 4,52 | m ² |
| Altura do Reservatório | 1,37 | m ² |
| Volume do Reservatório | 6,21 | m ³ |

Fonte: Autor

Tabela 13. Regime Laminar 2

| Índice | Valor | unidade |
|-----------------------------------|----------|----------------|
| Vazão de um módulo | 0,03 | L/s |
| Litros aquecidos em um dia/módulo | 1400,00 | L |
| Volume Consumido | 19440,00 | L |
| Quantidade de Módulos | 13 | Unidades |
| Área Disponível | 272,00 | m ² |
| Área de um módulo | 14,43 | m ² |
| Área ocupada pelo sistema | 187,64 | m ² |
| Área ocupada pelo Reservatório | 4,52 | m ² |
| Altura do Reservatório | 1,46 | m ² |
| Volume do Reservatório | 6,65 | m ³ |

Fonte: Autor

5. CONCLUSÕES

Os desafios com pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas de energias renováveis, em particular, a energia solar, são inúmeros, no entanto, esforços combinados da iniciativa privada, junto ao governo e em parceria com os centros de pesquisa é possível obter resultados positivos.

Este estudo fez uma análise de um modelo de equipamentos, CPV/T, que visam integrar células fotovoltaicas com sistemas de aquecimento.

Neste capítulo são mostradas as conclusões do dimensionamento do sistema com base no potencial calculado para a região, reforçando também a ideia potencial energético solar à ser explorado no Brasil. Foi determinando, conforme proposto no objetivo apresentado no início do estudo, a quantidade de módulos necessária para satisfazer a demanda do prédio, assim como a área que esses ocupariam.

Vale lembrar que o volume aquecido por um módulo é referente somente ao momento de operação das bombas, considerando um horário de trabalho de (6:00 as 18:00) totalizando 12 horas de operação. Além disso também foi feita a aproximação da densidade da água sendo equivalente a 1000 kg/m^3 e que $1\text{m}^3=1000\text{L}$ logo 1 litro de água é igual a 1 kg de água.

Analisando comparativamente os três casos estudados, pode-se observar que quanto menor a vazão maior é a temperatura atingida pelo fluido, isso se deve ao fato do fluido estar passando mais tempo trocando calor, dessa forma obtendo uma temperatura de saída maior, no entanto maior será a quantidade de módulos necessários para atender a demanda do prédio. Além disso quanto mais módulos mais favorecida é a demanda elétrica pois maior será a quantidade de energia elétrica produzida, no entanto existe um limitante que é o espaço.

Dessa forma pode-se concluir que é possível fazer a instalação dos sistemas CPV/T, pois a área ocupada pelos mesmos nos três casos, além da área ocupada pelo reservatório é inferior a área disponível. Ou seja, é possível a instalação, respeitando o espaçamento entre os módulos de maneira a minimizar o sombreamento entre os mesmos, além de sobrar área para a caixa d'água comercial de 20.000L, que ocupa aproximadamente 7m^2 .

É importante também trazer uma comparação entre os resultados obtidos nesse estudo e no trabalho de referência do Lucas Araujo. Como condição inicial de problema para esse estudo foi acrescida em 50% a demanda em comparação com o estudo realizado pelo Lucas, portanto isso acarretaria num aumento do reservatório e seria necessário também aumentar a temperatura de saída do fluido. No entanto, observou-se uma diminuição no volume do reservatório nos dois casos laminares e um aumento razoavelmente pequeno no regime

turbulento (10,79; 6,65; 6,21m³ contra 7,98m³) numa escala bem menor que o aumento da demanda, proposto inicialmente. Isso se deve ao fato de um aumento expressivo da temperatura média no caso dos regimes laminares e um pequeno aumento no caso do regime turbulento (53,21°C; 75,13°C; 71,69°C contra 50°C), que com a temperatura média do fluido do reservatório térmico maior, será necessário menos água para misturar com a água proveniente da fonte fria (caixa d'água convencional) e atingir a temperatura ideal de consumo, dessa forma culminando num aumento menor do reservatório térmico em comparação com o a demanda.

Além disso é importante analisar qual dos 3 conjuntos melhor atenderia a demanda de um prédio residencial. Acredita-se que com o regime laminar 2, de intensidade um pouco mais elevada que o regime laminar 1 e menor que o regime turbulento seja o ideal, uma vez que ocupa um espaço onde ainda seriam possíveis as instalações de outros equipamentos de uso comum em prédios residências e também em comparação com o regime turbulento, que ocuparia a menor área devido a menor quantidade de painéis, supriria uma demanda maior no quesito elétrico.

Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros de maneira a dar continuidade ao trabalho aqui iniciado. A primeira sugestão é a uma estimativa da demanda energética total do prédio, bem como de uma curva média de carga elétrica, para então se fazer um dimensionamento completo do sistema de modo a atender tanto a demanda térmica quanto a elétrica. Outra sugestão é a realização da análise financeira do problema, realizar comparativos de investimento, quanto seria economizado e em quanto tempo o investimento seria pago. A última e mais complexa sugestão é a criação de um modelo em pequena escala onde pudessem ser colhidos dados experimentais e comparados com o teórico, dessa forma podendo expandir o protótipo para uma escala real.

REFERÊNCIAS

ARAB, Ra'ed; AWAD, Yousef; GRUMAZESCU, Mihai. Concentrated photovoltaic and thermal system. U.S. Patent Application n. 13/578,331, 6 dez. 2012.

ARAUJO, Lucas. Dimensionamento de um sistema de aquecimento solar para edifícios residenciais na cidade do Rio de Janeiro. Macaé: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

ARMSTRONG, S.; HURLEY, W. G. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, v. 30, n. 11-12, p. 1488-1495, 2010.

BEYER, Hans-Georg; RÜTHER, R.; OLIVEIRA, S. H. F. PV systems as option to assist Diesel based electricity supply in the Brazilian Amazon. *Renewables and Rural Electrification*, Ed. G. Chakravarthy, A. Shukla & A. Misra, p. 179-194, 2004.

BUONOMANO, Annamaria et al. A novel solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. Part 1: Design and simulation model. *Energy*, v. 61, p. 59-71, 2013.

COTAL, Hector et al. III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, v. 2, n. 2, p. 174-192, 2009.

COORD. TIBA. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. UFPE, 2001.

DINCER, Furkan. The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 1, p. 713-720, 2011.

Dimensões de caixa d'água. Disponível em: < <http://www.fortlev.com.br/> > acessado em 02/07/2018.

EL CHAAR, L. et al. Review of photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 15, n. 5, p. 2165-2175, 2011.

GARCÍA-DOMINGO, B. et al. Modelling the influence of atmospheric conditions on the outdoor real performance of a CPV (Concentrated Photovoltaic) module. *Energy*, v. 70, p. 239-250, 2014.

HAMID, Suhaila Abdul et al. An overview of photovoltaic thermal combination (PV/T combi) technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 212-222, 2014.

HASAN, M. Arif; SUMATHY, K. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 7, p. 1845-1859, 2010.

HAYSOM, Joan E. et al. Learning curve analysis of concentrated photovoltaic systems. *Progress in photovoltaics: Research and applications*, v. 23, n. 11, p. 1678-1686, 2015. MOKRI, Alaeddine; EMZIANE, Mahieddine. Concentrator photovoltaic technologies and market: a critical review. In: *World Renewable Energy Congress-Sweden*; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. Linköping University Electronic Press, 2011. p. 2738-2742.

HONSBURG, Christiana; BOWDEN, Stuart. PV education. ORG.(access May-July 2018) <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator>, 2014.

KABIR, Ehsanul et al. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 894-900, 2018.

KALOGIROU, Soteris A.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Yiannis. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy conversion and management*, v. 47, n. 18-19, p. 3368-3382, 2006.

KONG, Chengdong; XU, Zilin; YAO, Qiang. Outdoor performance of a low-concentrated photovoltaic–thermal hybrid system with crystalline silicon solar cells. *Applied energy*, v. 112, p. 618-625, 2013.

KRIBUS, Abraham et al. A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*, v. 47, n. 20, p. 3582-3590, 2006.

LI, Ming et al. The performance analysis of the trough concentrating solar photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 6, p. 2378-2383, 2011.

MCCARTHY, James; THATCHER, Jim. Visualizing new political ecologies: a critical data studies analysis of the World Bank's renewable energy resource mapping initiative. *Geoforum*, 2017.

MARTINS, F. R. et al. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: resource assessment. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2853-2864, 2008.

MITTELMAN, Gur et al. Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Solar Energy*, v. 83, n. 8, p. 1322-1334, 2009.

SHARAF, Omar Z.; ORHAN, Mehmet F. Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I–Fundamentals, design considerations and current technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 1500-1565, 2015.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, Surendra. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1513-1524, 2011.

PÉREZ-HIGUERAS, P. et al. High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 4, p. 1810-1815, 2011

PHILIPPS, Simon P. et al. Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology. NREL (National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States)), 2015.

RENNO, Carlo; PETITO, Fabio. Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application. *Energy and buildings*, v. 62, p. 392-402, 2013.

ROSELL, J. I. et al. Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, v. 46, n. 18-19, p. 3034-3046, 2005.

SARVER, Travis; AL-QARAGHULI, Ali; KAZMERSKI, Lawrence L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 698-733, 2013.

SCHMALENSEE, Richard. *The future of solar energy: an interdisciplinary MIT study*. Energy Initiative, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

SIMIONI, Tássio. *O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, fevereiro 2017.

STEINER, Myles A. et al. Temperature-dependent measurements of an inverted metamorphic multijunction (IMM) solar cell. In: *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE*. IEEE, 2011. p. 002527-002532.

TONUI, J. K.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable energy*, v. 32, n. 4, p. 623-637, 2007.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Yiannis. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar energy*, v. 81, n. 9, p. 1117-1131, 2007.

TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 3, p. 1383-1398, 2012.

ZONDAG, H. A. et al. *PVT roadmap. A European guide for the development and market introduction of PVT technology*. Energy research Centre of the Netherlands ECN, 2005.

ZHANG, Xingxing et al. Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 599-617, 2012.

ZHAO, Jiafei et al. Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 2, p. 1343-1353, 2011.