



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB**

**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS - CEAR**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - CGEER**



---

**Dimensionamento de um Sistema Termosolar Utilizando  
Coletores Planos: Estudo de Caso em uma Indústria  
Têxtil em João Pessoa/PB.**

---

**Aluna: Rafaela Ramos Barbosa  
Matrícula 11410427**

**Prof.<sup>a</sup>. Monica Carvalho  
Orientadora**

Maio/2017,  
João Pessoa – PB.

**RAFAELA RAMOS BARBOSA**

---

**Dimensionamento de um Sistema Termosolar Utilizando  
Coletores Planos: Estudo de Caso em uma Indústria  
Têxtil em João Pessoa/PB.**

---

Trabalho apresentado à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências para conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis.

Prof<sup>a</sup>. Monica Carvalho  
Orientadora

Maio/2017,  
João Pessoa – PB.

**RAFAELA RAMOS BARBOSA**

**Dimensionamento de um Sistema Termosolar Utilizando Coletores  
Planos: Estudo de Caso em uma Indústria Têxtil em João Pessoa/PB.**

Trabalho apresentado à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências para conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. PhD Monica Carvalho (Orientadora)  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

---

Prof. Dr. Rogério Pinheiro Kluppel  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

---

Prof. Dr. Márcio Rodrigo de Araújo Souza  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

*A Deus, que com sua infinita misericórdia me permitiu obter mais essa vitória. A Ele toda honra e toda glória.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora, por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, nas tomadas de decisões e principalmente me concedendo força e fé na consolidação desta conquista.

Aos meus pais Alaíde Ramos e Israel Barbosa, pelo amor, carinho e compreensão em todos os momentos. Por serem a minha fonte de força de vontade, por sempre me inspirarem a lutar.

Aos meus irmãos, pelo apoio e incentivo ao longo dessa jornada. Em especial a minha irmã Israela que dividiu comigo o peso de todas as minhas batalhas.

A toda a minha família, por compreenderem as minhas ausências e pelo apoio incondicional dado em cada passo. Em especial a minha “primãe” Ivone Ramos, que me acolheu em sua casa no início da graduação e desde então foi minha mãe quando a minha não pôde se fazer presente.

Aos meus tios, José Lins (*in memoriam*) e Ana Lins, meus segundos pais, por acreditarem em meus sonhos e por nunca terem deixado de me apoiar.

Ao meu namorado Emerson Cavalcante, por todo carinho e suporte durante esse período, o qual foi crucial para enfrentar cada desafio.

A professora Monica Carvalho, o meu imenso agradecimento pela orientação neste trabalho, pela inspiração, contribuição e incentivo durante a graduação.

Aos professores Rogério Kluppel e Márcio Souza, pela disponibilidade em ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Zaqueu Ernesto da Silva, agradeço a confiança atribuída a mim desde o início da graduação, por ser fonte de incentivo e apoio, aspectos estes que foram de fundamental importância para conclusão do curso.

As professoras Cristiane Kelly, Flávia Medeiros, Kelly Cristiane, Pollyana Caetano e Silvia Layara pela amizade e compreensão, sempre acreditando no meu potencial e me impulsionando a fazer o melhor.

Aos professores José Maurício Gurgel, Marco Antônio Wanderley e Romberg Gondim, pelo incentivo contínuo que sempre recebi de vocês.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis pela dedicação e excelência na qualidade de ensino, mesmo quando eu era a única aluna da "turma". Muito obrigada! Vocês são minhas maiores inspirações para seguir a carreira acadêmica.

Aos meus amigos Mayslla Maciel, Syndylla Jully, Ana Raquel, Raíssa Moura, Carol Andrade, Mônica Alencar, Pablo Hasmuller, Luana Lima, Nkarthe Guerra, que sempre estiveram presentes nas batalhas do meu dia-a-dia. Meu muito obrigada!

A todos os amigos que fiz durante o curso, que não são poucos, sempre me dispondo do seu tempo e compartilhando conhecimento e experiências de vida. Em especial, agradeço a Rosa, Tássia, Andressa, Aline, Gabriela, Maria Eduarda, Camilla, Louise, Diego, Edvaldo e Filipe, por estarem presentes nas maiores e mais intensas lembranças vividas nos últimos 5 anos.

Aos funcionários do Laboratório de Energia Solar – LES, em especial a Seu Antônio (*in memoriam*), Lia, Eliane e Tereza, agradeço pela amizade e carinho diário.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desse sonho, meu eterno agradecimento!

## RESUMO

O Brasil é um país privilegiado quando se trata do potencial de exploração de energias renováveis, com destaque para o potencial solar da região nordeste, porém ainda é pequena a expressividade da energia solar na matriz energética brasileira. Uma das formas mais disseminadas da energia solar é a sua utilização para aquecimento de água doméstica a partir do uso de coletores solares planos. Tendo em vista a necessidade de diversificação da matriz energética nacional, da racionalização do uso da eletricidade, da busca de eficiência energéticas nos vários setores de atividade e do alto consumo energético do setor industrial para geração de calor de processo, o objetivo desse trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica dos principais conceitos físicos relacionados à energia solar, dimensionar um sistema termosolar utilizando coletores planos para atender a demanda de água quente (10m<sup>3</sup>/dia a 60°C) de processos de uma indústria têxtil localizada em João Pessoa-PB, verificar sua viabilidade técnica a partir do cálculo das perdas térmicas nos principais elementos e da determinação da fração solar do sistema proposto. O sistema final constituiu-se de 65 coletores planos e 8 boilers de 2 m<sup>3</sup>. O sistema proposto apresentou uma fração solar mínima de 73% no mês de menor incidência de radiação solar (junho), o que permite concluir que sistema é tecnicamente viável.

**PALAVRAS CHAVES:** Energia solar, indústria, coletores, calor de processo.

## ABSTRACT

Brazil is a privileged country when it comes to exploitations potential of renewable energies, highlighting the solar potential of the northeast region, but the expressiveness of solar energy in the Brazilian energy matrix is still small. One of the most widespread forms of solar energy is its use for domestic water heating from the use of flat solar collectors. Considering the need to diversify the national energy matrix, rationalize the use of electricity, the search for energy efficiency in the various sectors of activity and the high energy consumption of the industrial sector for the generation of process heat. The goals of this paper is to present a bibliographical review of the main physical concepts related to solar energy, size up a solar thermal system using flat plate the hot water demand ( $10\text{m}^3 / \text{day}$  at  $60^\circ \text{C}$ ) of a textile industry located in João Pessoa-PB, to check it technical feasibility from the calculation of the losses in the main elements and the determination of the solar fraction of the proposed system. The final system consisted of 65 flat collectors and 8 boilers of  $2 \text{ m}^3$ . The proposed system presented a minimum solar fraction of 73% in the month of lowest solar radiation incidence (June), which allows to conclude that the system is technically viable.

**KEYWORDS:** Solar Energy, industry, collector, process heat.

# Sumário

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Fundamentos da Radiação Solar .....	19
3.1.1 Conceitos fundamentais.....	20
3.1.2 Radiação de um corpo negro.....	21
3.1.3 Propriedades radioativas .....	23
3.1.3.1 Emissividade ( $\epsilon$ ).....	23
3.1.3.2 Absortividade ( $\alpha$ ), refletividade ( $\rho$ ) e transmissividade ( $\tau$ ).....	24
3.1.3.3 Lei de Kirchhoff.....	26
3.2 Sistemas de Aquecimento Solar (SAS).....	28
3.2.1 Coletor solar .....	30
3.2.1.1 Coletor solar plano fechado.....	31
3.2.1.1.1 Placa absorvedora e arranjo de tubos .....	32
3.2.1.1.2 Cobertura de vidro e vedação.....	32
3.2.1.1.3 Caixa de contenção e isolante térmico .....	33
3.3.2 Reservatório térmico .....	34
3.3.3 Ligações hidráulicas.....	35
3.3.4 Posição dos coletores solares .....	36
3.3.4.1 Geometria solar .....	36
3.2.4.1.1 Declinação solar ( $\delta$ ).....	37
3.2.4.1.2 Ângulo horário ( $\omega$ ).....	38
3.2.4.1.3 Ângulo zenital ( $\theta_z$ ).....	38
3.2.4.1.4 Azimute solar ( $\gamma$ ) e azimute de superfície ( $\gamma_s$ ).....	39
3.2.4.1.5 Ângulo de incidência da radiação solar direta ( $\theta$ ).....	39
3.3.4.1.6 Inclinação do coletor ( $\beta$ ).....	40

3.3	Potencial Solar do Brasil .....	41
3.3.1	Cenário energético atual.....	43
3.3.2	Potencial de aplicação solar no setor industrial.....	45
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1	Caracterização da Indústria .....	49
4.1.1	Demanda de Água quente.....	50
4.1.2	Características Climáticas .....	51
4.2	Estimativa da Energia Solar Disponível.....	52
4.3	Dimensionamento do SAS .....	54
4.3.1	Volume de Armazenamento.....	54
4.3.2	Demanda Diária de Energia Útil ( $E_{\text{útil}}$ ).....	55
4.3.3	SAS Proposto sem perdas .....	55
4.3.4	Cálculo das perdas térmicas do SAS proposto .....	59
4.3.4.1	Energia Útil Coletada .....	59
4.3.4.2	Perdas no Armazenamento .....	65
4.3.5	Fração Solar do SAS .....	66
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
5.1	Estimativa da Energia Solar Disponível.....	67
5.2	Dimensionamento do SAS .....	68
5.2.1	Volume de armazenamento .....	68
5.2.2	Demanda Diária de Energia Útil ( $E_{\text{útil}}$ ).....	68
5.2.3	Escolha do Coletor Solar.....	70
5.3	SAS proposto sem perdas.....	71
5.4	Cálculo das perdas do SAS proposto .....	72
5.4.1	Energia Útil Coletada .....	72
5.4.2	Perdas no Armazenamento.....	75
5.5	Fração Solar do SAS .....	79
6.	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83
	APÊNDICE A – Rotina de cálculo para estimativa da área coletora (com dados anuais) desenvolvida no EES.....	89
	APÊNDICE B – Rotina de cálculo para estimativa da fração solar mensal desenvolvida no EES.....	90

APÊNDICE C – Rotina de cálculo para estimativa das perdas nos coletores desenvolvida no MATLAB .....	91
APÊNDICE D – Rotina de cálculo para estimativa das perdas no Armazenamento desenvolvida no MATLAB .....	98
APÊNDICE F – Valores Médios Mensais Obtido no Cálculo da Energia Útil Coletada e da Energia Perdida no Armazenamento .....	99
ANEXO A – Irradiância Médias Horárias Mensais coletadas no Software RADIASOL2 .....	123

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – [a] Coletor solar plano fechado (Esfera Energias Solar, 20--); [b] Coletor de tubos de vácuo (Esfera Energias Solar, 20--); [c] Concentrador cilíndrico parabólico (SEBASTIAN, 2015). .....	18
<b>Figura 2</b> - Distribuição espectral da radiação solar (Traduzido de ÇENGEL, 2009)....	20
<b>Figura 3</b> - Espectro da radiação eletromagnética (INCROPERA & DE WITT, 2008). 21	
<b>Figura 4</b> - Emitância espectral do corpo negro (Traduzido de ÇENGEL, 2009). .....	22
<b>Figura 5</b> - Comparação da potência emissiva de uma superfície real, uma superfície cinza e um corpo negro a mesma temperatura (Traduzido de ÇENGEL, 2009). .....	24
<b>Figura 6</b> - Absorção, reflexão e transmissão da irradiação em um material semitransparente (Traduzido de ÇENGEL,2009). .....	25
<b>Figura 7</b> - Troca radiante entre um pequeno corpo dentro de uma grande cavidade fechada (ÇENGEL, 2009). .....	27
<b>Figura 8</b> - Principais elementos construtivos de um coletor solar plano fechado (Adaptado de Indiamart, 20--). .....	31
<b>Figura 9</b> - Reservatório térmico e seus principais componentes (Adaptado de Ótima Rio,20--). .....	34
<b>Figura 10</b> - Trajetória da Terra em relação ao Sol (Ciência Viva, 20--). .....	37
<b>Figura 11</b> - Ângulo Zenital (ABRAVA, 2008). .....	38
<b>Figura 12</b> - Azimute de superfície (Adaptado de ABRAVA, 2008). .....	39
<b>Figura 13</b> - Ângulo de incidência da radiação em uma superfície (ABRAVA, 2008)..	40
<b>Figura 14</b> - Ângulos que definem a posição de uma superfície em relação à radiação solar (Adaptado de LISBOA, 2010). .....	40
<b>Figura 15</b> - Distribuição da Radiação Solar média anual no território Brasileiro (Wh/m <sup>2</sup> ) (COLE & PEREIRA, 1998). .....	42
<b>Figura 16</b> - Oferta mundial de energia por fonte (Total: 13.371x10 <sup>6</sup> tep) - Ano base 2014 (BRASIL, 2015a). .....	43
<b>Figura 17</b> - Oferta Interna de Energia no Brasil (%)- Ano base 2014 (BRASIL, 2015b). .....	44
<b>Figura 18</b> – Roteiro para execução de projeto de um SAS.....	49
<b>Figura 19</b> – Demanda mensal de água quente da indústria têxtil em análise. ....	51
<b>Figura 20</b> – Esquema de Funcionamento Proposto do SAS.....	56
<b>Figura 21</b> – Estratificação do Tanque de Armazenamento (Adaptado de DOMÍNGUEZ, 2009). .....	57
<b>Figura 22</b> – Fluxograma para o cálculo da energia útil coletada (Adaptado de KLUPPEL, 1985). .....	60
<b>Figura 23</b> - Irradiâncias Médias Diárias Mensais no plano inclinado (16°N) em João Pessoa. ....	68

<b>Figura 24</b> – Demanda de energia útil mensal para aquecimento da água necessária (10000 litros/dia).....	69
<b>Figura 25</b> – Fração Solar Média Mensal Calculado no EES.....	72
<b>Figura 26</b> – Parcelas de Energia Coletada e Perdida em Relação a Energia Incidente na Área Coletora (MJ).....	73
<b>Figura 27</b> – Comportamento Mensal das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida do SAS.....	74
<b>Figura 28</b> – Relação do Comportamento Horário da Energia Útil Coletada, da Energia Armazenada e da Demanda de Energia.....	77
<b>Figura 29</b> – Comportamento diário Mensal da Energia Útil Coletada, da Energia Ganha no Armazenamento e da perda de energia em relação a demanda.....	78
<b>Figura 30</b> – Fração Solar final inicial e Perdas Totais do Sistema.....	80

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Classificação dos tipos de coletores de acordo com as faixas de temperaturas. .....	19
<b>Tabela 2</b> – Sistemas de aquecimento solar: principais tecnologias e aplicações.....	28
<b>Tabela 3</b> - Classificação do SAS de água. ....	29
<b>Tabela 4</b> - Consumo energético por setor de consumo (Total: 305,6 x 10 <sup>6</sup> tep). ....	45
<b>Tabela 5</b> - Consumo percentual por fonte do setor industrial.....	46
<b>Tabela 6</b> - Dados médios mensais para a cidade de João Pessoa .....	51
<b>Tabela 7</b> - Valores de Irradiação Média Mensal (kWh/m <sup>2</sup> dia).....	53
<b>Tabela 8</b> - Valores de Irradiação Média Mensal para uma superfície inclinada de 16°N (kWh/m <sup>2</sup> dia). ....	53
<b>Tabela 9</b> - Valores de Irradiâncias Médias Diárias Mensais (W/m <sup>2</sup> ) no plano inclinado (16°N) para cidade de João Pessoa.....	67
<b>Tabela 10</b> – Demanda Mensal de Energia para Aquecimento de Água (10000 litros/dia). .....	69
<b>Tabela 11</b> – Especificações Técnicas: Coletor Solar Plano S-81 da Solar Tech. ....	70
<b>Tabela 12</b> – Resultado do sistema de equações para os valores médios anuais. ....	71
<b>Tabela 13</b> – Resultado do sistema de equações para os valores médios mensais.....	71
<b>Tabela 14</b> – Valores médios anuais obtidos no cálculo da energia útil coletada Q <sub>tot</sub> (MJ). .....	72
<b>Tabela 15</b> – Valores Médios Mensais das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida.....	74
<b>Tabela 16</b> – Especificações Técnicas do Tanque de Armazenamento. ....	75
<b>Tabela 17</b> - Valores Médios horários Anuais das Perdas no Armazenamento.....	76
<b>Tabela 18</b> – Valores Médios Diários Mensais das Perdas no Armazenamento. ....	77
<b>Tabela 19</b> – Valores Percentuais da Fração Solar final e das Perdas Totais do SAS....	79
<b>Tabela F 1</b> - Valores médios ensais Resultantes do cálculo da energia útil coletada Q <sub>u</sub> (MJ): Janeiro.....	99
<b>Tabela F 2</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Q <sub>u</sub> (MJ): Fevereiro.....	100
<b>Tabela F 3</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Q <sub>u</sub> (MJ): Março.....	101
<b>Tabela F 4</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Q <sub>u</sub> (MJ): Abril.....	102
<b>Tabela F 5</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Q <sub>u</sub> (MJ): Maio.....	103
<b>Tabela F 6</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Q <sub>u</sub> (MJ): Junho.....	104

<b>Tabela F 7</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Julho.....	105
<b>Tabela F 8</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Agosto.....	106
<b>Tabela F 9</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Setembro.....	107
<b>Tabela F 10</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Outubro.....	108
<b>Tabela F 11</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Novembro.....	109
<b>Tabela F 12</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Dezembro.....	110
<b>Tabela F 13</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Janeiro.....	111
<b>Tabela F 14</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Fevereiro.....	112
<b>Tabela F 15</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Março.....	113
<b>Tabela F 16</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Abril.....	114
<b>Tabela F 17</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Maio.....	115
<b>Tabela F 18</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Junho.....	116
<b>Tabela F 19</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Julho.....	117
<b>Tabela F 20</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Agosto.....	118
<b>Tabela F 21</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Setembro.....	119
<b>Tabela F 22</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Outubro.....	120
<b>Tabela F 23</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Novembro.....	121
<b>Tabela F 24</b> - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Dezembro.....	122

---

# CAPÍTULO I

---

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se buscado cada vez mais um melhor aproveitamento dos recursos naturais; tal busca tem sido impulsionada globalmente por campanhas de conscientização ambiental e incentivos à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, devido a preocupações com as mudanças climáticas (CARVALHO; SERRA; LOZANO, 2011). A otimização do setor energético, nas etapas de geração, distribuição, transmissão e até integração, possui grande responsabilidade e contribuição para ajudar a alcançar os objetivos de redução de emissões e diminuir dependência em combustíveis fósseis.

O desenvolvimento econômico de uma nação está diretamente associado à disponibilidade e a qualidade dos seus recursos energéticos, logo a aspiração ao desenvolvimento da maioria da população mundial tende a aumentar a demanda energética tornando assim cada vez mais necessária a eficiência no uso da energia e a busca por fontes alternativas e renováveis (GOLDEMBERG & CHU, 2010).

As energias renováveis se apresentam como uma alternativa aos convencionais sistemas geradores de energia. A localização geográfica do Brasil o torna um dos países com maior potencial de exploração em energias renováveis, com destaque em algumas regiões para a energia solar (BRASIL, 2008).

O setor industrial brasileiro é responsável por cerca de um terço de toda a demanda energética nacional (BRASIL, 2014). Grande parte daquela energia é direcionada para os processos industriais, seja na utilização de energia elétrica como também na geração de energia térmica, também chamado calor de processo. Em grande parte dos processos industriais são necessárias temperaturas entre 60 a 250°C (SILVA, 2014). Por meio da utilização de tecnologias já bem consolidadas, coletores e concentradores solares, é possível atingir esses níveis de temperaturas através do uso da energia solar.

Os sistemas solares térmicos industriais são capazes de suprir total ou parcialmente demanda de calor dependendo das condições estabelecidas no projeto. O primeiro passo para estabelecer tais condições é a determinação das temperaturas necessárias seguido da determinação da localização da instalação, análise das condições

climáticas local, área para instalação do sistema, investimento disponível e escolha da tecnologia (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

Atualmente já existem em funcionamento sistemas solares térmicos industriais instalados nos tetos e em terrenos disponíveis de indústrias europeias com cerca de 10.000m<sup>2</sup>. Instalações em larga escala reduzem os custos financeiros do sistema, de tal forma que um sistema térmico solar industrial pode se apresentar, em médio prazo, economicamente viável e competitivo com instalações convencionais que usam combustíveis fósseis (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

## **2. OBJETIVOS**

### **GERAL**

Projetar e analisar tecnicamente uma instalação solar térmica para a produção de calor de processo em uma indústria têxtil de médio porte na cidade de João Pessoa.

### **ESPECÍFICOS**

Realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos físicos relevantes a aplicação da energia solar térmica e sobre seu potencial de aplicação na indústria no Brasil e no mundo.

Escolher, descrever e seguir uma metodologia de cálculo e dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de baixas temperaturas para aplicações industriais.

Determinar a fração solar de um sistema solar térmico dimensionado para uma indústria têxtil de médio porte localizada na cidade de João Pessoa, Paraíba.

---

## CAPÍTULO II

---

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sol é a principal fonte de energia da Terra. A radiação proveniente do sol sempre esteve presente na vida do planeta e é fundamental para o desenvolvimento da vida, pois é responsável por processos naturais, tais como: a formação de padrões climáticos; os movimentos da atmosfera; os ciclos biogeoquímicos e a fotossíntese (ALVES, 2015). No entanto, com o passar dos tempos e com a evolução da civilização humana houve também uma evolução nas maneiras de exploração deste recurso natural.

O aproveitamento da energia solar pode ser realizado para diversos fins, e os seus sistemas são geralmente classificadas como passivos, ativos e fotovoltaicos, de acordo com a sua aplicação. Os sistemas passivos estão relacionados com o ambiente construído, e não fazem uso de meios mecânicos. As aplicações da energia solar ativa são as que buscam a captação da energia térmica por meio de coletores solares, e podem empregar componentes mecânicos ativos, para coletar e transportar calor. Os fotovoltaicos convertem diretamente a energia solar em eletricidade através do efeito fotoelétrico (GOLDEMBERG & CHU, 2010; HODGE, 2011). Este trabalho concentra-se em sistemas térmicos solares ativos.

Em 28 de Abril de 1891 o Americano Clarence M. Kemp registrou no Departamento de Patentes dos Estados Unidos, com o número 451,384, a primeira patente mundial para um sistema de aquecimento solar (KEMP, 1891). O objetivo da invenção de Kemp era aquecer água para banho e fins domésticos, por meio da exposição aos raios solares. O equipamento criado consistiu de um tanque de água dentro de uma caixa de vidro, e de tubos que conduziam a água aquecida de um tanque a outro, de onde a água aquecida seria direcionada para o consumo.

Os sistemas de aproveitamento da energia solar térmica desde então vem sendo aprimorados por meio de pesquisas e do desenvolvimento de novos materiais. A cada dia a utilização de sistemas solares de aquecimento de água se tornam mais competitivos quando comparados, por exemplo, com sistemas de aquecimento de água a gás ou elétricos no Brasil, onde na maior parte do ano os dias são ensolarados na grande maioria da sua extensão territorial (MENEZES, 2013).

Devido ao grande número de pesquisas desenvolvidas pelo mundo com o objetivo de melhorar os processos de captação, conversão e fornecimento de energia, a listagem de todos os tipos existentes de tecnologias de sistemas de geração ativa de energia solar é praticamente impossível, mas é possível dividir os tipos de tecnologias a partir das configurações adotadas. Os coletores solares térmicos são trocadores de calor que promovem o aquecimento de um fluido de trabalho através da conversão da radiação eletromagnética incidente em energia térmica, e é o principal componente do sistema solar térmico. Estes podem ser classificados em três categorias: coletores planos, coletores de tubos de vácuo e concentradores (Figura 1).



[a]

[b]

[c]

**Figura 1** – [a] Coletor solar plano fechado (Esfera Energias Solar, 20--); [b] Coletor de tubos de vácuo (Esfera Energias Solar, 20--); [c] Concentrador cilíndrico parabólico (SEBASTIAN, 2015).

Os coletores planos utilizam uma superfície absorvedora para captar a radiação solar e a converter em energia térmica. Apresentam facilidade construtiva, operação simples e baixo custo em relação aos concentradores e é o de uso mais difundido no mundo todo (KLUPPEL, 2016). Uma das configurações dos coletores de tubos de vácuo apresentam como seus principais elementos dois tubos concêntricos de vidro com um isolamento de vácuo entre eles (reduz as perdas), onde o fluido de trabalho circula pelo tubo interno e o tubo externo é envolvido por uma superfície seletiva absorvedora (MARTÍNEZ, 2010). Os concentradores utilizam lentes ou espelhos para concentrar os raios solares em um ponto focal, onde se encontra um absorvedor que atinge elevadas temperaturas (COSTA, 2002).

Os concentradores solares podem possuir sistemas de rastreamento do sol, em um ou em dois eixos, ou podem ser estáticos. Nos concentradores com rastreamento do Sol, os espelhos refletores se movimentam de acordo com o movimento aparente do Sol.

A escolha da tecnologia mais adequada é feita de acordo com a aplicação, as faixas de temperaturas necessárias e a disponibilidade dos recursos naturais, econômicos e tecnológicos (KALOGIROU, 2014).

A Tabela 1 mostra as possíveis faixas de temperaturas para cada tipo de tecnologia. A faixa de temperatura mostrada para os concentradores compreende os concentradores estáticos e com rastreamento em um e dois eixos, sendo o inferior referente aos concentradores estáticos e o limite superior aos concentradores com rastreamento em dois eixos. Estes valores representam os limites com o uso de determinada tecnologia, os valores reais de temperaturas alcançadas dependem diretamente da incidência da radiação solar no local escolhido para instalação.

**Tabela 1** – Classificação dos tipos de coletores de acordo com as faixas de temperaturas.

<b>Tipo do coletor</b>	<b>Faixas de temperaturas (°C)</b>
Coletor solar plano	30-80
Coletor de tubo de vácuo	50-200
Concentradores	60-2000

(Fonte: KALOGIROU, 2014)

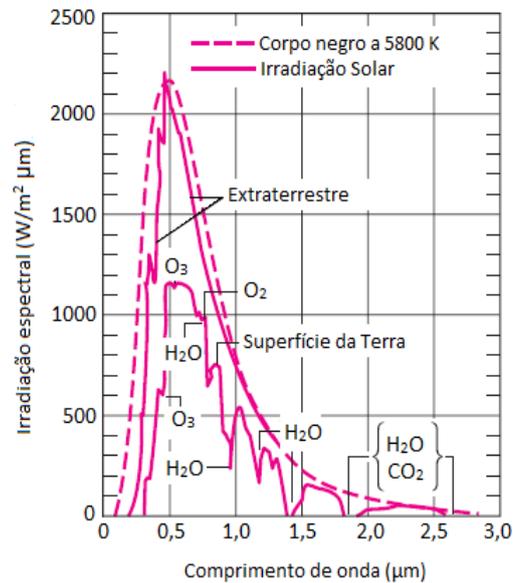
### **3.1 Fundamentos da Radiação Solar**

O sol está localizado a 150 milhões de km da Terra e apresenta um diâmetro de 1,39 milhões de km e emite radiação em todas as direções no espaço na velocidade da luz ( $2,998 \times 10^8$  m/s) a uma temperatura de aproximadamente 5800 K (HODGE, 2011). A fração da radiação emitida pelo sol que atinge a atmosfera terrestre é denominada de constante solar. O *World Radiation Center* adotou um valor médio para a constante solar de  $1367 \text{ W/m}^2$  com incertezas na ordem de 1% (DUFFIE & BECKMAN, 2014). No entanto, o fluxo solar que chega efetivamente na superfície terrestre é significativamente menor.

Na medida em que o fluxo solar atravessa à atmosfera da Terra além da magnitude, a direção também é alterada e isso se dá devido aos processos de absorção e espalhamento. Portanto, a radiação incidente na superfície terrestre pode ser dividida em duas parcelas: radiação direta e radiação difusa. A radiação direta representa a parcela que atravessa a atmosfera sem sofrer alterações significativas de espalhamento na direção do ângulo zenital, a radiação difusa é a que devido à influência desse processo é

considerada independente da direção (INCROPERA & DE WITT, 2008).

A Figura 2 ilustra a influência dos gases constituintes da atmosfera na quantidade de radiação solar que chega a superfície terrestre.



**Figura 2** - Distribuição espectral da radiação solar (Traduzido de ÇENGEL, 2009).

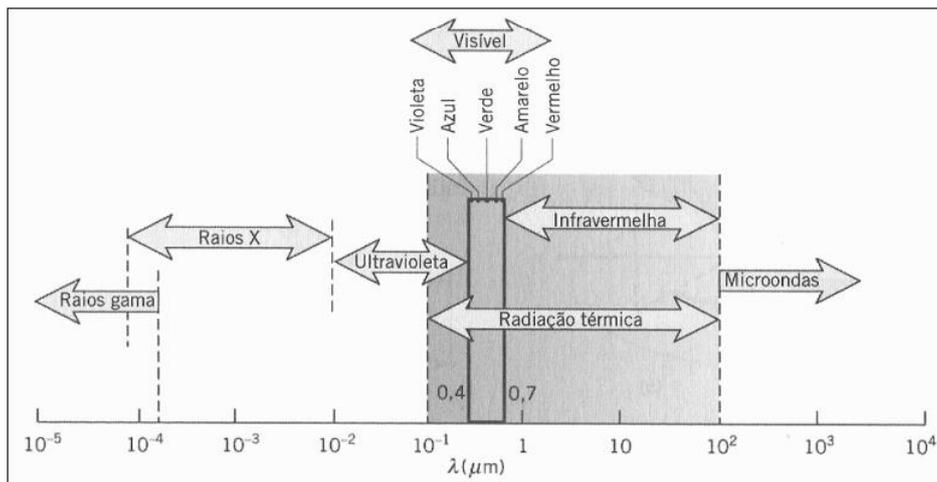
As mais diversas aplicações da energia solar são sensíveis à distribuição espectral da radiação. Portanto, a energia solar deve ser estudada tomando como base a natureza espectral da sua radiação para que seja possível conhecer o comportamento das superfícies absorvedoras (MEINEL & MEINEL, 1982).

O conhecimento e a quantificação dos recursos solares disponíveis na superfície terrestre são fundamentais para o dimensionamento correto de sistemas de energia solar.

### **3.1.1 Conceitos fundamentais**

O espectro da radiação eletromagnética é dividido por diferentes comprimentos de ondas (Figura 3). A parcela do espectro de maior interesse para a aplicação da energia solar é a da radiação térmica ( $10^{-1}$  a  $10^2$   $\mu\text{m}$ ), a qual é originada a partir da emissão da matéria, que está a uma temperatura superior ao zero na escala absoluta. O ponto de partida é a consideração das características da transferência de calor por radiação.

É importante observar que dentro do espectro correspondente à radiação térmica também está compreendida os espectros da radiação visível, uma pequena parcela do espectro da radiação ultravioleta e o espectro da radiação infravermelha.



**Figura 3** - Espectro da radiação eletromagnética (INCROPERA & DE WITT, 2008).

Do ponto de vista da energia solar, interessam as características da radiação emitida pelo sol e as características da superfície em que essa radiação incide. Para se quantificar a magnitude da radiação térmica é necessária a análise das características espectrais tanto quanto das características direcionais. A radiação incidente sobre uma superfície pode provir de diferentes direções e a maneira como essa superfície interage com essa radiação depende daquelas características. Esses efeitos são considerados dentro do conceito de intensidade de radiação, que descreve a quantidade de radiação emitida ou incidente em uma determinada direção no espaço e geralmente não apresenta uma distribuição uniforme (INCROPERA&DE WITT, 2008).

### 3.1.2 Radiação de um corpo negro

Para se compreender as características radiantes das superfícies reais, é útil a idealização de uma superfície para efeito de comparação. O corpo negro é uma superfície idealizada que apresenta as seguintes propriedades: para uma determinada temperatura e comprimento de onda nenhuma outra superfície emite mais energia que ele; é um emissor e um absorvedor perfeito (DUFFIE & BECKMAN, 2014; HODGE, 2011).

A distribuição espectral da emissão de um corpo negro foi apresentada pela primeira vez por Plank e é expressa por:

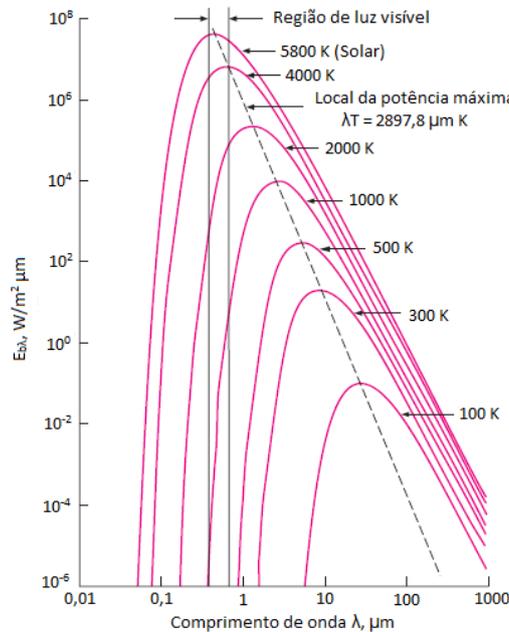
$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (1)$$

Em que  $C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$  e  $C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{mK}$ . Os subscritos  $\lambda$  e  $b$  indicam que os valores obtidos através da Equação 1, além da dependência da temperatura, são dados em função do comprimento de onda e a partir da consideração de um corpo negro. A Figura 4 mostra as variações da potência emissiva de um corpo negro como comprimento de onda para algumas temperaturas (ÇENGEL, 2009).

A lei de Wien do deslocamento determina o comprimento de onda em que o pico ocorre para uma determinada temperatura como

$$(\lambda T)_{\text{pot max}} = 2897,8 \mu\text{m K} \quad (2)$$

O pico da radiação solar ocorre em  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$  e está compreendido no espectro da luz visível.



**Figura 4** - Emitância espectral do corpo negro (Traduzido de ÇENGEL, 2009).

Pode-se obter a potência emissiva total de um corpo negro por unidade de área integrando a Equação 1 para todos os comprimentos de onda. A Equação a seguir é conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b} d\lambda = \sigma T^4 \quad (3)$$

Em que  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ , é a constante de Stefan-Boltzmann.

A Equação 3 apresenta uma dependência funcional à temperatura elevada à quarta

potência da superfície emissora, o que enfatiza a relevância da temperatura para a radiação térmica.

A lei de Stefan-Boltzmann permite o cálculo da quantidade de radiação emitida por um corpo negro em todas as direções e em todos os comprimentos de onda, mas muitas vezes o interesse está na quantidade de radiação emitida em uma determinada faixa, ou banda, de comprimento de onda. É possível se obter tais faixas em função da distribuição de Plank e da lei de Stefan-Boltzmann (INCROPERA & DE WITT, 2008).

Em temperaturas e comprimento de ondas especificados, entre 0 e um  $\lambda$  qualquer, a fração de emissão total de um corpo negro é determinada pela razão entre a emissão da radiação nesse intervalo de  $\lambda$  e a emissão total do corpo negro, como explicitado pela equação abaixo:

$$F(0 \rightarrow \lambda T) = \frac{\int_0^\lambda E_{\lambda,b} d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda,b} d\lambda} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{\lambda,b}}{\sigma T^5} d(\lambda T) \quad (4)$$

A Equação 4 depende unicamente do produto  $\lambda T$  e pode ser usada para calcular frações de radiação entre dois comprimentos de onda quaisquer.

### **3.1.3 Propriedades radioativas**

Os materiais apresentam características distintas entre si quando submetidos a um fluxo radiante, como também um mesmo material pode apresentar comportamento diferente em diferenciados comprimentos de ondas (ÇENGEL, 2009). As propriedades radiantes dos materiais são usadas para comparação entre as características das superfícies reais e de um corpo negro em relação ao seu poder emissivo e ao seu comportamento à radiação incidente.

O estudo destas propriedades geralmente é dividido em relação à origem da energia radiante. A emissividade de uma superfície está associada ao poder emissivo da mesma, enquanto que a absortividade, a refletividade e a transmissividade descrevem o comportamento da superfície à radiação incidente proveniente de outros corpos emissores.

#### **3.1.3.1 Emissividade ( $\epsilon$ )**

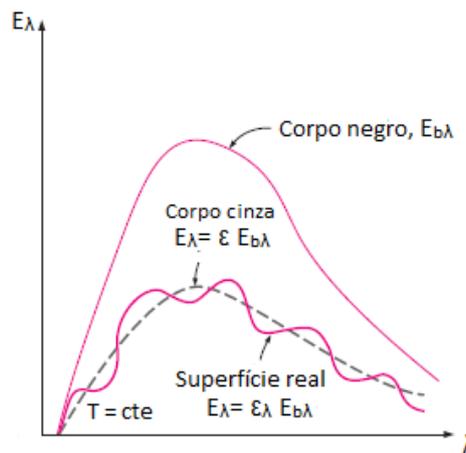
A emissividade dos materiais é definida como fração entre a radiação emitida por

uma superfície real e a radiação que seria emitida por um corpo negro à mesma temperatura (ÇENGEL, 2009). Como já foi dito anteriormente, o corpo negro é um emissor perfeito, ou seja, ele estabelece o limite máximo de emissão de radiação em quaisquer temperaturas.

Um corpo negro apresenta emissividade constante,  $\varepsilon=1$ . Para as superfícies reais a emissividade varia com a temperatura, com a direção e com o comprimento de onda e apresenta um valor entre 0 e 1. A emissividade de um material a uma determinada temperatura pode ser obtida em função do comprimento de onda e da direção, como também pode ser obtida na sua forma mais geral, denominada como emissividade total hemisférica, que representa a fração da radiação emitida em todos os comprimentos de onda e direção de uma superfície real e radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura e define-se como (INCROPERA& DE WITT, 2008):

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (5)$$

Conhecendo a emissividade de um material qualquer, o cálculo das características emissivas da superfície é simples, mas deve-se ter cuidado, pois a emissividade depende da natureza da superfície, como método de fabricação, rugosidade, tipo de acabamento e limpeza (INCROPERA& DE WITT, 2008). A Figura 5 ilustra a aproximação da potência emissiva de uma superfície cinza com uma superfície real e um corpo negro a mesma temperatura.



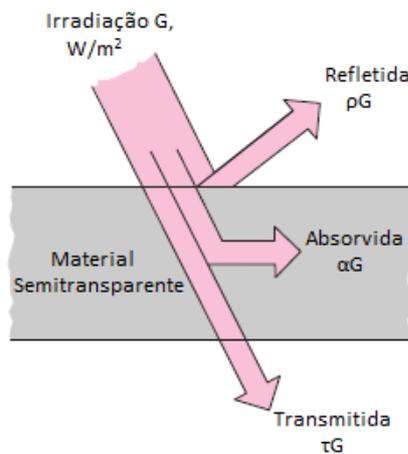
**Figura 5** - Comparação da potência emissiva de uma superfície real, uma superfície cinza e um corpo negro a mesma temperatura (Traduzido de ÇENGEL, 2009).

### 3.1.3.2 Absortividade ( $\alpha$ ), refletividade ( $\rho$ ) e transmissividade ( $\tau$ )

A irradiação espectral  $G_\lambda$  é a taxa em que a radiação de comprimento de onda  $\lambda$

incide sobre uma superfície por unidade de área e por unidade de comprimento de onda (INCROPERA& DE WITT, 2008). A irradiação pode ser originada de diferentes fontes e pode incidir na superfície em diferentes direções. O comportamento da superfície quando submetida a um fluxo radiante depende das características do material.

A Figura 6 mostra a intercepção de um fluxo radiante por um material semitransparente. Ao interagir com o meio material a radiação incidente é caracterizada pelos processos de absorção, reflexão e transmissão (ÇENGEL, 2009).



**Figura 6** - Absorção, reflexão e transmissão da irradiação em um material semitransparente (Traduzido de ÇENGEL,2009).

A absorvidade, a refletividade e a transmissividade são propriedades do material que permitem a quantificação das frações da radiação que sofre cada um desses processos e podem ser obtidas em função do comprimento de onda e da direção da radiação incidente na superfície, mas para aplicações práticas de engenharia é de maior interesse a determinação destas propriedades em suas formas mais gerais, ou seja, de valores médios obtidos através da integração em todos os comprimentos de onda do espectro da radiação térmica e para todas as direções.

A absorvidade  $\alpha$  (Equação 6) é a propriedade que determina a fração da radiação que é absorvida por uma superfície (INCROPERA& DE WITT, 2008).

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (6)$$

A refletividade  $\rho$  (Equação 7) é a propriedade do material que determina a fração da radiação incidente que é refletida pela superfície(INCROPERA& DE WITT, 2008).

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad (7)$$

A transmissividade  $\tau$  (Equação 8) é a propriedade que determina a fração da radiação incidente na superfície que atravessa o material (INCROPERA & DE WITT, 2008).

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (8)$$

Nas Equações 6, 7 e 8,  $G_{abs}$ ,  $G_{ref}$  e  $G_{tr}$  são as parcelas da irradiação incidente na superfície,  $G$ , que é absorvida, refletida e transmitida, respectivamente.

A conservação da energia, prevista na primeira lei da termodinâmica, determina que a soma das frações da radiação absorvida, refletida e transmitida deve ser igual à irradiação total na superfície (ÇENGEL, 2009). Logo, ao se realizar um balanço de energia, em um meio semitransparente o valor total desse somatório deve ser igual a 1 (Equação 9).

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

Para a idealização do corpo negro, que são absorvedores perfeitos, não há parcela de radiação transmitida e refletida. Em algumas superfícies pode não ocorrer apenas o processo de transmissão, o que as caracterizam como superfícies opacas.

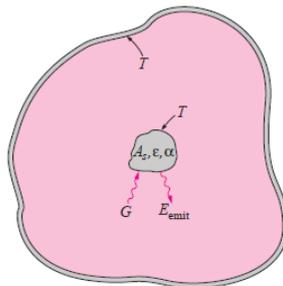
Uma superfície pode se comportar como transparente à radiação incidente a um determinado comprimento de onda e opaco aos demais (ÇENGEL, 2009). Essa é uma característica espectral importante que é bastante explorada na conversão da energia solar em calor, através da promoção do efeito estufa em coletores solares.

### 3.1.3.3 *Lei de Kirchhoff*

A absorção da radiação em um corpo ocorre por mecanismos inversos a emissão do mesmo. Quando os fótons incidem na matéria há uma elevação nos níveis de energia dos átomos que a constituem, o que provoca uma excitação eletrônica e um aumento na energia interna do corpo. Essa energia pode ser reemitida como fótons para o ambiente ou pode ser absorvida como energia térmica pelo núcleo. A partir da Lei de Kirchhoff é possível analisar as condições em que as propriedades de emissão e absorção de um corpo

são iguais (DUFFIE & BECKMAN, 2014).

Partindo da consideração que uma grande cavidade, isotérmica, com uma temperatura superficial  $T$  se comporta de maneira aproximada a um corpo negro e dentro da mesma está um pequeno corpo, como ilustra-se na Figura 7. Pode-se desprezar a influência desse corpo sobre o campo de radiação (ÇENGEL, 2009).



**Figura 7** - Troca radiante entre um pequeno corpo dentro de uma grande cavidade fechada (ÇENGEL, 2009).

Com condições de regime permanente atingida, ocorre o equilíbrio térmico entre os corpos e a cavidade, ou seja, eles tendem a se manter na mesma temperatura fazendo com que a taxa líquida de transferência entre eles seja nula (INCROPERA & DE WITT, 2008).

Realizando um balanço de energia numa superfície de controle sobre um dos pequenos corpos sob a cavidade, temos  $G_{\text{abs}} - E_{\text{emit}} = 0$ ,  $G_{\text{abs}} = E_{\text{emit}}$ ,  $A_s \epsilon \sigma T^4 = A_s \alpha \sigma T^4$ . Então:

$$\epsilon(T) = \alpha(T) \quad (10)$$

onde  $A_s$  é a área da superfície do pequeno corpo e  $T$  é a temperatura absoluta (em Kelvin) do corpo e também da superfície da cavidade. A Equação 10 é utilizada considerando a radiação para todos os comprimentos de ondas e em todas as direções.

A relação obtida na Equação 10, conhecida como Lei de Kirchhoff para radiação, pode ser utilizada em situações em que a temperatura da superfície dos pequenos corpos e a da cavidade possa ser aproximada. A lei de Kirchhoff também pode ser expressa na forma espectral e também é válida quando a irradiação ou a radiação emitida é proveniente de uma fonte difusa, ou seja, a emissividade e a absorvidade de uma superfície são sempre iguais em determinados comprimentos de ondas, direção e temperatura (ÇENGEL, 2009).

### 3.2 Sistemas de Aquecimento Solar (SAS)

Um sistema de aquecimento consiste na utilização de um conjunto de equipamentos com o objetivo de fornecer calor a um fluido, na temperatura e vazão estabelecida em projeto, para suprir uma demanda específica. Através do emprego de tecnologias adequadas os sistemas de aquecimento solar são capazes de atender a diversas finalidades em várias áreas. A Tabela 2 relaciona alguns tipos desses sistemas com a tecnologia adotada e a área de aplicação.

Tabela 2 – Sistemas de aquecimento solar: principais tecnologias e aplicações.

<b>Tipo de sistemas de aquecimento solar</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>Área de aplicação</b>
<b>Sistema de aquecimento de água</b>	Coletores planos fechados, Coletores de tubos de vácuo	Setor Residencial, Comercial e Industrial
<b>Sistemas de aquecimento de piscinas</b>	Coletores planos abertos	Setor Residencial e Comercial
<b>Sistema de aquecimento de ar</b>	Secador solar	Setor Industrial
<b>Sistemas de aquecimento direto</b>	Fogão solar	Setor residencial
<b>Sistema geradores de potência</b>	Concentradores solares e Chaminé solar	Setor Energético
<b>Sistemas de dessalinização de água</b>	Fogão solar e coletores fechados	-

Fonte: (PROCOBRE, 2009; RODRIGUES, 2010; KALOGIROU, 2014).

O sistema de aquecimento solar é caracterizado pelo emprego de equipamentos capazes de realizar o aproveitamento térmico da radiação solar incidente. Como mostrado na Tabela 2, os sistemas de aquecimento solar de água é o que atualmente possui maiores possibilidades de aplicações, pois representa uma importante estratégia para o consumo de energia em diferentes setores. Em aplicações residenciais e comerciais este tipo de sistema pode contribuir com diminuições significativas na demanda de energia do sistema elétrico. No setor industrial, além de apresentar potencial na diminuição do consumo de eletricidade estes sistemas se apresentam como uma alternativa competitiva a utilização de sistemas geradores de calor de processo e na diminuição da utilização de combustíveis fósseis.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 15569 (ABNT NBR 15569: 2008) define os sistemas de aquecimento solar por sistemas compostos por um ou mais coletor solar, reservatório térmico, aquecimento auxiliar (quando necessário), acessórios e ligações hidráulicas e classifica o SAS de água de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3** - Classificação do SAS de água.

<b>Categorias</b>			
<b>Atributo</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>Arranjo</b>	Solar mais auxiliar	Somente solar	Preaquecimento Solar
<b>Circulação</b>	Natural ou Termossifão	Forçada	-
<b>Regime</b>	Acumulação	Passagem	-
<b>Armazenamento</b>	Convencional	Acoplado	Integrado
<b>Alimentação</b>	Exclusiva	Não exclusiva	-
<b>Alívio de pressão</b>	Respiro	Conjunto de válvulas	-

Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2008).

O arranjo de um SAS de água, segundo ABNT NBR 15569 (2008), pode ser composto apenas por coletores solares para aquecimento ou preaquecimento de um fluido ou pode operar de forma integrada com outra fonte de energia para garantir o funcionamento quando a radiação solar estiver indisponível. O arranjo solar mais auxiliar é muito utilizado principalmente em SAS localizados em regiões com oscilações

significativas de radiação solar e em situações onde o abastecimento de energia não pode ser interrompido, como ocorre em alguns processos industriais.

A circulação natural ou por termossifão ocorre por um diferencial de pressão provocada pela diferença de densidade entre a água quente e a água fria. A circulação forçada é a que ocorre por meio do emprego de bombas hidráulicas.

No regime de acumulação a água circula entre os coletores solares e o reservatório térmico durante os períodos de funcionamento e no regime de passagem a água circula diretamente entre os coletores e os pontos de consumo (ABNT NBR 15569: 2008). O regime de acumulação tem a vantagem de possibilitar o consumo da água quente em diferentes horários do dia, mas aumenta o custo financeiro do projeto, pois depende de armazenamento.

O armazenamento é classificado de acordo com a distância dos coletores. É classificado como convencional quando está separado dos coletores a uma determinada distância. Quando o armazenamento está montado numa mesma estrutura física dos coletores é classificado como acoplado e o armazenamento integrado é quando a coleta da radiação e o armazenamento são realizados por um único dispositivo (ABNT NBR 15569: 2008).

A alimentação pode ser apenas para o SAS ou pode ser compartilhada entre o SAS e outros pontos de consumo, classificado, portanto como exclusiva e não exclusiva, respectivamente (ABNT NBR 15569: 2008).

O alívio de pressão é um parâmetro chave para a segurança e o funcionamento do SAS e tem como objetivo a equalização das pressões positivas e negativas. Pode ser feita pelo emprego de um dispositivo chamado de respiro que nada mais é que uma conexão direta entre o reservatório térmico e a atmosfera ou pelo emprego de válvulas que são dispositivos mecânicos (ABNT NBR 15569: 2008).

A seguir apresenta-se uma discussão sobre os principais elementos construtivos de um sistema de aquecimento solar de água.

### ***3.2.1 Coletor solar***

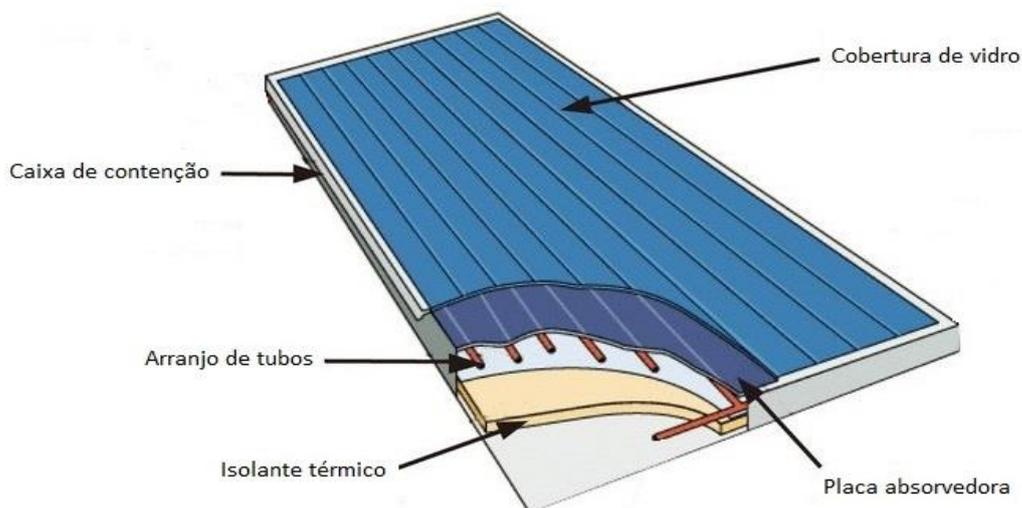
O coletor solar é o principal equipamento de um SAS de água. Na tabela 2 observa-se que em SAS de água a tecnologia mais utilizada são os coletores planos fechados e os coletores de tubos de vácuo. A escolha de uma destas tecnologias depende das disponibilidades de recursos naturais e financeiros e das temperaturas desejadas.

Os coletores solares apresentam modularidade estrutural e de potência de acordo com a demanda requerida, e a sua independência de eletricidade amplia as possibilidades de sua utilização, pois a localização de instalações não é limitada pelo alcance da rede elétrica (ROSA, 2012).

### 3.2.1.1 *Coletor solar plano fechado*

Os coletores solares planos são amplamente utilizados em aplicações que exigem baixas e médias temperaturas, abaixo de 100°C. Geralmente são empregados para aquecimento de uso residencial e pré-aquecimento em indústrias (KALOGIROU, 2014).

Uma das vantagens destes coletores é a simplicidade de montagem e manutenção e o baixo custo quando comparado aos demais. Eles são constituídos por uma caixa retangular de alumínio, chamada de caixa de contenção, uma superfície negra onde a radiação é absorvida e transferida a tubos que ficam soldados na mesma, uma cobertura de vidro responsável pelo efeito estufa no coletor, isolantes térmicos para minimizar as perdas de energia térmica para o ambiente e uma vedação eficiente entre as peças para garantir um bom funcionamento e durabilidade do coletor (COSTA, 2002). A Figura 8 mostra os principais componentes de um coletor solar plano fechado.



**Figura 8** - Principais elementos construtivos de um coletor solar plano fechado (Adaptado de Indiamart, 20--).

O desempenho final destes coletores é relativo à sua localização, pois depende da quantidade de radiação solar local e da temperatura de entrada da água no sistema, mas a

utilização de materiais que apresentem propriedades apropriadas em cada um dos seus constituintes e a instalação na orientação e inclinação mais adequada pode melhorar esse desempenho, para qualquer localização.

#### 3.2.1.1.1 Placa absorvedora e arranjo de tubos

A radiação incidente no coletor é transformada em energia térmica pela placa absorvedora, logo esta deve apresentar uma superfície de absorção que permita um elevado nível de captação da energia radiante incidente para os baixos comprimentos de onda, que compreendem parte da radiação ultravioleta e todo o espectro da luz visível, e baixo nível de emissividade para radiação solar nos comprimentos de ondas do infravermelho.

Para que as resistências ao fluxo de calor sejam pequenas a placa absorvedora deve apresentar alta condutividade térmica. Geralmente ela é fabricada em alumínio e pode ser pintada com uma tinta negra especial com alto índice de absorvidade ou coberta com uma superfície seletiva que garante as condições de absorção em comprimentos de onda com melhor potencial.

O arranjo de tubos é frequentemente composto de dois tubos de maior diâmetro que ficam localizados um na parte superior e outro na parte inferior do coletor, conectados a outros de menor diâmetro que ficam soldados à superfície da placa absorvedora. Os tubos de maior diâmetro são os responsáveis pela distribuição da água e os outros pelo aquecimento da água a partir da troca térmica com a placa absorvedora (KLUPPEL, 2016). Vide Figura 8.

O material utilizado na tubulação além de ser um bom condutor térmico deve apresentar uma boa resistência ao ataque químico por substâncias dissolvidas na água (KLUPPEL, 1985). Dependendo da qualidade da água disponível para aquecimento o funcionamento dos coletores pode ser comprometido por problemas de corrosão e incrustações.

#### 3.2.1.1.2 Cobertura de vidro e vedação

O objetivo da cobertura de vidro é que ela permita o máximo aproveitamento da radiação solar incidente. Sua função é recuperar parte da radiação emitida pela placa absorvedora e de reduzir as perdas por convecção para o ambiente. O vidro utilizado deve

apresentar espessura de cerca de 2 mm e baixo teor de óxido de ferro, o que lhes confere propriedades óticas favoráveis (KLUPPEL, 2016).

A cobertura de vidro é a responsável pelo efeito estufa no interior do coletor. O efeito estufa ocorre em virtude da alta absorvidade do vidro a radiação infravermelha e sua transparência a radiação solar (KLUPPEL, 2016).

A radiação solar incidente no coletor após atravessar a cobertura de vidro é absorvida pela placa, o que faz com que a mesma aumente sua temperatura e conseqüentemente seu poder emissivo, mas a cobertura de vidro não permite que a radiação emitida pela placa seja totalmente liberada para o ambiente, ela absorve essa radiação e a reemite em todas as direções. Metade é perdida para o ambiente e metade é remetida para a placa absorvedora aumentando a quantidade de calor acumulada no coletor.

Pode se utilizar mais do que uma cobertura de vidro com o objetivo de diminuir as perdas convectivas para o ambiente, mas nem sempre é vantajoso, pois uma pequena parcela da radiação incidente no coletor é refletida pela cobertura de vidro e a soma das contribuições de mais coberturas pode diminuir a transparência global do coletor à radiação solar (BENTIVENHA, 2005).

A vedação do coletor é um ponto importante, pois é essencial para que não hajam interferências externas que provoquem perdas de calor e redução da vida útil do coletor. É aconselhável a utilização de silicone ou de outra borracha com elevada durabilidade e resistência aos agentes atmosféricos e que garantam a estanqueidade do coletor (DE MACEDO NETO *et al.*, 2014).

### 3.2.1.1.3 Caixa de contenção e isolante térmico

A caixa de contenção é geralmente fabricada com as laterais em alumínio anodizado, por questões econômicas, o fundo por vezes é fabricado em aço galvanizado (CERVEIRA, 2012). Tem como principal função a junção dos demais elementos construtivos do coletor.

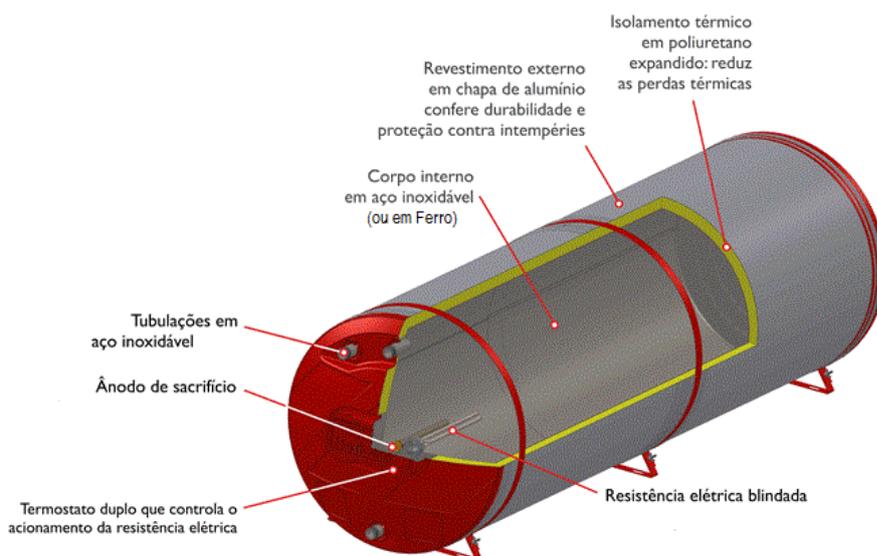
No fundo e nas laterais da caixa de contenção existe uma camada de isolante térmico para diminuir as perdas por condução. Essa camada possui uma espessura de cerca de 2,5 a 60 mm e geralmente é de espuma de poliuretano ou lã de rocha (DE MACEDO NETO *et al.*, 2014). Em climas frios usa-se uma camada mais espessa de isolante térmico.

### 3.3.2 Reservatório térmico

O reservatório térmico, também chamado de boiler, é o componente do SAS responsável pela acumulação e conservação da água aquecida até o momento do consumo. São geralmente cilíndricos, feitos de em cobre, polipropileno ou inox e isolados com lã de vidro, lã de rocha, espuma de poliuretano ou espuma de polietileno (BENTIVENHA, 2005) e devem obedecer aos requisitos estabelecidos pela ABNT, na NBR10185: 2013 (ABNT NBR 10185, 2013). A maioria dos fabricantes dispõe desses reservatórios com capacidades de armazenamento entre 100 a 5.000 litros (CERVEIRA, 2012).

Existe uma grande diversidade no que diz respeito aos elementos construtivos e a estrutura dos reservatórios térmicos, por esse motivo a classificação dos mesmos é geralmente feita em relação ao posicionamento (horizontal ou vertical) e também em relação à pressão de operação (altas e baixas pressões). Alguns reservatórios podem apresentar um sistema de proteção contra corrosão (anodos de sacrifício) e é imprescindível a utilização de sistemas aquecimento auxiliar (termostato e resistência elétrica) para garantir as condições desejadas. A escolha da configuração adequada é feita a partir das especificações técnicas e de segurança que melhor se apliquem ao projeto em questão.

Na Figura 9 está representado um reservatório cilíndrico horizontal que é a configuração construtiva mais usada em reservatórios térmicos no Brasil.



**Figura 9** - Reservatório térmico e seus principais componentes (Adaptado de Ótima Rio,20--).

O dimensionamento do volume necessário para armazenamento é realizado a partir do perfil de utilização de água quente de cada aplicação. A análise deste perfil é feita a partir das características do consumo, mas, de uma forma geral, o volume de armazenamento deve ser no mínimo igual a demanda diária (KLUPPEL, 2016). A instalação dos reservatórios pode ser feita de forma unitária ou combinada, dependendo da disponibilidade dos volumes de reservatórios como também da adequação as especificidades de cada instalação.

A análise da demanda de água quente representa a etapa inicial e é de crucial importância para a elaboração do projeto do sistema de aquecimento solar, pois o dimensionamento correto do armazenamento evita a falta de água quente para o consumo e também o superdimensionamento do sistema, que provoca o encarecimento da instalação.

### **3.3.3 *Ligações hidráulicas***

As ligações entre o reservatório térmico e o coletor são denominadas de circuito primário e a tubulação de distribuição da água quente aos pontos de consumo de circuito secundário, neste trabalho será apenas discutido o circuito primário.

O circuito hidráulico de um SAS é montado basicamente por tubos e conexões, bombas hidráulicas e vasos de expansão (MIYAZATO, 2012). Segundo a ABNT na NBR 15569: 2008, as tubulações e acessórios devem ser dimensionados de forma a transportar o fluido de trabalho e suportar as temperaturas e pressões estabelecidas em projeto sem apresentar vazamentos e deformações.

Para a tubulação de água quente é recomendado a utilização de tubos de cobre ou de CPVC (MIYAZATO, 2012). A escolha do material da tubulação é limitada pela qualidade da água que irá circular no SAS.

Todo o percurso, seja ele metálico ou polimérico, deve ser isolado termicamente a fim de reduzir as perdas térmicas do SAS para o ambiente. Geralmente o isolamento é feito com polietileno expandido com espessura mínima de 10 mm com proteção contra intempéries quando a tubulação ficar exposta (KULB, 2013).

Em SAS com circulação forçada, a bomba tem a função de promover a circulação do fluido entre os coletores e o reservatório térmico. Os vasos de expansão são apenas necessários em sistemas com fluido secundário, ou seja, em casos onde a fluido que circula nos coletores está em circuito fechado, eles têm a função de reduzir as pressões

do sistema à medida que o fluido se esquentava e sofre expansão térmica (MIYAZATO, 2012).

### **3.3.4 Posição dos coletores solares**

A definição correta da orientação e da inclinação do banco de coletores solares é a parte do projeto que garante o melhor aproveitamento do recurso solar disponível e pode garantir um menor investimento inicial e a melhor relação custo-benefício da instalação.

A latitude local, a inclinação e a orientação dos coletores estão diretamente ligadas à trajetória aparente do Sol (MIYAZATO, 2012) e o entendimento da geometria solar é fundamental para o posicionamento correto dos coletores.

#### **3.3.4.1 Geometria solar**

A disponibilidade da radiação solar depende das condições atmosféricas, da localização geográfica e do tempo (dia do ano e hora do dia), isso se dá devido aos movimentos de rotação e translação que a Terra faz ao redor do Sol. O movimento de rotação é um movimento diário que a Terra faz em relação ao seu eixo imaginário que apresenta uma inclinação de  $23^{\circ}27'$  em relação ao plano do Equador Celestial e o movimento de translação trata-se da trajetória elíptica que a Terra percorre ao redor do sol anualmente (aproximadamente 365 dias), como mostra a Figura 12.

O ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra ( $23^{\circ}27'$ ) define a posição dos trópicos e faz com que os hemisférios Norte e Sul recebam diferentes quantidades de radiação ao longo do ano, caracterizando assim as estações de acordo com os solstícios de verão e de inverno e pelos equinócios de primavera e de outono.

A rotação da Terra ao redor do seu eixo dá origem ao dia e à noite e a duração deles dependem do dia do ano e da latitude do local. O dia mais longo do ano marca o solstício de verão e o dia mais curto do ano marca o Solstício de inverno. Os equinócios são caracterizados por dias com a mesma duração das noites. A Figura 10 mostra os dias dos solstícios e dos equinócios nos dois hemisférios.

A partir do conhecimento das coordenadas geográficas (latitude e longitude) é possível calcular grandezas envolvidas no cálculo da geometria solar para qualquer localização (ABRAVA, 2008). O estudo sobre a geometria solar será desenvolvido de maneira bastante objetiva em relação aos principais ângulos solares e aos ângulos da instalação dos coletores.



Figura 10 - Trajetória da Terra em relação ao Sol (Ciência Viva, 20--).

### 3.2.4.1.1 Declinação solar ( $\delta$ )

A declinação solar é ângulo formado pela reta que liga o centro da Terra ao centro do Sol (plano da elíptica) com a projeção dessa reta no plano de Equador e seu valor está sempre compreendido entre  $-23,5^\circ$  e  $23,5^\circ$ . Esse é o ângulo responsável pela exposição dos hemisférios à radiação solar e para cálculos de engenharia solar o seu valor pode ser calculado pela Equação 11 (KLUPPEL, 1985).

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ 360 \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (11)$$

onde  $n$  é o número do dia juliano, ou seja, o dia considerado do ano, contando a partir do primeiro dia do ano. O valor do ângulo de declinação solar depende apenas do dia do ano, apresenta valores simétricos, em relação a  $0^\circ$ , para os dois hemisférios e apresenta valores nulos para os dias de equinócios, pois esses dias apresentam durações iguais as das noites em todo o planeta Terra.

### 3.2.4.1.2 Ângulo horário ( $\omega$ )

O ângulo horário representa o deslocamento angular do Sol, para Leste ou para Oeste, em relação ao meridiano local. Tem-se uma variação de  $15^\circ$  por hora ( $360^\circ/24$ ), sendo zero ao meio dia solar, negativo antes do meio dia e positivo depois. Pode ser calculado com a equação a seguir.

$$\omega = 15 (\text{Hora Legal} - 12) + L_p - L_l + \frac{E}{4} \quad (12)$$

sendo  $L_p$  e  $L_l$  a latitude do meridiano padrão para a hora legal e a latitude local, respectivamente e  $E$  é a variação da duração do dia solar verdadeiro dada em minutos pela equação do tempo, apresentada na Equação 13.

$$E = 9,87 \text{ sen}(2B) - 7,53 \text{ cos}(B) - 1,5 \quad (13)$$

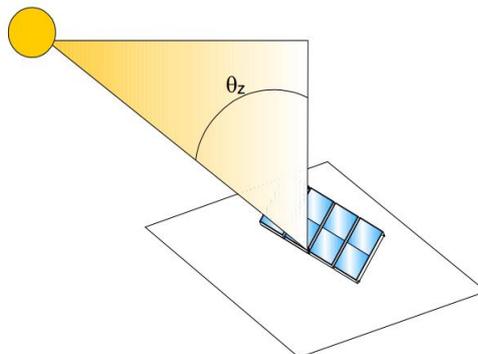
onde  $B = \frac{360(n-81)}{364}$ .

### 3.2.4.1.3 Ângulo zenital ( $\theta_z$ )

O ângulo zenital é o ângulo formado entre a linha do zênite e a direção dos raios solares incidentes em uma superfície (Figura 11). A linha do zênite é a linha normal a cabeça do observador, seu oposto é chamado de nadir.

O ângulo zenital pode ser calculado a partir da equação 14.

$$\cos(\theta_z) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \text{cos}(\delta) \text{cos}(\phi) \text{cos}(\omega) \quad (14)$$



**Figura 11** - Ângulo Zenital (ABRAVA, 2008).

Para o nascer e para o pôr do Sol o ângulo zenital é igual a  $90^\circ$ , logo, a partir de manipulações algébricas na Equação 14 é possível realizar o cálculo do ângulo horário máximo (em módulo) e conseqüentemente é possível conhecer o máximo número de horas de sol também chamada de insolação teórica máxima,  $N$ .

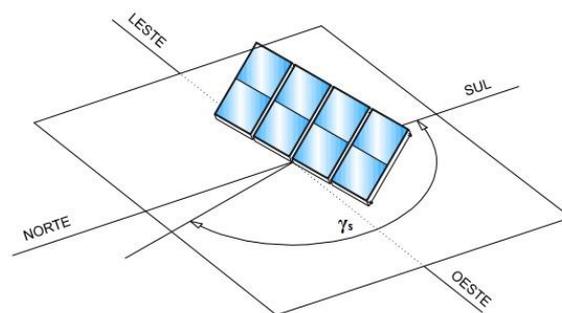
$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\text{tg}(\delta)\text{tg}(\phi)) \quad (15)$$

A equação 15 mostra que o número de horas de sol depende apenas do local e da época do ano (KLUPPEL, 1985).

#### 2.4.1.4 Azimute solar ( $\gamma$ ) e azimute de superfície ( $\gamma_s$ )

O azimute solar é o ângulo formado entre a linha norte-sul e a projeção da direção da radiação solar no plano horizontal, o azimute de superfície é o ângulo formado pela reta norte-sul e a projeção da reta normal à superfície no plano horizontal, logo é considerado apenas para superfícies inclinadas.

O azimute solar e o azimute de superfície podem apresentar valores entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ , sendo igual a  $0^\circ$  para o Sul e  $180^\circ$  para o norte, negativo para o Leste e positivo para o Oeste. O azimute de superfície permite avaliar o período efetivo de insolação a superfície (Figura 12).



**Figura 12** - Azimute de superfície (Adaptado de ABRAVA, 2008).

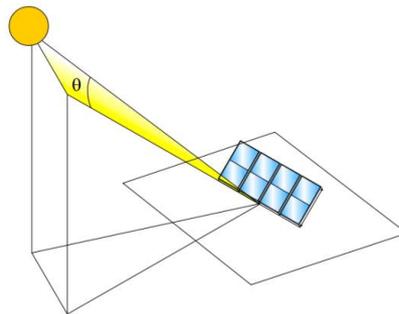
#### 3.2.4.1.5 Ângulo de incidência da radiação solar direta ( $\theta$ )

O ângulo de incidência da radiação solar direta é o ângulo formado pela direção da radiação com a normal à superfície em que está incidindo (Figura 13). Este ângulo é

de grande importância para a avaliação da radiação absorvida pela superfície e para o cálculo das sombras projetadas por um corpo (KLUPPEL, 2016).

Para uma superfície com determinada inclinação e orientação o ângulo de incidência da radiação solar direta pode ser calculado pela equação a seguir:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) \cos(\beta) - \text{sen}(\delta) \text{sen}(\beta) \cos(\phi) \cos(\gamma_s) \\ & + \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\gamma_s) \text{sen}(\phi) \text{sen}(\beta) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \cos(\beta) \\ & + \cos(\delta) \text{sen}(\omega) \text{sen}(\beta) \text{sen}(\gamma_s) \end{aligned} \quad (16)$$

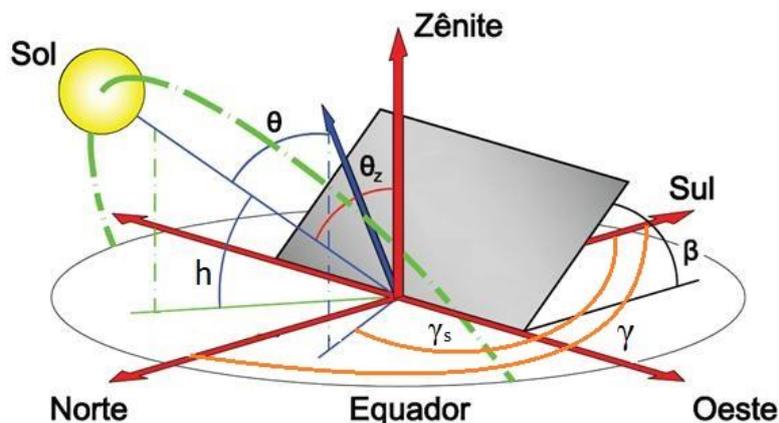


**Figura 13** - Ângulo de incidência da radiação em uma superfície (ABRAVA, 2008).

### 3.3.4.1.6 Inclinação do coletor ( $\beta$ )

A Figura 14 mostra os ângulos que definem a posição de uma superfície com relação à radiação solar.

Em busca de uma captação eficiente da radiação solar disponível adota-se a instalações dos coletores com ângulos de inclinação com variação entre a latitude local e a latitude local mais  $10^\circ$ . A implantação destes  $10^\circ$  se dá com o objetivo de diminuir a influência das baixas temperaturas e dos baixos índices de radiação durante o inverno em algumas regiões (KULB, 2013).



**Figura 14**- Ângulos que definem a posição de uma superfície em relação à radiação solar (Adaptado de LISBOA, 2010).

### 3.3 Potencial Solar do Brasil

A direção dos raios solares definida através da posição do Sol em relação a uma dada localização geográfica condiciona a quantidade de radiação solar recebida nesta localização, o que justifica o grande esforço mundial para avaliar e quantificar a variação da radiação solar na superfície terrestre ao longo do ano.

Para que a exploração da energia solar seja realizada de forma eficaz é necessária à quantificação da radiação solar incidente em uma determinada localidade em períodos de tempo, mas essa não é uma questão de fácil resolução, pois a sua dependência de variáveis atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa, etc.) faz com que apresente natureza imprevisível até certo ponto (MELO, 2012).

No Brasil os esforços de maior destaque são: 1) Atlas de Irradiação Solar do Brasil (1998), resultado de uma parceria do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLAR/UFSC; 2) O Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), resultado de uma parceria entre a Universidade Federal do Pernambuco – UFPE, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF e o Centro de Pesquisas em Energia Elétrica - CEPEL; 3) Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), elaborado sob coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – DMA/CPTEC/INPE.

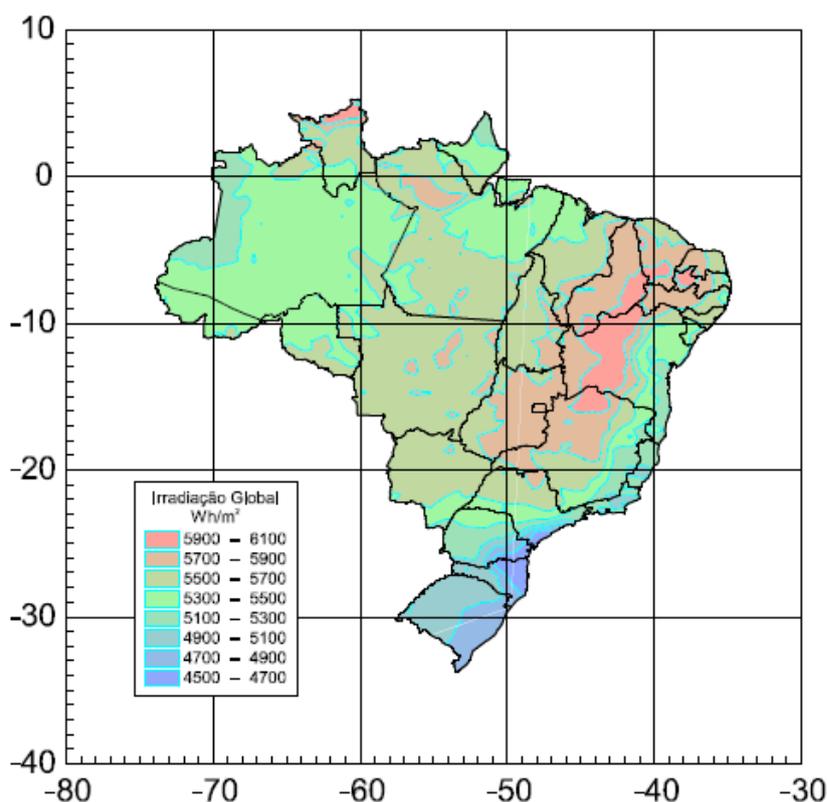
O Atlas Solarimétrico do Brasil foi elaborado com base em interpolações e extrapolações de dados medidos em estações solarimétricas espalhadas por todo o território nacional (TIBA, 2000), o Atlas de Irradiação Solar do Brasil e o Atlas Brasileiro de Energia Solar foram elaborados a partir de modelos físicos combinados com imagens de satélites (COLE & PEREIRA, 1998; PEREIRA *et al.*, 2006), ou seja, todos buscam realizar a mesma análise a partir de métodos diferentes e a utilização combinada dos mesmos tende a maximizar a segurança das observações.

As regiões do mundo que apresentam os maiores potenciais solarimétricos estão localizadas em áreas desérticas, como por exemplo, a região de Dagget no deserto do Mojave que apresenta uma média diária anual de  $20,9 \text{ MJ/m}^2$ , enquanto que no Nordeste brasileiro cidades como Petrolina-PE e Floriano-PI apresentam média diária anual de  $19,7 \text{ MJ/m}^2$  (TIBA, 2000). Outro fato relevante é que ao se comparar os menores índices de radiação solar incidente no território brasileiro com os índices em países da União Europeia, como Alemanha, Espanha e França, onde o aproveitamento da energia solar é

mais disseminado se torna ainda mais evidente o grande potencial solarimétrico do Brasil em relação aos demais países do mundo (PEREIRA *et al.*, 2006).

Os valores significativos de radiação solar incidente no território brasileiro são justificados pela sua proximidade à linha do Equador (0° de latitude), onde a radiação emitida pelo Sol atinge a superfície terrestre de forma relativamente uniforme e direta durante todo o ano, portanto não existem grandes variações sazonais deste recurso, o que favorece ainda mais a sua exploração.

A Figura 15 mostra a distribuição da radiação anual no Brasil e observa-se que não existem grandes variações destes valores no território brasileiro e que as maiores médias diárias de incidência solar por área são registradas no Nordeste, variando entre 5700 e 6100Wh/m<sup>2</sup> dia, o que é justificado pela proximidade dessa região à Linha do Equador e pelas suas características climáticas. As linhas verticais e horizontais traçadas sobre o mapa do Brasil na Figura 15 representam a latitude e a longitude, respectivamente.



**Figura 15** - Distribuição da Radiação Solar média anual no território Brasileiro (Wh/m<sup>2</sup>) (COLE & PEREIRA, 1998).

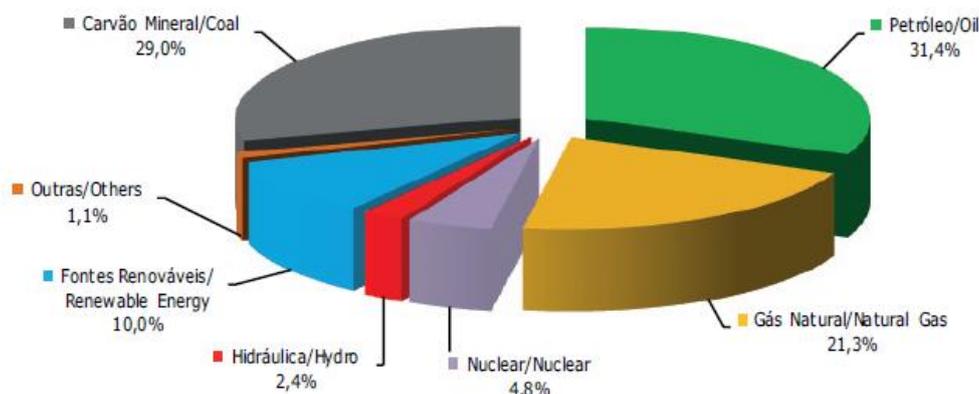
A radiação solar incidente em toda a superfície terrestre durante 84 minutos seria o suficiente para atender toda a demanda energética mundial, que é quantificada em

aproximadamente  $1,4 \times 10^{14}$  kW (KALOGIROU, 2014), mas a exploração deste recurso encontra ainda obstáculos quando comparados com a tecnologia e a economia de fontes energéticas convencionais.

### 3.3.1 *Cenário energético atual*

O crescimento populacional e a melhoria das condições de vida da população contribuem para que a oferta mundial de energia aumente a cada ano, no entanto as mudanças climáticas decorrentes da exploração inadequada e desenfreada dos recursos naturais tornam necessário o aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial, assim como a diversificação da mesma a fim de uma maior segurança energética.

Em 2014, de acordo como Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2015a), 81,7% da oferta mundial de energia foi provenientes de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral), 8,3% foram oriundos de combustíveis nucleares, recursos hídricos e outras fontes e apenas 10% foram correspondentes as demais fontes de energias renováveis (solar, eólica, biomassa e etc), como mostrado na Figura 16.



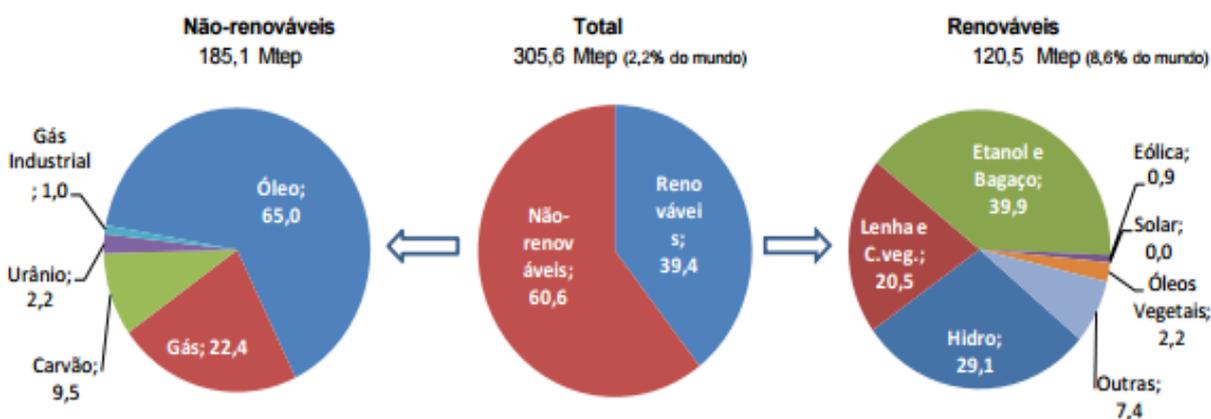
**Figura 16** - Oferta mundial de energia por fonte (Total:  $13.371 \times 10^6$  tep) - Ano base 2014 (BRASIL, 2015a).

No que diz respeito à contribuição dos países na inclusão das energias renováveis na matriz energética mundial o Brasil larga em vantagem em relação aos demais países, fato que pode ser comprovado ao se comparar o valor percentual da contribuição das energias renováveis na matriz energética brasileira de 39,4% com 13,8% da matriz energética mundial (BRASIL, 2015b).

Em 2014 as fontes de energias renováveis na matriz energética brasileira passaram a ocupar uma parcela de 39,4% contra 40,4% verificados em 2013 (BRASIL,2015b). Este decréscimo é justificado pela crise energética que o país tem enfrentado devido a longos períodos de estiagem que provocaram a diminuição da geração de energia hidroelétrica e o aumento da geração termoeétrica, o que tem tornado evidente a necessidade de diversificação da matriz energética nacional.

A Figura 17 mostra que a energia oriunda dos recursos hídricos representa uma parcela de 29,1% de toda energia renovável da matriz energética brasileira, enquanto que outras fontes de energias renováveis com grande potencial de exploração, tais como a energia eólica e a energia solar apresentam uma parcela pouco expressiva em escala nacional. Apesar de a energia hidroelétrica estar entre as fontes renováveis de energia a dependência de uma única fonte pode oferecer riscos à segurança energética do país.

Em escala mundial a energia solar, assim como as demais fontes renováveis, apresenta um pequeno percentual de exploração (BRASIL, 2008) sendo mais explorada em países como Alemanha, Estados Unidos, Japão e Espanha. Dentre esses países a Espanha e os Estados Unidos se destacam no desenvolvimento de tecnologias de exploração termosolar, em virtude dos altos valores de incidência de radiação em regiões semiáridas desses países. A Alemanha e o Japão se destacam principalmente na geração de eletricidade a partir do efeito fotovoltaico (SILVA, 2015).



**Figura 17** - Oferta Interna de Energia no Brasil (%) - Ano base 2014 (BRASIL, 2015b).

Outra visão da Matriz Energética Brasileira pode ser obtida ao se fazer uma análise do consumo energético por setor de consumo (Tabela 4).

**Tabela 4** - Consumo energético por setor de consumo (Total: 305,6 x 10<sup>6</sup> tep).

Setor de Consumo	2014
Industrial	28,6%
Transportes	28,2%
Energético	9,0%
Residencial	8,1%
Agropecuário	3,7%
Comercial	2,8%
Público	1,3%
Usos não energéticos	5,2%
Perdas na transformação	10,0%
Outras perdas	3,1%

FONTE: (BRASIL, 2015a).

Pode se notar que o setor industrial e o de transporte são os principais consumidores de energia no Brasil, com uma parcela de 28,6% e 28,2%, respectivamente, do total do consumo de energia no Brasil.

O setor industrial é responsável por maior parte do consumo final de toda a oferta de energia no Brasil e quando diz respeito ao consumo específico de energia elétrica não é diferente. Cerca de 33% de toda a eletricidade produzida é encaminhada para as indústrias (BRASIL, 2015a), portanto, esse setor se apresenta como uma importante área para atuação de programas de eficiência energética e de investimento em novas tecnologias de exploração energética.

### ***3.3.2 Potencial de aplicação solar no setor industrial***

Conforme os dados apresentados na Tabela 5, as fontes de energia utilizadas na indústria brasileira são bastante variadas. A eletricidade é apontada como a principal fonte de energia com 20,2% do total de 2014, sendo os demais 79,8% divididos entre as outras fontes, que são utilizadas principalmente para geração de calor para os processos produtivos.

A indústria é um setor de grande diversidade de atividades, desde a extração de recursos naturais e sua conversão em matérias-primas à fabricação de produtos finais, podendo ser dividido em duas categorias, o setor de indústrias energo-intensivas (ferro, alumínio, cimento, química, petróleo *etc.*) e o de indústrias leves (alimentos, processamento de materiais, têxteis *etc.*), sendo o primeiro responsável por mais da metade da demanda energética industrial (GOLDEMBERG; CHU, 2010).

Países como a China e a Índia tem formulado programas de incentivo à utilização de energia solar, e embora seja dado um foco maior à geração de eletricidade a partir de sistemas fotovoltaicos ligados a rede é dada oportunidade de implantação de tecnologias de aquecimento solar para aplicações industriais (GIZ, 2011). No Brasil os incentivos à utilização da energia solar são direcionados principalmente para geração fotovoltaica descentralizada. A norma n° 482/2012 da ANEEL estabelece as condições gerais para os sistemas de mini e micro geração fotovoltaica e define o sistema de compensação da energia elétrica (DELGADO, 2015).

Tendo em vista o potencial solarimétrico brasileiro e as necessidades energéticas dos processos produtivos industriais, seja de eletricidade ou de calor de processo, o setor industrial pode contribuir significativamente para a intensificação das aplicações da energia solar no Brasil e no mundo.

**Tabela 5 - Consumo percentual por fonte do setor industrial.**

<b>Fontes \ Ano</b>	<b>2008</b>	<b>2010</b>	<b>2012</b>	<b>2014</b>
<b>Gás Natural</b>	10,4 %	10,8%	11,1%	11,1%
<b>Carvão Mineral</b>	3,8%	3,8%	4,0%	4,4%
<b>Lenha</b>	8,0%	8,4%	8,4%	8,9%
<b>Bagaço de Cana</b>	18,9%	20,2%	20,1%	18,5%
<b>Óleo Combustível</b>	4,9%	3,8%	3,0%	3,0%
<b>Gás de Coqueria</b>	1,3%	1,5%	1,4%	1,4%
<b>Coque de Carvão Mineral</b>	8,2%	8,8%	9,0%	9,2%
<b>Eletricidade</b>	20,8%	20,4%	20,3%	20,2%
<b>Carvão vegetal</b>	6,9%	4,7%	4,5%	3,9%
<b>Outras</b>	17,0%	17,6%	20,0%	19,6%

FONTE: (BRASIL, 2015a).

Apesar dos poucos incentivos, a utilização da energia termosolar na indústria se apresenta como uma alternativa potencial dentro das energias renováveis, mas é necessário a realização de análises detalhadas para identificar a tecnologia adequada para aplicações específicas.

O número de trabalhos acadêmicos e de pesquisa encontrados na literatura desenvolvidos com foco no aproveitamento da energia solar tem aumentado nos últimos anos, porém ainda são poucos os trabalhos encontrados referentes a aplicações industriais da energia solar. Dentre os principais trabalhos encontrados na literatura estão estudos de casos e estimação de potenciais de aplicações industriais, desenvolvidos principalmente

em países como a Espanha, Portugal (EUROPEAN COMMISSION, 2001), China (LI *et al.*, 2007) e Índia (GIZ, 2011), onde a utilização da energia solar nos demais setores de consumo já é mais consolidada.

No Brasil os trabalhos desenvolvidos sobre energia solar são principalmente referentes a mini e micro geração fotovoltaica e a sistemas de aquecimento solar de pequeno e médio porte, aplicados no setor residencial, comercial e afins. Delgado (2015) realizou um estudo de caso em um hospital paraibano em que buscou a otimização econômica e ambiental de um sistema de poligeração incluindo a energia solar fotovoltaica, e Lafay (2005) fez uma análise do comportamento térmico de um sistema de aquecimento solar de água combinado com um sistema auxiliar a gás.

Vichi & Mansor (2009), com base no potencial brasileiro de exploração das energias renováveis, apontam o Brasil como um país promissor no aumento do percentual das energias renováveis na matriz energética brasileira e mundial. O alto consumo do setor industrial, o potencial solarimétrico brasileiro e o pouco número de referências bibliográficas encontradas na literatura justificam a idealização deste trabalho.

---

## CAPÍTULO III

---

### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os sistemas de energia solar apresentem funcionamento adequado e eficiente é necessário que alguns critérios sejam estabelecidos, portanto, n presente capítulo serão descritos os métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, assim como a escolha dos dados de radiação solar empregados.

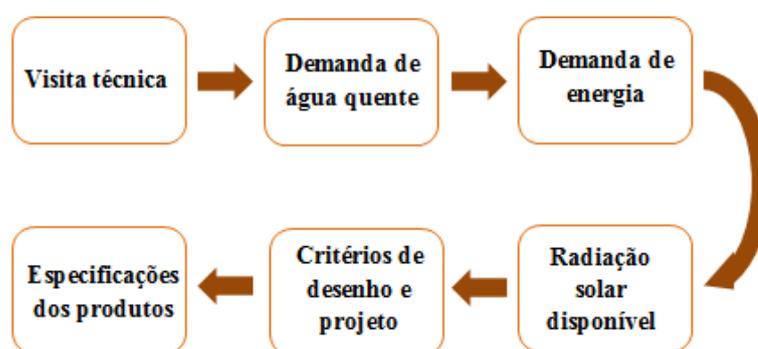
De acordo com a NBR 15569 (ABNT NBR 15569, 2008), um projeto de um SAS deve contemplar no mínimo os seguintes elementos:

- a) Premissas de cálculo;
- b) Dimensionamento;
- c) Fração solar;
- d) Memorial descritivo;
- e) Volume de armazenamento;
- f) Pressão de trabalho;
- g) Fontes de abastecimento de água;
- h) Área coletora;
- i) Ângulos de orientação e de inclinação dos coletores solares;
- j) Estudo de sombreamento;
- k) Previsão de disposição de segurança;
- l) Massa dos principais componentes;
- m) Considerações a respeito de propriedades físico-químicas da água;
- n) Localização, incluindo endereço;
- o) Indicação do norte geográfico;
- p) Planta, corte, isométrico, vista, detalhe e diagrama esquemático, necessários para perfeita compreensão das interligações hidráulicas e interfaces das principais componentes;
- q) Esquema, detalhe e especificação para operação e controle de componentes elétricos (quando aplicável);
- r) Especificação dos coletores e reservatórios térmicos;
- s) Especificações de tubos, conexões, isolamento térmico, válvulas e motobomba;

- t) Tipos e localização de suportes e métodos de fixação de equipamentos, quando aplicável;
- u) Especificação do sistema de aquecimento auxiliar.

Na Figura 18 encontra-se um fluxograma que está representado um roteiro proposto pela ABRAVA (2008) para a execução de um projeto de SAS.

A partir dos elementos mínimos necessários exigidos pela ANBT e utilizando o roteiro proposto pela ABRAVA (2008) como um direcionador, a seguir apresenta-se a metodologia proposta para o projeto e para análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de um sistema de aquecimento solar de água para processos industriais, bem como, as ferramentas necessárias para sua execução.



**Figura 18** – Roteiro para execução de projeto de um SAS.

#### 4.1 Caracterização da Indústria

O processo têxtil de produção, de uma forma simplificada, pode ser dividido em fiação, tecelagem e beneficiamento (FERNANDES, 2010). No entanto, são os processos de beneficiamento de tecidos que requerem significativas demandas de água quente, portanto, para o desenvolvimento deste trabalho foi analisada a necessidade de água quente em uma indústria têxtil de beneficiamento, de pequeno porte, localizada na cidade de João Pessoa, (Latitude 7,06° Sul; longitude 34,5° Oeste; Altitude 7,43 m), Paraíba, Brasil.

A Indústria em questão foi hipoteticamente criada com o objetivo de viabilizar o desenvolvimento deste trabalho e de possibilitar análises o mais próximas possível de casos reais. Será considerada uma área disponível para instalação dos painéis solares de 420 m<sup>2</sup> (12m X 35m).

A quantidade de água usada varia bastante de fábrica para fábrica e depende das operações específicas de processamento e equipamento, aqui se considerou a média dos valores disponibilizada por KRMELT (2011) para consumo de água quente no processamento de tecidos de algodão ou viscose (e suas composições com fibras sintéticas): 82 l de água quente por kg de tecido processado.

#### ***4.1.1 Demanda de Água quente***

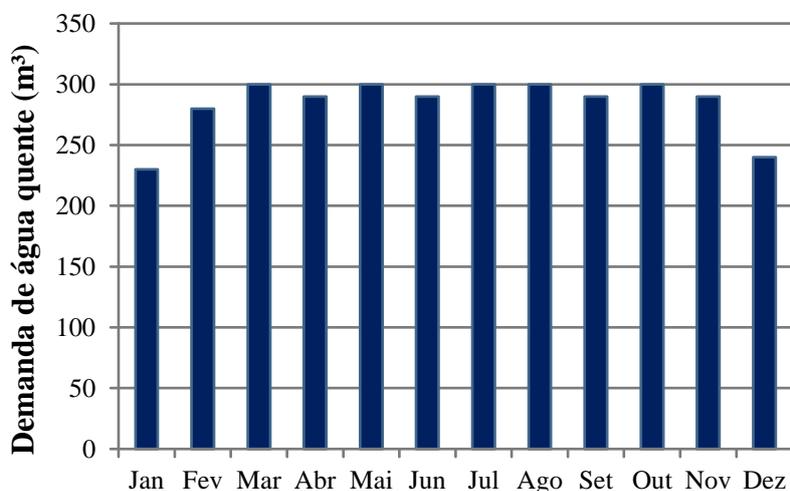
Considera-se que 95% da água utilizada é aplicada para processamento (5% na cozinha e banheiros). As etapas da manufatura têxtil que utilizam mais água são os processamentos "úmidos", que se constituem na transformação de tecidos virgens (não-tingidos, não-branqueados, ou crus, também referidos como "*greige*" em inglês) em produto final, por meio de quatro etapas fundamentais:

- i) Preparação ou pré-tratamento: consiste do tratamento químico do tecido cru para remover impurezas, melhorar resistência e absorção do tingimento, e melhorar aparência do tecido;
- ii) Tingimento: Trata-se do processo de aplicação de corantes ou de pigmentação as fibras têxteis (AMORIM, 1996 *apud* FERNANDES, 2010);
- iii) Impressão: Trata-se da aplicação de desenhos localizados no material têxtil (FERNANDES, 2010);
- iv) Finalização: Está é a etapa do beneficiamento responsável por conferir ao tecido qualidades e características essenciais para o consumidor final (BELTRAME, 2000 *apud* FERNANDES, 2010).

A demanda de água quente mensal da industrial está representada no Gráfico ilustrado na Figura 19. O comportamento é pouco variável ao longo dos meses, o que implica em uma demanda de energia para aquecimento da água com similar comportamento.

O Gráfico representado na Figura 19 foi plotado considerando que a indústria em questão opere durante 24 horas diárias, com pausas programadas apenas por 24 horas a cada um mês para manutenção preventiva dos equipamentos e por um período de recesso de 15 dias entre os meses de dezembro e janeiro, sendo a parada de 7 e 8 dias, respectivamente. A empresa apresenta uma demanda mensal de água quente, com temperaturas entre 50 a 60°C, variando entre aproximadamente 230 a 300 m<sup>3</sup>/mês (cerca de 10 m<sup>3</sup>/dia), o que equivale a uma vazão de consumo de aproximadamente 0,12 kg/s,

sendo esta extraída de um poço tubular localizado na própria indústria onde também recebe um tratamento químico para eliminação parcial de impurezas.



**Figura 19** – Demanda mensal de água quente da indústria têxtil em análise.

#### 4.1.2 Características Climáticas

Na Tabela 6 estão apresentados os dados encontrados no Climaticus 4.2 para a cidade de João Pessoa.

**Tabela 6** - Dados médios mensais para a cidade de João Pessoa

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
<b>Temp. Média (°C)</b>	25,8	25,2	28,2	25,5	27	26,2	23,7	25,4	27,5	27,7	27	24,1	26,1
<b>Temp. Máx. (°C)</b>	31,8	30,5	30	29,8	29,6	28,3	26,3	27,8	28,3	29,3	29,7	30	29,3
<b>Temp. Mín. (°C)</b>	22,8	22,6	21,2	22,9	22,2	21,8	20,3	21,7	18,9	23,3	23,2	23	21,9
<b>Umidade Relativa (%)</b>	75	75	81	79	81	81	87	75	67	73	74	74	76,8
<b>Nebulosidade (0-10)</b>	5,6	5,8	6,1	6	6,2	6,1	6	5,2	5,7	5,1	5,4	5,3	5,7
<b>Insolação Total (horas)</b>	244	219	209	182	194	181	149	212	235	266,2	273	229	216,1
<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	3,00	2,50	2,50	2,00	2,50

FONTE: (ALUCCI, 2011).

O banco de dados Climaticus 4.2 (ALUCCI, 2011) compila dados das Normais Climatológicas de 1992 e a partir deles fornece dados para caracterização do clima local, tais como: médias mensais de temperaturas, valores mínimos e máximos de temperatura, médias mensais da velocidade do vento, valores de umidade relativa, índice de nebulosidade e valores de Insolação total mensal, em número de horas de sol, para todos os meses do ano (médias históricas de 50 anos).

## **4.2 Estimativa da Energia Solar Disponível**

Para a estimativa da energia solar disponível pode-se utilizar diretamente os atlas solarimétricos do Brasil já mencionados anteriormente (COLE & PEREIRA, 1998; PEREIRA *et al.*, 2006; TIBA, 2000). No entanto, existem softwares e planilhas de cálculo disponíveis gratuitamente na internet, que a partir das coordenadas geográficas de uma determinada cidade fornecem valores médios mensais e anuais da radiação solar disponível para diferentes inclinações e orientações. Neste trabalho utilizou-se o software RadiaSol 2 (UFRGS, 2010) e o programa SunData disponibilizado no site da CRESESB (2016).

O RadiaSol 2 é um programa desenvolvido no laboratório de Energia Solar da universidade Federal do Rio Grande do Sul que dispõe de duas opções de entrada de dados. Uma destas trata-se dos dados climáticos relacionados com as coordenadas geográficas inseridas, a outra opção usa um banco de dados interno do software que compila medições na superfície, de diferentes fontes, entre as quais são utilizadas medições das Normais Climatológicas de 1992, que também é a fonte dos dados utilizados no Climaticus 4.2 (ALUCCI, 2011). O programa SunData é baseado no banco de dados *Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal* do *Centro de Estudios de la Energia Solar* (CRESESB, 2016) contendo valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes.

Nota-se que existe uma diferença na forma como os dados são calculados e apresentados nas fontes consultadas. O SunData fornece valores de irradiação média mensal (kWh/m<sup>2</sup> dia) para todos os meses do ano, valores de máximo e mínimo para a irradiação média mensal, a média da irradiação anual e a diferença entre os extremos (Delta), para diferentes ângulos de inclinação. A Tabela 7 mostra os dados referentes à cidade de João Pessoa. A inclinação adotada para a análise do SAS será a mesma

inclinação no telhado disponibilizado pela indústria para instalação dos painéis solares, 16°N.

Utilizando o RadiaSol 2 é possível verificar tanto os valores de irradiação média mensal para todos os meses do ano (kWh/m<sup>2</sup> dia) quanto uma estimativa das parcelas direta e difusa destes valores para uma inclinação específica determinada pelo usuário. A Tabela 8 mostra os valores no plano horizontal para a cidade de João Pessoa.

**Tabela 7 - Valores de Irradiação Média Mensal (kWh/m<sup>2</sup> dia).**

Inclinação (β)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual	Delta
0° N	5,36	5,72	5,50	5,03	5,06	4,28	4,56	5,39	5,69	6,42	6,61	6,33	5,50	2,33
7° N	5,15	5,58	5,50	5,16	5,32	4,53	4,81	5,59	5,75	6,31	6,34	6,02	5,50	1,81
5° N	5,21	5,63	5,50	5,13	5,25	4,47	4,75	5,54	5,74	6,35	6,43	6,11	5,51	1,96
16° N	4,80	5,33	5,40	5,24	5,57	4,79	5,06	5,76	5,72	6,06	6,06	5,53	5,43	1,27

FONTE: (CRESESB, 2016).

Para facilitar a comparação entre os dados obtidos através do programa SunData e do RadiaSol 2, os valores de mínimos e máximos da irradiação média mensal global e das componentes direta e difusa foram destacados, assim como, foi calculado a média anual de ambas e o delta.

**Tabela 8 - Valores de Irradiação Média Mensal para uma superfície inclinada de 16°N (kWh/m<sup>2</sup> dia).**

Mês	Irradiação Média – I (kWh/ m <sup>2</sup> / dia)			
	Global	Direta	Difusa	Inclinada (16°)
Jan	5,35	2,90	2,77	5,68
fev	5,71	3,25	2,55	5,81
Mar	5,49	2,70	2,61	5,32
Abr	5,02	2,41	2,12	4,54
Mai	5,05	2,28	2,00	4,30
Jun	4,27	1,75	1,77	3,54
Jul	4,55	2,08	1,69	3,78
Ago	5,38	2,58	2,13	4,72
Set	5,68	2,97	2,34	5,33
Out	6,41	3,90	2,48	6,39
Nov	6,60	4,38	2,50	6,90
Dez	6,31	4,21	2,53	6,75
Anual	5,49	2,95	2,29	5,26
Delta	2,33	2,63	1,00	3,36

FONTE: UFRGS, 2010.

Para obter os valores de radiação solar através do RadiaSol 2, além da localização geográfica deve-se especificar a inclinação, a orientação da superfície e o albedo das superfícies adjacentes aos coletores, no nosso caso considerou-se o albedo do telhado da indústria de 0,6 (KLUPPEL, 1975) a inclinação dos coletores de 16°N e a orientação de 180°N (ângulo azimutal).

### 4.3 Dimensionamento do SAS

A ABNT na NBR 15669 (2008) apresenta em sua metodologia de cálculo duas alternativas para o dimensionamento de sistemas de aquecimento solar. Para SAS em residências unifamiliares é indicada a metodologia de cálculo 2, exposta na própria NBR, para demais sistemas é indicada a metodologia 1, que é a metodologia *f-Chart* conforme encontrado em DUFFIE & BECKMAN (2014), no entanto, neste trabalho, será utilizado um método também encontrado em DUFFIE & BECKMAN (2014), mas bem mais detalhista que o método *f-Chart*. A escolha dessa metodologia foi feita com o objetivo de observar as perdas presentes em cada parte do SAS e a identificação dos motivos, afim de propor possíveis soluções e assim um SAS mais eficiente.

A seguir encontra-se de forma detalhada cada uma das etapas necessárias ao dimensionamento do SAS.

#### 4.3.1 Volume de Armazenamento

O volume de armazenamento pode ser calculado pela seguinte equação (ABNT, 2008):

$$V_{\text{armaz}} = \frac{V_{\text{consumo}} (T_{\text{consumo}} - T_{\text{amb}})}{(T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})} \quad (17)$$

Onde:  $V_{\text{consumo}}$  é o consumo diário ( $\text{m}^3$ );

$T_{\text{consumo}}$  é a temperatura de consumo de utilização;

$T_{\text{armaz}}$  é a temperatura de armazenamento da água ( $T_{\text{armaz}} > T_{\text{consumo}}$ );

$T_{\text{amb}}$  é a temperatura ambiente média anual do local da instalação;

### 4.3.2 Demanda Diária de Energia Útil ( $E_{\text{útil}}$ )

A demanda diária de energia útil é a quantidade de energia utilizada para aquecer a quantidade de água necessária por dia até a temperatura desejada. Segundo a NBR 15669 (ABNT, 2008) a  $E_{\text{útil}}$  pode ser determinada, em kWh/dia, através da equação a seguir:

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{armaz}} \rho C_p (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})}{3600} \quad (18)$$

Onde:  $\rho$  é a massa específica da água igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>;

$C_p$  é o calor específico da água a pressão constante, igual a 4,18 kJ/kg K;

$V_{\text{armaz}}$  será considerado igual ao consumo médio diário (para esse cálculo) em m<sup>3</sup>/dia;

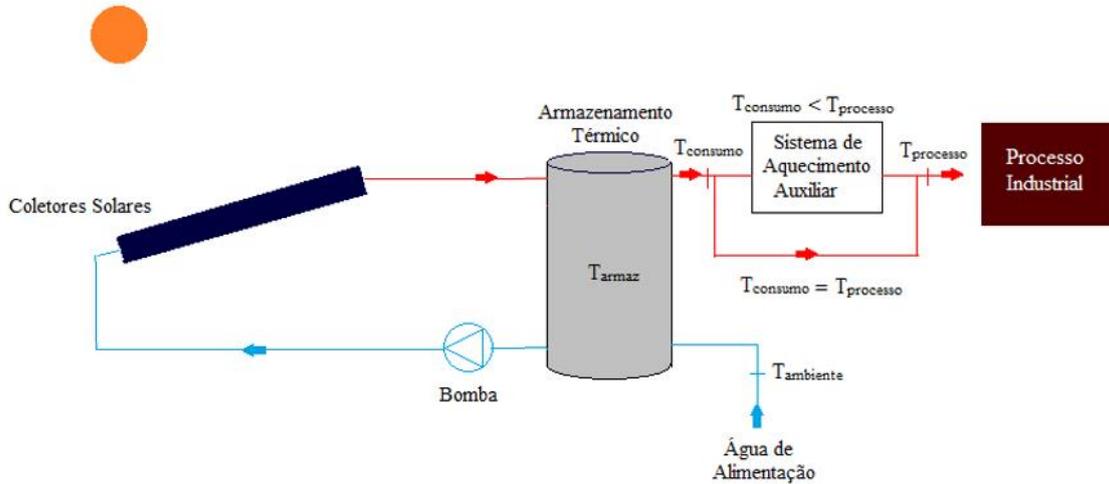
$T_{\text{armaz}}$  será considerado igual à temperatura requerida no processo industrial (para esse cálculo);

$T_{\text{ambiente}}$  é a temperatura média do ambiente (considera-se que a água está inicialmente na mesma temperatura).

### 4.3.3 SAS Proposto sem perdas

A Figura 20 mostra um esboço do esquema proposto para a instalação do sistema de aquecimento solar. O sistema proposto apresenta circulação forçada direta, ou seja, é feito o uso de bombas para circulação da água e a água que circula nos coletores que é a mesma do consumo.

Para determinação da área de coletores deve ser feita uma estimativa inicial, onde será considerado os valores médios da radiação, da temperatura ambiente local e será desconsiderada as perdas devido ao vento. Os valores inicialmente calculados serão usados como ponto inicial de sucessivas interações e serão obtidos a partir de balanços de energia nos principais componentes do sistema proposto.



**Figura 20** – Esquema de Funcionamento Proposto do SAS.

A seguir, através da aplicação da 1<sup>o</sup> Lei da termodinâmica em cada um dos componentes do sistema considerando a conservação da massa e regime permanente, são obtidas as equações que formarão um sistema a ser resolvido posteriormente.

- Balanço de Energia nos Coletores Solares:

$$\frac{dE}{dt} = E_{entra} - E_{sai}$$

$$0 = I A_c n - m_c C_p (T_{c2} - T_{c1}) \quad (19)$$

- Balanço de Energia no Tanque de Armazenamento:

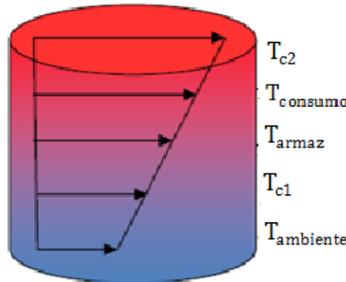
$$\frac{dE}{dt} = E_{entra} - E_{sai}$$

$$0 = m_c C_p (T_{c2} - T_{c1}) - m_{consumo} C_p (T_{consumo} - T_{ambiente}) \quad (20)$$

A Equação 20 foi determinada considerando a temperatura do tanque de armazenamento constante, porém é importante considerar que esta temperatura não será uniforme, o que torna necessária a determinação de uma temperatura média,  $T_{armaz}$ .

O tanque tende a apresentar uma temperatura estratificada que varia entre a temperatura de alimentação e a temperatura de consumo. Para considerar este efeito é determinando um coeficiente adimensional ( $E_{armaz}$ ) que será igual a 0 quando  $T_{armaz} = T_{ambiente}$  e igual a 1 quando  $T_{armaz} = T_{consumo}$ . Essa estratificação ocorre devido à diferença

de densidade da água no tanque, a água mais quente e menos densa fica na parte superior do tanque enquanto que a água fria e mais densa fica na parte inferior, conforme mostra a Figura 21.



**Figura 21** – Estratificação do Tanque de Armazenamento (Adaptado de DOMÍNGUEZ, 2009).

A variação do coeficiente  $E_T$  pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E_{\text{armaz}} = \frac{T_{\text{consumo}} - T_{\text{armaz}}}{T_{c2} - T_{\text{armaz}}} \quad (21)$$

Realizando um balanço de energia considerando a estratificação térmica do tanque de armazenamento temos:

$$\frac{dE}{dt} = E_{\text{entra}} - E_{\text{sai}}$$

$$0 = m_c c_p T_{c2} + m_{\text{consumo}} c_p T_{\text{ambiente}} = (m_c + m_{\text{consumo}}) c_p T_{\text{armaz}} \quad (22)$$

onde  $m_{\text{consumo}}$  é igual a vazão mássica da água de alimentação e  $m_c$  é a vazão nos coletores.

Logo, a temperatura média de armazenamento do tanque pode ser calculada:

$$T_{\text{armaz}} = \frac{(m_c T_{c2} + m_{\text{consumo}} T_{\text{ambiente}})}{(m_c + m_{\text{consumo}})} \quad (23)$$

A área coletora necessária é determinada pela relação entre a energia solar que é efetivamente usada para aquecer a água do sistema e a energia necessária para o aquecimento da água nas condições desejadas, como definida a seguir:

$$f = \frac{m_{\text{consumo}} C_p (T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}})}{m_{\text{consumo}} C_p (T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}})} = \frac{T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}}}{T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}}} \quad (24)$$

onde  $f$  é um índice que determina a contribuição solar do sistema de aquecimento e varia de acordo com a configuração e a localização dos sistema.

O número de coletores solares necessários é calculado pela equação a seguir:

$$N_{\text{coletores}} = \frac{A_c}{A_{tc}} \quad (25)$$

onde  $A_{tc}$  é a área da cobertura de vidro do coletor, também chamada de área transparente.

Das Equações 19 a 25, os seguintes dados são conhecidos:

- Radiação Incidente no plano inclinado;
- Eficiência dos coletores solar usados ( $n= 0,518$ );
- Temperatura da água de alimentação ( $T_{\text{ambiente}}$ );
- Temperatura requerida no processo ( $T_{\text{processo}} = 60^{\circ}\text{C}$ );
- Vazão de consumo ( $m_{\text{cons}}= 0,12 \text{ kg/s}$ );
- Propriedades do fluido de trabalho (água);
- Área transparente dos coletores;

E tem – se as seguintes incógnitas:

- Temperatura de entrada dos coletores ( $T_{c1}$ );
- Temperatura de saída dos coletores ( $T_{c2}$ );
- Vazão mássica necessária no banco de coletores;
- Temperatura média do tanque de armazenamento ( $T_{\text{armaz}}$ );
- Temperatura de consumo ( $T_{\text{consumo}}$ );
- Área coletora ( $A_c$ ).

A resolução das equações 19 a 25 é feita a partir de um sistema de equações resolvido no Software *Engineering Equation Solver* (EES), considerando inicialmente uma fração solar de 80% e  $T_{c1}$  20% maior que  $T_{\text{ambiente}}$  (estratificação térmica no tanque de armazenamento).

Após determinada a primeira estimativa da área coletora, pode-se fazer estimativas da fração solar para todos os meses do ano. Através da resolução do mesmo sistema de equações usado anteriormente no EES.

Nos Apêndices A e B estão disponíveis as rotinas de cálculos criadas no EES para o cálculo da área coletora com os dados anuais e mensais, respectivamente.

#### ***4.3.4 Cálculo das perdas térmicas do SAS proposto***

Uma vez proposta o dimensionamento de um SAS em condições ideais, é possível e necessário, para se obter um projeto final eficiente, realizar o cálculo das perdas que ocorrem no sistema e assim o seu dimensionamento final as considerando.

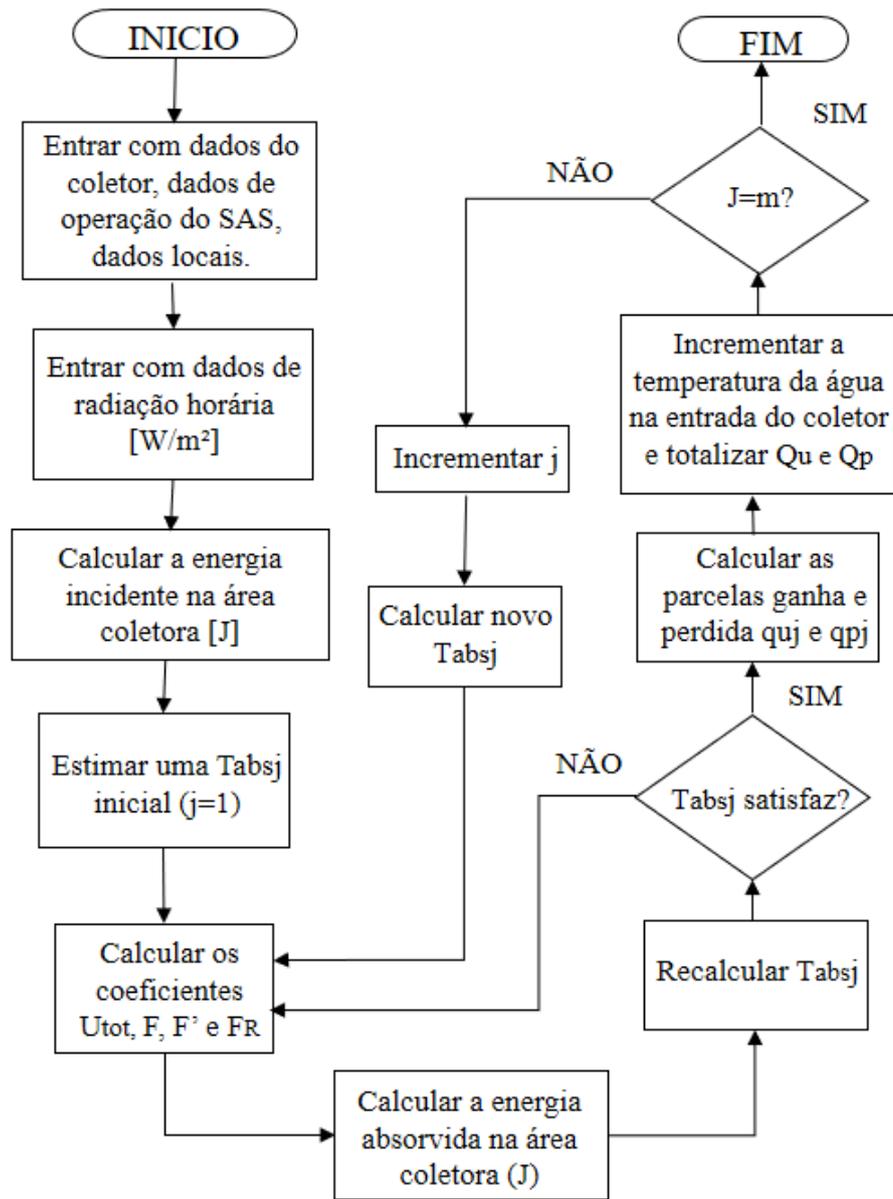
Pode-se dividir as perdas presentes em SAS em duas partes principais, de acordo com o local da instalação onde ocorrem, são elas: Perdas nos coletores solares e perdas no armazenamento. A perda presente nos coletores é considerada no cálculo da energia útil coletada.

##### ***4.3.4.1 Energia Útil Coletada***

O coletor solar plano absorve a radiação solar incidente, no entanto, parte daquela energia é perdida para o ambiente. A energia útil coletada é a fração da energia que é absorvida pelo coletor e convertida em energia térmica, ou seja, é a diferença entre a energia solar incidente no coletor e a perda para o ambiente.

Para a quantificação da energia útil coletada é necessário a realização de um complexo cálculo interativo. Na Figura 22, encontra-se o fluxograma do método interativo proposto.

Serão considerados os dados horários da radiação solar incidente, e consequentemente serão calculados hora a hora a energia absorvida nos coletores. A energia útil coletada em um dia de operação será então o somatório da energia absorvida em cada hora de sol pelo banco de coletores.



**Figura 22** – Fluxograma para o cálculo da energia útil coletada (Adaptado de KLUPPEL, 1985).

Os dados referentes ao primeiro e ao terceiro passo do fluxograma (Figura 24) foram obtidos nas seções anteriores. O cálculo da energia incidente na área coletora é feito com a equação a seguir:

$$I_j = 3600S_jA_c \quad (26)$$

A estimativa inicial da temperatura da placa absorvedora,  $T_{\text{abs}(j=1)}$ , será feita a partir da suposição que a temperatura da placa inicialmente será igual a temperatura média do ambiente mais 10 K (DUFFIE & BECKMAN, 2014).

Para calcular o coeficiente global de perda de calor do coletor solar,  $U_{\text{tot}}$ ; o fator de rendimento das aletas,  $F$ ; o fator de rendimento de captação  $F'$  e o fator de remoção de calor,  $F_R$  serão utilizadas as equações indicadas por DUFFIE & BECKMAN (2014). Algumas hipóteses devem ser consideradas:

- Operação em regime uniforme;
- Temperatura da cobertura de vidro e da placa absorvedora uniformes em todas as suas extensões e espessura;
- Fluxos de calor unidimensionais;
- As perdas radiantes se dão para as altas camadas da atmosfera (considerada um corpo negro).

O coeficiente global de perdas térmicas no coletor é obtido pelo somatório da contribuição das partes do coletor (Equação 27).

$$U_{\text{tot}} = U_{\text{topo}} + U_{\text{base}} + U_{\text{lad}} \quad (27)$$

As perdas de energia que ocorrem pelo topo do coletor podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$U_{\text{topo}} = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{\text{abs}}} [T_{\text{abs}} + T_{\text{amb}}/N + z]^e} + \frac{1}{h_{\text{ca}}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{\text{abs}} + T_{\text{amb}})(T_{\text{abs}}^2 + T_{\text{amb}}^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591 N h_{\text{ca}})^{-1} + (2N + z - 1 + 0,133 \varepsilon_p/\varepsilon_c) - N} \quad (28)$$

$$h_{\text{ca}} = 2,87 + 3 V_v \quad (29)$$

$$C = 520(1 - 0,000051\beta^2) \quad (30)$$

$$e = 0,430 \left( 1 - \frac{100}{T_{\text{abs}}} \right) \quad (31)$$

$$z = (1 + 0,089 h_{ca} - 0,1166h_{ca}\epsilon_p)(1 + 0,07866 N) \quad (32)$$

onde N é o número de coberturas de vidro no coletor;  $\epsilon_p$  e  $\epsilon_c$  é a emissividade da placa absorvedora e do vidro, respectivamente;  $T_{abs}$  é a temperatura da placa absorvedora;  $V_v$  é a velocidade média do vento;  $h_{ca}$  é o coeficiente convectivo entre a cobertura de vidro do coletor e o ar e  $\beta$  é a inclinação dos coletores.

As perdas de energia pela base do coletor e pelos lados são facilmente determinadas pelas Equações 33 e 34:

$$U_{base} = \frac{k_i}{l_i} \quad (33)$$

$$U_{lados} = \frac{A_{lados}}{A_{col}} U_{base} \quad (34)$$

Onde  $k_i$  e  $l_i$  são, respectivamente, a condutividade térmica e a espessura usado do isolante térmico;  $A_{lados}$  e  $A_{col}$  é a área lateral e a área total do coletor.

O fator de rendimento das aletas, para aletas retas, F, é determinado pelas Equações 35 e 36.

$$F = \frac{\text{tgh} \left( m \frac{(W - D)}{2} \right)}{m \frac{(W - D)}{2}} \quad (35)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_{tot}}{k t}} \quad (36)$$

onde t e k são a espessura e a condutividade térmica da placa absorvedora, respectivamente e W é a distância entre os tubos e De é o diâmetro externo dos tubos.

O fator de rendimento de captação, F', é determinado com as Equações a seguir:

$$F' = \left( \frac{1/U_{tot}}{W(D_e + (W - D_e)F)} \right) U_f \quad (37)$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\gamma}{k_b b}} \quad (38)$$

onde  $U_f$  é o coeficiente global de troca térmica entra a chapa e o fluído;  $h_i$  é o coeficiente de convecção interno aos tubos;  $b$  e  $k_b$  é a largura da junção placa-tubo e a sua condutividade térmica, respectivamente;  $\gamma$  é a espessura da solda na junção placa-tubo.

O coeficiente de convecção interno nos tubos é determinado através do cálculo do número de Nusselt, que por sua vez é calculado em função no número de Reynolds, dados por:

$$Re = \frac{4 \left( \frac{m_c}{N_t} \right)}{\pi D_i \mu_{it}} \quad (39)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds,  $m_c$  é a vazão mássica em um coletor,  $N_t$  o número de tubos no coletor,  $D_i$  o diâmetro interno dos tubos e  $\mu_{it}$  é a viscosidade cinemática da água no interior dos tubos.

Uma vez conhecido o número de Reynolds e caracterizado o escoamento como laminar ( $Re < 2300$ ) ou turbulento ( $Re > 4000$ ), pode se escolher uma correlação adequada para o cálculo do número de Nusselt. Neste trabalho será considerado o escoamento turbulento para  $Re \geq 2300$ .

Considerando fluxo térmico na superfície dos tubos constantes, neste trabalho as correlações adotadas para o cálculo do número de Nusselt, para escoamento laminar ou turbulento, respectivamente, foram as equações 40 e 41:

$$Nu = 4,36 \quad (40)$$

$$Nu = \frac{(f_a/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f_a/8)^{\frac{1}{2}}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (41)$$

Onde  $f_a$  é o fator de atrito do escoamento no interior dos tubos e  $Pr$  é o número de Prandtl da água na temperatura média da água nos coletores.

A Equação 41 foi formulado por Gnielinski e é válida para o cálculo do número de Nusselt em escoamento caracterizados como transitórios ou turbulentos ( $Re > 2300$ ).

O fator de atrito do escoamento da água no interior dos tubos é calculado com a seguinte correlação, para  $Re < 3000$ :

$$f_a = 0,316 Re^{-1/4} \quad (42)$$

Para  $Re \geq 3000$ :

$$f_a = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (43)$$

Com o número de Nusselt calculado, o coeficiente de convecção do escoamento da água interno aos tubos do coletor é definido isolando  $h_{it}$  na equação 44.

$$Nu = \frac{h_{it} D_i}{k_c} \quad (44)$$

O fator de remoção de calor,  $F_R$ , é calculado por:

$$F_R = \frac{m C_p}{A_c U_{tot}} \left[ 1 - e^{\frac{-A_c U_{tot} F'}{m C_p}} \right] \quad (45)$$

O cálculo da energia absorvida por hora na área coletora é feito através da equação 46.

$$Q_u = 3600 A_c F_R (S - U_{tot} (T_{abs} - T_{amb})) \quad (46)$$

Depois de calculados os valores dos coeficientes considerando a temperatura da placa absorvedora inicialmente estimada, deve-se, através de um processo iterativo, corrigir  $T_{abs}$  (Equação 47) até que a diferença relativa entre o novo valor de  $T_{abs}$  e o valor anterior esteja dentro da tolerância estabelecida ( $1 \times 10^{-4}$ ).

$$T_{abs} = T_{f1} + \left( \frac{Q_u}{A_c F_R U_{tot}} \right) (1 - F_R) \quad (47)$$

Com o  $T_{abs}$  corrigido, a partir das Equações 27 a 45, recalcula-se os coeficientes  $U_{tot}$ ,  $F$ ,  $F'$  e  $F_R$  e pode-se obter o ganho e as perdas de energia térmica nos coletores.

A parcela de energia total útil e a energia perdida é calculada pelas Equações 48 e 49.

$$Q_{tot} = 3600 \sum_{j=1}^m Q_{uj} = 3600 \sum_{j=1}^m F_{Rj} [S_j - A_c U_{totj} (T_{c1j} - T_{ambj})] \quad (48)$$

$$mC_p (T_{mf(j+1)} - T_{mf(j)}) = Q_{uj} - Q_{pj} \quad (49)$$

onde,  $T_{mf}$  é a temperatura média do fluido nos coletores (Equação 50).

$$T_{mf} = T_{f1} + \left( \frac{Q_u}{A_c F_R U_{tot}} \right) \left( 1 - \frac{F_R}{F'} \right) \quad (50)$$

Para solução da Equação 50 em  $j=1$ ,  $T_{f1}$  será considerada igual a  $T_{amb}$ . Para  $j > 1$ ,  $T_{f1}$  será a média da temperatura ambiente e a temperatura média do fluido no instante anterior,  $T_{mf(j-1)}$ .

No Apêndice B encontra-se a rotina de cálculo em MATLAB para o cálculo da energia útil coletada na área coletora estimada anteriormente.

#### 4.3.4.2 *Perdas no Armazenamento*

O tanque de armazenamento também é responsável pela conservação da água aquecida nos coletores até que seja direcionada ao processo. Como a água contida nos tanques estará em uma temperatura maior que a temperatura ambiente, mesmo com isolamento térmico, haverá perdas de energia térmica do tanque para o ambiente, ou seja, haverá uma variação da energia interna armazenada nos tanques.

A Equação 51 representa a capacidade de armazenamento de energia interna na estocagem de líquidos desconsiderando os efeitos de estratificação térmica nos tanques.

$$Q_{armaz} = m_{armaz} C_p \Delta T_{armaz} \quad (51)$$

Onde:  $m_{armaz}$  é a massa do líquido armazenado;  $C_p$  é o calor específico do líquido armazenado e  $\Delta T_{armaz}$  é a variação da temperatura média do líquido no armazenamento em um determinado intervalo de tempo.

Através de um balanço de energia obtém-se a Equação 52:

$$m_{\text{armaz}} C_p \Delta T_{\text{armaz}} = Q_u - E_{\text{util}} - 3600 U_{TA} A_{TA} (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}}) \quad (52)$$

onde  $Q_u$  é a energia térmica vindo dos coletores;  $E_{\text{util}}$  é a demanda de energia necessária ao processo;  $U_{TA}$  e  $A_{TA}$  são o coeficiente global de perdas térmicas para o ambiente e a área externo do tanque, respectivamente.

Através da integração da Equação 53 em relação ao tempo, considerando um intervalo de tempo de 1 hora, isolando a Temperatura final de armazenamento temos:

$$T_{\text{armaz}(j)} = T_{\text{armaz}(j-1)} + \frac{\Delta t}{m_{\text{armaz}} C_p} [Q_u E_{\text{util}} - 3600 U_{TA} A_{TA} (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})] \quad (53)$$

Para solução da Equação 53 em  $j=1$ ,  $T_{\text{armaz}(j-1)}$  será considerada igual a  $T_{\text{amb}} + 20$ ; Para  $j > 1$ ,  $T_{\text{armaz}(j-1)}$  será a temperatura de armazenamento calculada para hora (j) anterior.

No Apêndice C encontra-se a rotina de cálculo em MATLAB para o cálculo da temperatura horária de armazenamento.

#### 4.3.5 Fração Solar do SAS

Depois de conhecidas as perdas presentes na área coletora e no armazenamento pode se determinar a fração solar através da Equação a seguir:

$$f = \frac{\text{Ganho Térmico Armazenado}}{\text{Demanda de Energia}} = \frac{E_{\text{util}} + Q_{\text{armaz}}}{E_{\text{util}}} \quad (54)$$

A fração solar ( $f$ ) representa quanto da energia usado no processo é proveniente do SAS. O valor de  $Q_{\text{armaz}}$  apresenta valores negativos em situações em que a energia solar não é suficiente para atender toda a demanda, positivo quando excede e nulo quando é igual.

---

## CAPÍTULO IV

---

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 Estimativa da Energia Solar Disponível

No presente capítulo apresentaremos os resultados obtidos a partir da metodologia descrita no capítulo anterior.

A Tabela 9 mostra valores médios de irradiâncias diárias mensais ( $W/m^2$ ), para cada mês do ano, calculados a partir dos valores de irradiâncias horárias mensais disponibilizados pelo RadiaSol 2. Estes valores são importantes para a quantificação da radiação incidente na superfície e a sua variação ao longo do dia.

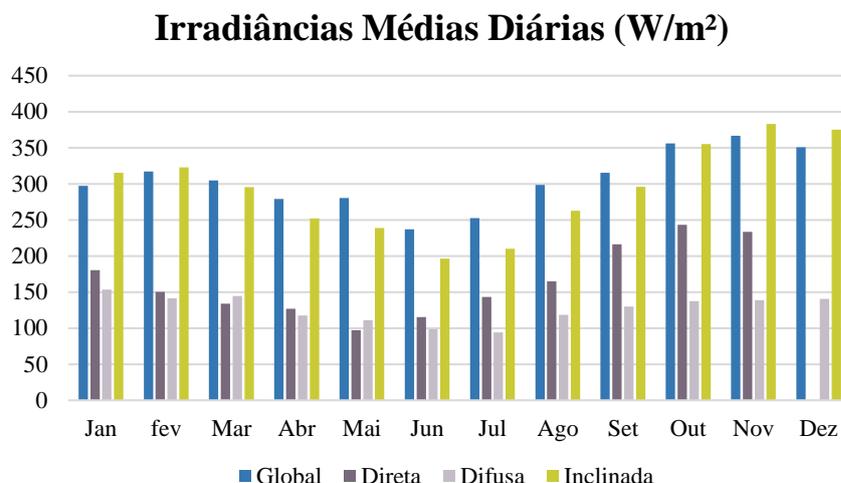
Nota-se que João Pessoa, apesar da cidade ser uma cidade litorânea e apresentar índices de nebulosidades médios (Tabela 6), possui um potencial solar com poucas variações ao longo do ano, o que favorece a sua exploração energética.

Para o dimensionamento do sistema serão utilizados os valores de irradiâncias médias horárias mensais em  $W/m^2$  (Anexo A).

**Tabela 9** - Valores de Irradiâncias Médias Diárias Mensais ( $W/m^2$ ) no plano inclinado ( $16^\circ N$ ) para cidade de João Pessoa.

<b>Irradiâncias médias diárias (<math>W/m^2</math>)</b>				
<b>Mês</b>	<b>Global</b>	<b>Direta</b>	<b>Difusa</b>	<b>Inclinada (<math>16^\circ</math>)</b>
<b>Jan</b>	297	161	154	316
<b>fev</b>	317	181	141	323
<b>Mar</b>	305	150	145	296
<b>Abr</b>	279	134	118	252
<b>Mai</b>	280	127	111	239
<b>Jun</b>	237	97	99	197
<b>Jul</b>	253	115	94	210
<b>Ago</b>	299	143	118	263
<b>Set</b>	315	165	130	296
<b>Out</b>	356	216	138	355
<b>Nov</b>	367	244	139	383
<b>Dez</b>	351	234	140	375
<b>Anual</b>	302	156	134	296

Os dados da Tabela 9 estão ilustrados na Figura 23.



**Figura 23** - Irradiâncias Médias Diárias Mensais no plano inclinado (16°N) em João Pessoa.

## 5.2 Dimensionamento do SAS

### 5.2.1 Volume de armazenamento

O volume de armazenamento calculado foi de 7,70 m<sup>3</sup>. No entanto como a demanda de água quente é constante e sem interrupção (24h por dia) e a disponibilidade de energia solar não, o volume de armazenamento será dobrado, ou seja, consideraremos 16 m<sup>3</sup> para garantir uma maior contribuição do sistema.

Os cálculos foram realizados para uma temperatura de armazenamento igual a 70°C.

### 5.2.2 Demanda Diária de Energia Útil ( $E_{\text{útil}}$ )

Uma estimativa da demanda de energia útil mensal do sistema pode ser obtida multiplicando o valor calculado com a Equação 18 pelo número de dias do mês em que o sistema está em funcionamento (Tabela 10). Neste caso, a temperatura ambiente considerada para cada mês é a temperatura média anual (Tabela 6).

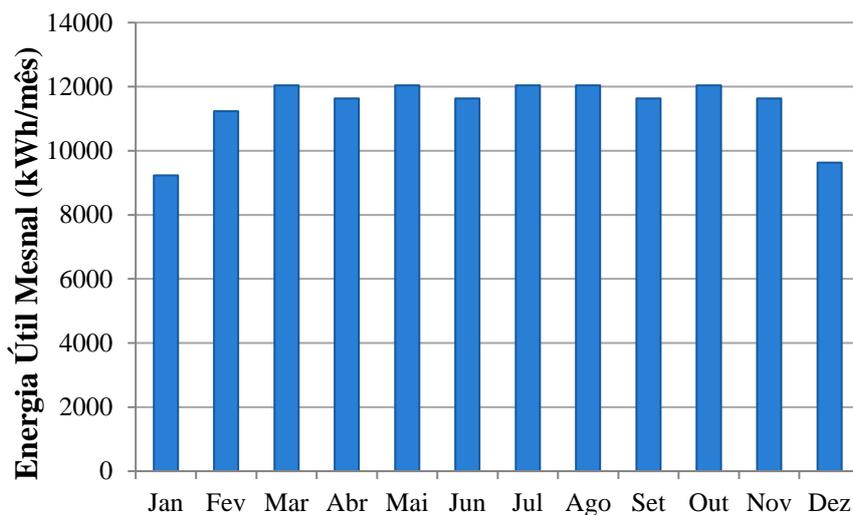
Calculado os valores médios mensais da energia útil, observou-se que a maior demanda de energia mensal é de 12038,40 kWh/mês (ocorre nos meses de março, maio, julho, agosto e setembro) e, portanto, para os cálculos seguintes este será o valor de energia útil mensal utilizado.

Como trata-se de um processo contínuo de operação, a demanda de energia diária independe do mês do ano. Dividindo-se os dados mensais da demanda energia útil pelo dia de operação no mês nota-se que a demanda diária é sempre 401, 28 kWh (60,1920 MJ por hora).

A Figura 24 mostra o comportamento da variação da demanda de energia útil mensal ao longo do ano.

**Tabela 10** – Demanda Mensal de Energia para Aquecimento de Água (10000 litros/dia).

Mês	Dias de operação	Eútil (kWh/mês)
<b>Jan</b>	23	9229,44
<b>Fev</b>	28	11235,84
<b>Mar</b>	30	12038,4
<b>Abr</b>	29	11637,12
<b>Mai</b>	30	12038,4
<b>Jun</b>	29	11637,12
<b>Jul</b>	30	12038,4
<b>Ago</b>	30	12038,4
<b>Set</b>	29	11637,12
<b>Out</b>	30	12038,4
<b>Nov</b>	29	11637,12
<b>Dez</b>	24	9630,72
<b>Total Anual</b>	341	9229,44



**Figura 24** – Demanda de energia útil mensal para aquecimento da água necessária (10000 litros/dia).

### 5.2.3 Escolha do Coletor Solar

Uma vez estimada a disponibilidade da radiação solar e conhecidas as condições de aquecimento necessárias pode-se selecionar a tecnologia que será utilizada. Neste trabalho serão empregados coletores planos, pois é possível atender as especificidades da demanda com esta tecnologia e, em relação às demais, é a tecnologia solar térmica de maior aplicabilidade no Brasil. Através de uma busca na internet nota-se que existe uma pequena quantidade de fabricantes de coletores solares no Brasil e que dentre estes é predominante a utilização de coletores planos.

A NBR 15669 (ABNT NBR 15669, 2008) recomenda a escolha de coletores planos certificados pelo INMETRO, porém para o desenvolvimento deste trabalho, a escolha entre os fabricantes dos coletores planos também será condicionada pela disponibilidade das informações técnicas necessárias, bem como de futuros orçamentos e dados de fabricação.

A partir dos critérios expostos anteriormente foi escolhido o coletor solar plano S-81, fabricado pela empresa Solar Tech na cidade de João Pessoa. A Tabela 11 mostra as especificações técnicas do coletor, e sua eficiência é dada pela Equação 53 (GREEN-PUC Minas, 2003):

$$n = 62,1 - 513,6 \left( \frac{T_{c2} - T_{amb}}{I} \right) \quad (53)$$

Onde:  $T_{c2}$  é a temperatura em que a água sai do coletor solar.

**Tabela 11** – Especificações Técnicas: Coletor Solar Plano S-81 da Solar Tech.

Especificações Técnicas (S-81)	
Área Externa	1,78 m <sup>2</sup>
Área Transparente	1,72 m <sup>2</sup>
Peso do Coletor Seco	29 kg
Pressão Máxima de Operação	250 kPa
Fluido de Trabalho	Água
Eficiência Térmica	51,8%
$F_R(\tau\alpha)$	0,645
$F_R(U_i)$	5,334

FONTE: (GREEN – PUC Minas, 2003).

### 5.3 SAS proposto sem perdas

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos para os valores médios anuais desconsiderando as perdas presentes do SAS proposto. Estes valores servem como uma estimativa inicial, um ponto de partida para o cálculo dos valores médios mensais e para o dimensionamento final do SAS. A única perda considerada é da curva de eficiência dada pelo fabricante.

**Tabela 12** – Resultado do sistema de equações para os valores médios anuais.

$T_{c1}$	$T_{c2}$	$m_c$	$T_{armaz}$	$T_{consumo}$	$A_c$	$N_{coletores}$	$f$
31,32°C	61,59°C	0,1075kg/s	42,87°C	53,22°C	88,79 m <sup>2</sup>	51,62	0,80

A vazão volumétrica recomendada pelo fabricante nos coletores em condições de teste é de 70 l/h, o que equivale a uma vazão mássica de aproximadamente 0,02 kg/s, portanto para se atingir a vazão mássica requisitada pelo sistema será necessário o arranjo dos coletores em pelo menos 5 conjuntos em paralelo.

Para que garantir a segurança do dimensionamento o número de coletores será arredondado para o próximo maior valor múltiplo de 5, ou seja, serão utilizados 55 coletores, sendo 5 conjuntos em paralelo de 11 coletores conectados em série, o que resulta em uma área coletora de aproximadamente 95 m<sup>2</sup>.

Definido o número de coletores, a vazão mássica, considerando as médias mensais da radiação solar e da temperatura ambiente e desconsiderando as perdas no SAS, foram obtidos os dados da fração solar mensal para o SAS proposto (Tabela 13).

**Tabela 13** – Resultado do sistema de equações para os valores médios mensais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$f$	0,9020	0,9061	0,8303	0,7131	0,7070	0,5690	0,5648	0,7420	0,8891	1,073	1,133	1,0200
$T_{c1}$ (°C)	26,67	26,09	26,02	26,19	27,66	26,74	24,28	26,13	28,32	28,68	28,06	25,13
$T_{c2}$ (°C)	63,69	63,93	63,69	55,72	55,66	49,82	48,88	56,93	62,99	70,27	72,92	69,06
$T_{armaz}$ (°C)	43,02	42,80	41,33	39,23	40,03	36,94	35,15	39,73	43,63	47,05	47,87	44,54
$T_{cons}$ (°C)	56,65	56,73	54,10	50,10	50,33	45,43	44,20	51,07	56,40	62,32	64,39	58,71

Na Figura 25 está ilustrado o comportamento da fração solar do sistema proposto em relação a cada mês do ano. Nota-se que nos meses de junho e julho o SAS apresenta seu pior aproveitamento, no entanto, em todos os meses do ano é capaz de suprir mais da metade de toda a demanda energética necessária.

### Fração Solar (f)

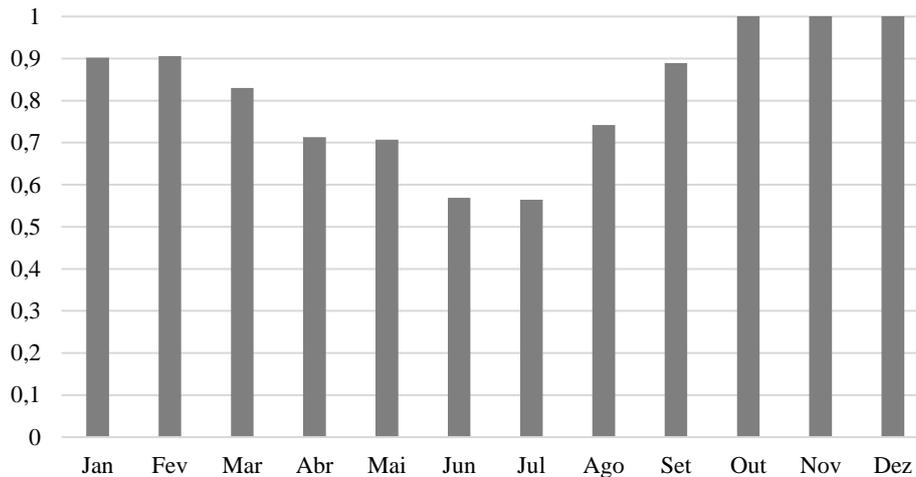


Figura 25 – Fração Solar Média Mensal Calculado no EES.

## 5.4 Cálculo das perdas do SAS proposto

A seguir encontram-se os resultados obtidos seguindo a metodologia apresentada usando a rotina numérica desenvolvida no software MATLAB.

### 5.4.1 Energia Útil Coletada

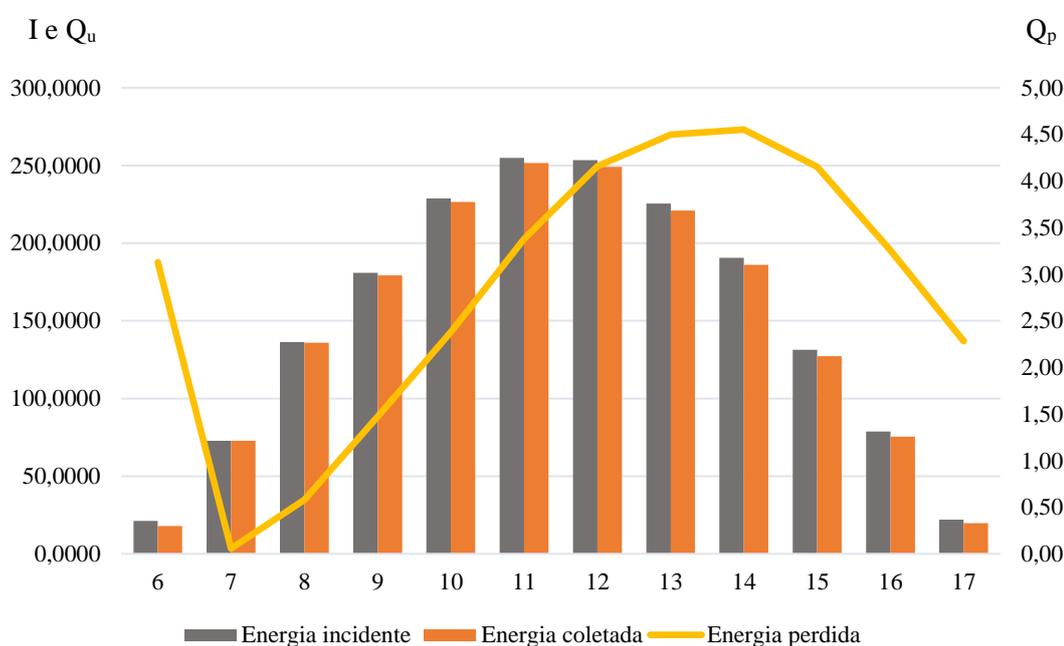
A Tabela 14 mostra os valores médios obtidos no cálculo da energia útil coletada pela área coletora considerando os dados médios horários anuais.

Tabela 14 – Valores médios anuais obtidos no cálculo da energia útil coletada  $Q_{tot}$  (MJ).

j	S [W/m <sup>2</sup> ]	I [MJ]	T <sub>abs</sub> [°C]	U <sub>tot</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	T <sub>fm</sub> [°C]	Q <sub>u</sub> [MJ]	Q <sub>p</sub> [MJ]	Q <sub>tot</sub> [MJ]	Q <sub>pt</sub> [MJ]
6	62,00	21,1147	23,99	4,8347	23,54	17,99	3,13	17,99	3,13
7	214,00	72,8798	30,27	4,5158	28,41	72,82	0,06	90,81	3,19
8	400,50	136,3943	39,18	5,3848	35,72	135,82	0,58	226,62	3,76
9	531,00	180,8374	47,49	5,8991	42,93	179,36	1,47	405,99	5,24
10	672,00	228,8563	56,09	6,2315	50,32	226,48	2,38	632,47	7,62
11	748,50	254,9092	62,69	6,5205	56,29	251,53	3,38	884,00	10,99
12	744,00	253,3766	65,98	6,7215	59,64	249,22	4,16	1133,21	15,15
13	662,00	225,4507	65,47	6,8170	59,85	220,95	4,50	1354,16	19,66
14	559,50	190,5433	61,76	6,8037	57,02	185,99	4,55	1540,15	24,21
15	386,00	131,4562	54,26	6,6961	51,02	127,30	4,15	1667,46	28,36
16	231,00	78,6694	45,82	6,4672	43,90	75,41	3,25	1742,87	31,61
17	64,50	21,9661	36,46	6,1807	35,96	19,68	2,28	<b>1762,56</b>	<b>33,90</b>

Uma das observações importantes nos resultados obtidos é o comportamento do coeficiente global de perdas térmicas da área coletora para o ambiente,  $U_{tot}$ , em relação a temperatura da placa absorvedora,  $T_{abs}$ . A medida que a temperatura da placa absorvedora aumenta, as perdas térmicas dos coletores para o ambiente aumentam também. Esse comportamento é justificado pelo aumento da diferença de temperatura coletor-ambiente.

Os valores de Energia Incidente  $I$ , de Energia Coletada  $Q_u$ , e de energia perdida  $Q_p$  verificados na Tabela 14 estão ilustrados na Figura 26. Observa-se que a energia perdida, ou seja, a fração da energia solar que é perdida para o ambiente em forma de calor apresenta um comportamento proporcional a energia solar incidente na área coletora e a energia solar que é efetivamente absorvida pelos coletores.



**Figura 26** – Parcelas de Energia Coletada e Perdida em Relação a Energia Incidente na Área Coletora (MJ)

Uma outra particularidade importante observada na Figura 28 é o comportamento da Energia Coletada em relação ao horário. Assim como a Incidência da radiação solar a Energia Coletada cresce do início da manhã até atingir o seu valor máximo próximo ao meio dia legal (no meio dia solar) e cai proporcionalmente até o fim do dia.

Observa-se também o comportamento da temperatura média do fluido no coletor,  $T_{mf}$ . Nota-se que apesar de também apresentar um comportamento proporcional à incidência de radiação solar e apresentar uma variação considerável hora a hora no dia, o ganho térmico é maior a cada hora passada. As 17h, com uma incidência solar de  $64,5 \text{ W/m}^2$ , atinge-se uma temperatura média do fluido de  $40,7^\circ\text{C}$ .

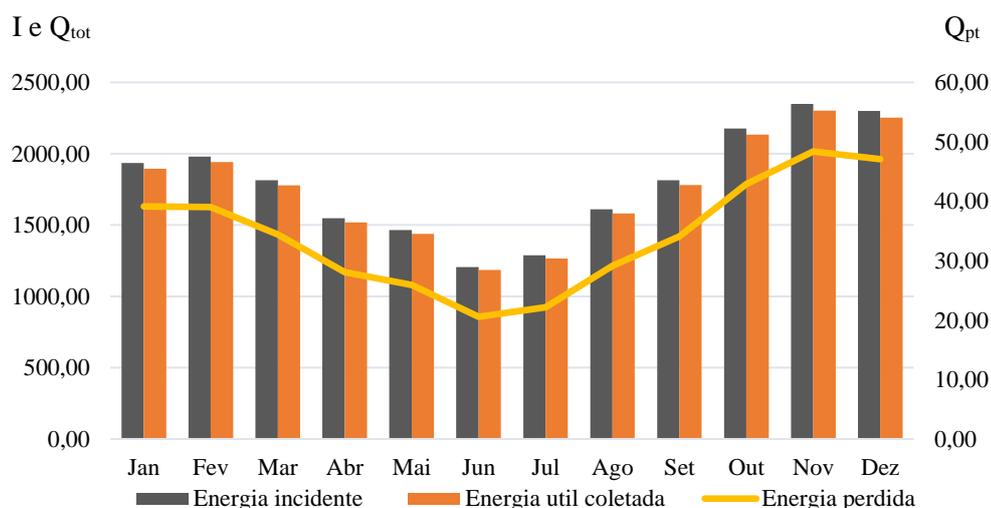
No Apêndice E estão disponíveis tabelas, similares à Tabela 14, para cada mês do ano, onde é possível fazer uma análise mensal do comportamento da área coletora do SAS proposto.

Na Tabela 15 verifica-se os valores mensais de energia total incidente,  $I_{tot}$ , energia total coletada,  $Q_{tot}$ , e de energia total perdida,  $Q_{pt}$ . Estes valores foram obtidos a partir do somatório dos dados horários calculados para cada mês do ano, disponível no Apêndice D.

**Tabela 15** – Valores Médios Mensais das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida.

	<b>Itot [MJ]</b>	<b>Qtot [MJ]</b>	<b>Qpt [MJ]</b>
<b>Jan</b>	1934,38	1895,23	39,15
<b>Fev</b>	1980,02	1941,01	39,01
<b>Mar</b>	1812,80	1778,38	34,43
<b>Abr</b>	1546,48	1518,40	28,09
<b>Mai</b>	1463,73	1437,79	25,93
<b>Jun</b>	1204,90	1184,35	20,56
<b>Jul</b>	1286,98	1264,85	22,13
<b>Ago</b>	1609,49	1580,33	29,15
<b>Set</b>	1814,16	1780,09	34,07
<b>Out</b>	2177,54	2134,63	42,91
<b>Nov</b>	2349,52	2301,15	48,37
<b>Dez</b>	2299,12	2252,04	47,08
<b>Anual</b>	1796,45	1762,56	33,90

A Figura 27 mostra a variação mensal das parcelas de energia incidente, coletada e perdida na área coletora.



**Figura 27** – Comportamento Mensal das Parcelas de Energia Incidente, Coletada e Perdida do SAS Proposto.

### 5.4.2 Perdas no Armazenamento

Antes do cálculo das perdas no armazenamento é necessário a escolha do tanque a ser utilizado, portanto com o volume de armazenamento já definido anteriormente (16 m<sup>3</sup>). Foram selecionados 8 tanques de 2000l da Solar Tech, cuja especificações encontram-se na tabela a seguir.

**Tabela 16** – Especificações Técnicas do Tanque de Armazenamento.

<b>Boiler 2000 l – SolarTech</b>	
<b>Comprimento</b>	2,65 m
<b>Largura</b>	1,07 m
<b>Altura</b>	1,12 m
<b>Isolante Térmico</b>	Poliestireno Expandido
<b>Espessura do isolante</b>	0,05 m

FONTE: (SOLARTECH, 2016).

O coeficiente de global de perdas térmicas do tanque para o ambiente a partir dos dados da Tabela 16 considerando que os tanques serão instalados em um ambiente fechado sem incidência de vento. Através do método das resistências térmicas foi determinado um valor de aproximadamente 1,1 W/m<sup>2</sup> K.

A Tabela 17 mostra os valores médios obtidos no cálculo das perdas no armazenamento considerando os dados médios horários anuais e os tanques conectados em paralelo.

A parcela da energia armazenada representa o somatório das parcelas de entrada e saída no tanque de armazenamento durante a hora *j*. Como a demanda de água quente é constante (60,1920 MJ/h) e a energia solar não, nota-se que nos horários sem incidência solar o  $Q_{armaz}$  é negativo e varia de acordo com as perdas térmicas para o ambiente.

A Figura 28 mostra a relação entre as parcelas de energia útil coletada, a parcela armazenada e a demanda de energia do processo, com base nos dados médios horários anuais. O eixo horizontal diz respeito à hora do dia e o vertical à parcela de energia em MJ. Ao observa-la verifica-se que nas primeiras e nas últimas horas do dia (horas sem sol) não há contribuição do SAS, porém há perdas, pois, a água quente no tanque de armazenamento perde energia térmica para o ambiente. Estes são fatores importantes que devem ser considerados para o dimensionamento de um sistema de aquecimento auxiliar na linha de alimentação do processo.

Os valores negativos de energia armazenada na Figura 28 representam as perdas térmicas nesses horários e são os responsáveis pelo decaimento da temperatura de armazenamento. Os valores superiores à demanda de energia ocorrem devido ao volume de armazenamento utilizado (duas vezes o valor calculado) e contribuem para aumentar a contribuição do SAS ao processo.

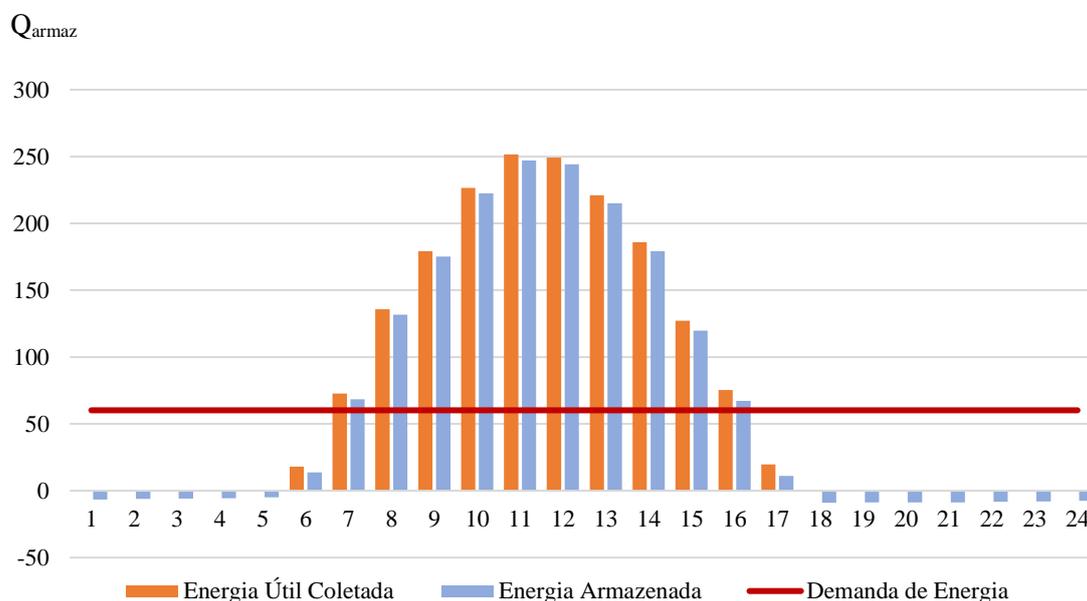
**Tabela 17** - Valores Médios horários Anuais das Perdas no Armazenamento.

<b>j</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Tarmaz [°C]</b>	<b>Qpa [MJ]</b>	<b>Qarmaz [MJ]</b>
1	0	40,90	6,50	-66,70
2	0	39,91	6,18	-66,37
3	0	38,92	5,86	-66,05
4	0	37,94	5,54	-65,73
5	0	36,97	4,92	-65,12
6	17,99	36,27	4,28	-46,48
7	72,82	36,39	4,38	8,25
8	135,82	37,46	4,10	71,53
9	179,36	39,18	4,12	115,05
10	226,48	41,61	4,03	162,26
11	251,53	44,40	4,49	186,85
12	249,22	47,15	5,07	183,95
13	220,95	49,47	5,81	154,95
14	185,99	51,25	6,72	119,08
15	127,30	52,14	7,63	59,48
16	75,41	52,25	8,24	6,98
17	19,68	51,51	8,60	-49,11
18	0	50,48	8,98	-69,17
19	0	49,45	8,67	-68,87
20	0	48,42	8,67	-68,86
21	0	47,39	8,62	-68,81
22	0	46,37	8,29	-68,48
23	0	45,35	7,96	-68,15
24	0	44,33	7,62	-67,82

No Apêndice F estão disponíveis 12 tabelas, similares a Tabela 17, com os valores obtidas para com as médias mensais.

Na Tabela 18 encontra-se os valores médios diários mensais das parcelas da Energia Útil Coletada, Energia Perdida no Armazenamento e Energia Armazenada. Assim como nos dados anuais, a parcela de Energia Armazenada trata-se do resultado de um balanço de energia no armazenamento, ou seja, é a diferença entre a entrada e a saída

de energia. Valores positivos de  $Q_{armaz}$  representa energia excedente a demanda (1444,61 MJ/dia) e valores negativos o déficit de energia, ou carga necessária a ser produzida pelo aquecimento auxiliar.



**Figura 28** – Relação do Comportamento Horário da Energia Útil Coletada, da Energia Armazenada e da Demanda de Energia.

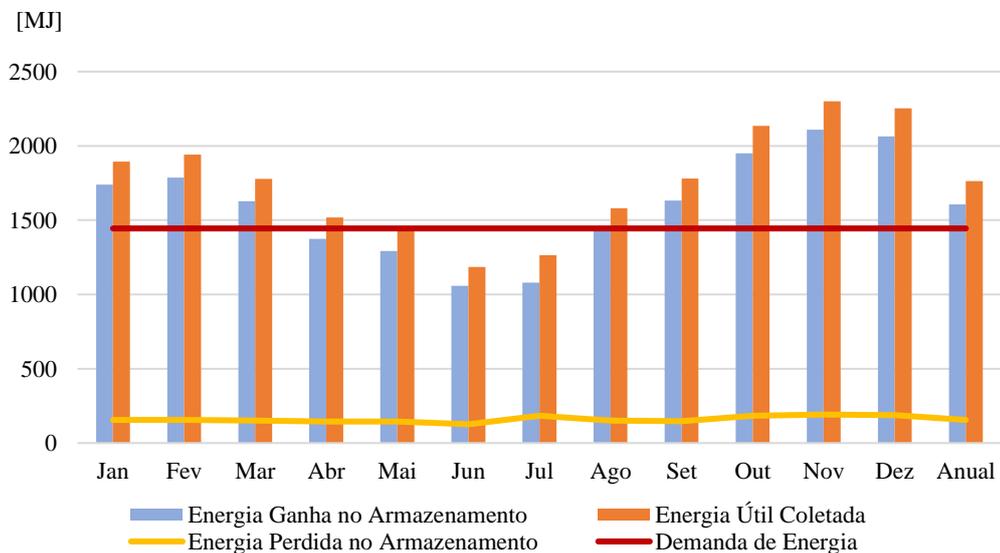
**Tabela 18** – Valores Médios Diários Mensais das Perdas no Armazenamento.

Mês	Qu [MJ]	Qpa [MJ]	Qarmaz [MJ]
Jan	1895,23	156,64	293,98
Fev	1941,01	154,80	206,76
Mar	1778,38	150,86	182,92
Mai	1518,40	144,81	-71,00
Abri	1437,79	144,81	-144,83
Jun	1184,35	126,63	-386,90
Jul	1264,85	184,58	-313,40
Ago	1580,33	151,56	-15,84
Set	1780,09	147,49	187,99
Out	2134,63	184,58	505,44
Nov	2301,15	191,87	664,67
Dez	2252,04	187,91	619,52

A Figura 29 mostra o comportamento das parcelas de energia presentes na Tabela 18.

A parcela de Energia Ganha no Armazenamento é o somatório da energia útil coletada com o valor negativo da energia perdida no armazenamento, ou seja, representa a parcela da energia Solar que é efetivamente convertida em energia térmica. Esse valor também pode ser obtido pelo somatório da demanda de energia e a energia armazenada.

Verifica-se que apenas em 5 meses do ano (de maio a agosto) a energia líquida diária do SAS não é suficiente para atender a demanda. Esses são também meses em que a incidência de radiação solar é menor, o que acarreta uma menor parcela de energia útil coletada e conseqüentemente de energia armazenada, no entanto, nos demais meses há excedentes de energia. Esse comportamento se mostra de acordo com a sazonalidade prevista de sistemas de energia Solar.



**Figura 29** –Comportamento diário Mensal da Energia Útil Coletada, da Energia Ganha no Armazenamento e da perda de energia em relação a demanda.

A parcela de Energia perdida no armazenamento (Figura 29) apresenta um comportamento pouco variável ao longo do ano, isso ocorre devido a proporcionalidade entre a temperatura de armazenamento e a energia armazenada e a variação da temperatura ambiente.

## 5.5 Fração Solar do SAS

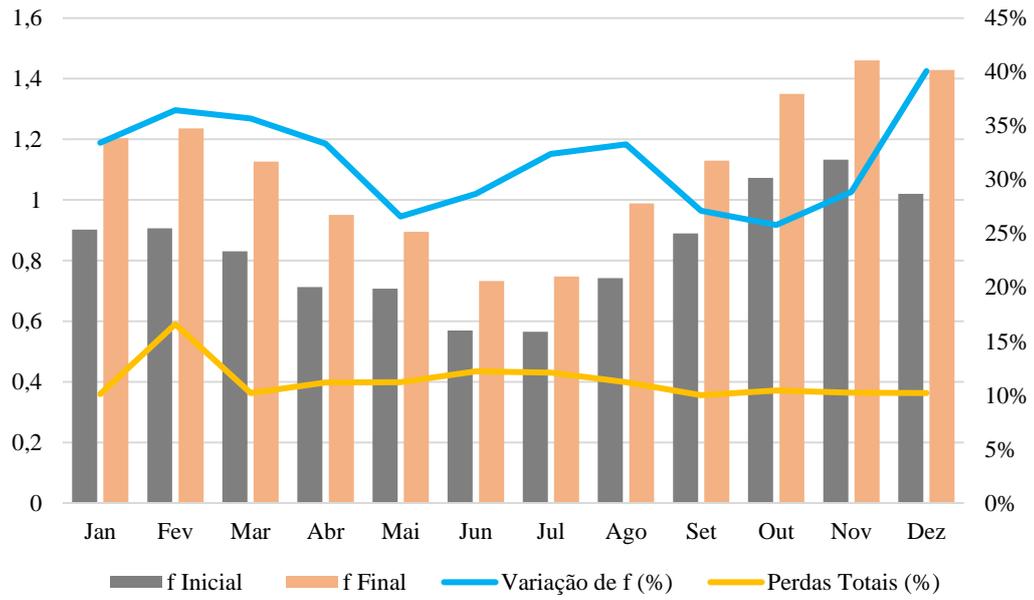
A Tabela 19 mostra os valores da fração solar mensal do SAS considerando o dobro do volume de armazenamento, as perdas presentes na área coletora e no armazenamento do SAS proposto.

**Tabela 19** – Valores Percentuais da Fração Solar final e das Perdas Totais do SAS.

<b>Mês</b>	<b><i>f</i></b>	<b>Energia perdida</b>
<b>Jan</b>	120%	10%
<b>Fev</b>	124%	17%
<b>Mar</b>	113%	10%
<b>Mai</b>	95%	11%
<b>Abri</b>	90%	11%
<b>Jun</b>	73%	12%
<b>Jul</b>	75%	12%
<b>Ago</b>	99%	11%
<b>Set</b>	113%	10%
<b>Out</b>	135%	10%
<b>Nov</b>	146%	10%
<b>Dez</b>	143%	10%

Na maior parte dos meses a fração solar é maior que 100%, ou seja, é mais do que suficiente para suprir a demanda de água quente analisada. A Figura 30 mostra os valores mensais da fração solar calculada anteriormente sem consideração das perdas e com o volume de armazenamento inicial com os valores expostos na Tabela 19.

Nota-se que o comportamento da fração solar continua exatamente o mesmo e que, portanto, o aumento de seu valor mesmo com a consideração das perdas presentes no SAS, deve-se ao aumento do volume de armazenamento, porém é importante destacar que mesmo com a utilização do dobro do volume de armazenamento não se obtém o dobro da contribuição solar do sistema.



**Figura 30** – Fração Solar final inicial e Perdas Totais do Sistema.

---

## CAPÍTULO V

---

### 6. CONCLUSÃO

A localização geográfica e a extensão territorial do Brasil o tornam um país de significativo potencial de exploração de energias renováveis, sobre tudo de energia solar. O Brasil possui grande parte de sua área localizada entre os trópicos, o que faz com que grande parte do seu território tenha uma incidência solar com pouca variação durante o ano. O Nordeste destaca-se por estar situado muito próximo à linha do Equador e por isso apresentar uma alta incidência solar, verões longos, secos e quentes.

No entanto, mesmo com condições ambientais favoráveis, principalmente quando comparado com países europeus como Alemanha e Espanha, o Brasil ainda apresenta em sua matriz energética baixos percentuais de exploração de energias renováveis (com exceção da energia hidráulica). Mas, felizmente, este é um cenário que tende a mudar.

Atualmente, impulsionado pelos impactos causados ao meio ambiente com a exploração desenfreada dos recursos naturais, pelo comportamento crescente do custo da eletricidade gerada a partir dos combustíveis fósseis e em busca da segurança energética do Brasil, tem-se buscado a utilização, desde de pequenas escalas e de forma descentralizada até grandes sistemas de energias alternativas.

O setor industrial brasileiro apresenta uma grande demanda por calor de processo nas mais diversas temperaturas. Cerca de 79,8% das fontes da energia consumida no setor industrial em 2014 se dividem em fontes que são destinadas principalmente para geração de calor para o processo produtivo. Muitos destes processos demandam água quente em baixas temperaturas (50 a 70°C), que podem facilmente serem atingidas com o emprego de coletores solar planos.

Em país como China e Índia já é dado incentivo para o emprego de tecnologia solar térmica em indústrias. No Brasil os incentivos a energia solar são dados principalmente na geração fotovoltaica de energia, no entanto, tendo conhecimento do potencial solar brasileiro e das características da demanda de calor de processo nas indústrias, o emprego de tecnologias conhecidas e nacionais, pode contribuir de forma significativa para o aumento da energia solar na matriz energética industrial e conseqüentemente nacional. Diante disso surge a necessidade do desenvolvimento de estudos e avaliações dessa

aplicação. Neste trabalho, foi dimensionado um sistema de aquecimento solar térmico para atender a demanda produtiva de uma indústria têxtil, (0,12 kg/s de água a 60°C 24 horas por dia).

Seguindo a metodologia descrita, inicialmente, visando uma contribuição mínimo do SAS de 80% foram estimadas uma área coletora de 95 m<sup>2</sup>, sendo essa obtida com o emprego de 55 coletores planos da Solar Tech arranjados em 5 conjuntos em paralelo de 11 coletores conectados em série, e uma vazão mássica no banco de coletores de 0,1 kg/s, sendo 0,02 kg/s em cada conjunto de 11 coletores conectados em série. O volume de armazenamento, a partir da demanda de água quente, foi calculado em 8 m<sup>3</sup>, porém esse valor foi dobrado (16 m<sup>3</sup>) pensando que o SAS apresenta contribuição variável e restrita às horas de Sol, e a demanda de energia é constante durante todo o dia. Para o armazenamento de todo esse volume de água quente foi escolhido a utilização de 8 Boilers de 2000l da Solar Tech conectados em paralelo.

Uma vez estabelecida as condições do sistema e a disposição dos seus principais componentes, foi realizado o cálculo das principais perdas presentes no SAS. Notou-se que a maior parte da energia solar é perdida ainda na área coletora. Isso ocorre devido principalmente ao fato dos coletores permanecerem expostos ao ambiente recebendo incidência de ventos, além da contribuição das propriedades radiantes dos seus materiais construtivos, pois são elas que definem seu comportamento quanto a radiação incidente (absortividade, transmissividade e refletividade) e ao ganho térmico de energia (emissividade).

As perdas no armazenamento apresentam valores menos expressivos, pois se dão principalmente por radiação térmica, uma vez que, diferente dos coletores, os tanques podem ser instalados em áreas fechadas de forma a diminuir as perdas convectivas.

Uma outra análise importante é a relação da fração solar do SAS com o volume de armazenamento adotado. Com um volume de 8 m<sup>3</sup>, mesmo sem consideração das perdas, verifica-se uma menor contribuição do sistema do que quando adotado o dobro desse valor e contabilizando as perdas.

Partindo do pressuposto de que um Sistema de Aquecimento Solar de Água é viável tecnicamente quando apresenta uma fração solar mínima de 50%, o SAS dimensionado mostrou-se apto do ponto de vista técnico e operacional. Porém, para verificar a viabilidade da instalação ainda se faz necessária a realização de uma análise econômica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVA. **Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar**. [s.n.], 2008. 138 f. il. color. Disponível em: <<http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/manual2008.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2016.

ALUCCI, M. **Climaticus 4.2** (versão Beta). Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética- FAUUSP. 2011. Disponível em: <[www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus\\_2011\(beta\).xlsm](http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_2011(beta).xlsm)>. Acesso em: 11 jun. 2016.

A rotação da Terra. Os dias, as noites e as estações do ano. In: *Ciência Viva*, 20--., il. color. Disponível em: <[http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat\\_long/cap2.asp](http://www.cienciaviva.pt/equinocio/lat_long/cap2.asp)>. Acesso em: 23 maio 2016.

ALVES, M. C. **Sol, primeira fonte de luz e energia**. Pré-Univesp, n. 56, 2016. Disponível em: <<http://pre.univesp.br/sol-primeira-fonte-de-luz-e-energia#.V0SWGZErLIV>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2008. 36p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10185: Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar – Determinação de desempenho térmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 12p.

BENTIVENHA, L. C. **Determinação da Eficiência de um Coletor Solar Plano com Aletas de Vidro**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu: 2005. Disponível em: <[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90592/bentivenha\\_lc\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90592/bentivenha_lc_me_botfca.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 19 maio 2016.

BRASIL. ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª Ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

BRASIL.EPE. **Consumo de energia do Brasil (Análises Setoriais): Nota Técnica DEA 10/14**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 116p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

BRASIL. MME. **Balço Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015a. 155 f., il. color. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)>. Acesso em: 2 maio 2016.

BRASIL. MME. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2014**. Brasília: N3E, 2015b. 32 f., il. color. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+-+Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>>. Acesso em: 20 maio 2016.

CARVALHO, M., SERRA, L.M., LOZANO, M.A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. **Energy**, v. 36, p. 3779-3790, 2011.

ÇENGEL, Y. A. **Heat transfer: a practical approach**. 3 th ed. São Paulo: Mc. Graw Hill, 2009., il. color.

CERVEIRA, M. **Sistemas Térmicos de Energia Solar**. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia) – Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra: 2012. Disponível em: <[http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese\\_Mest\\_Manuel-Cerveira.pdf](http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Manuel-Cerveira.pdf)>. Acesso em: 19 maio 2016.

COLE, S.; PEREIRA, E. B. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil**. Brasília: LABSOLAR/INMET, UFSC, 1998. 65 f., il. color. Disponível em: <[https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/atlas\\_de\\_irradiacao.pdf](https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/atlas_de_irradiacao.pdf)>. Acesso em: 23 maio 2016.

COSTA, E. R. **Limitações no uso de coletores solares sem cobertura para sistemas domésticos de aquecimento de água**. 2002. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2002. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/costa.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

**CRESESB**: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Potencial Energético: Potencial Solar - SunData**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

DELGADO, D. B. de M. **Otimização Econômica e Ambiental de um Sistema de Poligeração Incluindo Energia Solar Fotovoltaica e Biomassa: Estudo de caso em um hospital paraibano**. 2015. 177 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa: 2015.

DOMÍNGUEZ, J. G., **Diseño de una Instalación Solar Térmica Multipropósito para un Edificio de Viviendas em Zaragoza**. 2009. 157 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos. Universidade Carlos III de Madrid. Madrid: 2009. il. color. Disponível em: <<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/8062>>. Acesso em: 15 out. 2016.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York etc.: Wiley, 2014., il. color.

ECOCOMFORT, **Aquecedor solar de tubo de vidro a vácuo**. Guarulhos, 20--., il. Color.

Disponível em:  
<[http://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/ecocomfort/catalogo\\_aquecedores-ECO.pdf](http://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/ecocomfort/catalogo_aquecedores-ECO.pdf)>. Acesso em: 31 maio 2016.

EUROPEAN COMMISSION, Directorate General Energy And Transport, POSHIP: O Potencial da Energia Solar no Calor de Processo Industrial. **Energia Solar – Revista de Energias Renováveis & Ambiente**, n. 48. p. 7-37, 2001.

FERNANDES, A. K. de S., **Reuso de Água no Processamento de Jeans na Indústria Têxtil**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal: 2009. Disponível em:<<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiUpoGJw9LOAhWJWpAKHUm0CvUQFgg6MAQ&url=https%3A%2F%2Fsigaa.ufrn.br%2Fsigaa%2FverProducao%3FidProducao%3D2949437%26key%3D7860111928f2bc949553d997748e3e0c&usg=AFQjCNG0ALGeIMYHwdONedJP8Qh0k3-meQ>>. Acesso em: 15 out. 2016.

**Flat Plate Solar collecto**. In: Indiamart, 20--., il. color. Disponível em: <<http://www.indiamart.com/abhaenergy/solar-water-heaters.html#flat-plate-solar-collector>>. Acesso em: 23 maio 2016.

GOLDEMBERG, J.; CHU, S. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**, Traduzido por Maria Cristina Vidal Borba e Neide Ferreira Gaspar. São Paulo: FAPESP; Amsterdam: InterAcademy Council; Rio de Janeiro: Acadêmica Brasileira de Ciências, 2010. 300 p. Tradução de: Lighting the way: toward a sustainable energy future, 2007. Disponível em: <<http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2016.

GREEN – PUC Minas. **Relatório de ensaio CSP-128BF**. INMETRO, 2003.

HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Tradução de Luiz Claudio de Queiroz. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INCROPERA, F.P., DE WITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos editora S.A, 2008.

KALOGIROU, A. S. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 2. ed. Elsevier Inc: Waltham, 2014.

KEMP, C. **Apparatus for utilizing the sun s rays for heating water**. 1891. Disponível em: <<http://www.google.com.br/patents/US451384?hl=pt-BR&dq=Clarence+M.+Kemp>>. Acesso em: 8 abr. 2016.

KLUPPEL, R. P. **Curso de Especialização em Energia Solar para Agricultura**. João Pessoa: UFPB, 1985.

KLUPPEL, R. P. **Curso de Conversão Térmica da Energia Solar**. João Pessoa: CEAR/UFPB, 2016.

GIZ. **Identification of Industrial Sectors Promising for Commercialisation of Solar Energy**. PWC: New Delhi, 2011. 140 f. Disponível em: <<http://mnre.gov.in/file->

manager/UserFiles/identification\_of\_industrial\_sectors\_promising\_for%20\_commercialisation\_of\_solar\_energy\_ComSolar.pdf>. Acesso em: 23 maio 2016.

KRMELJ, V. **Selected industrial processes which require low temperature heat**. In: INTELLIGENT ENERGY EUROPE, 2011, Bruxelas. **Anais...** Bruxelas: European Commission, 2011

KULB, J. R.(Coord). **Projetando Sistemas de Aquecimento Solar para Habitações Multifamiliares**. São Paulo: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/wp-content/uploads/2014/04/Manual-Projetando-Sistemas-de-Aquecimento-Solar-para-Habita%C3%A7%C3%B5es-Multifamiliares1.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2016.

LAFAY, J. M. S. **Análise Energética de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5911/000477619.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 maio 2016.

LI, Z. S.; ZHANG, G. Q.; LI, D. M.; ZHOU, J.; LI, L. J. & LI, L. X. Application and development of solar energy in building industry and its prospects in China. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4121-4127, 2007.

LISBOA, D. da S. **Dimensionamento de um SFVCR: Estudo de Caso do Prédio Central do Campus Universitário de Tucuruí – PA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí: 2010. p. 13.,il. color. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABH7QAI/dimensionamento-sfvcr-estudo-caso-predio-central-campus-universitario-tucuru-pa>>. Acesso em: 24 maio 2016.

MACEDO NETO, M. C. de; GOMES, I. R. B.; SANTOS JÚNIOR, Z. J.; OLIVEIRA, E. V.; SOUZA, L. G. M. Aplicação de Materiais Alternativos para o Uso da Energia Solar. **HOLOS**, v. 4, p. 212-223, 2014. Disponível em: <[http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/663/pdf\\_64](http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/663/pdf_64)>. Acesso em: 22 maio 2016.

MARTÍNEZ, P. R. **Energía Solar Térmica – Técnicas para su aprovechamiento**. 1. ed. Barcelona: Marcombo S.A., 2010.

MEINEL, A. B., MEINEL, M. P. **Aplicaciones de la energía solar**. Barcelona: Reverté, 1982.

MELO, E. G. de. **Geração Fotovoltaica: Estimativa do fator de sombreamento e irradiação em modelos tridimensionais de edificações**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2012. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-21062013-105044/.../Dissertacao.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-21062013-105044/.../Dissertacao.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2016.

MENEZES, T. L. de, **Automação para chuveiros elétricos em sistemas de aquecimento solar**. 2013. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Centro Universitário de Brasília, Brasília (DF): 2013.

Disponível em: <<http://repositorio.uniceub.br/bitstream/235/4913/1/20565200.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

MIYAZATO, T. **Integração do Sistema de Aquecimento Solar (SAS) ao Projeto de Edificações Residenciais**. 2012. 215 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo: 2012. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj51cS\\_873MAhXCHJAKHah\\_D4UQFgg6MAU&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F16%2F16132%2Fde-30052012-141504%2Fpublico%2FDISSERTACAO\\_FINAL\\_MIYAZATO\\_2012.pdf&usg=AFQjCNHWI-2mOV4vCsTu0ckp6eWbYkuzYg](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj51cS_873MAhXCHJAKHah_D4UQFgg6MAU&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisponiveis%2F16%2F16132%2Fde-30052012-141504%2Fpublico%2FDISSERTACAO_FINAL_MIYAZATO_2012.pdf&usg=AFQjCNHWI-2mOV4vCsTu0ckp6eWbYkuzYg)>. Acesso em: 19 maio 2016.

RadiaSol 2. Laboratório de Energia Solar. UFRGS, Porto Alegre: 2010. Disponível em <<http://radiasol-c-program-files-x86-radiasol-2.updatestar.com/pt>> Acesso em: 12 Jul. 2016.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1 ed. São José dos Campos: INPE, 2006. 64 f. Disponível em: <[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2016.

PROCOBRE. **Qualidade em Instalação de Energia Solar: Boas Práticas**. 44 f. 2009. Disponível em: <http://www.dasolabrava.org.br/wp-content/uploads/2013/08/Manual-de-Boas-Praticas-Aquecimento-Solar.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2016.

**Produtos Esfera Energia Solar**. In: Esfera Energia Sola, 20--., il. color. Disponível em: <[http://www.esferaenergiasolar.com.br/site/produto\\_categoria.php?id=2](http://www.esferaenergiasolar.com.br/site/produto_categoria.php?id=2)>. Acesso em: 23 maio 2016.

Reservatório térmico. In: Ótima Rio, 20--., il. color. Disponível em: <<http://www.otimarioaquecedores.com.br/descricao-produto/reservatorio-termico>>. Acesso em: 20 maio 2016.

RINNAI. **Manual do Usuário: Coletores solar tubos a vácuo**. Mogi das Cruzes (SP): [s.n.], [201-]. p. 4., il. color. Disponível em: <<http://www.rinnai.com.br/uploads/manual/117.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2016.

RODRIGUES, D. (Coord.). **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar**. São Paulo: Ekos Brasil e Vitae Civilis, 2010. 132 f. Disponível em: <[http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/60551/mod\\_resource/content/1/Apostila\\_Aquecimento\\_Solar.pdf](http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/60551/mod_resource/content/1/Apostila_Aquecimento_Solar.pdf)>. Acesso em: 24 maio 2016.

ROSA, F. N. da, **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2012. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/rosa.pdf>>. Acesso em: 12 Abr. 2016> Acesso em: 12 abr. 2016.

SEBASTIAN, E. **Concentrador Solar para más Energía**, In: Eliseo Sebastian. 2015., il. color. Disponível em: <<http://eliseosebastian.com/sistemas-de-colector-cilindrico-parabolico/>>. Acesso em: 23 maio 2016.

SILVA, J. A. C. da, **Potenciais aplicações de tecnologias solares em processos industriais como fonte de energia: uma revisão bibliográfica**. 2014. 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)- Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo, Lorena: 2014. Disponível em: <<http://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2014/MEQ14015.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, 2015 (Texto para Discussão nº 166). Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

SOLARTECH. **Informações Técnicas do Coletor Solar S-81**. João Pessoa: 2016.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Quim. Nova**, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009. Disponível em: <<http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/2009/vol32n3/18-QN09061.pdf>>. Acesso em 22 maio 2016.

TIBA, C. (Coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000. 111 p. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf). Acesso em: 24 maio 2016.

## APÊNDICE A – Rotina de cálculo para estimativa da área coletora (com dados anuais) desenvolvida no EES.

{ESTIMATIVA INICIAL DA AREA COLETORA - VALORES MÉDIOS ANUAIS}

{VARIABLES CONHECIDAS}

$P=100,3$  {kPa, pressão atmosférica}

$n=0,518$  {Eficiência térmica do coletor (SOLAR TECH)}

$I=296$  {W/m<sup>2</sup>, radiação média anual incidente num plano inclinado 16° N}

$T_{amb}=26,1$  {°C, temperatura ambiente}

{ $m_c = 0,1$  kg/s, vazão mássica nos coletores}

$m_{cons}=0,12$  {kg/s, vazão mássica requerida no processo}

$c_p=cp(\text{Water}, T=T_{amb}; P=P)$  {J/kg °C, calor específico da água}

$T_{processo}=60$  {°C, temperatura requerida no processo}

$A_{tc}=1,72$  { m<sup>2</sup>, Área transparente de um coletor solar plano (SOLAR TECH)}

{Eficiência do coletor solar: Incógnita  $T_{c2}$ }

$n=62,1-(513,6*((T_{c2}-T_{amb})/I))$

{Balanço de energia no coletor solar: Incógnita  $A_c$ }

$I*A_c*n = m_c*cp*(T_{c2} - T_{c1})*1000$

{Balanço de energia no tanque de armazenamento}

$T_{c1}=T_{amb}+0,2*T_{amb}$  {Suposição inicial}

$m_c*cp*(T_{c2} - T_{c1}) = m_{cons}*cp*(T_{cons}-T_{amb})$

{Estratificação térmica do tanque de armazenamento}

$T_{armaz}=(m_c*T_{c2} + m_{cons}*T_{amb})/(m_c+m_{cons})$

$E_t=(T_{cons} - T_{armaz})/(T_{c2} - T_{armaz})$

{Mínima contribuição Solar}

$f=0,8$  {Suposição inicial}

$f=(T_{cons}-T_{amb})/(T_{processo}-T_{amb})$

{Número de coletores - Estimativa Inicial}

$N_c=A_c/A_{tc}$

## APÊNDICE B – Rotina de cálculo para estimativa da fração solar mensal desenvolvida no EES.

{ESTIMATIVA INICIAL DA AREA COLETORA - VALORES MÉDIOS MENSAIS: Janeiro}  
{IGUAL PARA TODOS OS MESES DO ANO}

{VARIABLES CONHECIDAS}

P= 100,3 {kPa, pressão atmosférica}  
n=0,518 {Eficiência térmica do coletor (SOLAR TECH)}  
I=316 {W/m<sup>2</sup>, radiação média anual incidente num plano inclinado 16° N}  
Tamb= 25,8 {°C, temperatura ambiente}  
mcons= 0,12{kg/s, vazão mássica requerida no processo}  
cp=cp(**Water**, T=Tamb; P=P) {J/kg °C, calor específico da água}  
Tprocesso=60 {°C, temperatura requerida no processo}  
Atc=1,72 { m<sup>2</sup>, Área transparente de um coletor solar plano (SOLAR TECH)}  
Ac=94,6 {m<sup>2</sup>, área coletora definida anteriormente}  
mc = 0,1 {kg/s, vazão mássica nos coletores definida anteriormente}

{Eficiência do coletor solar: Incógnita Tc2}

$$n=62,1-(513,6*((Tc2-Tamb)/I))$$

{Balanço de energia no coletor solar: Incógnita A}

$$I*Ac*n = mc*cp*(Tc2 - Tc1)*1000$$

{Balanço de energia no tanque de armazenamento}

$$mc*cp*(Tc2 - Tc1) = mcons*cp*(Tcons-Tamb)$$

{Estratificação térmica do tanque de armazenamento}

$$Tarmaz =(mc*Tc2 + mcons*Tamb)/(mc+mcons)$$

$$Et= (Tcons - Tarmaz)/(Tc2 - Tarmaz)$$

{Mínima contribuição Solar}

$$f= (Tcons-Tamb)/(Tprocesso-Tamb)$$

## APÊNDICE C – Rotina de cálculo para estimativa das perdas nos coletores desenvolvida no MATLAB

```
##### DADOS MÉDIOS MENSASIS: Anual #####
%A mesma rotina foi utilizada para o cálculo dos valores mensais

clear all;
clc;

##### Dados construtivos do coletor #####
Nt=6; %Número de tubos no coletor
N=1; %Número de coberturas de vidro
Di=0.014; %Diâmetro interno dos tubos em m
De= 0.0145; %Diâmetro externo dos tubos em m
Ha= 2.1; %Altura em m
La=0.85; %Largura em m
W=La/(Nt+1); %Epaço entre os tubos
epabs= 0.0005; %Espessura da placa absorvedora em m
eiso=0.05; %Espessura do isolante térmico(lã de rocha) em m
kc= 392.8; %W/mK, Condutividade dos tubos (Cobre)
kpabs=240; %W/mK, Condutividade da placa absorvedora (Alumínio)
kiso = 0.029; %Condutividade térmica do isolante (Lã de rocha)
ep= 0.95; %Emisividade da placa coletora
eg= 0.88; %Emissividade da cobertura de vidro"
A=111.8; %m², Área coletora
Ac= 1.78; %Área do coletor em m²
As=0.32; %Área lateral do coletor em m²
Atc=1.72; %m²,Área transparente de um coletor solar plano (SOLAR TECH) -
Tabela 11

##### Dados de operação e instalação #####
mcons= 0.12; %kg/s, vazão mássica requerida no processo
mcons_h= mcons*3600;
np=5; %Número de coletores conectados em paralelo: serão usados 65 coletores,
sendo 5 conjuntos em paralelo de 1 coletores conectados em série
ns=11; %Número de coletores conectados em série
Tprocesso= 333.15; %temperatura requerida no processo
beta = 16; %deg, Inclinação do coletor=Inclinação do telhado
s = 5.67*1e-8; %sigma:Constante de Steffan Boltzmann
g = 9.807; %Aceleração
mc = 0.1; %kg/s, Vazão mássica da água nos coletores (0,1/np)
rhoag=990.3; %kg/m³, Densidade da água no interior dos tubos (CTE)
cp= 4.183; %kJ/kgK, Calor específico da água

##### DADOS LOCAIS #####
Vv=2.5;%Média mensal da velocidade do vento: Média anual
hw = 2.8 + 3*Vv; %Coeficiente convectivo cobertura de vidro-vento
%Número de horas por dia de operação do sistema
n_horas = 24;

%Tamb = 299.25 K= 26.1 °C; Média mensal anual da temperatura ambiente
%Tamb MIN = 295.05 = 21.9 °C; Média mensal anual da temperatura ambiente
mínima
%Tamb MAX = 302.45 = 29.3 °C; Média mensal anual da temperatura ambinete
máxima
%Hora mais quente do dia: Aproximadamente 1 horas após o meio dia solar
Tamb = [295.05 295.05 295.05 295.05 295.05 295.45 296.45 297.45 298.45 ...
        299.45 300.45 301.45 302.45 301.45 300.45 299.45 298.45 297.45 296.45 ...
        295.45 295.05 295.05 295.05 295.05];

%Inicialmente a Temp de entrada (Tc1) nos coletores é considerada igual a Tamb
Tc1 = Tamb;
```

```

##### DADOS DA RADIAÇÃO SOLAR MENSAL: Médias anuais (W/m2)#####
%Superfície Inclinada (16°N)
%12 HORAS DE SOL: 6h as 17h
S1=0;
S2=0;
S3=0;
S4=0;
S5=0;
S6=62;
S7=214;
S8=400.5;
S9=531;
S10=672;
S11=748.5;
S12=744;
S13=662;
S14=559.5;
S15=386;
S16=231;
S17=64.5;
S18=0;
S19=0;
S20=0;
S21=0;
S22=0;
S23=0;
S24=0;

S = [S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 S9 S10 S11 S12 S13 S14 S15 S16 S17 S18 S19 ...
      S20 S21 S22 S23 S24];

%Inicializa "I"
I = zeros(length(S),1);
%Inicializa "Tabs"
Tabs = I;
%Inicializa "e"
e = I;
%Inicializa "Ut"
Ut = I;
%Inicializa "Utot"
Utot = I;
%Inicializa outras variáveis vetoriais
ma = I;
cx = I;
Fa = I;
Fc = I;
Fr = I;
Fr1 = I;
Qu = I;
nu = I;
qu = I;
qp = I;
Tmf = I;
Tabs1 = I;
Tc2 = I;
dTmf = I;
Tmf1 = I;
Qtot = I;
qpt = I;

%Define tolerância para o procedimento não linear
tol = 1e-4;

%Cálculo da energia incidente na área coletora, I
Ir= (S*3600*Atc*ns*np); %[J/m²]

for j = 1:n_horas %Varre o número de horas

```

```

if j == 6
%COEFICIENTE DE PERDAS PELO TOPO
Tabs(j) = Tamb(j) + 10; %ESTIMATIVA INICIAL DE Tabs
f = (1 + 0.089*hw - 0.1166*hw*ep)*(1 + 0.07866*N);
e(j) = 0.430*(1 - (100/Tabs(j)));
C = 520*(1 - 0.000051*beta^2);
Ut(j) = ((N/((C/Tabs(j))*((Tabs(j)-Tamb(j))/(N+f))^e(j))) +
(1/hw))^( -1))+...

(s*(Tabs(j)+Tamb(j))*((Tabs(j)^2)+(Tamb(j)^2)))/((1/(ep+0.00591*N*hw))+...
((2*N+f-1+0.1333*ep)/eg)-N);

%COEFICIENTE DE PERDAS PELA BASE"
Ub = kiso/(eiso);

%COEFICIENTE DE PERDAS PELOS LADOS"
Ul = (As/Ac)*Ub;

%COEFICIENTE GLOBAL DE PERDAS DO COLETOR
#####
Utot(j) = Ut(j) + Ub + Ul;

%COEFICIENTE DE CONVECÇÃO NO INTERIOR DOS TUBOS: hit
#####
%Propriedades do fluido (água) no interior dos tubos: cte
muit = 0.0005998; %Viscosidade cinemática
rhoit = 990.3; %Densidade da água
kit = 0.624;
Prit = 4.019;

%Velocidade do fluido no interior dos tubos: vint
%Considerando que os tubos são conectados em paralelo
Ait = (pi*(Di/2)^2); %Área de seção transversal dos tubos circular
vint = ((mc/Nt)/(rhoit*Ait)); %Velocidade do fluido no interior dos
tubos
Reit = (vint*Di*rhoit)/muit; %Número de Reynolds do escoamento no
interior dos tubos

%Condições para Nusselt
%Laminar
if (Reit < 2300)
    Nuit = 4.36;

%Turbulento
else
    %Cálculo do fator de atrito em escoamentos em tubos
    %circulares lisos
    if (Reit<3000)
        fa=0.316*Reit^(-1/4);
    else
        fa=((0.790*log(Reit))-1.64)^(-2);
    end

    Nuit = ((fa/8)*(Reit-
1000)*Prit)/(1+12.7*((fa/8)^(1/2))*((Prit^(2/3))-1));

end %Fim do IF para cálculo do Nusselt

hit = (Nuit*kit)/Di;

%FATOR DE RENDIMENTO DE ALETA: F = Fa
ma(j) = sqrt(Utot(j)/(kc*epabs));
Fa(j) = tanh(ma(j)*(W-De)/2)/(ma(j)*(W-De)/2);

```

```

%FATOR DE RENDIMENTO DE CAPTAÇÃO: F' = Fc
Fc(j) = (1/Utot(j))/(W*((1/(Utot(j))*(De+(W-
De)*Fa(j))))+(1/(pi*Di*hit))));

%FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR: Fr
Fr(j) = (mc*cp*1000/(Atc*ns*Utot(j)))*(1 - ...
exp(-(Atc*ns*Utot(j)*Fc(j))/(mc*cp*1000)));

%FATOR DE FLUXO DE CALOR: F''
Fr1(j) = Fr(j)/Fc(j);

%POTÊNCIA ÚTIL CAPTADA PELOS COLETORES: qu [W]
qu(j) = ((Atc*ns*S(j) - (Utot(j)*(Tabs(j) - Tamb(j)))));
nu(j) = qu(j)/(S(j)*Atc*ns);

%CORREÇÃO DA TEMPERATURA DA PLACA ABSORVEDORA
Tf1(j)=Tc1(j);
Tabs1(j) = Tf1(j) + ((qu(j)/(Atc*ns))/(Utot(j)*Fr(j)))*(1-(Fr(j)));

%Calcula o erro:
erro = (Tabs1(j) - Tabs(j))/Tabs1(j); %Erro relativo

while -tol > erro > tol
Tabs(j)=Tabs1(j);

%CORREÇÃO DO Utot
e(j) = 0.430*(1 - (100/Tabs(j)));
Ut(j)= ((N/((C/Tabs(j))*((Tabs(j)-Tamb(j))/(N+f))^e(j))) + (1/hw))^(-
1))+...

(s*(Tabs(j)+Tamb(j))*((Tabs(j)^2)+(Tamb(j)^2)))/((1/(ep+0.00591*N*hw))+...
((2*N+f-1+0.1333*ep)/eg)-N);
Utot(j) = Ut(j) + Ub + U1;

%FATOR DE RENDIMENTO DE ALETA: F = Fa
ma(j) = sqrt(Utot(j)/(kc*epabs));
Fa(j) = tanh(ma(j)*(W-De)/2)/(ma(j)*(W-De)/2);

%FATOR DE RENDIMENTO DE CAPTAÇÃO: F' = Fc
Fc(j) = (1/Utot(j))/(W*((1/(Utot(j))*(De+(W-
De)*Fa(j))))+(1/(pi*Di*hit))));

%FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR: Fr
Fr(j) = (mc*cp*1000/(Atc*ns*Utot(j)))*(1 - ...
exp(-(Atc*ns*Utot(j)*Fc(j))/(mc*cp*1000)));

%FATOR DE FLUXO DE CALOR: F''
Fr1(j) = Fr(j)/Fc(j);

%POTÊNCIA ÚTIL CAPTADA PELOS COLETORES: qu [W]
qu(j) = ((Atc*ns*(S(j) - (Utot(j)*(Tabs(j) - Tamb(j))))));
nu(j) = qu(j)/(S(j)*Atc*ns);

%CORREÇÃO DA TEMPERATURA DA PLACA ABSORVEDORA
Tabs1(j) = Tf1(j) + ((qu(j)/(Atc*ns))/(Utot(j)*Fr(j)))*(1-(Fr(j)));

%Calcula o erro:
tol=1^(-4); %Tolerancia
erro = (Tabs1(j) - Tabs(j))/Tabs1(j); %Erro relativo

end

%ENERGIA ÚTIL CAPTADA: Qu [J]
Qu(j) = 3600*qu(j)*np;

```

```

%ENERGIA PERDIDA DOS COLETORES PARA O AMBIENTE: Qp [J]
Qp(j) = Ir(j) - Qu(j);

%TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO
Tf1(j)=Tc1(j);
Tmf(j)= Tf1(j) + (((qu(j)/(Atc*ns))/(Utot(j)*Fr(j))))*(1-Fr1(j));

%INCREMENTO DA TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO
dTmf(j) = (Tmf(j)-Tf1(1));
Tmf1(j)=Tmf(j)

%ENERGIA ACUMULADA ATÉ O HORÁRIO J
Qtot(j) = Qu(j);

elseif j > 6 && j <= 18
%COEFICIENTE DE PERDAS PELO TOPO
Tabs(j)=Tabs1(j-1);
f = (1 + 0.089*hw - 0.1166*hw*ep)*(1 + 0.07866*N);
e(j) = 0.430*(1 - (100/Tabs(j)));
C = 520*(1 - 0.000051*beta^2);
Ut(j)= (((N/((C/Tabs(j))*((Tabs(j)-Tamb(j))/(N+f))^e(j)))) +
(1/hw))^(-1))+...
(s*(Tabs(j)+Tamb(j))*((Tabs(j)^2)+(Tamb(j)^2)))/((1/(ep+0.00591*N*hw))+...
((2*N+f-1+0.1333*ep)/eg)-N);

%COEFICIENTE DE PERDAS PELA BASE"
Ub = kiso/(eiso);

%COEFICIENTE DE PERDAS PELOS LADOS"
Ul = (As/Ac)*Ub;

%COEFICIENTE GLOBAL DE PERDAS DO COLETOR
#####
Utot(j) = Ut(j) + Ub + Ul;

%COEFICIENTE DE CONVECÇÃO NO INTERIOR DOS TUBOS: hit
#####
%Propriedades do fluido (água) no interior dos tubos: cte
muit = 0.0005998; %Viscosidade cinemática
rhoit = 990.3; %Densidade da água
vit = 2.945*1e-7; %Viscosidade dinâmica: deve ser avaliada na
temperatura da parede do coletor
kit = 0.624;
Prit = 4.019;

%Velocidade do fluido no interior dos tubos: vint
%Considerando que os tubos são conectados em paralelo
Ait = (pi*(Di/2)^2); %Área de seção transversal dos tubos circular
vint = ((mc/Nt)/(rhoit*Ait)); %Velocidade do fluido no interior dos
tubos
Reit = (vint*Di*rhoit)/muit; %Número de Reynolds do escoamento no
interior dos tubos

%Condições para Nusselt
%Laminar
if (Reit < 2300)
Nuit = 4.36;

%Turbulento
else
%Cálculo do fator de atrito em escoamentos em tubos

```

```

        %circulares lisos
        if (Reit<3000)
            fa=0.316*Reit^(-1/4);
        else
            fa=((0.790*log(Reit))-1.64)^(-2);
        end

        Nuit = ((fa/8)*(Reit-
1000)*Prit)/(1+12.7*((fa/8)^(1/2))*((Prit^(2/3))-1));

        end %Fim do IF para cálculo do Nusselt

        hit = (Nuit*kit)/Di;

        %FATOR DE RENDIMENTO DE ALETA: F = Fa
        ma(j) = sqrt(Utot(j)/(kc*epabs));
        Fa(j) = tanh(ma(j)*(W-De)/2)/(ma(j)*(W-De)/2);

        %FATOR DE RENDIMENTO DE CAPTAÇÃO: F' = Fc
        Fc(j) = (1/Utot(j))/(W*((1/(Utot(j))*(De+(W-
De)*Fa(j))))+(1/(pi*Di*hit))));

        %FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR: Fr
        Fr(j) = (mc*cp*1000/(Atc*ns*Utot(j)))*(1 - ...
exp(-(Atc*ns*Utot(j)*Fc(j))/(mc*cp*1000)));

        %FATOR DE FLUXO DE CALOR: F''
        Fr1(j) = Fr(j)/Fc(j);

        %POTÊNCIA ÚTIL CAPTADA PELOS COLETORES: qu [W]
        qu(j) = ((Atc*ns*S(j) - (Utot(j)*(Tabs(j) - Tamb(j)))));
        nu(j) = qu(j)/(S(j)*Atc*ns);

        %CORREÇÃO DA TEMPERATURA DA PLACA ABSORVEDORA
        Tf1(j)=(Tcl(j)+Tmf(j-1))/2;
        Tabs1(j) = Tf1(j) + ((qu(j)/(Atc*ns))/(Utot(j)*Fr(j)))*(1-(Fr(j)));

        %Calcula o erro:
        erro = (Tabs1(j) - Tabs(j))/Tabs1(j); %Erro relativo

        while -tol > erro > tol %MODIFIQUEI AQUI!!!!!!!
            Tabs(j)=Tabs1(j);

        %CORREÇÃO DO Utot
        e(j) = 0.430*(1 - (100/Tabs(j)));
        Ut(j) = (((N/((C/Tabs(j))*((Tabs(j)-Tamb(j))/(N+f))^e(j))) + (1/hw))^(-
1))+...

(s*(Tabs(j)+Tamb(j))*((Tabs(j)^2)+(Tamb(j)^2)))/((1/(ep+0.00591*N*hw))+...
((2*N+f-1+0.1333*ep)/eg)-N);
        Utot(j) = Ut(j) + Ub + Ul;

        %FATOR DE RENDIMENTO DE ALETA: F = Fa
        ma(j) = sqrt(Utot(j)/(kc*epabs));
        Fa(j) = tanh(ma(j)*(W-De)/2)/(ma(j)*(W-De)/2);

        %FATOR DE RENDIMENTO DE CAPTAÇÃO: F' = Fc
        Fc(j) = (1/Utot(j))/(W*((1/(Utot(j))*(De+(W-
De)*Fa(j))))+(1/(pi*Di*hit))));

        %FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR: Fr
        Fr(j) = (mc*cp*1000/(Atc*ns*Utot(j)))*(1 - ...
exp(-(Atc*ns*Utot(j)*Fc(j))/(mc*cp*1000)));

```

```

%FATOR DE FLUXO DE CALOR: F"
Fr1(j) = Fr(j)/Fc(j);

%POTÊNCIA ÚTIL CAPTADA PELOS COLETORES: qu [W]
qu(j) = ((Atc*ns*(S(j) - (Utot(j)*(Tabs(j) - Tamb(j))))));
nu(j) = qu(j)/(S(j)*Atc*ns);

%CORREÇÃO DA TEMPERATURA DA PLACA ABSORVEDORA
Tf1(j)=(Tc1(j)+Tmf(j-1))/2;
Tabs1(j) = Tf1(j) + ((qu(j)/(Atc*ns))/(Utot(j)*Fr(j)))*(1-(Fr(j)));

%Calcula o erro:
tol=1^(-4); %Tolerancia
erro = (Tabs1(j) - Tabs(j))/(Tabs1(j)); %Erro relativo

```

end

```

%ENERGIA ÚTIL CAPTADA: Qu [J]
Qu(j) = 3600*qu(j)*np;

%ENERGIA PERDIDA DOS COLETORES PARA O AMBIENTE: Qp [J]
Qp(j) = Ir(j) - Qu(j);

%ENERGIA ACUMULADA ATÉ O HORÁRIO J
Qtot(j) = Qu(j)+Qtot(j-1);

```

```

%TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO
Tf1(j)=(Tmf(j-1)+Tc1(j))/2;
Tmf(j)= Tf1(j) + (((qu(j)/(Atc*ns))/(Utot(j)*Fr(j))))*(1-Fr1(j));

```

```

%INCREMENTO DA TEMPERARUTA MÉDIA DO FLUIDO
dTmf(j) = (Tmf(j)-Tf1(1));
Tmf1(j)=Tmf(j)

```

end

end

## APÊNDICE D – Rotina de cálculo para estimativa das perdas no Armazenamento desenvolvida no MATLAB

```
##### PERDAS NO ARMAZENAMENTO: Dados Anuais #####
%A mesma rotina foi utilizada para o cálculo dos valores mensais
clear all;
clc;

%Temperatura ambiente horária
Tamb = [295.05; 295.05; 295.05; 295.05; 295.95; 296.95; 295.95; 296.95; ...
        297.95; 299.95; 300.95; 301.95; 302.45; 301.95; 300.95; 299.95; 98.95; ...
        297.06; 296.95; 295.95; 295.05; 295.05; 295.05; 295.05;];

%Energia Útil Coletada: 12h de Sol
Qu= [0;0;0;0;0;17.99e6; 72.82e6; 135.82e6; 179.36e6; 226.48e6; 251.53e6; ...
     249.22e6; 220.95e6; 185.99e6; 127.30e6; 75.41e6; 19.68e6;0;0;0;0;0;0];

%Carga do Sistema : Constante 24 h
E= 60192000; %J/h

%Dados do Tanque de Armazenamento
dext = 1.07; %largura
dit= 1.02; %Diamêtro interno: Considerando 25cm de isolante térmico
lt= 2.65; %comprimento
Aexta=((pi/2)*dext^2)+(pi*dext*lt); %Área externa do tanque
hta= 1.12; %altura
vta= 2; %volume de armazenamento: 8 tanques de 2m³ cada
kisota=0.027; %poliestireno expandido
Ma=1000*vta; %Massa de água no tanque de armazenamento - propriedades da água
considerado constante
cp=4180; %Calor específico da água: cte

%Cálculo do coeficiente de perdas térmicos do tanque de armazenamento
Ut=1/((Log(dext/dit))*((dext/2)/kisota));
UtA=Ut*Aexta;

%Inicializando Tarmaz
Tarmaz1=Tamb;

%Determinação da variação Tarmaz
for j=1:24

    if j==1
        Tarmaz1(j)= Tamb(j)+20;
        Tarmaz2(j)= Tarmaz1(j)+(1/(Ma*cp))*((Qu(j)/8)- E/8 -
(UtA*3600*(Tarmaz1(j)-Tamb(j))));
        Qpa(j)=8*UtA*3600*(Tarmaz1(j)-Tamb(j));
        Qarmaz2(j)=Ma*cp*(Tarmaz2(j)-Tarmaz1(j));

    else
        Tarmaz1(j)=Tarmaz2(j-1);
        Tarmaz2(j)= Tarmaz1(j)+(1/(Ma*cp))*((Qu(j)/8)- E/8 -
(UtA*3600*(Tarmaz1(j)-Tamb(j))));
        Qpa(j)=8*UtA*3600*(Tarmaz1(j)-Tamb(j));
        Qarmaz2(j)=Ma*cp*(Tarmaz2(j)-Tarmaz1(j));

    end

end

end
```

## APÊNDICE F – Valores Médios Mensais Obtido no Cálculo da Energia Útil Coletada e da Energia Perdida no Armazenamento

**Tabela F 1** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Janeiro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Tamb[°C]	Tf1[°C]	Tabs[°C]	Utot[W/m <sup>2</sup> K]	F	F'	Fr	F''	Tfm[°C]	Qu [MJ]	Qp (MJ)	Qtot[MJ]	Qpt(MJ)
<b>6</b>	105,00	35,76	24,80	24,80	27,63	5,1151	0,9759	0,9575	0,8589	0,8970	26,87	30,04	5,72	30,04	5,72
<b>7</b>	280,00	95,36	25,80	26,33	35,30	4,9015	0,9769	0,9592	0,8641	0,9008	32,88	95,20	0,16	125,23	5,88
<b>8</b>	421,00	143,38	26,80	29,84	43,31	5,6345	0,9735	0,9534	0,8464	0,8878	39,69	142,51	0,86	267,74	6,75
<b>9</b>	554,00	188,67	27,80	33,74	51,46	6,0370	0,9717	0,9503	0,8370	0,8808	46,70	186,98	1,69	454,73	8,43
<b>10</b>	669,00	227,83	28,80	37,75	59,12	6,3503	0,9703	0,9478	0,8298	0,8754	53,38	225,24	2,59	679,97	11,02
<b>11</b>	805,00	274,15	29,80	41,59	67,30	6,6047	0,9691	0,9459	0,8240	0,8711	60,41	270,67	3,49	950,64	14,51
<b>12</b>	768,00	261,55	30,80	45,61	70,04	6,8537	0,9680	0,9440	0,8184	0,8670	63,51	257,05	4,50	1207,69	19,01
<b>13</b>	712,00	242,48	31,80	47,65	70,26	6,9335	0,9677	0,9433	0,8166	0,8656	64,22	237,71	4,77	1445,39	23,78
<b>14</b>	574,00	195,48	30,80	47,51	65,63	6,9402	0,9676	0,9433	0,8165	0,8655	60,79	190,55	4,93	1635,94	28,71
<b>15</b>	417,00	142,01	29,80	45,29	58,37	6,8060	0,9682	0,9443	0,8195	0,8678	54,87	137,62	4,39	1773,57	33,10
<b>16</b>	268,00	91,27	28,80	41,84	50,17	6,5860	0,9692	0,9460	0,8244	0,8714	47,94	87,76	3,51	1861,33	36,61
<b>17</b>	107,00	36,44	27,80	37,87	41,08	6,3138	0,9705	0,9481	0,8306	0,8761	40,22	33,90	2,54	<b>1895,23</b>	<b>39,15</b>

Tabela F 2 - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Fevereiro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Tamb[°C]	Tf1[°C]	Tabs[°C]	Utot[W/m <sup>2</sup> K]	F	F'	Fr	F''	Tfm[°C]	Qu [MJ]	Qp (MJ)	Qtot[MJ]	Qpt(MJ)
<b>6</b>	86,00	29,29	23,50	23,50	25,83	4,9976	0,9764	0,9584	0,8617	0,8991	25,20	24,74	4,55	24,74	4,55
<b>7</b>	243,00	82,76	24,50	24,85	32,63	4,7551	0,9776	0,9604	0,8677	0,9035	30,53	82,64	0,11	107,38	4,66
<b>8</b>	398,00	135,54	25,50	28,01	40,76	5,5063	0,9741	0,9544	0,8495	0,8900	37,32	134,84	0,71	242,22	5,37
<b>9</b>	604,00	205,70	26,50	31,91	51,24	5,9464	0,9721	0,9510	0,8391	0,8824	46,05	204,17	1,53	446,39	6,90
<b>10</b>	749,00	255,08	27,50	36,77	60,71	6,3555	0,9703	0,9478	0,8297	0,8753	54,29	252,36	2,72	698,75	9,61
<b>11</b>	832,00	283,35	28,50	41,40	67,95	6,6608	0,9689	0,9454	0,8227	0,8702	60,84	279,48	3,86	978,24	13,48
<b>12</b>	802,00	273,13	29,50	45,17	70,69	6,8741	0,9679	0,9438	0,8179	0,8666	63,86	268,37	4,76	1246,61	18,23
<b>13</b>	731,00	248,95	30,50	47,18	70,38	6,9524	0,9676	0,9432	0,8162	0,8653	64,18	243,92	5,03	1490,53	23,26
<b>14</b>	581,00	197,87	29,50	46,84	65,17	6,9437	0,9676	0,9433	0,8164	0,8655	60,27	192,76	5,11	1683,28	28,37
<b>15</b>	430,00	146,44	28,50	44,38	57,88	6,7946	0,9683	0,9444	0,8197	0,8680	54,27	141,96	4,49	1825,24	32,86
<b>16</b>	264,00	89,91	27,50	40,88	49,08	6,5766	0,9693	0,9461	0,8246	0,8716	46,88	86,31	3,60	1911,55	36,45
<b>17</b>	94,00	32,01	26,50	36,69	39,49	6,2879	0,9706	0,9483	0,8312	0,8765	38,74	29,46	2,56	<b>1941,01</b>	<b>39,01</b>

**Tabela F 3 - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Março.**

<b>j</b>	<b>S[W/m²]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m²K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	64,00	21,80	23,00	23,00	24,75	4,8634	0,9771	0,9595	0,8650	0,9015	24,27	18,54	3,25	18,54	3,25
<b>7</b>	221,00	75,26	24,00	24,14	31,21	4,5541	0,9785	0,9620	0,8727	0,9072	29,30	75,20	0,06	93,74	3,32
<b>8</b>	413,00	140,65	25,00	27,15	40,38	5,4218	0,9745	0,9551	0,8515	0,8915	36,81	140,05	0,61	233,79	3,92
<b>9</b>	522,00	177,77	26,00	31,41	48,09	5,9397	0,9721	0,9510	0,8393	0,8825	43,61	176,24	1,54	410,02	5,46
<b>10</b>	676,00	230,22	27,00	35,30	56,91	6,2457	0,9708	0,9487	0,8322	0,8772	51,11	227,85	2,37	637,87	7,83
<b>11</b>	753,00	256,44	28,00	39,55	63,58	6,5431	0,9694	0,9463	0,8254	0,8722	57,14	253,04	3,40	890,91	11,23
<b>12</b>	783,00	266,66	29,00	43,07	68,01	6,7464	0,9685	0,9448	0,8208	0,8688	61,34	262,46	4,20	1153,37	15,43
<b>13</b>	658,00	224,09	30,00	45,67	66,53	6,8756	0,9679	0,9438	0,8179	0,8666	60,95	219,38	4,70	1372,75	20,14
<b>14</b>	545,00	185,61	29,00	44,97	62,18	6,8335	0,9681	0,9441	0,8188	0,8673	57,58	180,99	4,62	1553,74	24,75
<b>15</b>	382,00	130,09	28,00	42,79	54,76	6,7070	0,9687	0,9451	0,8217	0,8694	51,55	125,97	4,13	1679,71	28,88
<b>16</b>	238,00	81,05	27,00	39,28	46,66	6,4791	0,9697	0,9468	0,8268	0,8733	44,68	77,82	3,24	1757,52	32,12
<b>17</b>	68,00	23,16	26,00	35,34	37,32	6,2039	0,9710	0,9490	0,8331	0,8779	36,79	20,85	2,31	<b>1778,38</b>	<b>34,43</b>

**Tabela F 4** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Abril.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Tamb[°C]	Tf1[°C]	Tabs[°C]	Utot[W/m <sup>2</sup> K]	F	F'	Fr	F''	Tfm[°C]	Qu [MJ]	Qp (MJ)	Qtot[MJ]	Qpt(MJ)
<b>6</b>	43,00	14,64	22,90	22,90	24,08	4,7068	0,9044	0,9608	0,8689	0,9044	23,76	12,58	2,07	12,58	2,07
<b>7</b>	176,00	59,94	23,80	23,78	29,41	4,2857	0,9121	0,9641	0,8794	0,9121	27,88	59,92	0,02	72,49	2,09
<b>8</b>	348,00	118,51	24,80	26,34	37,49	5,2696	0,8942	0,9563	0,8551	0,8942	34,48	118,08	0,44	190,57	2,53
<b>9</b>	474,00	161,43	25,80	30,14	45,30	5,7999	0,8849	0,9521	0,8425	0,8849	41,22	160,21	1,22	350,78	3,75
<b>10</b>	602,00	205,02	26,80	34,01	53,25	6,1393	0,8790	0,9495	0,8346	0,8790	48,08	202,97	2,04	553,75	5,79
<b>11</b>	624,00	212,51	27,80	37,94	57,83	6,4227	0,8742	0,9473	0,8281	0,8742	52,49	209,57	2,94	763,32	8,73
<b>12</b>	664,00	226,13	28,80	40,65	61,79	6,5684	0,8717	0,9462	0,8248	0,8717	56,13	222,70	3,43	986,02	12,16
<b>13</b>	567,00	193,10	29,80	42,96	60,94	6,6895	0,8697	0,9452	0,8221	0,8697	56,13	189,25	3,85	1175,26	16,02
<b>14</b>	476,00	162,11	28,80	42,46	57,50	6,6668	0,8701	0,9454	0,8226	0,8701	53,47	158,25	3,86	1333,51	19,87
<b>15</b>	339,00	115,45	27,80	40,64	51,27	6,5631	0,8718	0,9462	0,8249	0,8718	48,42	111,94	3,51	1445,45	23,38
<b>16</b>	182,00	61,98	26,80	37,61	43,22	6,3627	0,8752	0,9477	0,8295	0,8752	41,72	59,18	2,80	1504,63	26,18
<b>17</b>	46,00	15,67	25,80	33,76	35,06	6,0698	0,8802	0,9500	0,8362	0,8802	34,71	13,76	1,90	<b>1518,40</b>	<b>28,09</b>

**Tabela F 5** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada  $Q_u$  (MJ): Maio.

<b>j</b>	<b>S[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	30,00	10,22	22,60	22,60	23,43	4,5695	0,9784	0,9619	0,8723	0,9069	23,21	8,86	1,35	8,86	1,35
<b>7</b>	162,00	55,17	23,60	23,40	28,58	3,9077	0,9815	0,9672	0,8888	0,9190	27,17	55,18	-0,01	64,05	1,34
<b>8</b>	325,00	110,68	24,60	25,89	36,30	5,1962	0,9755	0,9569	0,8569	0,8955	33,49	110,31	0,37	174,35	1,71
<b>9</b>	463,00	157,68	25,60	29,54	44,35	5,7402	0,9731	0,9526	0,8439	0,8859	40,37	156,57	1,11	330,93	2,82
<b>10</b>	560,00	190,71	26,60	33,48	51,37	6,1037	0,9714	0,9498	0,8354	0,8796	46,57	188,76	1,95	519,69	4,77
<b>11</b>	635,00	216,26	27,60	37,08	57,34	6,3591	0,9703	0,9478	0,8296	0,8753	51,91	213,53	2,72	733,23	7,49
<b>12</b>	618,00	210,47	28,60	40,25	59,91	6,5537	0,9694	0,9463	0,8251	0,8720	54,65	207,08	3,39	940,30	10,88
<b>13</b>	578,00	196,84	29,60	42,12	60,48	6,6313	0,9690	0,9457	0,8234	0,8707	55,56	193,23	3,62	1133,53	14,50
<b>14</b>	437,00	148,82	28,60	42,08	55,85	6,6531	0,9689	0,9455	0,8229	0,8703	52,17	145,01	3,82	1278,53	18,32
<b>15</b>	305,00	103,87	27,60	39,88	49,43	6,5112	0,9696	0,9466	0,8261	0,8727	46,87	100,56	3,31	1379,09	21,63
<b>16</b>	155,00	52,79	26,60	36,74	41,50	6,2995	0,9705	0,9482	0,8309	0,8763	40,22	50,20	2,59	1429,29	24,22
<b>17</b>	30,00	10,22	25,60	32,91	33,71	5,9992	0,9719	0,9506	0,8379	0,8814	33,50	8,50	1,72	<b>1437,79</b>	<b>25,93</b>

**Tabela F 6** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Junho.

<b>j</b>	<b>S[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	23,00	7,83	21,80	21,8000	22,4444	4,4595	0,9789	0,9627	0,8750	0,9089	22,27	6,85	0,98	6,85	0,98
<b>7</b>	127,00	43,25	22,30	22,2849	26,3441	4,0990	0,9806	0,9656	0,8841	0,9156	25,24	43,24	0,01	50,09	0,99
<b>8</b>	249,00	84,80	23,30	24,2710	32,2411	5,0477	0,9762	0,9581	0,8605	0,8982	30,09	84,52	0,28	134,62	1,27
<b>9</b>	373,00	127,03	24,30	27,1942	39,1248	5,5365	0,9740	0,9542	0,8488	0,8895	35,91	126,24	0,79	260,85	2,06
<b>10</b>	462,00	157,34	25,30	30,6053	45,3610	5,8963	0,9723	0,9514	0,8403	0,8832	41,39	155,87	1,47	416,73	3,53
<b>11</b>	546,00	185,95	26,30	33,8467	51,2697	6,1492	0,9712	0,9494	0,8344	0,8789	46,59	183,84	2,11	600,56	5,64
<b>12</b>	515,00	175,39	27,30	36,9456	53,3235	6,3583	0,9703	0,9478	0,8296	0,8753	48,93	172,65	2,74	773,21	8,38
<b>13</b>	458,00	155,98	28,30	38,6153	53,1417	6,4213	0,9700	0,9473	0,8281	0,8742	49,25	153,08	2,89	926,29	11,27
<b>14</b>	382,00	130,09	27,30	38,2733	50,3347	6,4231	0,9700	0,9473	0,8281	0,8742	47,10	127,11	2,99	1053,40	14,26
<b>15</b>	252,00	85,82	26,30	36,7003	44,5809	6,3347	0,9704	0,9480	0,8301	0,8757	42,47	83,08	2,74	1136,48	17,00
<b>16</b>	129,00	43,93	25,30	33,8834	37,8451	6,1328	0,9713	0,9495	0,8348	0,8791	36,78	41,80	2,13	1178,28	19,13
<b>17</b>	22,00	7,49	24,30	30,5406	31,1145	5,8584	0,9725	0,9517	0,8412	0,8839	30,96	6,06	1,43	<b>1184,35</b>	<b>20,56</b>

**Tabela F 7** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Julho.

<b>j</b>	<b>S[W/m²]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m²K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	24,00	8,17	20,30	20,30	20,97	4,4404	0,9790	0,9629	0,8755	0,9092	20,79	7,15	1,02	7,15	1,02
<b>7</b>	136,00	46,32	20,30	20,54	24,89	4,4379	0,9790	0,9629	0,8756	0,9093	23,72	46,26	0,05	53,41	1,08
<b>8</b>	269,00	91,61	21,30	22,51	31,12	5,0748	0,9761	0,9578	0,8599	0,8977	28,79	91,28	0,33	144,69	1,41
<b>9</b>	403,00	137,25	22,30	25,55	38,43	5,5483	0,9739	0,9541	0,8485	0,8893	34,96	136,37	0,88	281,06	2,29
<b>10</b>	530,00	180,50	23,30	29,13	46,07	5,9088	0,9723	0,9513	0,8400	0,8830	41,51	178,89	1,61	459,95	3,90
<b>11</b>	576,00	196,16	24,30	32,91	51,27	6,2022	0,9710	0,9490	0,8332	0,8780	46,34	193,73	2,43	653,68	6,33
<b>12</b>	549,00	186,97	25,30	35,82	53,28	6,3754	0,9702	0,9476	0,8292	0,8750	48,59	183,99	2,98	837,67	9,31
<b>13</b>	478,00	162,79	26,30	37,45	52,60	6,4349	0,9699	0,9472	0,8278	0,8740	48,54	159,66	3,12	997,33	12,43
<b>14</b>	392,00	133,50	25,30	36,92	49,29	6,4195	0,9700	0,9473	0,8282	0,8743	45,97	130,35	3,15	1127,67	15,59
<b>15</b>	268,00	91,27	24,30	35,14	43,52	6,3163	0,9704	0,9481	0,8305	0,8760	41,27	88,43	2,84	1216,10	18,43
<b>16</b>	132,00	44,95	23,30	32,29	36,33	6,1194	0,9713	0,9496	0,8351	0,8794	35,25	42,73	2,23	1258,83	20,65
<b>17</b>	22,00	7,49	22,30	28,77	29,34	5,8339	0,9726	0,9519	0,8417	0,8843	29,19	6,02	1,47	<b>1264,85</b>	<b>22,13</b>

**Tabela F 8** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Agosto.

<b>j</b>	<b>S[W/m²]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m²K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	39,00	13,28	21,70	21,7000	22,7774	4,6435	0,9781	0,9613	0,8704	0,9055	22,49	11,45	1,83	11,45	1,83
<b>7</b>	180,00	61,30	21,80	22,1429	27,9032	4,5886	0,9783	0,9617	0,8718	0,9065	26,34	61,22	0,08	72,67	1,92
<b>8</b>	338,00	115,11	22,80	24,5717	35,3916	5,2721	0,9752	0,9563	0,8551	0,8942	32,47	114,62	0,48	187,29	2,40
<b>9</b>	491,00	167,21	23,80	28,1363	43,8415	5,7466	0,9730	0,9525	0,8438	0,8858	39,62	166,02	1,20	353,31	3,60
<b>10</b>	633,00	215,57	24,80	32,2076	52,4366	6,1108	0,9714	0,9497	0,8353	0,8795	47,00	213,48	2,09	566,79	5,69
<b>11</b>	672,00	228,86	25,80	36,4018	57,8256	6,4106	0,9700	0,9474	0,8284	0,8744	52,08	225,78	3,07	792,57	8,77
<b>12</b>	675,00	229,88	26,80	39,4404	60,9205	6,5782	0,9693	0,9461	0,8246	0,8716	55,17	226,20	3,67	1018,78	12,44
<b>13</b>	633,00	215,57	27,80	41,4828	61,5842	6,6695	0,9689	0,9454	0,8225	0,8700	56,20	211,60	3,98	1230,37	16,42
<b>14</b>	498,00	169,60	26,80	41,5006	57,2157	6,6923	0,9687	0,9452	0,8220	0,8697	53,01	165,41	4,19	1395,78	20,61
<b>15</b>	341,00	116,13	25,80	39,4039	50,0785	6,5636	0,9693	0,9462	0,8249	0,8718	47,22	112,42	3,71	1508,20	24,32
<b>16</b>	186,00	63,34	24,80	36,0092	41,7442	6,3390	0,9703	0,9479	0,8300	0,8756	40,21	60,46	2,88	1568,66	27,20
<b>17</b>	40,00	13,62	23,80	32,0029	33,1084	6,0418	0,9717	0,9502	0,8369	0,8807	32,81	11,67	1,95	1580,33	29,15

**Tabela F 9** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada  $Q_u$  (MJ): Setembro.

<b>j</b>	<b>S[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp [MJ]</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	60,00	20,43	21,30	21,3000	22,9419	4,7991	0,9774	0,9600	0,8666	0,9027	22,50	17,43	3,00	17,43	3,00
<b>7</b>	207,00	70,50	22,30	22,3989	29,0235	4,4695	0,9789	0,9627	0,8748	0,9087	27,23	70,44	0,05	87,88	3,05
<b>8</b>	403,00	137,25	23,30	25,2642	38,1715	5,3404	0,9749	0,9557	0,8534	0,8930	34,69	136,70	0,55	224,57	3,60
<b>9</b>	540,00	183,90	24,30	29,4953	46,7640	5,8742	0,9724	0,9515	0,8408	0,8836	42,12	182,44	1,47	407,01	5,07
<b>10</b>	737,00	250,99	25,30	33,7101	57,2774	6,2163	0,9709	0,9489	0,8328	0,8777	50,95	248,59	2,40	655,60	7,47
<b>11</b>	744,00	253,38	26,30	38,6256	62,3369	6,5633	0,9693	0,9462	0,8249	0,8718	55,98	249,72	3,66	905,32	11,13
<b>12</b>	720,00	245,20	27,30	41,6419	64,5379	6,7135	0,9687	0,9450	0,8215	0,8693	58,41	240,97	4,23	1146,28	15,37
<b>13</b>	666,00	226,81	28,30	43,3540	64,4910	6,7764	0,9684	0,9446	0,8201	0,8683	58,83	222,39	4,42	1368,68	19,79
<b>14</b>	575,00	195,82	27,30	43,0670	61,2474	6,7766	0,9684	0,9445	0,8201	0,8683	56,38	191,29	4,54	1559,96	24,32
<b>15</b>	390,00	132,82	26,30	41,3408	53,5596	6,6836	0,9688	0,9453	0,8222	0,8698	50,29	128,61	4,20	1688,58	28,53
<b>16</b>	224,00	76,29	25,30	37,7939	44,7223	6,4508	0,9698	0,9471	0,8275	0,8737	42,86	73,00	3,28	1761,58	31,81
<b>17</b>	61,00	20,77	24,30	33,5824	35,3370	6,1519	0,9712	0,9494	0,8343	0,8788	34,87	18,51	2,26	1780,09	34,07

**Tabela F 10** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qu (MJ): Outubro.

<b>j</b>	<b>S[W/m²]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m²K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	82,00	27,93	23,30	23,30	25,53	4,9727	0,9766	0,9586	0,8623	0,8995	24,92	23,62	4,31	23,62	4,31
<b>7</b>	282,00	96,04	23,30	24,11	33,14	4,9189	0,9768	0,9591	0,8637	0,9005	30,70	95,84	0,20	119,46	4,51
<b>8</b>	484,00	164,83	24,30	27,50	43,00	5,5970	0,9737	0,9537	0,8473	0,8884	38,83	163,94	0,89	283,40	5,40
<b>9</b>	657,00	223,75	25,30	32,06	53,08	6,0689	0,9716	0,9500	0,8363	0,8802	47,43	221,81	1,93	505,21	7,33
<b>10</b>	779,00	265,30	26,30	36,87	61,75	6,4284	0,9699	0,9472	0,8280	0,8741	55,08	262,20	3,10	767,41	10,43
<b>11</b>	872,00	296,97	27,30	41,19	69,01	6,6959	0,9687	0,9452	0,8219	0,8696	61,56	292,82	4,15	1060,23	14,58
<b>12</b>	911,00	310,25	28,30	44,93	73,95	6,9049	0,9678	0,9436	0,8172	0,8661	66,19	305,19	5,06	1365,42	19,64
<b>13</b>	826,00	281,30	29,30	47,75	73,97	7,0430	0,9672	0,9425	0,8142	0,8638	66,96	275,64	5,66	1641,06	25,30
<b>14</b>	633,00	215,57	28,30	47,63	67,59	7,0421	0,9672	0,9425	0,8142	0,8639	62,26	209,78	5,79	1850,84	31,09
<b>15</b>	498,00	169,60	27,30	44,78	60,43	6,8652	0,9680	0,9439	0,8181	0,8668	56,24	164,62	4,98	2015,46	36,07
<b>16</b>	265,00	90,25	26,30	41,27	49,46	6,6594	0,9689	0,9455	0,8227	0,8702	47,26	86,16	4,09	2101,62	40,16
<b>17</b>	105,00	35,76	25,30	36,28	39,41	6,3132	0,9705	0,9481	0,8306	0,8761	38,57	33,01	2,75	<b>2134,63</b>	<b>42,91</b>

**Tabela F 11** - - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada  $Q_u$  (MJ): Novembro.

<b>j</b>	<b>S[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	116,00	39,50	23,70	23,70	26,83	5,1349	0,9758	0,9574	0,8584	0,8966	25,98	33,14	6,36	33,14	6,36
<b>7</b>	291,00	99,10	23,70	24,84	34,16	5,0683	0,9761	0,9579	0,8600	0,8978	31,64	98,82	0,29	131,96	6,65
<b>8</b>	485,00	165,17	24,70	28,17	43,70	5,6454	0,9735	0,9533	0,8462	0,8876	39,52	164,21	0,96	296,17	7,61
<b>9</b>	723,00	246,22	25,70	32,61	55,75	6,0912	0,9715	0,9499	0,8357	0,8799	49,54	244,25	1,97	540,42	9,58
<b>10</b>	831,00	283,01	26,70	38,12	64,66	6,5131	0,9696	0,9466	0,8261	0,8727	57,55	279,60	3,41	820,02	12,99
<b>11</b>	956,00	325,58	27,70	42,62	73,14	6,7809	0,9684	0,9445	0,8200	0,8682	64,97	321,06	4,51	1141,08	17,50
<b>12</b>	939,00	319,79	28,70	46,84	76,73	7,0199	0,9673	0,9427	0,8147	0,8642	68,74	314,17	5,62	1455,25	23,12
<b>13</b>	871,00	296,63	29,70	49,22	76,88	7,1193	0,9668	0,9419	0,8125	0,8626	69,49	290,60	6,03	1745,86	29,14
<b>14</b>	721,00	245,54	28,70	49,10	71,88	7,1213	0,9668	0,9419	0,8124	0,8626	65,79	239,37	6,18	1985,22	35,32
<b>15</b>	525,00	178,79	27,70	46,75	63,23	6,9843	0,9674	0,9430	0,8155	0,8648	58,82	173,24	5,55	2158,46	40,87
<b>16</b>	308,00	104,89	26,70	42,76	52,31	6,7409	0,9685	0,9448	0,8209	0,8689	49,75	100,46	4,43	2258,92	45,31
<b>17</b>	133,00	45,29	25,70	37,73	41,73	6,4070	0,9700	0,9474	0,8285	0,8745	40,66	42,23	3,07	<b>2301,15</b>	<b>48,37</b>

**Tabela F 12** - Valores médios mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada  $Q_u$  (MJ): Dezembro.

<b>j</b>	<b>S[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>I[MJ]</b>	<b>Tamb[°C]</b>	<b>Tf1[°C]</b>	<b>Tabs[°C]</b>	<b>Utot[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>F</b>	<b>F'</b>	<b>Fr</b>	<b>F''</b>	<b>Tfm[°C]</b>	<b>Qu [MJ]</b>	<b>Qp (MJ)</b>	<b>Qtot[MJ]</b>	<b>Qpt(MJ)</b>
<b>6</b>	115,00	39,16	23,00	23,00	26,10	5,1149	0,9759	0,9575	0,8589	0,8970	25,26	32,88	6,28	32,88	6,28
<b>7</b>	321,00	109,32	24,00	24,63	34,92	4,9123	0,9768	0,9591	0,8638	0,9006	32,14	109,13	0,19	142,01	6,47
<b>8</b>	503,00	171,30	25,00	28,57	44,67	5,6803	0,9733	0,9531	0,8453	0,8870	40,34	170,29	1,01	312,30	7,48
<b>9</b>	729,00	248,27	26,00	33,17	56,50	6,1261	0,9713	0,9496	0,8349	0,8793	50,23	246,21	2,06	558,51	9,54
<b>10</b>	829,00	282,32	27,00	38,62	65,09	6,5354	0,9695	0,9464	0,8256	0,8723	58,00	278,85	3,47	837,37	13,01
<b>11</b>	896,00	305,14	28,00	43,00	71,57	6,7930	0,9683	0,9444	0,8197	0,8680	63,92	300,61	4,54	1137,97	17,55
<b>12</b>	938,00	319,45	29,00	46,46	76,34	6,9769	0,9675	0,9430	0,8156	0,8649	68,35	314,10	5,35	1452,07	22,89
<b>13</b>	814,00	277,22	30,00	49,18	75,00	7,1094	0,9669	0,9420	0,8127	0,8627	68,10	271,29	5,93	1723,36	28,82
<b>14</b>	657,00	223,75	29,00	48,55	69,29	7,0711	0,9671	0,9423	0,8136	0,8634	63,75	217,89	5,85	1941,25	34,68
<b>15</b>	539,00	183,56	28,00	45,87	62,84	6,9127	0,9678	0,9435	0,8171	0,8660	58,30	178,42	5,14	2119,67	39,82
<b>16</b>	285,00	97,06	27,00	42,65	51,46	6,7290	0,9686	0,9449	0,8212	0,8691	49,10	92,72	4,34	2212,39	44,16
<b>17</b>	125,00	42,57	26,00	37,55	41,31	6,3762	0,9702	0,9476	0,8292	0,8750	40,30	39,65	2,92	<b>2252,04</b>	<b>47,08</b>

**Tabela F 13** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Janeiro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0,0000	0,0000	314,95	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0,0000	0,0000	313,96	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0,0000	0,0000	312,97	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0,0000	0,0000	311,99	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0,0000	0,0000	311,02	4,89	28,96	-65,08	-329,92	-4,89
6	105	35,7588	30,04	310,50	4,25	33,21	-34,40	-364,33	25,79
7	280	95,3568	95,20	310,97	3,76	36,97	31,25	-333,07	91,44
8	421	143,3758	142,51	312,15	3,58	40,55	78,73	-254,34	138,93
9	554	188,6702	186,98	313,99	3,64	44,19	123,15	-131,19	183,34
10	669	227,8346	225,24	316,40	3,91	48,11	161,13	29,94	221,33
11	805	274,1508	270,67	319,48	4,37	52,48	206,11	236,05	266,30
12	768	261,5501	257,05	322,35	5,05	57,53	191,81	427,85	252,00
13	712	242,4787	237,71	324,92	5,66	63,19	171,86	599,72	232,05
14	574	195,4814	190,55	326,76	6,82	70,01	123,54	723,26	183,73
15	417	142,0135	137,62	327,81	7,74	77,75	69,68	792,94	129,88
16	268	91,2701	87,76	328,09	8,41	86,16	19,16	812,10	79,35
17	107	36,4399	33,90	327,57	8,83	94,98	-35,12	776,98	25,07
18	0	0,0000	0,0000	326,53	8,98	103,96	-69,17	707,81	-8,98
19	0	0,0000	0,0000	325,50	8,97	112,93	-69,16	638,65	-8,97
20	0	0,0000	0,0000	324,47	8,96	121,89	-69,15	569,50	-8,96
21	0	0,0000	0,0000	323,43	8,95	130,84	-69,14	500,36	-8,95
22	0	0,0000	0,0000	322,40	8,94	139,77	-69,13	431,23	-8,94
23	0	0,0000	0,0000	321,37	8,60	148,37	-68,79	362,44	-8,60
24	0	0,0000	0,0000	320,35	8,27	<b>156,64</b>	-68,46	<b>293,98</b>	-8,27

**Tabela F 14 - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Fevereiro.**

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	314,75	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	313,76	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	312,77	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	311,79	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	310,81	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	86	29,2882	24,74	310,21	4,61	33,89	-40,06	-370,31	20,13
7	243	82,7561	82,64	310,49	4,09	37,98	18,36	-351,94	78,55
8	398	135,5429	134,84	309,53	3,85	41,83	-64,04	-415,99	-3,85
9	604	205,6982	204,17	311,63	3,21	45,04	140,77	-275,22	200,96
10	749	255,0794	252,36	314,45	3,57	48,61	188,60	-86,62	248,79
11	832	283,3459	279,48	317,67	4,16	52,78	215,12	128,50	275,32
12	802	273,1291	268,37	320,71	4,88	57,66	203,29	331,79	263,49
13	731	248,9494	243,92	323,38	5,55	63,21	178,18	509,97	238,37
14	581	197,8654	192,76	325,26	6,74	69,95	125,83	635,80	186,02
15	430	146,4408	141,96	326,36	7,68	77,63	74,09	709,89	134,28
16	264	89,9078	86,31	326,63	8,36	85,99	17,76	727,65	77,95
17	94	32,0126	29,46	326,04	8,77	94,76	-39,51	688,15	20,69
18	0	0	0	325,01	8,91	103,67	-69,10	619,05	-8,91
19	0	0	0	323,97	8,90	112,56	-69,09	549,96	-8,90
20	0	0	0	322,94	8,88	121,45	-69,08	480,88	-8,88
21	0	0	0	321,91	8,84	130,29	-69,03	411,85	-8,84
22	0	0	0	320,88	8,51	138,79	-68,70	343,15	-8,51
23	0	0	0	319,86	8,17	146,96	-68,36	274,79	-8,17
24	0	0	0	318,84	7,84	<b>154,80</b>	-68,03	<b>206,76</b>	-7,84

**Tabela F 15** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Março.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	313,35	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	312,36	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	311,37	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	310,39	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	309,42	4,96	29,03	-65,15	-329,99	-4,96
6	64	21,7958	18,54	308,73	4,31	33,34	-45,97	-375,96	14,23
7	221	75,2638	75,20	308,90	3,77	37,11	11,24	-364,71	71,43
8	413	140,6513	140,05	310,04	3,49	40,60	76,36	-288,35	136,56
9	522	177,7723	176,24	311,72	3,54	44,14	112,51	-175,84	172,70
10	676	230,2186	227,85	314,17	3,76	47,91	163,90	-11,95	224,09
11	753	256,4417	253,04	316,99	4,23	52,14	188,61	176,67	248,81
12	783	266,6585	262,46	319,94	4,83	56,97	197,44	374,11	257,63
13	658	224,0885	219,38	322,24	5,46	62,43	153,73	527,84	213,92
14	545	185,6052	180,99	323,95	6,53	68,96	114,26	642,10	174,46
15	382	130,0939	125,97	324,82	7,41	76,37	58,36	700,47	118,56
16	238	81,0533	77,82	324,97	8,02	84,40	9,60	710,07	69,80
17	68	23,1581	20,85	324,25	8,39	92,79	-47,74	662,33	12,46
18	0	0	0	323,23	8,49	101,28	-68,68	593,65	-8,49
19	0	0	0	322,20	8,48	109,76	-68,67	524,98	-8,48
20	0	0	0	321,17	8,47	118,23	-68,66	456,32	-8,47
21	0	0	0	320,15	8,46	126,69	-68,65	387,67	-8,46
22	0	0	0	319,12	8,39	135,08	-68,58	319,09	-8,39
23	0	0	0	318,10	8,05	143,14	-68,25	250,84	-8,05
24	0	0	0	317,09	7,72	<b>150,86</b>	-67,91	<b>182,92</b>	-7,72

**Tabela F 16** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Abril.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	315,05	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	314,06	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	313,07	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	312,09	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	311,11	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	43	14,6441	12,58	310,33	4,90	34,19	-52,51	-382,76	7,68
7	176	59,9386	59,92	310,26	4,35	38,54	-4,62	-387,38	55,57
8	348	118,5149	118,08	311,06	4,00	42,54	53,89	-333,50	114,08
9	474	161,4254	160,21	312,50	3,94	46,48	96,08	-237,42	156,27
10	602	205,0171	202,97	314,57	4,08	50,56	138,70	-98,72	198,89
11	624	212,5094	209,57	316,74	4,43	54,99	144,95	46,23	205,14
12	664	226,1318	222,70	319,10	4,81	59,80	157,70	203,93	217,89
13	567	193,0975	189,25	320,95	5,25	65,05	123,81	327,73	184,00
14	476	162,1066	158,25	322,32	6,18	71,23	91,88	419,61	152,07
15	339	115,4498	111,94	322,99	6,95	78,18	44,80	464,41	104,99
16	182	61,9819	59,18	322,87	7,49	85,67	-8,51	455,91	51,69
17	46	15,6658	13,76	322,06	7,78	93,45	-54,21	401,70	5,98
18	0	0	0	321,04	7,84	101,29	-68,03	333,67	-7,84
19	0	0	0	320,02	7,83	109,12	-68,03	265,64	-7,83
20	0	0	0	319,01	7,79	116,92	-67,99	197,65	-7,79
21	0	0	0	317,99	7,46	124,38	-67,66	130,00	-7,46
22	0	0	0	316,99	7,14	131,52	-67,33	62,67	-7,14
23	0	0	0	315,99	6,81	138,32	-67,00	-4,33	-6,81
24	0	0	0	314,99	6,48	<b>144,81</b>	-66,67	<b>-71,00</b>	-6,48

**Tabela F 17** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Maio.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	314,35	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	313,36	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	312,37	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	311,39	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	310,41	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	30	10,2168	8,86	309,57	4,77	34,06	-56,10	-386,35	4,09
7	162	55,1707	55,18	309,44	4,17	38,23	-9,18	-395,53	51,01
8	325	110,6820	110,31	310,13	3,80	42,03	46,32	-349,21	106,51
9	463	157,6793	156,57	311,51	3,70	45,73	92,68	-256,54	152,87
10	560	190,7136	188,76	313,38	3,83	49,55	124,74	-131,79	184,93
11	635	216,2556	213,53	315,61	4,11	53,66	149,23	17,44	209,42
12	618	210,4661	207,08	317,74	4,51	58,17	142,38	159,82	202,57
13	578	196,8437	193,23	319,66	4,87	63,04	128,16	287,98	188,36
14	437	148,8247	145,01	320,84	5,82	68,86	79,00	366,98	139,19
15	305	103,8708	100,56	321,34	6,53	75,39	33,84	400,82	94,03
16	155	52,7868	50,20	321,09	7,02	82,42	-17,01	383,80	43,18
17	30	10,2168	8,50	320,21	7,26	89,68	-58,96	324,85	1,24
18	0	0	0	319,20	7,30	96,98	-67,49	257,35	-7,30
19	0	0	0	318,19	7,30	104,28	-67,49	189,86	-7,30
20	0	0	0	317,18	7,30	111,58	-67,49	122,37	-7,30
21	0	0	0	316,17	7,10	118,68	-67,29	55,08	-7,10
22	0	0	0	315,17	6,77	125,45	-66,96	-11,88	-6,77
23	0	0	0	314,18	6,45	131,89	-66,64	-78,52	-6,45
24	0	0	0	313,18	6,12	<b>138,01</b>	-66,31	<b>-144,83</b>	-6,12

**Tabela F 18** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Junho.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	313,95	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	312,96	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	311,97	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	310,99	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	310,01	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	23	7,8329	6,85	309,14	4,90	34,19	-58,24	-388,49	1,95
7	127	43,2511	43,24	308,82	4,45	38,64	-21,40	-409,89	38,79
8	249	84,7994	84,52	309,12	4,02	42,66	20,31	-389,59	80,50
9	373	127,0289	126,24	310,06	3,80	46,46	62,25	-327,34	122,44
10	462	157,3387	155,87	311,43	3,77	50,23	91,90	-235,43	152,10
11	546	185,9458	183,84	313,22	3,90	54,13	119,75	-115,68	179,94
12	515	175,3884	172,65	314,84	4,15	58,28	108,31	-7,37	168,50
13	458	155,9765	153,08	316,16	4,35	62,63	88,53	81,16	148,73
14	382	130,0939	127,11	317,09	5,11	67,74	61,81	142,97	122,00
15	252	85,8211	83,08	317,34	5,74	73,48	17,15	160,12	77,34
16	129	43,9322	41,80	316,98	6,14	79,62	-24,54	135,59	35,66
17	22	7,4923	6,06	316,07	6,35	85,97	-60,48	75,10	-0,29
18	0	0	0	315,08	6,38	92,35	-66,57	8,53	-6,38
19	0	0	0	314,08	6,38	98,74	-66,57	-58,04	-6,38
20	0	0	0	313,09	6,22	104,96	-66,41	-124,46	-6,22
21	0	0	0	312,10	5,90	110,85	-66,09	-190,55	-5,90
22	0	0	0	311,12	5,58	116,43	-65,77	-256,32	-5,58
23	0	0	0	310,14	5,26	121,69	-65,45	-321,77	-5,26
24	0	0	0	309,17	4,94	<b>126,63</b>	-65,13	<b>-386,90</b>	-4,94

**Tabela F 19** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Julho.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	312,45	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	311,46	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	310,47	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	309,49	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	308,51	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	24	8,1734	7,15	307,65	4,90	34,19	-57,94	-388,19	2,25
7	136	46,3162	46,26	307,37	4,70	38,88	-18,55	-406,74	41,64
8	269	91,6106	91,28	307,77	4,52	43,41	26,89	-379,85	87,08
9	403	137,2457	136,37	308,85	4,68	48,08	72,17	-307,68	132,36
10	530	180,4968	178,89	310,56	5,12	53,20	114,67	-193,01	174,86
11	576	196,1626	193,73	312,50	5,75	58,95	129,27	-63,74	189,47
12	549	186,9674	183,99	314,28	6,53	65,48	119,23	55,49	179,42
13	478	162,7877	159,66	315,69	7,36	72,84	94,65	150,14	154,84
14	392	133,4995	130,35	316,66	8,70	81,53	64,55	214,69	124,74
15	268	91,2701	88,43	316,99	9,71	91,24	21,99	236,68	82,18
16	132	44,9539	42,73	316,63	10,49	101,74	-24,14	212,54	36,05
17	22	7,4923	6,02	315,71	10,89	112,63	-61,06	151,48	-0,87
18	0	0	0	314,71	11,03	123,66	-67,11	84,37	-6,91
19	0	0	0	313,71	11,01	134,68	-67,11	17,27	-6,91
20	0	0	0	312,71	10,67	145,34	-66,78	-49,51	-6,59
21	0	0	0	311,72	10,32	155,67	-66,45	-115,97	-6,26
22	0	0	0	310,73	9,98	165,64	-66,13	-182,10	-5,94
23	0	0	0	309,74	9,64	175,28	-65,81	-247,91	-5,62
24	0	0	0	308,76	9,30	<b>184,58</b>	-65,49	<b>-313,40</b>	-5,30

**Tabela F 20** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Agosto.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	313,85	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	312,86	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	311,87	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	310,89	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	309,91	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	39	13,2818	11,45	309,11	4,90	34,19	-53,64	-383,89	6,55
7	180	61,3008	61,22	309,06	4,60	38,79	-3,58	-387,47	56,62
8	338	115,1093	114,62	309,81	4,26	43,05	50,17	-337,30	110,36
9	491	167,2150	166,02	311,33	4,18	47,23	101,65	-235,65	161,84
10	633	215,5745	213,48	313,55	4,35	51,58	148,94	-86,71	209,13
11	672	228,8563	225,78	315,96	4,75	56,33	160,84	74,13	221,03
12	675	229,8780	226,20	318,36	5,21	61,54	160,80	234,93	220,99
13	633	215,5745	211,60	320,54	5,66	67,20	145,75	380,67	205,94
14	498	169,5989	165,41	322,02	6,70	73,90	98,52	479,20	158,71
15	341	116,1310	112,42	322,68	7,50	81,40	44,73	523,92	104,92
16	186	63,3442	60,46	322,57	8,04	89,44	-7,77	516,15	52,42
17	40	13,6224	11,67	321,72	8,33	97,77	-56,85	459,30	3,34
18	0	0	0	320,69	8,38	106,15	-68,57	390,73	-8,38
19	0	0	0	319,67	8,37	114,52	-68,56	322,16	-8,37
20	0	0	0	318,65	8,07	122,59	-68,26	253,90	-8,07
21	0	0	0	317,63	7,74	130,33	-67,93	185,97	-7,74
22	0	0	0	316,62	7,41	137,73	-67,60	118,37	-7,41
23	0	0	0	315,61	7,08	144,81	-67,27	51,10	-7,08
24	0	0	0	314,61	6,75	<b>151,56</b>	-66,94	<b>-15,84</b>	-6,75

Tabela F 21 - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Setembro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	311,05	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	310,06	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	309,07	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	308,09	5,41	23,94	-65,60	-264,71	-5,41
5	0	0	0	307,12	4,76	28,71	-64,95	-329,67	-4,76
6	60	20,4336	17,43	306,42	4,12	32,83	-46,88	-376,55	13,31
7	207	70,4959	70,44	306,52	3,57	36,39	6,68	-369,87	66,87
8	403	137,2457	136,70	307,61	3,27	39,67	73,23	-296,63	133,43
9	540	183,9024	182,44	309,39	3,31	42,97	118,94	-177,69	179,13
10	737	250,9927	248,59	312,16	3,56	46,53	184,84	7,15	245,03
11	744	253,3766	249,72	314,93	4,13	50,66	185,40	192,55	245,59
12	720	245,2032	240,97	317,56	4,71	55,37	176,07	368,62	236,26
13	666	226,8130	222,39	319,91	5,24	60,61	156,96	525,57	217,15
14	575	195,8220	191,29	321,77	6,33	66,94	124,77	650,35	184,96
15	390	132,8184	128,61	322,69	7,26	74,20	61,16	711,50	121,35
16	224	76,2854	73,00	322,76	7,88	82,08	4,93	716,43	65,12
17	61	20,7742	18,51	322,02	8,23	90,31	-49,91	666,52	10,28
18	0	0	0	320,99	8,31	98,62	-68,51	598,01	-8,31
19	0	0	0	319,97	8,31	106,93	-68,50	529,52	-8,31
20	0	0	0	318,94	8,30	115,22	-68,49	461,03	-8,30
21	0	0	0	317,92	8,29	123,51	-68,48	392,54	-8,29
22	0	0	0	316,90	8,15	131,67	-68,34	324,20	-8,15
23	0	0	0	315,88	8,08	139,75	-68,27	255,93	-8,08
24	0	0	0	314,86	7,75	<b>147,49</b>	-67,94	<b>187,99</b>	-7,75

**Tabela F 22** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Outubro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	315,45	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	314,46	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	313,47	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	312,49	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	311,51	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	82	27,9259	23,62	310,89	4,90	34,19	-41,47	-371,72	18,72
7	282	96,0379	95,84	311,35	4,70	38,88	30,95	-340,77	91,14
8	484	164,8310	163,94	312,84	4,52	43,41	99,23	-241,54	159,42
9	657	223,7479	221,81	315,19	4,68	48,08	156,94	-84,60	217,13
10	779	265,2962	262,20	318,13	5,12	53,20	196,89	112,29	257,08
11	872	296,9683	292,82	321,52	5,75	58,95	226,88	339,17	287,07
12	911	310,2502	305,19	325,09	6,53	65,48	238,47	577,64	298,66
13	826	281,3026	275,64	328,20	7,36	72,84	208,09	785,73	268,28
14	633	215,5745	209,78	330,30	8,70	81,53	140,89	926,62	201,08
15	498	169,5989	164,62	331,72	9,71	91,24	94,72	1021,34	154,91
16	265	90,2484	86,16	331,95	10,49	101,74	15,47	1036,81	75,67
17	105	35,7588	33,01	331,38	10,89	112,63	-38,08	998,74	22,12
18	0	0	0	330,32	11,03	123,66	-71,23	927,51	-11,03
19	0	0	0	329,25	11,01	134,68	-71,20	856,31	-11,01
20	0	0	0	328,19	10,67	145,34	-70,86	785,45	-10,67
21	0	0	0	327,14	10,32	155,67	-70,51	714,93	-10,32
22	0	0	0	326,09	9,98	165,64	-70,17	644,76	-9,98
23	0	0	0	325,05	9,64	175,28	-69,83	574,93	-9,64
24	0	0	0	324,01	9,30	<b>184,58</b>	-69,49	<b>505,44</b>	-9,30

**Tabela F 23** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Novembro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	315,35	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	314,36	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	313,37	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	312,39	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	311,41	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	116	39,5050	33,14	310,94	4,74	34,03	-31,79	-362,04	28,40
7	291	99,1030	98,82	311,45	4,58	38,61	34,05	-327,99	94,24
8	485	165,1716	164,21	312,94	4,42	43,03	99,60	-228,39	159,79
9	723	246,2249	244,25	315,62	4,58	47,61	179,48	-48,91	239,67
10	831	283,0054	279,60	318,82	5,13	52,73	214,28	165,37	274,47
11	956	325,5754	321,06	322,64	5,84	58,58	255,02	420,39	315,22
12	939	319,7858	314,17	326,33	6,76	65,34	247,22	667,61	307,41
13	871	296,6278	290,60	329,66	7,64	72,97	222,77	890,38	282,96
14	721	245,5438	239,37	332,21	9,04	82,02	170,13	1060,52	230,33
15	525	178,7940	173,24	333,74	10,20	92,21	102,85	1163,37	163,04
16	308	104,8925	100,46	334,18	11,02	103,23	29,25	1192,61	89,44
17	133	45,2945	42,23	333,74	11,49	114,72	-29,45	1163,16	30,74
18	0	0	0	332,67	11,67	126,39	-71,86	1091,30	-11,67
19	0	0	0	331,59	11,65	138,04	-71,84	1019,46	-11,65
20	0	0	0	330,52	11,46	149,50	-71,65	947,81	-11,46
21	0	0	0	329,46	11,11	160,61	-71,30	876,51	-11,11
22	0	0	0	328,39	10,76	171,38	-70,96	805,55	-10,76
23	0	0	0	327,34	10,42	181,80	-70,61	734,94	-10,42
24	0	0	0	326,29	10,08	<b>191,87</b>	-70,27	<b>664,67</b>	-10,08

**Tabela F 24** - Valores Médios Mensais resultantes do cálculo da energia útil coletada Qpa (MJ): Dezembro.

j	S[W/m <sup>2</sup> ]	I[MJ]	Qutil [MJ]	Tarmaz2 [K]	Qpa [MJ]	Qpatot [MJ]	Qarmaz [MJ]	Qarmaztot [MJ]	Qarmaz + Eútil
1	0	0	0	315,15	6,50	6,50	-66,70	-66,70	-6,50
2	0	0	0	314,16	6,18	12,68	-66,37	-133,07	-6,18
3	0	0	0	313,17	5,86	18,54	-66,05	-199,11	-5,86
4	0	0	0	312,19	5,54	24,07	-65,73	-264,84	-5,54
5	0	0	0	311,21	5,22	29,29	-65,41	-330,25	-5,22
6	115	39,1644	32,88	310,73	4,90	34,19	-32,21	-362,46	27,98
7	321	109,3198	109,13	311,40	4,42	38,60	44,52	-317,94	104,71
8	503	171,3017	170,29	312,98	4,31	42,91	105,79	-212,15	165,98
9	729	248,2682	246,21	315,69	4,50	47,41	181,52	-30,63	241,71
10	829	282,3242	278,85	318,89	5,05	52,46	213,60	182,98	273,80
11	896	305,1418	300,61	322,39	5,77	58,23	234,65	417,63	294,84
12	938	319,4453	314,10	326,09	6,58	64,81	247,33	664,95	307,52
13	814	277,2158	271,29	329,14	7,46	72,27	203,64	868,59	263,83
14	657	223,7479	217,89	331,36	8,78	81,05	148,92	1017,52	209,11
15	539	183,5618	178,42	332,98	9,82	90,87	108,40	1125,92	168,60
16	285	97,0596	92,72	333,31	10,68	101,55	21,85	1147,77	82,04
17	125	42,5700	39,65	332,84	11,11	112,66	-31,65	1116,12	28,54
18	0	0	0	331,77	11,28	123,94	-71,47	1044,65	-11,28
19	0	0	0	330,70	11,26	135,19	-71,45	973,20	-11,26
20	0	0	0	329,63	11,24	146,43	-71,43	901,77	-11,24
21	0	0	0	328,57	10,89	157,32	-71,08	830,69	-10,89
22	0	0	0	327,51	10,54	167,86	-70,73	759,96	-10,54
23	0	0	0	326,46	10,20	178,06	-70,39	689,57	-10,20
24	0	0	0	325,41	9,86	<b>187,91</b>	-70,05	<b>619,52</b>	-9,86

**ANEXO A – Irradiância Médias Horárias Mensais coletadas no  
Software RADIASOL2**

<b>Irradiancias Médias (W/m<sup>2</sup>) - RadiaSol 2</b>					
<b>Mês</b>	<b>Hora Legal</b>	<b>Global</b>	<b>Direta</b>	<b>Difusa</b>	<b>Inclinada (16°)</b>
1	4	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0
1	6	87	35	71	105
1	7	253	118	162	280
1	8	393	192	228	421
1	9	526	277	275	554
1	10	639	357	311	669
1	11	771	477	326	805
1	12	735	451	314	768
1	13	680	387	322	712
1	14	545	303	269	574
1	15	389	157	259	417
1	16	243	114	154	268
1	17	88	35	72	107
1	18	0	0	0	0
1	19	0	0	0	0
1	20	0	0	0	0
1	21	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0
2	6	77	26	60	86
2	7	231	85	157	243
2	8	387	178	220	398
2	9	598	361	242	604
2	10	742	467	279	749
2	11	827	535	294	832
2	12	796	491	309	802
2	13	722	419	309	731
2	14	575	337	242	581
2	15	418	206	222	430
2	16	251	111	152	264
2	17	82	35	59	94
2	18	0	0	0	0
2	19	0	0	0	0
2	20	0	0	0	0
2	21	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0
3	5	0	0	0	0
3	6	64	12	52	64

---

3	7	226	72	149	221
3	8	425	194	218	413
3	9	539	258	263	522
3	10	701	377	297	676
3	11	780	437	313	753
3	12	809	462	318	783
3	13	675	333	323	658
3	14	561	272	272	545
3	15	395	178	203	382
3	16	243	92	145	238
3	17	69	17	52	68
3	18	0	0	0	0
3	19	0	0	0	0
3	20	0	0	0	0
3	21	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0
4	6	51	5	38	43
4	7	196	55	121	176
4	8	387	160	187	348
4	9	523	247	226	474
4	10	662	353	247	602
4	11	684	367	255	624
4	12	727	395	267	664
4	13	632	355	210	567
4	14	526	260	214	476
4	15	372	146	193	339
4	16	203	58	124	182
4	17	58	9	37	46
4	18	0	0	0	0
4	19	0	0	0	0
4	20	0	0	0	0
4	21	0	0	0	0
5	4	0	0	0	0
5	5	0	0	0	0
5	6	43	0	30	30
5	7	200	52	110	162
5	8	387	154	170	325
5	9	546	266	195	463
5	10	642	302	256	560
5	11	727	372	260	635
5	12	713	369	247	618
5	13	676	360	215	578
5	14	512	233	202	437
5	15	357	125	179	305
5	16	193	49	106	155

---

---

5	17	49	0	30	30
5	18	0	0	0	0
5	19	0	0	0	0
5	20	0	0	0	0
5	21	0	0	0	0
6	4	0	0	0	0
6	5	0	0	0	0
6	6	33	0	23	23
6	7	167	37	90	127
6	8	305	101	147	249
6	9	447	180	192	373
6	10	545	238	223	462
6	11	647	319	225	546
6	12	609	292	221	515
6	13	550	270	186	458
6	14	455	180	200	382
6	15	309	102	150	252
6	16	166	34	95	129
6	17	38	0	23	22
6	18	0	0	0	0
6	19	0	0	0	0
6	20	0	0	0	0
6	21	0	0	0	0
7	4	0	0	0	0
7	5	0	0	0	0
7	6	37	0	24	24
7	7	173	42	94	136
7	8	329	125	144	269
7	9	479	216	186	403
7	10	630	331	197	530
7	11	683	372	201	576
7	12	643	322	225	549
7	13	569	290	186	478
7	14	472	224	167	392
7	15	322	113	155	268
7	16	170	42	90	132
7	17	42	0	23	22
7	18	0	0	0	0
7	19	0	0	0	0
7	20	0	0	0	0
7	21	0	0	0	0
8	4	0	0	0	0
8	5	0	0	0	0
8	6	50	2	37	39
8	7	210	58	121	180
8	8	383	148	189	338

---

---

8	9	555	260	229	491
8	10	717	395	235	633
8	11	756	407	262	672
8	12	762	418	255	675
8	13	723	413	217	633
8	14	560	258	238	498
8	15	389	155	185	341
8	16	214	59	127	186
8	17	57	3	37	40
8	18	0	0	0	0
8	19	0	0	0	0
8	20	0	0	0	0
8	21	0	0	0	0
9	4	0	0	0	0
9	5	0	0	0	0
9	6	64	11	49	60
9	7	219	75	131	207
9	8	425	186	216	403
9	9	573	280	258	540
9	10	792	490	244	737
9	11	795	475	266	744
9	12	763	424	293	720
9	13	711	399	265	666
9	14	618	350	224	575
9	15	412	175	214	390
9	16	238	91	133	224
9	17	66	14	47	61
9	18	0	0	0	0
9	19	0	0	0	0
9	20	0	0	0	0
9	21	0	0	0	0
10	4	0	0	0	0
10	5	0	0	0	0
10	6	76	21	61	82
10	7	274	125	156	282
10	8	484	280	202	484
10	9	660	395	260	657
10	10	785	482	295	779
10	11	884	590	280	872
10	12	925	638	269	911
10	13	837	554	269	826
10	14	633	367	264	633
10	15	498	295	202	498
10	16	258	108	157	265
10	17	95	41	64	105
10	18	0	0	0	0

---

---

<b>10</b>	19	0	0	0	0
<b>10</b>	20	0	0	0	0
<b>10</b>	21	0	0	0	0
<b>11</b>	4	0	0	0	0
<b>11</b>	5	0	0	0	0
<b>11</b>	6	96	42	74	116
<b>11</b>	7	266	128	162	291
<b>11</b>	8	459	270	214	485
<b>11</b>	9	696	471	250	723
<b>11</b>	10	805	538	290	831
<b>11</b>	11	935	690	263	956
<b>11</b>	12	915	650	285	939
<b>11</b>	13	848	610	258	871
<b>11</b>	14	695	475	244	721
<b>11</b>	15	496	306	218	525
<b>11</b>	16	281	141	167	308
<b>11</b>	17	108	62	71	133
<b>11</b>	18	0	0	0	0
<b>11</b>	19	0	0	0	0
<b>11</b>	20	0	0	0	0
<b>11</b>	21	0	0	0	0
<b>12</b>	4	0	0	0	0
<b>12</b>	5	0	0	0	0
<b>12</b>	6	93	42	73	115
<b>12</b>	7	284	158	163	321
<b>12</b>	8	464	281	220	503
<b>12</b>	9	687	479	248	729
<b>12</b>	10	789	549	278	829
<b>12</b>	11	856	609	284	896
<b>12</b>	12	899	681	255	938
<b>12</b>	13	773	514	298	814
<b>12</b>	14	619	407	248	657
<b>12</b>	15	497	327	211	539
<b>12</b>	16	254	113	172	285
<b>12</b>	17	100	47	78	125
<b>12</b>	18	0	0	0	0
<b>12</b>	19	0	0	0	0
<b>12</b>	20	0	0	0	0
<b>12</b>	21	0	0	0	0

---