

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELO JOSÉ CIVIDINI**

**ESTUDO DE UM SISTEMA MISTO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA  
PROVENIENTE DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA LENHOSA E ENERGIA SOLAR  
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2017**

**MARCELO JOSÉ CIVIDINI**

**ESTUDO DE UM SISTEMA MISTO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA  
TÉRMICA PROVENIENTE DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA LENHOSA E  
ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso,  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica do Departamento  
Acadêmico de Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná, Campus  
Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli  
Júnior

**PATO BRANCO**

**2017**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DE UM SISTEMA MISTO DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA PROVENIENTE DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA LENHOSA E ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

MARCELO JOSÉ CIVIDINI

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 09/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

**Prof. Me. Paulo Cezar Adamczuck.**  
(UTFPR – Depto. de Engenharia Mecânica)

---

**Prof. Me. Neri Santos de Vargas**  
(UTFPR – Depto. de Física)

---

**Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Jr.**  
(UTFPR – Depto. de Engenharia Mecânica)  
Orientador

---

**Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros**  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

A meus pais Almeri De Fátima Spricigo Cividini e Vilmar José Cividini (in memoriam) a qual me conceberam a vida, educação, os bons valores e princípios. A meu irmão Marcos José Cividini pelo companheirismo e amizade.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, especialmente, Matheus, Salatiel, Mauricio, Coelho, Luiz e João pelos vários momentos de alegria, dificuldades, churrascos, risadas e claro pelas muitas horas e noites de estudos durante o curso.

A empresa Fogões Petrycoski por disponibilizar um fogão a lenha para realizar as coletas de dados técnicos.

A meu orientador Dr. Luiz Carlos Martinelli Jr. pelo conhecimento, auxílio, dedicação, atenção e paciência em orientar esse trabalho.

Ao professor Me. Neri Santos de Vargas pela amizade e coleguismo de trabalho no laboratório de energias renováveis da universidade.

A todos que indireta ou diretamente colaboraram para a realização desse trabalho.

A todos meus sinceros agradecimento.

Os pequenos atos que se executam são  
melhores que todos aqueles grandes que  
apenas se planejam.

(GEORGE C.MARSHALL)

## RESUMO

CIVIDINI, Marcelo José. Estudo de um sistema misto de aproveitamento de energia térmica proveniente da combustão de biomassa lenhosa e energia solar para aquecimento de água. 2017. 76 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho consiste no estudo de um sistema misto de aproveitamento de energia térmica proveniente da combustão de biomassa lenhosa e energia solar para aquecimento de água. O estudo permeia-se em avaliar a necessidade de melhorar o aproveitamento da energia térmica de um fogão a lenha por meio da recuperação da energia presente nos gases de exaustão e aquecer água para uso residencial. Para isso, desenvolveu-se um dimensionamento e modelo de trocador de calor para realizar este aquecimento e proporcionar a redução do consumo de energia elétrica destinado a aquecimento de água no uso residencial. Juntamente a isso, avaliou-se a utilização da energia solar térmica para promover o aquecimento da água e auxiliar o trocador de calor no fogão a lenha e conseqüentemente comparar e avaliar a economia ocasionada pelo sistema misto de aquecimento de água.

**Palavras-chave:** Energia térmica. Aquecimento de água. Sistema misto. Trocador de calor.

## ABSTRACT

CIVIDINI, Marcelo José. Study of a mixed system of thermal energy reuse provided by woody biomass combustion and solar energy in order to heat up water. 2017. 76 pages. Mechanical Engineering Undergraduate Thesis. Federal Technological University of Parana. Pato Branco. 2017.

This project consists of the study of a mixed system of thermal energy reuse provided by woody biomass combustion and solar energy in order to heat up water. The study is based on evaluating the necessity of thermal energy reuse improvement of a wood burning stove through the recovery of energy present in the exhaust gases and also heat up water for residential use. In order to this, a model of a heat exchanger with its dimensions was developed, to conduct this heating and provide the reduction of electric energy used to heat up water in the residential environment. Along with that, the solar thermal energy utilization to promote water heating and assist the heat exchanger in the woody stove was also evaluated and consequently making it possible to compare and evaluate the savings caused by the water heating mixed system.

**Key – Words:** Thermal Energy, Water heating, Mixed System, Heat Exchanger.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Histórico e perspectivas percentual da matriz energética mundial..</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2 – Diagrama esquemático de conversão da biomassa.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3 – Oferta interna de energia elétrica distribuída por fonte.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 4 – Oferta interna de energia.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5 – Consumo energético final residencial por fonte.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 6 – Volume de madeira em tora das florestas naturais.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7 – Volume de madeira em tora das florestas plantadas.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 8 – Percentual do extrativismo florestal na produção de madeira para combustível (lenha e carvão) e para indústria (tora) em 2014.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 9 – Distribuição percentual da radiação solar incidente.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 10 – Fluxograma dos métodos e aplicações da energia solar.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11 – Coletor solar de placa plana vitrificado (fechado).....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 12 – Coletor solar sem cobertura (aberto).....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 13 – Reservatório térmico.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 14 – Estratificação térmica da água em reservatório vertical e horizontal. ....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 15 – Sistema de aquecimento solar passivo direto com auxílio de energia internamente ao reservatório.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 16 – Esquema de um sistema de aquecimento solar passivo indireto...38</b>	<b>38</b>
<b>Figura 17 – Esquema de um sistema de aquecimento solar ativo direto.....39</b>	<b>39</b>
<b>Figura 18 – Desenho esquemático do trocador de calor.....43</b>	<b>43</b>
<b>Figura 19 – Propriedades químicas, físicas e mecânicas do trocador de calor para o projeto.....44</b>	<b>44</b>
<b>Figura 20 – Desenho esquemático do trocador de calor em projeto.....51</b>	<b>51</b>
<b>Figura 21 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 01.....56</b>	<b>56</b>
<b>Figura 22 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 02.....59</b>	<b>59</b>
<b>Figura 23 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 03.....61</b>	<b>61</b>
<b>Figura 24 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 04.....63</b>	<b>63</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência para cozimento em vários modelos de fogão a lenha .....	29
Tabela 2 – Temperatura dos gases de exaustão na chaminé do fogão a lenha .....	46
Tabela 3 – Propriedades da água saturada a 47, 5°C .....	50
Tabela 4 – Propriedades dos gases de exaustão CO <sub>2</sub> a 1 atm de pressão .....	50
Tabela 5 – Número de Nusselt para escoamento laminar plenamente desenvolvido em regiões anulares circulares com uma superfície isolada e a outra a temperatura constante.....	55

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	15
1.2 OBJETIVOS. ....	16
1.2.1 Objetivos Específicos .....	16
2 Revisão bibliográfica .....	17
2.1 BIOMASSA.....	17
2.1.1 Biomassa Lenhosa .....	19
2.1.2 Tipos de Biomassa Lenhosa .....	22
2.1.3 Características Físico-Químicas da Biomassa lenhosa.....	25
2.1.3.1 Teor de umidade.....	25
2.1.3.2 Poder calorífico.....	25
2.1.3.3 Densidade .....	26
2.1.3.4 Teor de cinzas .....	26
2.1.3.5 Conteúdo de carbono .....	26
2.1.3.6 Teor de voláteis .....	27
2.1.4 Processo de Combustão Direta .....	27
2.2 FOGÃO A LENHA .....	27
2.2.1 Principais Componentes do Fogão a Lenha.....	28
2.2.2 Eficiência nos Fogões a Lenha.....	29
2.2.3 Vantagens e Limitações .....	30
2.3 ENERGIA SOLAR .....	30
2.3.1 Energia Solar Térmica .....	32
2.3.2 Componentes de Sistemas de Aquecimento Solar .....	33
2.3.2.1 Coletor de radiação solar.....	33
2.3.2.2 Reservatório térmico.....	35

2.3.2.3 Dutos de distribuição de água quente .....	37
2.3.2.4 Métodos existentes para aquecimento de água com energia solar .....	37
2.3.2.5 Sistema passivo direto.....	37
2.3.2.6 Sistema passivo indireto.....	38
2.3.2.7 Sistema ativo direto .....	39
2.3.2.8 Sistema ativo indireto .....	40
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA INTERLIGADA COM A ENERGIA DA COMBUSTÃO EM FOGÃO A LENHA.....	41
3.2 Metodologia de desenvolvimento de cálculos e projeto do sistema misto de aproveitamento de energia térmica .....	42
3.3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TROCADOR DE CALOR .....	42
3.3.1 Dados de processo.....	43
3.3.2 Consideração sobre o projeto mecânico .....	43
3.3.3 Material para construção do trocador de calor interno.....	44
3.3.4 Pré-dimensionamento da área do trocador de calor no fogão a lenha .....	45
3.3.5 Cálculo do coeficiente global de transferência de calor no trocador de calor ...	49
3.3.6 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 01 .....	56
3.3.7 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 02 .....	58
3.3.8 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 03 .....	60
3.3.9 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 04 .....	62
3.3.10 Avaliação do sistema.....	64
3.4 RESULTADOS .....	68
4 CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS.....	71

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de energias é fundamental e indispensável para a sobrevivência dos seres vivos. Além disso, o homem busca através de diversas fontes e recursos alternativos à adaptação ao meio em que vive. Diante deste ponto de vista, um dos grandes problemas que a sociedade moderna vem enfrentando é o desenvolvimento sustentável, interligando produção e o uso de energias. Pois, sabe-se que as fontes energéticas triviais, ou seja, combustíveis fósseis e hidráulicas estão cada vez mais escassas e limitadas, respectivamente e por consequência, seus custos estão aumentando (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002).

Observa-se ainda, que existe uma necessidade na busca de incentivos para o desenvolvimento e pesquisas de novas alternativas de energias, que vinculam o crescimento técnico-econômico com o intuito de minimizar problemas ambientais e aperfeiçoar soluções energéticas. Assim sendo, uma maneira adequada de interligar o desenvolvimento sustentável é a utilização de energias renováveis, já que essas são mais abundantes e possuem impactos ambientais relativamente menores (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Nota-se então, que um bom aproveitamento de energia é fundamental para o desenvolvimento de uma nação, pois impacta diretamente na matriz energética da mesma. Segundo estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o aquecimento de água para banho no setor residencial é responsável por 24,9% do consumo de eletricidade no Brasil (EPE, 2015, p. 34). E boa parte dessa energia elétrica é consumida em horas específicas do dia, o que provoca uma intensa sobrecarga no sistema elétrico nacional (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002, p. 12).

Perante esse cenário, observa-se que diversas alternativas energéticas podem suprir ou reverter essa situação, das quais, duas fontes de energias podem ser amplamente aproveitadas para a finalidade de aquecimento de água, são elas a biomassa lenhosa e energia solar térmica.

A biomassa apresenta uma enorme importância no setor energético do Brasil. No ano de 2014 o consumo final de biomassa foi de 68,82 milhões tep (tonelada equivalente de petróleo) dos quais 9,6% do total foram consumidos no setor residencial (EPE, 2015, p. 36).

De todas as biomassas disponíveis, destaca-se a biomassa lenhosa. A qual é usada para várias finalidades, no setor industrial, residencial e de transformação (geração elétrica e produção de carvão).

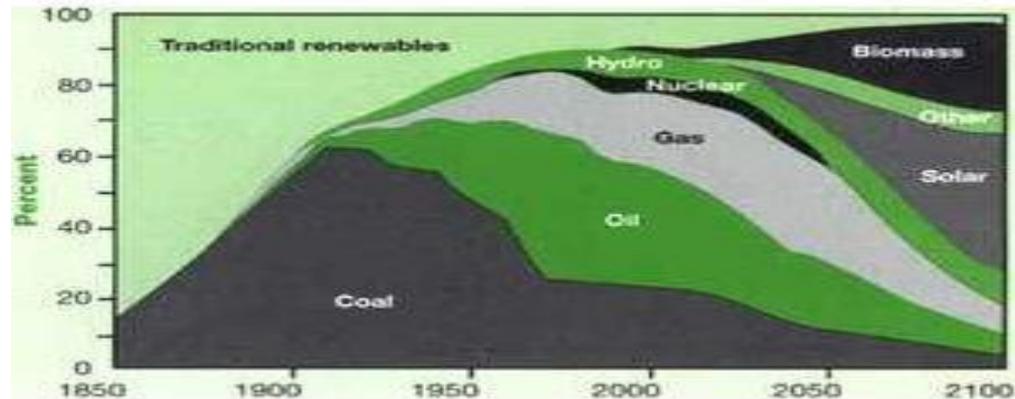
No mesmo ano 2014, de um total de 79,768 milhões de toneladas de lenha produzida, o setor de transformação foi responsável por consumir 25,988 milhões de toneladas, o setor industrial consumiu 25,112 milhões de toneladas contra 19,705 milhões de toneladas no setor residencial e outros setores consumiram 2,896 milhões de toneladas (EPE, 2015, p. 50).

Desta forma, é notável que o setor residencial ainda represente expressivamente o consumo de lenha no país e quase todo esse consumo é utilizável em cocção de alimento, aquecimento de ambiente.

Assim sendo, uma alternativa para auxiliar a redução da matriz energética brasileira, seria o mais recomendável com o uso da energia solar. Pois, os estudos da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) avaliam que a menor irradiação nacional está no estado de Santa Catarina e mesmo assim essa irradiação é 30% maior que a média na Alemanha, diante disso é evidente que existe um elevado desperdício do aproveitamento dessa energia solar no país, a qual pode ser consideravelmente utilizada para fins de aquecimento de água para o uso doméstico (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA, 2016).

CRESTANA (2005 apud Nakicenovic et al., 1998) relatam que a matriz energética mundial vem enfrentando diversas mudanças em relação às fontes de energias, pois entre aos anos de 1850 e 1910 as principais fontes energéticas consistiam em lenha e carvão. Assim, existem expectativas que no ano de 2100 ocorram à diminuição do consumo de petróleo, gás natural e carvão e que ocorra um considerável aumento do aproveitamento energético de fontes solares e biomassas modernas. A figura 1 revela esse cenário mencionado.

**Figura 1 – Histórico e perspectivas percentual da matriz energética mundial**



Fonte - Nakicenovic et al 1998 (apud CRESTANA, 2005).

Diante do exposto, é conveniente que essas fontes de energias sejam interligadas e usufruídas para o aquecimento de água. Pois, como Brasil é um país tropical e com uma área territorial considerável, torna-se evidente o enorme potencial para o aproveitamento da energia solar térmica e biomassa lenhosa para minimizar o consumo de eletricidade destinado a aquecer água.

### 1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Sabe-se que o aquecimento de água nas residências brasileiras é realizado principalmente por chuveiros elétricos, equipamento este que possui um baixo valor de aquisição inicial, porém ao longo de sua vida útil representa custos relativamente altos, pois apresenta uma grande potência elétrica, o que geram consideráveis gastos com energia elétrica.

Ao analisar essas duas fontes energéticas, biomassa lenhosa e energia solar térmica, percebe-se a inexistência de um produto/sistema que associe o aproveitamento térmico para o mesmo fim, ou seja, um sistema de aquecimento de água provido da combustão da biomassa lenhosa e energia solar.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar um sistema misto de aproveitamento da energia térmica proveniente da combustão da biomassa lenhosa e energia solar para aquecimento de água em residências.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Esse trabalho possui como objetivo específico o estudo da importância do aproveitamento energético da biomassa lenhosa no setor residencial, mais especificamente na região sul do Brasil, pois nessa região existe a tradição do uso de fogões a lenha nas residências e como a principal utilização é a cocção de alimento e aquecimento interno do ambiente, é notável que exista elevado desperdício de energia térmica. Também o trabalho tem como objetivos estudar a energia solar térmica para aquecimento de água em residências, avaliando os diversos sistemas existentes e suas vantagens e limitações.

Por fim, esse trabalho irá propor como aproveitar essa energia perdida para promover o aquecimento de água em residências em conjunto com a energia solar térmica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BIOMASSA

Em termos energéticos, entende-se como biomassa todo recurso de matéria orgânica que seja renovável e que possa ser aproveitada para transformação de energia. De maneira indireta a biomassa é a conversão da energia solar pelos processos biológicos da matéria orgânica por meio da fotossíntese (ANEEL, 2002, p. 51).

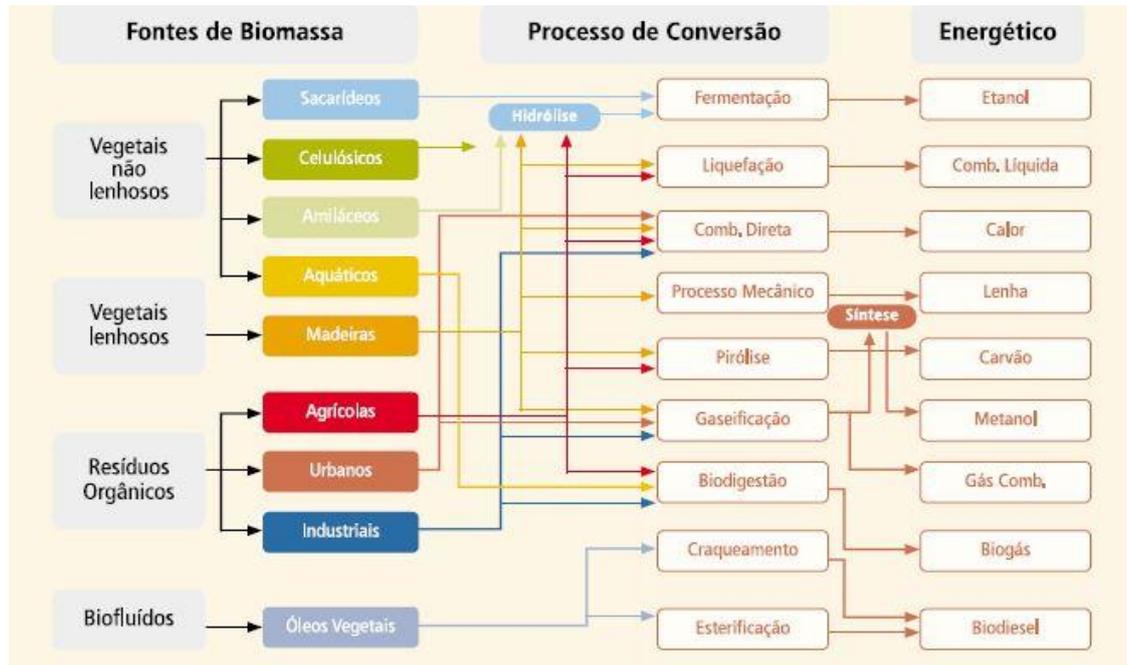
De modo geral a biomassa é considerada uma fonte de energia renovável a qual envolvem várias subcategorias e que nem sempre se enquadram aos meios sustentáveis (GUARDABASSI, 2006).

Segundo Goldemberg; Lucon (2007, p. 9) e Karekesi, Coelho e Lata (2004) são consideradas como “biomassas tradicionais” aquelas de uso não sustentáveis e normalmente usadas no meio residencial, as quais são entendidas como resíduos florestais, dejetos de animais e madeira de desflorestamento. Conforme os mesmos autores entendem-se como “biomassas modernas” os biocombustíveis, madeira de reflorestamento, biomassas agrícolas (casca de arroz, bagaço-de-cana) e entre outras, desde que sejam usufruídas de modo sustentável.

A biomassa continua sendo um recurso energético utilizado mundialmente. Porém, é nos países em desenvolvimento que a utilização desse recurso torna-se mais evidente (FERREIRA 2012, p.5). Em algumas regiões da Ásia, África Subsaariana e América latina a biomassa nas zonas rurais é utilizada por aproximadamente 83% da população e nos meios urbanos fica em torno de 23% (AIE, 2006).

Pois, de acordo com ANEEL (2002, p. 87) apesar de a biomassa apresentar uma eficiência relativamente baixa, o aproveitamento energético é realizado de modo direto, ou seja, pelo processo de combustão em fogões a lenha, fornos, caldeiras e etc. Deste modo, pesquisas e tecnologias estão sendo desenvolvidas para aperfeiçoar a eficiência e diminuir impactos socioambientais. Assim, a biomassa pode ser aproveitada por diferentes procedimentos, como a combustão direta, processos biológicos e processos termoquímicos. Os principais métodos de conversão da biomassa estão representados na figura a seguir.

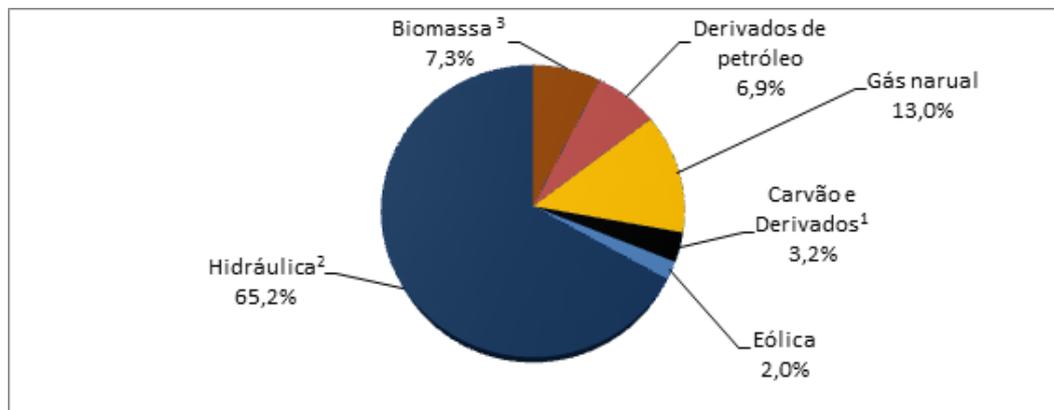
**Figura 2 – Diagrama esquemático de conversão da biomassa**



Fonte - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002 (apud EPE, 1982).

Segundo o relatório da EPE (2015, p. 16) o Brasil concentra-se sua produção interna de energia elétrica por meio das fontes de energia hidráulica, derivados de cana-de-açúcar, energia eólica e biomassa aos quais são recursos renováveis e estes representam 74,5% de todo o montante produzido. Os outros 25,5% são correspondente às fontes não renováveis, tais como, derivados de petróleo, carvão mineral, gás natural e urânio. A figura 3 representa o que foi mencionado anteriormente.

**Figura 3 – Oferta interna de energia elétrica distribuída por fonte**



Fonte - Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2015, p. 16).

Notas: <sup>1</sup> Inclui gás de coqueria; <sup>2</sup> Inclui importação de eletricidade; <sup>3</sup> Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras

Desta forma, percebe-se que a biomassa foi superada somente pela hidroeletricidade e embora continue apresentando um número relativamente pequeno na produção de energia elétrica nacional, essa fonte possui um grande potencial de expansão nos próximos anos, pois além de ser um recurso renovável é considerado como uma das alternativas para a diminuição do uso de combustíveis fósseis, assim, a biomassa necessita ser mais bem aproveitada para fins energéticos (ANEEL, 2009, p. 70).

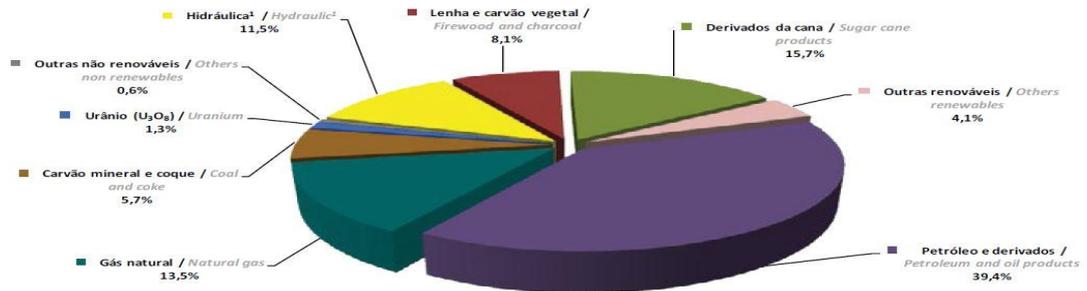
### 2.1.1 Biomassa Lenhosa

A biomassa lenhosa, tradicionalmente conhecida como lenha, talvez seja a fonte de energia primária mais antiga utilizada pelo ser humano e é aproveitada desde os primórdios da civilização para fins de cocção de alimentos e conforto térmico (CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA, 2015).

De acordo com as publicações da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) através do Balanço Energético Nacional 2015 (BEN), na década de 70, eram utilizados aproximadamente 103 milhões de toneladas de lenha, agora com dados mais recentes de 2014, os mesmos estudos apontam que são utilizados praticamente 80 milhões de toneladas, deste modo, ainda é considerável e perceptível o consumo de lenha no Brasil (EPE, 2015, p. 50).

Embora, tenha ocorrido essa redução do consumo de lenha no país, os números ainda indicam um consumo significativo referente a este energético. Pois no ano de 2014 a oferta total de bioenergia na matriz energética foi de 84,4 milhões de tep, entre esses, a lenha foi responsável por 29,3% da biomassa utilizada, ou seja, com 24,7 milhões de tep o que correspondem a 8,1% da matriz energética nacional (EPE, 2015, p. 24). Esses números podem ser observados através da figura 4.

**Figura 4 – Oferta interna de energia**



**Fonte - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BEN, 2015, p. 24).**

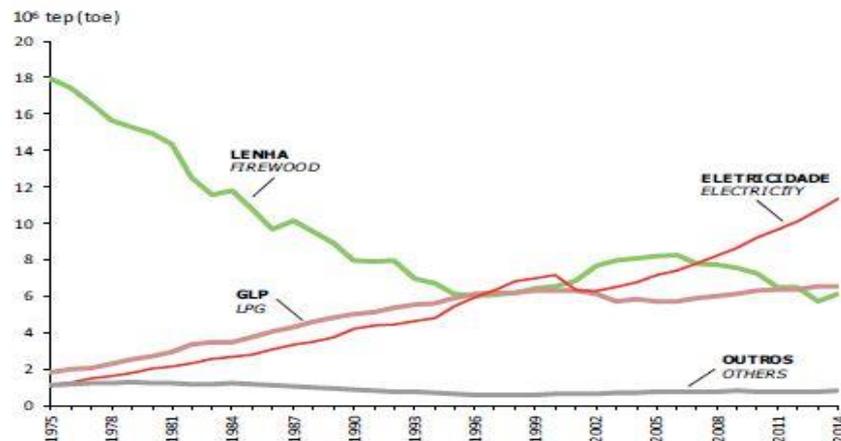
Em 1975, aproximadamente 18 milhões de tep providos de mais de 60 milhões de toneladas de lenha eram utilizados pelo setor residencial, basicamente na cocção de alimentos e em alguns casos isolados para conforto térmico. A partir da evolução da dependência dos subprodutos de petróleo, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) os números do consumo de lenha foram sendo reduzidos ao longo dos anos (EPE, 2015).

Segundo Lucon, Coelho e Goldemberg (2004) a biomassa tradicional/lenhosa utilizada nos domicílios brasileiro para a finalidade de cocção de alimento e conforto térmico (aquecimento de ambiente e água) é diretamente afetada pelo valor do botijão de GLP e pelos preços da distribuição do mesmo.

De acordo com a EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE, 2015, p. 79) em 2014, o setor residencial consumiu cerca de 20 milhões de toneladas de lenha, equivalentes a quase 24,70% da produção (~6,1 milhões de tep), o que corresponde a 6,25% a mais ao consumo de 2014.

Este aumento reflete o comportamento dos últimos anos, revelando uma relativa competitividade do consumo residencial de biomassa lenhosa em relação ao GLP. Pois, quando os preços do GLP aumentam, há uma redução no consumo do mesmo e por consequência aumentam o consumo da biomassa lenhosa para fins de cocção (TUDESCHINI, 200?). Está consequência pode ser observada na figura 5.

**Figura 5 – Consumo energético final residencial por fonte**



**Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2015, p. 80).**

Estudos da Agência Internacional de Energia (AIE) revelam em suas publicações que há 2,5 bilhões de pessoas nos países em desenvolvimento que necessitam da biomassa tradicional/lenhosa como fonte de energia para realizar as atividades domésticas de cocção de alimento. Em algumas nações mais pobres a utilização desse recurso chega a 90% do principal energético no setor doméstico (AIE, 2006).

Esse expressivo número de pessoas que utilizam essa fonte de energia é a consequência do preço relativamente alto das fontes energéticas triviais para as regiões remotas dos países em desenvolvimento.

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura conhecida pela abreviação de FAO, destacam em seus relatórios que de toda a superfície terrestre do globo, aproximadamente 31% são ocupadas por florestas (plantadas e nativas) pelo qual esse percentual representa algo em torno de 4 bilhões de hectares e mais da metade dessa área florestal permanecem concentradas em cinco países que são a Federação Russa, Brasil, Canadá, Estados Unidos da América e China (FAO, 2010).

Assim, observa-se que ainda é significativa a utilização da lenha no setor residencial. No Brasil este setor tem participação direta de quase 25% da produção da biomassa lenhosa e como a utilização desse energético no setor residencial é praticamente como combustível para cocção, percebe-se que há um relativo

desperdício do aproveitamento energético da lenha a qual pode ser aproveitado em conjunto para outros fins, como aquecimento de água.

### 2.1.2 Tipos de Biomassa Lenhosa

As florestais utilizadas para fins energéticos são as florestas plantadas que apresentam finalidade de melhorar a viabilidade de sua utilização e diminuir (evitar) o desmatamento através das florestas naturais, são empregadas para fins energéticos como fonte de energia alternativa e renovável. Os subprodutos destas florestas são lenha para queima direta e produção de carvão vegetal, o qual esses produtos contribuem para aumentar o uso dos recursos renováveis na matriz energética brasileira (Puentes, 2010, p. 21).

De acordo com a FAO (2010) somente 264 milhões de hectares (ha) são correspondentes a florestas plantadas, porém o crescimento de expansão médio é cerca de cinco milhões de hectares por ano.

O Brasil é um dos países que possui uma das maiores áreas territoriais e áreas florestais de todo o globo, com aproximadamente 851,4 milhões de hectares e de 463 milhões de ha, respectivamente, ou seja, a relação entre área florestal e territorial é de 54,4% (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2013, p.9).

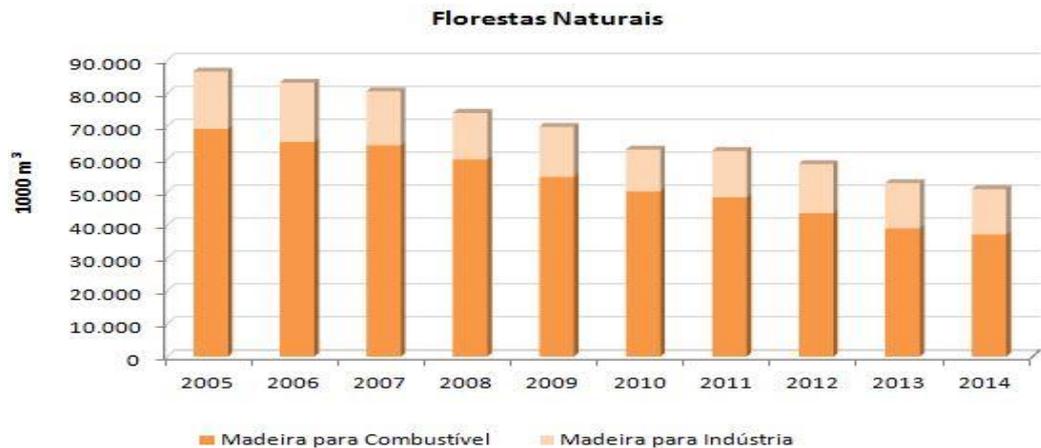
Embora, o número de área florestal brasileira seja considerável, em 2013 somente 7,6 milhões de hectares correspondem a florestas plantadas, o que representam cerca de 1% do território nacional. Desta superfície, 72% são relativos às florestas de eucalipto (*Eucalyptus spp*), 20,7% aos plantios de pinus e as demais espécies como acácia, teca, seringueira e paricá complementam as outras florestas plantadas no Brasil (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014, p. 21).

As principais espécies plantadas de biomassa lenhosa utilizadas para fins energéticos no Brasil são a Acácia Negra (*Acacia measrnsii*) e o Eucalipto (*Eucalyptus grandis*), essas espécies de árvores apresentam-se como as principais por possuírem uma boa produtividade e um bom poder calorífico (IFRG, 200?), porém, como informado anteriormente o eucalipto destaca-se como a principal espécie de árvore para utilização como combustível energético.

O consumo de biomassa lenhosa no país é fruto primordialmente de extração florestal ao qual se referem a briquetes, pellets e madeira/lenha. O setor residencial consome quase unicamente a biomassa lenhosa como combustível

alternativo para cocção de alimento e conforto térmico, ao qual a quantidade desse recurso consumido está intrinsecamente ligado à região geográfica, zona (urbana ou rural), preço do GLP e clima (TUDESCHINI, 20?). As informações do ano de 2014 em relação ao extrativismo florestal podem ser observadas nas figuras abaixo.

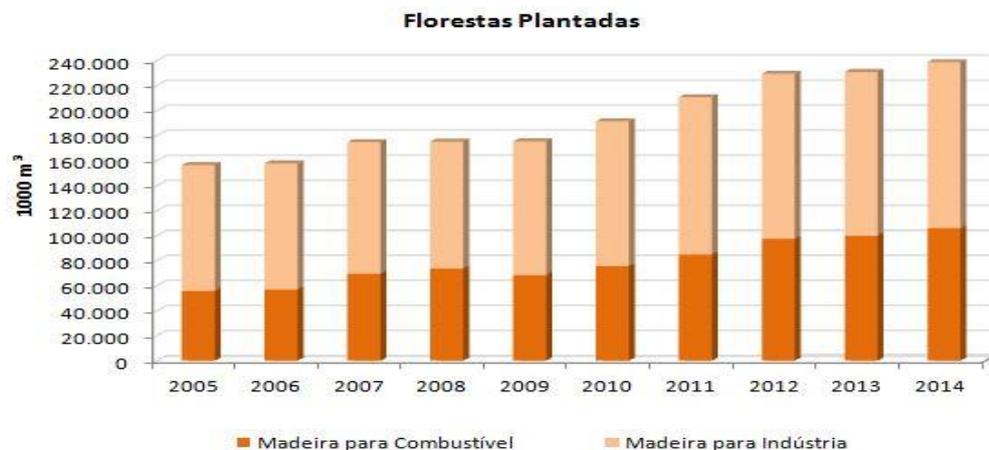
**Figura 6 – Volume de madeira em tora das florestas naturais**



**Fonte - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO**

Conforme a figura 6 no ano de 2014 as florestas naturais extraídas apresentaram um número de aproximadamente 51 milhões de m<sup>3</sup>, dos quais, quase 14 milhões de m<sup>3</sup> foram utilizados para uso industrial e aproximadamente 37 milhões de m<sup>3</sup> como combustível (29 milhões de m<sup>3</sup> de lenha e 8 milhões m<sup>3</sup> de carvão).

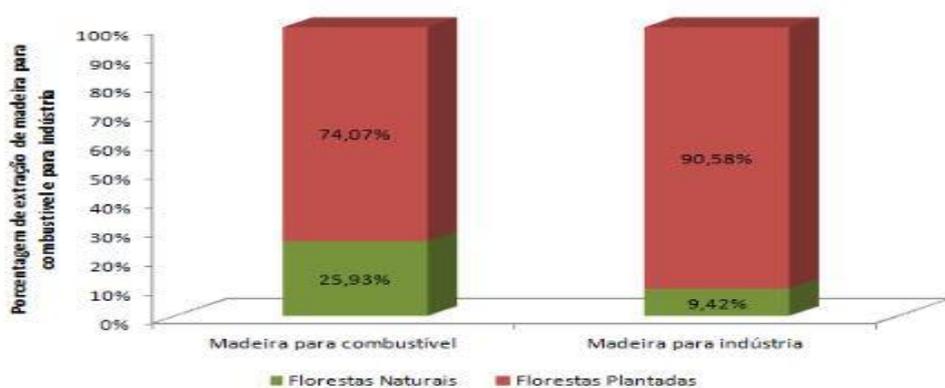
**Figura 7 – Volume de madeira em tora das florestas plantadas**



**Fonte: SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO**

Através da figura 7, observa-se que as florestas plantadas no mesmo ano de 2014 ofereceram quase 239 milhões de m<sup>3</sup> de madeira, entre esses, a indústria utilizou quase 133 milhões de m<sup>3</sup> e para utilização como combustível provido da madeira foram utilizados aproximadamente 106 milhões de m<sup>3</sup> (56 milhões de m<sup>3</sup> de lenha e 50 milhões de m<sup>3</sup> de carvão). Assim, somando esses montantes a extração madeireira no ano de 2014 foi de praticamente 290 milhões de m<sup>3</sup> (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS, 2016).

**Figura 8 – Percentual do extrativismo florestal na produção de madeira para combustível (lenha e carvão) e para indústria (tora) em 2014**



**Fonte - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO**

Analisando a figura 8, nota-se que o extrativismo vegetal está caminhando para uso sustentável desse energético. Pois, para que a biomassa lenhosa possa ser utilizada como fonte energética no meio residencial, essa mesma deve ser cultivada de forma sustentável, onde o manejo e o uso não acrescentam CO<sub>2</sub> na atmosfera (SOARES et al., 2006).

Segundo Nogueira (2005) para que a biomassa lenhosa seja sustentável é necessário que a demanda pela lenha seja menor que o reflorestamento, caso contrário, ou seja, se o reflorestamento não suprir a quantidade necessária de lenha, o uso desse recurso energético é não sustentável, pois, as diferentes espécies de árvores utilizadas para a produção de madeira necessitam de um considerável tempo de regeneração.

### 2.1.3 Características Físico-Químicas da Biomassa lenhosa

Segundo Guardabassi (2006, p. 7 apud RODERO et al., 2012), a biomassa lenhosa é basicamente um hidrocarboneto com a sua composição química elementar constituída de carbono, variando entre 49 a 50%, oxigênio entre 44 à 45%, hidrogênio com 6%, nitrogênio de 0,1 à 1% e demais elementos como potássio, cálcio, magnésio, cloro, arsénio, cádmio, zinco, mercúrio, chumbo, cobre e crômio, porém esses elementos apresentam-se em quantidades muito pequenas

De acordo com os estudos de Couto (2014, p. 25 apud MARTINI, 2009) os componentes da biomassa vegetal variam de 40 a 50% de celulose, de 20 a 40% de hemicelulose e a quantidade de lignina é cerca de 25%.

#### 2.1.3.1 Teor de umidade

O teor de umidade é o indicativo de quanta água está presente na lenha e este teor de umidade presente na biomassa lenhosa deve ser minimizado, pois a umidade contida na madeira faz com que ocorra o desperdício de calor presente na combustão dos gases em forma de vapor de água (QUERINO et al., 2005).

De acordo com Querino (2005 apud CUNHA et al, 1989) a quantidade máxima de água que a lenha pode apresentar para entrar em combustão é de 65%, acima desse valor é necessário utilizar calor externo para promover a secagem da madeira e conseqüentemente a combustão.

#### 2.1.3.2 Poder calorífico

Entende-se como poder calorífico (PC) a quantidade de energia em forma de calor liberada através da combustão de uma unidade de massa do combustível (QUERINO, 2005).

De acordo Querino (2005 apud BRIANE; DOAT, 1985) a liberação da energia térmica proveniente da combustão do combustível normalmente é medida em termos de quilocalorias (kcal) por quilograma (kg), embora no sistema internacional (S.I) a unidade de medida do PC é joules (J) por grama (g).

O poder calorífico pode ser expresso de duas formas, em superior (PCS) e inferior (PCI). Onde, o PCS a combustão ocorre a volume constante e a água gerada no meio da combustão é condensada e existe a recuperação do calor através dessa condensação.

Segundo Querido (2005 apud JARA, 1989) o PCI é a energia real disponível por unidade de massa do combustível, em forma de calor, após a evaporação da água e por esse motivo o valor do PCI é menor que o valor do poder calorífico superior (SANTOS, 2012).

#### 2.1.3.3 Densidade

Uma das características que indicam a qualidade da lenha e sua utilização é a densidade, pois, segundo Guardabassi (2006, p. 9 apud QUERINO, 2005) madeiras mais leve apresentam um PC menor comparadas a lenhas mais densas por unidade volumétrica.

#### 2.1.3.4 Teor de cinzas

Caracterizam-se como teor de cinzas os resíduos derivados da combustão da biomassa lenhosa, onde estes resíduos variam de 0,5 a 5% de acordo com a espécie de lenha, o quanto foi queimada e o quão de terra/areia estão presentes na madeira (GUARDABASSI, 2006, p. 9).

#### 2.1.3.5 Conteúdo de carbono

Entende-se como teor carbono a parcela de carbono queimada no estado sólido, onde as lenhas que possuem uma maior concentração de carbono queimam de maneira mais lenta, reduzindo a geração de óxidos de ferro (GUARDABASSI, 2006, p. 9).

### 2.1.3.6 Teor de voláteis

É a quantidade parcial de combustível a qual se volatiliza a altas temperaturas, e depois da evaporação combina-se com o O<sub>2</sub>, promovendo a combustão. As lenhas que possuem alta quantidade de voláteis queimam mais rapidamente (GUARDABASSI, 2006, p. 9).

### 2.1.4 Processo de Combustão Direta

Segundo Querino (2005 apud EARL, 1975) e citado por Cunha et al., (1989) a combustão direta é o processo menos tecnológico e mais econômico ao qual se obtém energia. Onde, de acordo com os mesmos autores, a eficiência energética da combustão da biomassa lenhosa está diretamente ligada com a composição química da lenha.

A combustão pode ser entendida como a transformação proveniente das reações de um combustível (lenha) reagindo-se com um oxidante (oxigênio), gerando energia em forma de calor. Em termos energéticos, a combustão direta acontece principalmente em fornos, fogões a lenha (cocção de alimento) e caldeiras (ANELL, 2002, p. 54).

O processo de combustão da biomassa acontece em três fases, as quais são ignição, combustão com chama e combustão sem chama. Na primeira fase, ocorre a ignição em elevadas temperaturas, originando-se os compostos voláteis inflamáveis. Depois de ocorrer a carbonização, a combustão com chama aparece e os níveis de combustíveis voláteis vão diminuindo a níveis desprezíveis, promovendo que aconteça a combustão sem chama, liberando-se os componentes voláteis derivados da lenha (ARBEX et al, 2004).

## 2.2 FOGÃO A LENHA

O fogão a lenha é um utensílio doméstico ao qual pode ser associado como um dos equipamentos térmicos mais antigos produzidos pelo ser humano. Este equipamento possui como principal finalidade a cocção de alimento e aquecimento

de ambiente. Porém, com a grande inserção dos usos de combustíveis fósseis houve uma diminuição da utilização deste equipamento (BORGES, 1994).

Entretanto, segundo estudos da Shell (2007) o Brasil possui aproximadamente nove milhões de domicílios que ainda utilizam a biomassa lenhosa para cozinhar, destas, 50% estão no nordeste do país, os outros 4,5 milhões estão distribuídos nas demais regiões do Brasil. Assim, ainda existe um relativo número de famílias que utilizam este utensílio.

### 2.2.1 Principais Componentes do Fogão a Lenha

O fogão a lenha é caracterizado por possuir componentes coesos entre si mesmo, ou seja, sem componentes a parte. Porém, podem-se dividir os itens essenciais para a produção e transporte de calor, como, câmara de combustão, grelha, chapa condutora de calor, cinzeiro, válvula reguladora de exaustão e chaminé.

A câmara de combustão, ou fornalha é o volume onde ocorre a combustão da biomassa lenhosa, e esta câmara possui materiais refratários ao seu redor, para isolar (manter) o calor interno e proteger as pessoas do excesso de calor produzido no interior da câmara.

A grelha é o suporte de ferro gradeado ao qual coloca-se a biomassa lenhosa.

Chapa condutora de calor é o componente que absorve a energia provida da combustão da lenha e gases, e a transfere em forma de calor a utensílios domésticos e ao meio ao redor.

A válvula reguladora de exaustão é responsável por dosar a saída dos gases para a chaminé, a qual a chaminé é o componente que possui a finalidade de retirar os gases da combustão e lança-los na atmosfera, podendo ser produzidas em material metálico ou em alvenaria.

Cinzeiro é o local de armazenamento das cinzas e das partes da lenha que caem da grelha.

### 2.2.2 Eficiência nos Fogões a Lenha

Os estudos sobre fogões a lenha como equipamento térmico foram incentivados após a crise do petróleo nos anos 70, pois nesse período houve estímulos de governos e organizações para aperfeiçoar a disseminação desta tecnologia (BORGES, 1994).

Segundo Borges (1994 apud MARTINS, 1989) estudos foram realizados sobre a eficiência de fogões a lenha tradicional da região Sul-Sudeste do Brasil, e através de algumas modificações nestes fogões tradicionais conseguiram melhorar suas eficiências, que de acordo com os mesmos, a eficiência passou de 7,6% para 12,6%, assim com este aumento de eficiência, conseguiram através de um tubo de calor fornecer energia do fogão para uma geladeira residencial de ciclo de absorção.

De acordo com López et al, (2000) os fogões a lenha apresentam menos eficientes pois utilizam no máximo 25% da energia gerada quando comparada ao fogão a gás, o qual esse consome 95% da energia cedida

Sanga (2004) através de seus estudos avalia que na maioria das vezes a eficiência de fogões a lenha destinada para cocção de alimento seja menor que 10%.

Kammen (1995 apud SANGA 2004) relata que a eficiência de energia para cozimento em fogões a lenha está relacionada ao tipo de combustão, tecnologias e modelos de construção, a qual a eficiência permeia entre 5% a 30%. A tabela 1 apresenta os diversos modelos de fogões a lenha e suas respectivas eficiências.

**Tabela 1 – Eficiência para cozimento em vários modelos de fogão a lenha**

Combustível	Modelos	Eficiência em Laboratório [%]	Eficiência em Campo [%]	Aceitáveis
Lenha	3 pedras (panela de argila)	-	5-10	7
	3 (panela de alumínio)	18-24	13-15	15
	Tradicional forno aberto	-	3-6	5
	Melhorado barro/argila	11-23	8-14	10
	Tijolos	15-25	13-16	15
	Metal e portátil	25-35	20-30	25

Fonte: [kammen \(1995\)](#)

Seguindo esta informações, do total da energia liberada pela combustão da lenha, adota-se que 15% é utilizada para cozimento e o restante (85%) é cedida

para o ambiente (aquecimento 75%) e perda junto com os gases da combustão (10%).

### 2.2.3 Vantagens e Limitações

O fogão a lenha apresenta algumas vantagens em relação ao fogão a gás, que são elas: baixo custo de aquisição, possuir combustível renovável, ser sustentável se o manejo do combustível for corretamente e proporcionar conforto térmico. Entretanto, algumas das suas limitações são referentes ao baixo poder calorífico do combustível, baixa eficiência energética, geração de materiais particulados e poluentes lançados na atmosfera, bem como a dificuldade de armazenamento do combustível (REGUEIRA, 2010, p. 9).

## 2.3 ENERGIA SOLAR

A energia solar pode ser entendida como a energia obtida da estrela mais próxima da Terra, o Sol, a qual essa energia chega ao planeta Terra em forma de radiação de ondas eletromagnéticas, ou seja, fótons (HODGE, 2011, p.84).

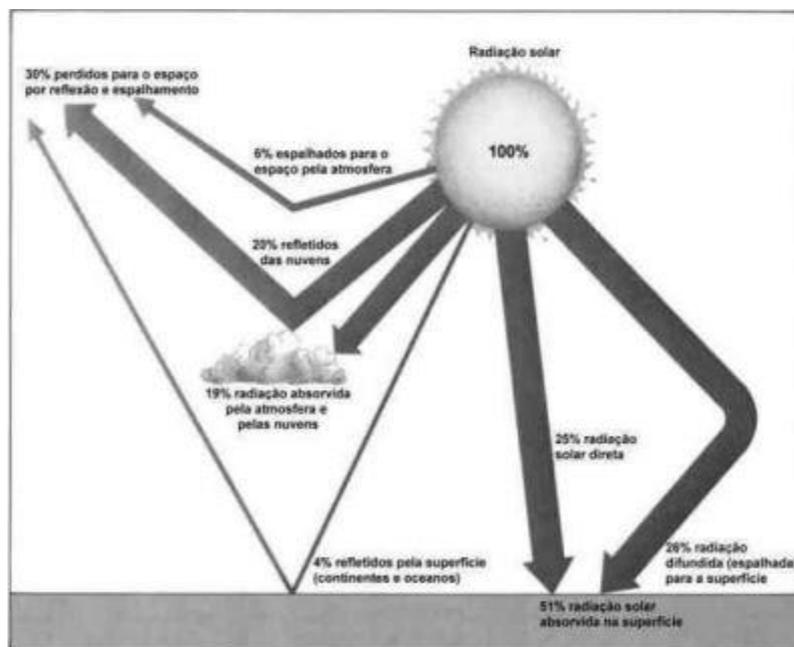
As diversas fontes de energias conhecidas, como biomassa, hidráulica, combustíveis fósseis, eólica e demais fontes são indiretamente formas de energia solar. A radiação proveniente do Sol é geralmente utilizada para iluminação natural, embora possa ser consideravelmente aproveitada e difundida para o conforto térmico e geração de potência mecânica e/ou elétrica (ANEEL, 2002, p. 5).

Segundo o Centro de Referência Para a Energia Solar e Eólica de Salvo Brito (CRESESB) o Sol é a fonte com maior potencial energético para utilização na Terra, o qual a energia incidida na atmosfera terrestre é estimada em  $1,5 \cdot 10^{18}$  kWh. Esse valor é correspondente a dez mil vezes a quantidade de energia consumida pela população mundial (CRESESB, 1999).

Toda essa energia é provida de um enorme processo termonuclear o qual ocorre internamente no Sol, resultando aproximadamente em 650 milhões de toneladas do elemento hidrogênio que é convertido em hélio a cada segundo (BROWN, 1988).

Porém, essa energia não pode ser totalmente aproveitada, pois a radiação incidente na atmosfera e na superfície terrestre é refletida para o espaço, e estudos indicam que cerca de 30% são retornados ao espaço por dispersão e reflexão, os outros 70% são responsáveis pelo aquecimento terrestre, ocasionando calor latente e sensível, ou seja, evaporação da água ou convecção respectivamente (INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA ESPACIAIS, 2006, p. 14). A figura 9 demonstra de maneira esquemática os valores percentuais da radiação incidente.

**Figura 9 – Distribuição percentual da radiação solar incidente**



Fonte - Departamento de Física da UFPR, 2007.

Assim, uma aplicação eficaz da radiação solar pode ser realizada através de tecnologias da engenharia moderna, como é o caso da geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas, também um bom aproveitamento dessa radiação é com o uso de concentradores e coletores solares, ao quais são destinados para aquecimento de fluidos para usos residenciais, comerciais e/ou industriais.

### 2.3.1 Energia Solar Térmica

Entende-se por energia solar térmica o aproveitamento da radiação provida do Sol para transferi-la a um elemento de transferência de calor onde geralmente utilizam-se água e ar (SOLAR ENERGIA, 2016).

Segundo HODGE (2011) a energia solar é difundida como passiva, ativa ou fotovoltaica, as quais existem distintas tecnologias de aproveitamento.

Outras definições de acordo com Varella (2004, p. 5 apud DIOFFO 1976) a energia solar pode ser utilizada de diversas maneiras, nas quais são intrinsecamente térmicas (fogões solares, destiladores e aquecedores de água), ou na conversão termodinâmica (motores, turbinas e refrigeração solar), bem como na conversão direta em eletricidade, ou seja, painéis solares fotovoltaicos.

**Figura 10 – Fluxograma dos métodos e aplicações da energia solar**



Fonte: Alves, 2009, p. 24 (apud PEREIRA et al., 2004).

Conforme a figura 10 observa-se os métodos e aplicações da energia solar, onde se enquadram os métodos ativos e passivos. A energia solar ativa enfoca seu uso para captação da energia solar térmica por diferentes equipamentos que podem ou não possuir componentes mecânicos (bombas) para captar e transportar calor. Já os sistemas passivos, são normalmente responsáveis pela transferência do calor por meio natural, ou seja, não utilizam equipamentos mecânicos.

Diante dos diversos processos existentes de aproveitamento da energia solar, destacam-se o aquecimento de água, nas regiões Sul e Sudeste e a geração

fotovoltaica de eletricidade, em regiões do Norte e Nordeste, onde ainda existem comunidades com ausência de eletricidade (ANEEL, 2002, p. 5).

### 2.3.2 Componentes de Sistemas de Aquecimento Solar

Os sistemas de aproveitamento térmico da energia solar para aquecer água são constituídos normalmente por coletores de radiação solar, reservatórios térmicos, reservatórios de água, dutos de alimentação e distribuição para o uso e em alguns casos, possuem sistemas de auxílio de energia, para compensar os dias e/ou regiões que provém de menor radiação solar, ou até mesmo para equilibrar o consumo acima do dimensionamento do sistema.

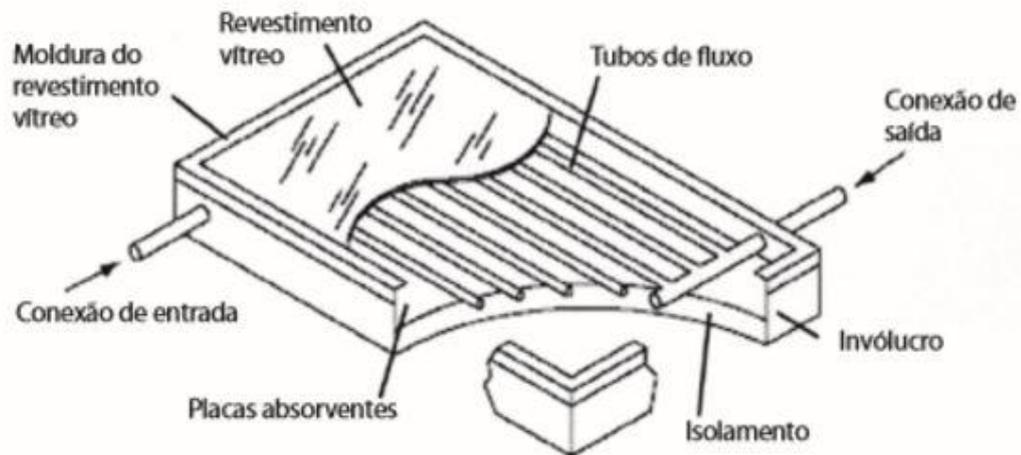
#### 2.3.2.1 Coletor de radiação solar

Coletores solares são equipamentos responsáveis por captar a radiação solar (energia solar) e transferi-la a um fluido (geralmente água) em forma de calor útil (LAFAY, 2005, p. 16).

Segundo Hodge (2011) existem dois modelos de coletores solares, os coletores do tipo concentradores e os de placa plana. Coletores solares de placa plana são largamente utilizados no meio habitacional, ou seja, em residências, edificações comerciais e industriais para aquecimento de água e condicionamento de ar.

De acordo com o mesmo autor, os coletores solares de placa plana subdividem em dois modelos, não revestidos (abertos) e com revestimento vitrificado (fechados). A escolha do modelo mais adequado é realizada de acordo com a temperatura desejada. Quando existe a necessidade de se aquecer água a temperatura por volta de 60°C e abaixo de 93°C, opta-se por escolher os coletores de placa plana revestidos com vidros (HUDSON; MARKELL, 1985). O qual uma visão em corte pode ser observada através da figura 11.

**Figura 11 – Coletor solar de placa plana vitrificado (fechado)**

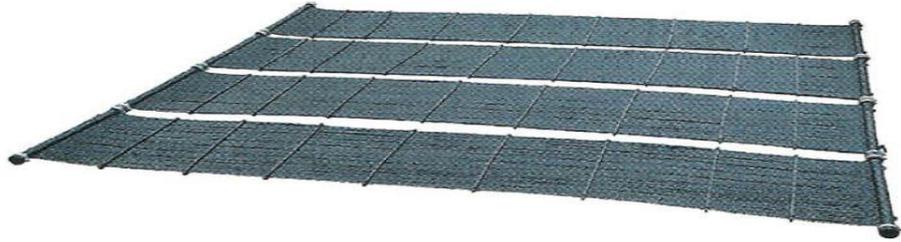


**Fonte - Hodge (2011, p. 112)**

Através da figura 11, observam-se os componentes presentes no coletor solar de placa plana fechado que são, a caixa (invólucro) a qual tem a função de suporte estrutural e protetora. Revestimento vítreo transparente, que são normalmente produzidos em vidro de alta transmissividade solar proporcionando proteção e permitindo a passagem de grande parte da irradiação solar, a qual é absorvida pela placa absorvedora (cor preta e de cobre ou alumínio), essa emite radiação em faixas de comprimentos de ondas maiores que a radiação incidente, onde o revestimento vítreo “torna-se” opaco para essa radiação, ocasionando o efeito estufa (LAFAY, 2005, p. 16). A água que escoar através dos tubos é aquecida pela energia recebida da placa absorvente e para minimizar a perda de calor, entre a parte inferior do coletor e a placa absorvente há um isolamento térmico (no Brasil geralmente utiliza-se lã de vidro) (HODGE, 2011, p. 113).

Enquanto para os coletores solares de placa plana sem cobertura (abertos) as aplicações são adequadas quando a temperatura desejada da água giram em torno de 28 a 30°C (Varella, 2004), e em regiões que não apresentam temperatura ambiente relativamente baixa (Costa, 2002).

**Figura 12 – Coletor solar sem cobertura (aberto)**



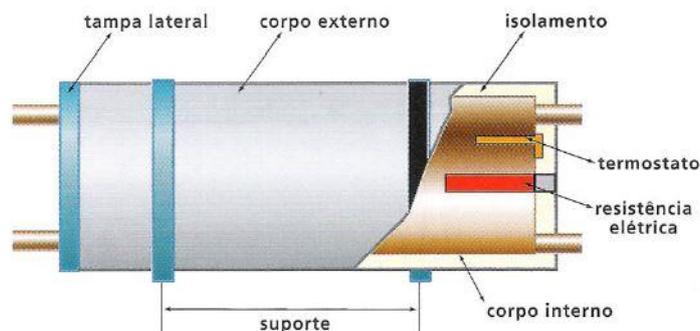
**Fonte - Procobre (2009, p. 10)**

Através da figura 12 observa-se um modelo de coletores solar sem revestimento, os quais diferenciam dos coletores fechados por não possuírem o isolamento térmico, a caixa externa e a cobertura vitrificada, e são geralmente produzidos em materiais termoplásticos, etileno propileno dieno (EPDM), policloreto de polivinila (PVC) e borrachas especiais (PEREIRA et al, 2003).

### 2.3.2.2 Reservatório térmico

O reservatório térmico, vulgarmente chamado de (Boiler) é o equipamento responsável por armazenar e manter a água aquecida através dos coletores solares, este componente do sistema de aquecimento solar pode ser observado na figura 13.

**Figura 13 – Reservatório térmico**



**Fonte - Procobre (2009, p. 12)**

Por meio da figura 13, observa-se como são constituídos os reservatórios térmicos, normalmente são de geometria cilíndrica, produzidos em cobre ou aço inoxidável, e externamente são isolados termicamente por materiais que apresentam baixa condutividade térmica, na parte externa do cilindro possuem uma capa metálica servindo de proteção e acabamento para a parede do reservatório e quando necessário apresentam internamente uma fonte auxiliar de aquecimento (resistência elétrica e termostato) (GUARIENTE, 2005 apud PETRUCCI, p. 1998).

Os reservatórios térmicos podem ser classificados como abertos (não pressurizados) trabalhando sempre na pressão atmosférica e fechados (pressurizados) a qual trabalham com pressão acima da pressão atmosférica (LAFAY, 2005, p.18).

Segundo Guariente (2005, p.28 apud PHILLIPS; DAVE 1982) em reservatórios horizontais a estratificação térmica é menor, pois existe uma maior área de contato entre as zonas de condução térmica até que haja o equilíbrio de temperatura, tornando esse reservatório menos eficiente. Os reservatórios verticais apresentam uma melhor estratificação, já que o equilíbrio de temperatura ocorre mais rapidamente entre camadas de condução, pois há uma menor área de contato, podendo ser observado na figura 14.

**Figura 14 – Estratificação térmica da água em reservatório vertical e horizontal.**



**Fonte - Guariente (2005, p. 28).**

### 2.3.2.3 Dutos de distribuição de água quente

A tubulação de água quente para sistemas de aquecimento solar devem ser projetadas seguindo os mesmos critérios de utilização nos sistemas de aquecimento por acumulação a gás ou elétrico, assim sendo, os dutos tem de estarem em conformidade com a Norma NBR 1798 – Projeto e execução de instalações prediais de água quente (ABNT, 1993).

### 2.3.2.4 Métodos existentes para aquecimento de água com energia solar

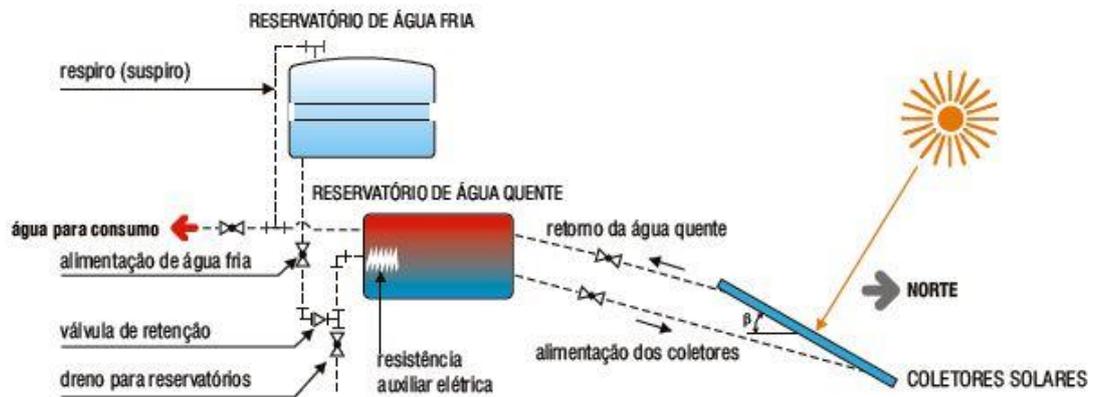
Existem quatro métodos para realizar o aquecimento de água aproveitando a energia solar, são eles: sistema passivo direto, sistema passivo indireto, sistema ativo direto e sistema ativo indireto.

Quando o sistema trabalha com a água, o sistema é nomeado como sistema direto, já quando a troca de calor acontece entre coletor-fluido refrigerante e água nomeia-se como sistema indireto. A diferenciação entre sistema ativo e passivo está relacionada à utilização de equipamento mecânicos auxiliares para circulação, ou seja, a circulação por termossifão (natural) é dita como passiva, enquanto o sistema ativo é quando há necessidade de forçar a circulação (bombeamento) (PRADO et al, 2007, p.19).

### 2.3.2.5 Sistema passivo direto

No sistema passivo direto a circulação da água acontece naturalmente, ou seja, quando a água presente nos coletores solares é aquecida e começa ocorrer uma diferença de densidade provocada pela existência de diferença de temperatura entre o coletor e o reservatório, onde o reservatório ocasiona um gradiente de pressão, colocando o fluido (água) em circulação (PRADO et al, 2007, p. 20). Diante da relativa simplicidade de funcionamento desse sistema, este é o método de aquecimento mais utilizado no Brasil para fins residenciais (LAFAY, 2005, p. 23). A figura 15 demonstra a configuração deste sistema mencionado e com um sistema auxiliar de energia internamente ao reservatório.

**Figura 15 – Sistema de aquecimento solar passivo direto com auxílio de energia internamente ao reservatório**

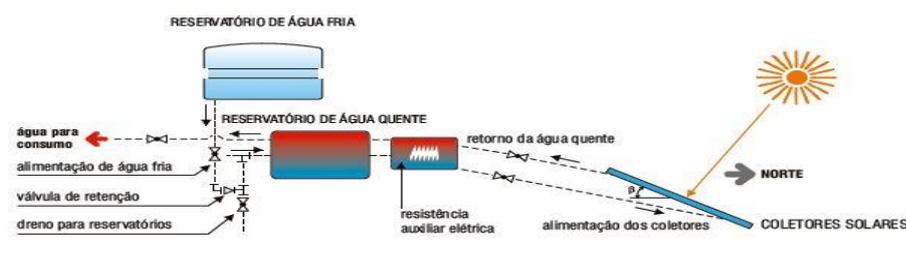


Fonte - Prado et al, 2007, p.20 (apud LIMA, 2003)

### 2.3.2.6 Sistema passivo indireto

Segundo Lafay (2005, p. 23 apud Hudson; Markell, 1985) nos sistemas passivos indiretos, muito utilizado e aconselhável em regiões onde o clima apresenta-se mais rigoroso (frio), ou seja, possibilitando o congelamento da água, devem-se adicionar um fluido refrigerante ao sistema, ao qual este fluido realiza a troca de calor com a água. O movimento do fluido é realizado naturalmente (termossifão), podendo ou não haver um armazenamento de água quente por meio do trocador de calor (PRADO et al, 2007, p. 21). Através da figura 16 observa-se o que foi descrito anteriormente.

**Figura 16 – Esquema de um sistema de aquecimento solar passivo indireto**



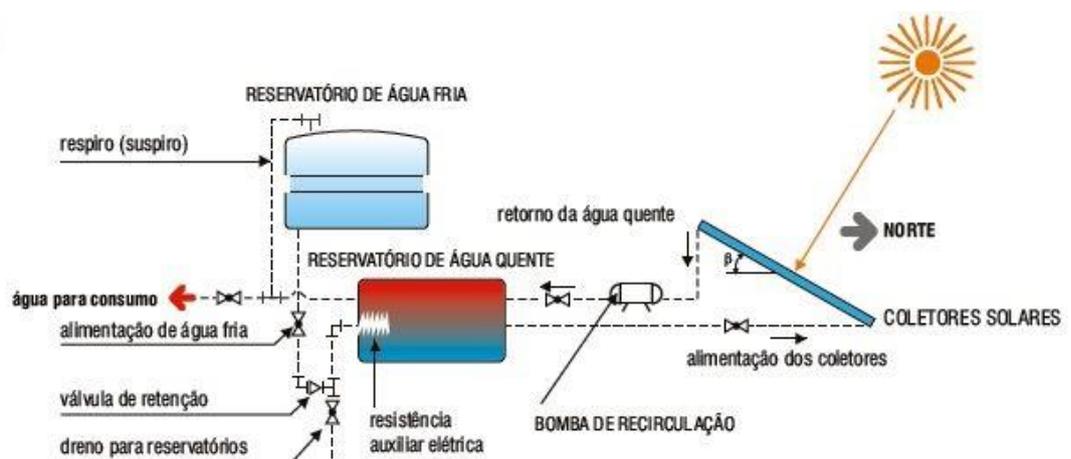
Fonte - Prado et al 2007, p.21 (apud LIMA, 2003)

Os fluidos refrigerantes mais utilizados são o etileno-glicol e propileno-glicol, embora existam diversos outros fluidos capazes de realizar esta troca de calor (LIMA, 2003).

### 2.3.2.7 Sistema ativo direto

Segundo Prado et al., (2007, p. 21 apud ARRUDA, 2004) o sistema ativo direto diferencia-se do passivo direto por possuir um elemento mecânico responsável pela movimentação da água, ou seja, a circulação é ocasionada por uma motobomba e aquecida pelos coletores. Quando a diferença de temperatura entre a parte superior do coletor e do reservatório atinge um valor predeterminado a motobomba é acionada, iniciando-se assim a circulação. A motobomba desliga-se quando esta diferença de temperatura for pequena ou quando o volume do reservatório esteja em um valor determinado. A grande vantagem deste sistema, esta relacionada ao local do reservatório em relação aos aquecedores, porém os custos deste sistema aumentam, por possuírem mais componentes. A representação esquemática pode ser observada através da figura 17.

**Figura 17 – Esquema de um sistema de aquecimento solar ativo direto**



Fonte - Prado et al, 2007, p.21 (apud LIMA, 2003)

### 2.3.2.8 Sistema ativo indireto

Segundo o autor mencionado no paragrafo anterior, no sistema ativo indireto o movimento da água é realizado pelo auxilio de equipamentos mecânicos (motobombas) e é adicionado um fluido refrigerante ao sistema, o qual este fluido absorve calor no coletor e o transfere com a água no trocador de calor, o qual este pode estar presente internamente ou externamente no reservatório, apresentando vantagens e desvantagens. Por exemplo, se o trocador de calor estiver pelo lado de fora do reservatório de água quente, possibilita uma maior facilidade, entretanto ocasiona maior perda de calor.

Esse tipo de sistema é muito utilizado em regiões onde existem elevadas possibilidades de ocorrer o congelamento da água nos dutos (LAFAY, 2005, p. 25).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA INTERLIGADA COM A ENERGIA DA COMBUSTÃO EM FOGÃO A LENHA

O presente trabalho estuda a interligação das duas fontes de energias térmicas para aquecimento de água no setor residencial.

Diante do que foi apresentado no referencial teórico existem diversos modelos de sistemas de aquecimento de água por meio da utilização da energia solar. Para este trabalho, o foco do estudo será para o sistema de aquecimento solar passivo direto, interligado a um sistema de aquecimento proveniente da queima da biomassa lenhosa em fogão a lenha metálico. A qual a água aquecida ficará armazenada em um reservatório isolado de água quente, e à medida que se consome a água aquecida, uma caixa de água fria alimentará os dois sistemas, tornando o funcionamento completo do sistema de maneira natural, ou seja, sem auxílio de componentes mecânicos (motobombas).

Este trabalho analisará somente uma linha de distribuição de água quente, ou seja, distribuir água quente para um único ponto e com uma residência de três pessoas, que no caso em estudo será para um banheiro onde se utilizam água aquecida para o banho.

O sistema hidráulico de água quente terá de possuir materiais adequados para a rede de distribuição de água aquecida, pois a temperatura global de trabalho (armazenamento do reservatório) da água quente será aproximadamente na ordem de 50°C.

Por fim, este estudo estuda a energia elétrica economizada, ou seja, o quanto uma unidade familiar de três pessoas gasta em reais para aquecer a água para o banho e comparar o quanto o sistema misto pode auxiliar na economia final da conta de energia elétrica.

### 3.2 Metodologia de desenvolvimento de cálculos e projeto do sistema misto de aproveitamento de energia térmica

Como o sistema misto de aproveitamento de energia irá possuir como fluido de trabalho água, onde não irá trocar de fase, ou seja, permanecerá no estado líquido recebendo calor sensível. O qual o calor sensível pode ser definido como a energia necessária para aquecer certo material de uma temperatura inicial para uma final, sem que haja a mudança de fase do material. De acordo com Çengel (2006, p. 44), energia sensível ou calor sensível está relacionada com a energia interna que resulte da soma da energia cinética e potencial das moléculas, onde a energia cinética é designada calor sensível e é expresso pela equação 1.

$$Q = m \cdot C_{med} \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot C_{med} \cdot [(T_{solar} + T_{fogão}) - T_{alimentação}] \quad (1)$$

onde  $Q$  é a quantidade de calor necessária para aquecer a água dada em Joule (J),  $m$  é massa de água que será aquecida em quilograma (kg),  $C_{med}$  é o calor específico médio dado em (kJ/kg.°C),  $T_2$  é soma da temperatura do aquecimento solar mais a temperatura do aquecimento do fogão a lenha e é dada em graus Celsius e  $T_1$  é a temperatura da água que alimenta o sistema misto dada em graus Celsius.

Assim, determinando a quantidade de água e possuindo a variação de temperatura da água é possível encontrar a quantidade de energia economizada no sistema misto.

A eficiência do sistema é determinada pela diferença entre as temperaturas de entrada e saída água, pois a medida que entra água a temperaturas baixas, ou seja, próximas do ambiente, melhora-se a eficiência do sistema num todo, pois há uma maior diferença de temperatura e conseqüentemente maior ganho de energia.

### 3.3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO TROCADOR DE CALOR

Para projetar um trocador de calor devem ser fixadas algumas condições exigíveis para aceitação do mesmo. As condições são:

- Dados de processo;

- Consideração sobre o projeto mecânico e
- Considerações sobre o material de fabricação.

### 3.3.1 Dados de processo

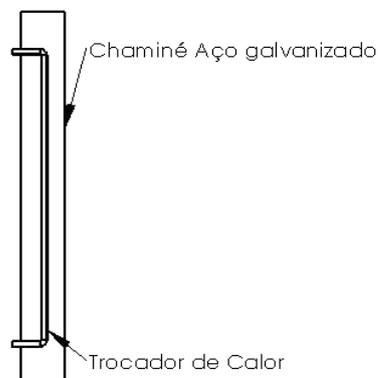
Os dados de processo que devem ser considerados são descargas de ambos os fluidos, composição dos fluidos e fases, temperaturas de entrada e de saída e por fim carga térmica.

Neste trabalho, o fluido utilizado será água, com sua composição química natural, ou seja, duas moléculas de hidrogênio e uma de oxigênio na fase líquida. A temperatura de entrada do fluido de trabalho será a temperatura ambiente, atribuindo 25°C, a de saída, adota-se que chega a 70°C.

### 3.3.2 Consideração sobre o projeto mecânico

O trocador de calor escolhido para o presente estudo será um trocador de duplo tubo o qual o fluido de trabalho (água) terá movimento em um único sentido e água fria que entrará em uma extremidade será aquecida pelos gases de exaustão do fogão a lenha e sairá em outra extremidade. A Figura 18 mostra o desenho esquemático do trocador de calor.

**Figura 18 – Desenho esquemático do trocador de calor**



**Fonte – Autoria própria**

### 3.3.3 Material para construção do trocador de calor interno

Para a escolha do material de construção consideram-se alguns fatores: corrosão pelos fluidos a diferentes temperaturas; corrosão galvânica; possibilidade de solda entre materiais diferentes; aceitabilidade pelo código ASME e resistência estrutural.

Neste trabalho, pré-selecionou-se três materiais para a construção do trocador de calor, que são eles: cobre, aço inoxidável e alumínio.

Através da análise dos seguintes critérios de aceitabilidade de solda, custo, processo de fabricação, condutividade térmica e resistência a corrosão, selecionamos o material que satisfaça aos seguintes requisitos de projeto.

- Resistência à corrosão para CO<sub>2</sub>, vapor de água e calor;
- Suportar a temperatura dos gases de combustão na ordem de 150 a 300°C;
- Resistir a uma pressão de funcionamento de 400 kPa.

Diante desses critérios analisados, selecionamos o material para o projeto do trocador de calor como Cobre Fosforoso DHP que possui as seguintes propriedades químicas, físicas e mecânicas mostrada na figura 19.

**Figura 19 – Propriedades químicas, físicas e mecânicas do trocador de calor para o projeto**

<b>Composição e Propriedades dos Tubos de Cobre</b>		
<b>Composição Química</b>	<b>Propriedade Física</b>	<b>Propriedade Mecânica</b>
Liga ELUMA: n° 122	Densidade: 8,94 g/cm <sup>3</sup>	<i>Tempera: Mole</i>
Denominação: Cobre Fosforoso DHP	Condutibilidade térmica a 20°C: 292,41 kcal/h.m.°C	<i>Válida somente para tubos de cobre ELUMAGÁS®</i>
Espec. ASTM CDA: C12200	Calor específico a 20°C: 0,092 kcal/kg.°C	Limite resistência: 21,1 ksi (30) min
Composição: Cu: 99,90% min; P: 0,015/0,040	Resistência elétrica a 20°C (material recozido): 2,03 micro ohm-cm	Alongamento % em 2": 40 min
Ligas equivalentes: EN: CR024A	Condutibilidade elétrica volumétrica a 20°C (material recozido): 80% IACS	Rockwell: Escala: 15 t / Dureza: 65 max
	Coefficiente médio de expansão térmica: 17,7	Tamanho do grão (mm): 0,40 max
	Módulo de elasticidade: 12.000 kgf/mm <sup>2</sup>	<i>Tempera: Duro</i>
	Módulo de rigidez: 4.500 kgf/mm <sup>2</sup>	Limite resistência: 31,6 ksi (45) min
	Nota: valores referenciais baseados no C.D.A.	Limite escoamento: 28,1 ksi (40) min
		Rockwell: Escala: 30 t / Dureza: 55 min

Fonte - TUBOS DE COBRE..., (p.02, 20?)

### 3.3.4 Pré-dimensionamento da área do trocador de calor no fogão a lenha

A área necessária será dimensionada para aquecer água para utilização residencial por meio da recuperação de calor dos gases de exaustão de um fogão a lenha. Para isso, nesse trabalho, utiliza-se um trocador de calor com tubos concêntricos e escoamento paralelo e um único passe.

A água a ser aquecida pode chegar a uma velocidade máxima de 3m/s (NBR 7198, p. 04, 1993).

De acordo com a escolha do material de projeto do trocador de calor o diâmetro externo selecionado é de 15mm com espessura de parede de 0,5mm (TUBOS DE COBRE..., p.01, 20?).

A equação 2, possibilita o cálculo da vazão volumétrica máxima calculada para a tubulação no trocador de calor.

$$\dot{V}_{m\acute{a}x} = v \cdot A_{interna\ TC} \quad (2)$$

onde,

$\dot{V}_{m\acute{a}x}$  é a vazão mássica volumétrica máxima de água a ser aquecida no trocador de calor.

$v$  é a velocidade máxima da água em tubulações de instalações de água quente que é de 3m/s (NBR 7198, p.04, 1993) .

$A_{interna\ TC}$  é a área onde irá fluir a água na tubulação do trocador de calor

Tem-se que a vazão volumétrica máxima da água que poderá escoar no tubo do trocador de calor de acordo com a norma NBR 7198 é de:

$$\dot{V}_{m\acute{a}x} = v \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} = 4,62 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \quad (3)$$

Onde,

$D_i$  é o diâmetro interno por onde água irá escoar.

Convertendo a vazão volumétrica máxima para vazão mássica máxima na temperatura média da água de 47,5°C

$$\dot{m}_{m\acute{a}x} = \rho_{47,5^{\circ}c} \cdot V\dot{m}_{\acute{a}x} = 0,457 \text{ kg/s} \quad (4)$$

onde,

$\rho_{47,5^{\circ}c}$  é a densidade da água a 47,5°C e é igual a 989,1 kg/m<sup>3</sup> (ÇENGEL, 2006,p. 854).

Sendo esta vazão mássica relativamente alta (sistema forçado), e como trabalha-se com sistema de termossifão, adota-se um valor menor para fins de dimensionamento, o qual esse valor é de  $\dot{m}_{m\acute{a}x} = 0,0457 \frac{kg}{s}$ .

Atribuindo que a temperatura de entrada da água seja de 25°C e de saída 70°C. Os gases de exaustão do fogão a lenha, que possuem propriedades termo físicas similares às de CO<sub>2</sub>, saem da fornalha, ou seja, entram no trocador de calor na ordem de 205°C e saem aproximadamente com temperatura de 156°C. Essas temperaturas são as médias dos pontos de leitura experimentais representados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Temperatura dos gases de exaustão na chaminé do fogão a lenha**

Ponto de leitura 0,10m [°C]	Ponto de leitura 0,80m [°C]	Ponto de leitura 0,10m [°C]	Ponto de leitura 0,80m [°C]	Ponto de leitura 0,10m [°C]	Ponto de leitura 0,80m [°C]
207	156	195	128	180	170
209	158	187	175	187	150
206	157	209	157	202	159
203	157	213	168	210	159
206	156	209	159	221	160
204	155	208	160	218	158
209	155	189	129	215	159
207	155	197	137	208	157
205	155	218	161	210	158
208	157	188	173	198	151
209	159	196	128	219	160
207	156	209	160	209	159
211	159	213	160	-	-
188	156	220	161	-	-
Média de temperatura em 0,10m [°C]				205,17	
Média de temperatura em 0,80m [°C]				156,20	
Média da temperatura dos gases [°C]				180,67	

Fonte – Autoria própria

Admite-se que o coeficiente global de transferência de calor é de 200 W/m<sup>2</sup>.K para se iniciar o pré-dimensionamento da área. Assim, tem-se que a área necessária é dimensionada conforme o prosseguimento a seguir.

Primeiramente deve-se determinar a temperatura média da água e dos gases de exaustão a qual são realizados através da equação 4 e 5, respectivamente.

$$\bar{T}_a = \frac{T_e + T_s}{2} = \frac{25 + 70}{2} = 47,5^\circ\text{C} = 320,65 \text{ K} \quad (4)$$

$$\bar{T}_g = \frac{T_e + T_s}{2} = \frac{205 + 156}{2} = 180,5^\circ\text{C} = 453,65 \text{ K} \quad (5)$$

onde,

$T_a$  é a temperatura média da água a ser aquecida no trocador de calor.

$T_g$  é a temperatura média dos gases de exaustão do fogão a lenha.

Determinada a temperatura média da água, faz-se uma interpolação linear com base nos valores através da tabela de propriedades da água saturada (ÇENGEL, 2006, p.854). Assim, tem-se que o calor específico da água para  $47,5^\circ\text{C}$  é

$$c_p = 4,1805 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}. \quad (6)$$

Para a temperatura média dos gases de exaustão também realiza-se uma interpolação linear de acordo com as propriedades termofísicas de  $\text{CO}_2$  a pressão atmosférica (ÇENGEL, 2006, p.861).

Então, realizada a interpolação temos que o calor específico dos gases ( $\text{CO}_2$ ) é  $c_p = 0,984627 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$ .

Depois de encontrado o calor específico dos gases de exaustão e da água, prossegue-se os cálculos através do método da efetividade-NTU.

Primeiramente calcula-se a taxa de capacidade térmica do fluido frio ( $C_f$ ) pela equação 7.

$$C_f = \dot{m}_f \cdot c_f = 0,0457 \frac{kg}{s} \cdot \frac{4,1805kJ}{kg \cdot K} = 0,190 \frac{kW}{K} \quad (7)$$

onde,  $\dot{m}_f$  é a vazão mássica da (água/fluido) fria em 47,5°C e  $c_f$  é o calor específico da (água/fluido) fria a essa temperatura, respectivamente.

A energia de transferência de calor sobre o trocador de calor é calculada a partir do balanço de energia sobre o fluido frio e é calculada pela equação 8.

$$q = C_f \cdot (T_{f,s} - T_{f,e}) = 1,91 \cdot (70 - 25) = 8,57kW \quad (8)$$

onde,

$T_{f,s}$  é a temperatura de saída do fluido frio (água).

$T_{f,e}$  é a temperatura de entrada do fluido frio (água).

Realizando o balanço de energia para o fluido quente, temos que.

$$C_q = \frac{q}{T_{q,e} - T_{q,s}} = \frac{85,96 kW}{(205 - 156)^\circ C} = 0,168 \frac{kW}{K} \quad (9)$$

Onde,

$T_{q,e}$  é a temperatura de entrada do fluido quente (gases).

$T_{q,s}$  é a temperatura de saída do fluido quente (gases).

Então calcula-se o desempenho do trocador de calor  $C_r$  pela equação 10.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{0,168}{0,190} = 0,88 \quad (10)$$

onde,

$C_{min}$  é a capacidade calorífica mínima no trocador de calor.

$C_{max}$  é a capacidade calorífica máxima no trocador de calor.

Calcula-se a efetividade da transferência do calor  $\varepsilon$  através da equação 11.

$$\varepsilon = \frac{q}{C_{min} \cdot (T_{q,e} - T_{f,e})} = \frac{8,57}{0,168 \cdot (206 - 25)} = 0,281 \quad (11)$$

Agora, calcula-se NTU por meio da equação 12.

$$NTU = -\frac{1}{C_r} \cdot \ln[C_r \cdot \ln(1 - \varepsilon) + 1] = 0,3913 \quad (12)$$

Então, temos que a área necessária do trocador de calor é realizada pela equação 13.

$$A = \frac{NTU \cdot C_{min}}{U} = \frac{0,3913 \cdot 0,168}{200} = 0,00032 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Embora, o real coeficiente global de transferência de calor não é o usado nesse pré-dimensionamento, pois realizou-se este pré-dimensionamento para obter-se uma estimativa da área necessária de troca de calor.

Nota-se que esta área é relativamente baixa para as condições iniciais.

Diante disso, realiza-se agora um procedimento de cálculo para encontrar o real coeficiente global de transferência de calor.

### 3.3.5 Cálculo do coeficiente global de transferência de calor no trocador de calor

Como água fria deve ser aquecida em um trocador de calor de tubo concêntrico em escoamento paralelo. O tubo interno de cobre fosforoso DHP possui diâmetro interno de 14mm. O diâmetro interno da chaminé de aço galvanizado é de 113mm. A água flui através do tubo de cobre a uma taxa de 0,0457 kg/s e atribuindo que gases de exaustão do fogão a lenha escoam através da chaminé a uma taxa de 0,4kg/10min (0,00066kg/s) (BORGES, 1994).

Fixando que a temperatura média da água seja de 47,5°C (para o primeiro ciclo) e realizadas as medições da temperatura dos gases de exaustão tem-se que a temperatura média dos gases de exaustão é de 180,5°C. Assim, através do procedimento a seguir encontra-se o coeficiente global de transferência de calor deste trocador de calor.

Premissas utilizadas para o cálculo:

- a) a resistência térmica do tubo interno (cobre) é desprezível, visto que o material do tubo é altamente condutor e sua espessura (0,5mm) é desprezível.
- b) Os escoamentos dos gases e da água são completamente desenvolvidos.
- c) Propriedades da água e dos gases de exaustão são constantes e tomadas na temperatura média.

As propriedades da água a 47,5°C estão listadas na tabela 3.

**Tabela 3 – Propriedades da água saturada a 47, 5°C**

Temperatura T, K	Densidade, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Número de Prandtl, Pr	Viscosidade dinâmica $\mu$ , kg/m.s	k, Condutividade térmica W/m.K
320,00	989,12	3,77	$577 \cdot 10^{-6}$	$640 \cdot 10^{-3}$
<u>320,65</u>	<u>988,86</u>	<u>3,72</u>	<u><math>570,63 \cdot 10^{-6}</math></u>	<u><math>640,65 \cdot 10^{-3}</math></u>
325,00	987,16	3,42	$528 \cdot 10^{-6}$	$645 \cdot 10^{-3}$

**Fonte – Incropera (2008, p. 608)**

As propriedades dos gases de exaustão do fogão a lenha a 180,5°C estão interpoladas e apresentadas na tabela 4.

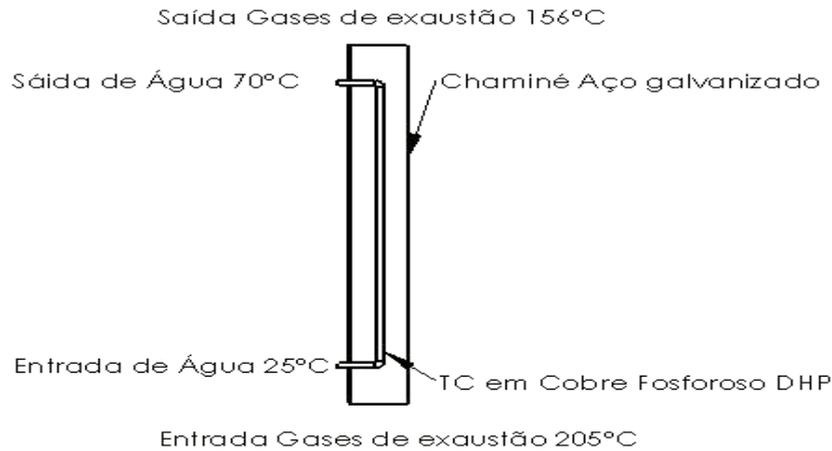
**Tabela 4 – Propriedades dos gases de exaustão CO<sub>2</sub> a 1 atm de pressão**

Temperatura T, K	Densidade, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Número de Prandtl, Pr	Viscosidade dinâmica $\mu$ , kg/m.s	Condutividade térmica k, W/m.K
450	1,1782	0,728	$210 \cdot 10^{-7}$	$28,3 \cdot 10^{-3}$
<u>453,65</u>	<u>1,1695</u>	<u>0,727</u>	<u><math>211,53 \cdot 10^{-7}</math></u>	<u><math>28,6 \cdot 10^{-3}</math></u>
500	1,0594	0,725	$231 \cdot 10^{-7}$	$32,5 \cdot 10^{-3}$

**Fonte – Incropera (2008, p. 601)**

A figura 20 mostra o esquema do trocador com as variáveis a serem calculadas.

**Figura 20 – Desenho esquemático do trocador de calor em projeto**



**Fonte – Autoria própria**

Para determinar o coeficiente global de transferência de calor  $U$ , utiliza-se a equação 14.

$$Ue \sim \frac{1}{\frac{1}{\frac{D_e}{D_i} \cdot h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{D_e \cdot \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot k} + Rde + \frac{D_e \cdot Rdi}{D_i}} \quad (14)$$

onde,  $h_i$  e  $h_o$  são os coeficientes de transferência de calor por convecção interno e externo ao trocador de calor, respectivamente, o qual devem ser determinados utilizando-se relações de convecção forçada.  $D_e$ ,  $D_i$ ,  $Rde$ ,  $Rdi$  são respectivamente o diâmetro interno da chaminé, diâmetro externo do tubo, fator de incrustação dos gases e fator de incrustação da água.

Necessita-se da velocidade média ( $\bar{V}$ ) da água que escoar no tubo, a qual determina-se por meio da equação 15.

$$\bar{V} = \frac{\dot{m}_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}_{47,5^{\circ}\text{C}} \cdot A_{i\text{Tubo}}} \quad (15)$$

Onde,

$\dot{m}_{\text{água}} = \dot{m}_f = 0,0457 \text{ kg/s}$  é a vazão mássica da (água em  $47,5^{\circ}\text{C}$ ).

$\rho_{\text{água}}_{47,5^{\circ}\text{C}}$  é densidade da água em  $47,5^{\circ}\text{C}$ .

$A_{i\text{Tubo}}$  é área interna do tubo de cobre onde irá fluir a água a qual é determinada pela equação 16.

$$A_{i\text{Tubo}} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_h^2 = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (16)$$

onde,  $D_h$  é o diâmetro hidráulico, o qual para um tubo circular é o próprio diâmetro externo do tubo de cobre, ou seja,  $D_e = 15 \text{ mm}$ .

Então, resolvendo a equação 16, temos que a velocidade média da água é  $\bar{V} = 0,26 \text{ m/s}$

Agora calculamos o número de Reynold, pela equação 17.

$$Re = \frac{\bar{V} \cdot D_h}{\nu} \quad (17)$$

onde,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e para a água ela é calculada pela equação 18.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_{\text{água}}_{47,5^{\circ}\text{C}}} = \frac{570,63 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}}{988,86 \text{ kg/m}^3} = 5,77 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (18)$$

Então da equação 17 encontramos o número de Reynold igual a 67982.

Assim, como o número de Reynold é maior que 1000, então o escoamento da água é turbulento e fixando que o escoamento seja completamente desenvolvido e temperatura superficial constante, para simplificação de cálculos (INCROPERA, 2008, p. 324). Assim, tem-se que Nusselt é apresentado na equação 19.

$$Nu_D = \frac{h_a \cdot D_e}{k} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = 43,41 \quad (19)$$

onde,  $h_a$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção da água e  $k$  é o coeficiente de condutividade térmica da água apresentado na tabela 3. Assim, tem-se que.

$$h_a = \frac{k \cdot Nu}{D_e} = 1854,37 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (20)$$

Realiza-se o mesmo procedimento anterior para obter o coeficiente de transferência de calor por convecção dos gases de exaustão do fogão lenha  $h_g$ .

A velocidade média dos gases de exaustão do fogão a lenha ( $\bar{V}_g$ ) é calculada pela equação 21.

$$\bar{V}_g = \frac{\dot{m}_{gases}}{\rho_{gases_{180,5^\circ C}} \cdot A_{escoa\ Gases\ chaminé}} \quad (21)$$

onde,

$A_{escoa\ Gases\ chaminé}$  é a área pela qual os gases escoam na chaminé e é calculada pela equação 22, então tem-se que.

$$A_{escoa\ Gases\ chaminé} = \frac{1}{4} \pi \cdot (D_i^2 - D_e^2) = 9,85 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (22)$$

onde,  $D_i$  é o diâmetro interno da chaminé (113mm) e  $D_e$  é o diâmetro externo do trocador de calor (15mm).

O diâmetro hidráulico para uma região anular é calculado por meio da equação 23.

$$D_h = D_e - D_i = D_{\text{interno chaminé}} - D_{\text{interno do TC}} = 0,099m \quad (24)$$

De posse desses valores o resultado da equação 21 é informado na equação 25.

$$\bar{V}_g = \frac{0,00066kg/s}{\frac{1,1695kg}{m^3} \cdot 9,85 \cdot 10^{-3} m^2} = 0,0578 m/s \quad (25)$$

Calcula-se, agora o número de Reynold pela expressão 26.

$$R_e = \frac{\bar{V}_g \cdot D_h}{\nu} \quad (26)$$

Antes, deve-se calcular a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) dos gases em 180,5°C calculada pela equação 27.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_{gase_{180,5^\circ C}}} = 1,808 \cdot 10^{-5} m^2/s \quad (27)$$

Tem-se que  $R_e = 316,38$  então, como é inferior a 2300 o escoamento na região anular é, portanto, laminar.

Fixando escoamento completamente desenvolvido, o número de Nusselt  $Nu_i$  no lado do tubo do espaço anular é encontrado por meio da relação apresentada na equação 28.

$$\frac{D_i}{D_o} \quad (28)$$

onde,

$D_i$  é o diâmetro interno do tubo de cobre do trocador de calor.

$D_o$  é o diâmetro interno da chaminé.

Assim, da relação da equação 28, encontra-se o valor de 0,123 e  $Nu_i$  é encontrado por interpolação através da tabela 5. O qual o valor de

$Nu_i$  é 10,91. Então, o coeficiente de transferência de calor por convecção fora do tubo é  $h_g = \frac{(k_g \cdot Dh)}{Nu_i} = 3,15$ , onde  $k_g, Dh$  é o coeficiente de condutividade térmica dos gases e diâmetro hidráulico para o espaço anular.

**Tabela 5 – Número de Nusselt para escoamento laminar plenamente desenvolvido em regiões anulares circulares com uma superfície isolada e a outra a temperatura constante.**

$\frac{D_i}{D_o}$	$Nu_i$	$Nu_e$
0	-	3,66
0,05	17,46	4,06
0,10	11,56	4,11
0,25	7,37	4,23
0,50	5,74	4,43
~1,00	4,86	4,86

Fonte – Incropera (2008, p. 327 apud Kays, Perkins et al., Cap. 7, 1972)

Então, diante desse procedimento e da equação 14, obtém-se o resultado do coeficiente global de transferência de calor para o trocador em estudo.

$$Ue \cong 3,095 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (29)$$

Assim, se realizarmos o mesmo procedimento do item 3.3.4, porém agora com o coeficiente global de transferência de calor calculado, encontra-se a área necessária de troca térmica. Então, com auxílio de uma planilha elaborada no software Microsoft Excel<sup>®</sup> e com as mesmas condições iniciais, encontra-se o valor da área de transferência de calor do tubo de cobre, apresentado na equação 30.

$$A_{Tubo\ Calculado} = 0,021\ m^2 \quad (30)$$

Diante disso, compara-se com a área de transferência de calor no tubo de cobre fabricado. A qual esta é realizada pela equação 31.

$$A_{Tubo\ fabricado} = \pi \cdot D_e \cdot L \quad (31)$$

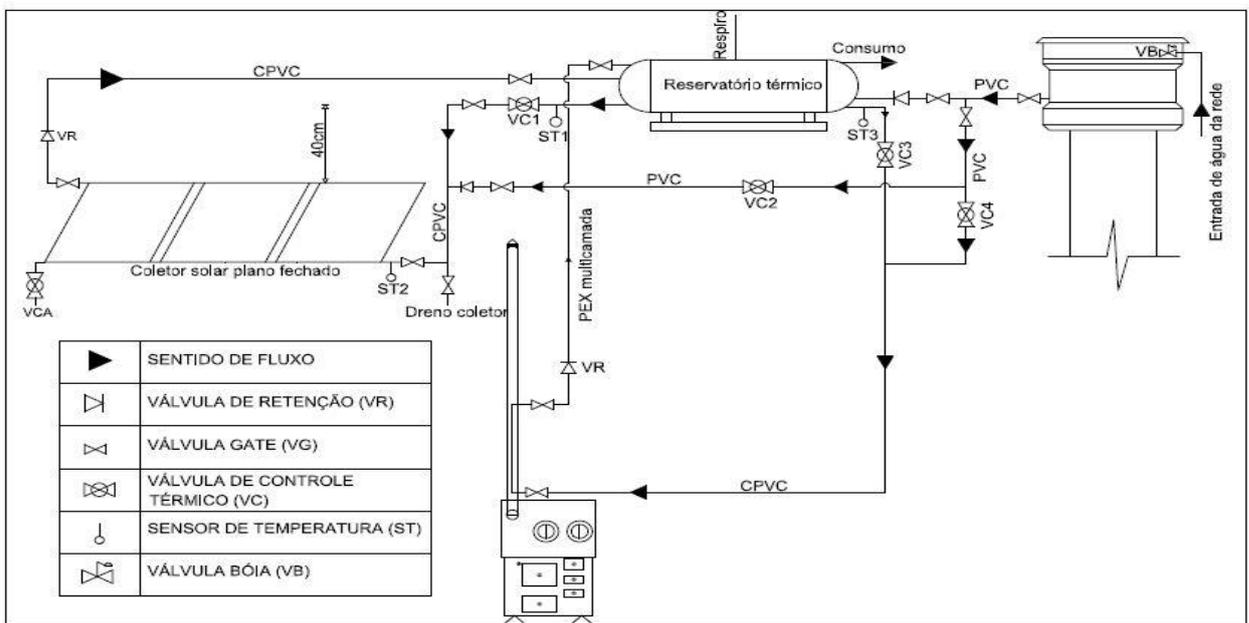
onde,  $D_e$  e  $L$  são o diâmetro externo do tubo de cobre (15mm) e comprimento do tubo de cobre (0,8m). Então, da equação 31 resulta-se no resultado

$$A_{Tubo\ fabricado} = 0,0377m^2.$$

### 3.3.6 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 01

Para o primeiro sistema, o princípio de funcionamento é por meio de circulação natural, e o reservatório de água quente está posicionado ao mesmo nível do reservatório de água fria o qual alimenta o reservatório térmico (figura 21). Para este sistema explica-se o funcionamento e suas vantagens e limitações.

Figura 21 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 01



Fonte – Autoria própria

O funcionamento deste sistema acontece da seguinte maneira. O reservatório de água fria é alimentado pela água da companhia de saneamento, este reservatório alimenta o reservatório térmico o qual os dois estão no mesmo nível, essa escolha dos dois reservatórios estarem ao mesmo nível possibilita um

controle de nível do reservatório térmico regulado e realizado por meio de uma válvula com comando de boia na caixa de água. Ao alimentar o reservatório térmico com água a temperatura ambiente a tubulação neste caminho é de PVC, pois não há características que restringem o uso desse material. Entretanto, nesse caminho deve conter válvula de retenção para restringir que água quente retorne para o reservatório de água fria.

A alimentação de água nos trocadores de calor, ou seja, coletor solar e trocador de calor no fogão a lenha acontece quando a água sai do ponto mais baixo do reservatório térmico passando por tubulações de CPVC. Entretanto, nesta parte do sistema, deve haver componentes que controlam e respeitam as características dos materiais e componentes presentes. Pois, quando o sensor de temperatura 1, ler que a água está acima de 70°C, este mesmo deve comunicar-se com a válvula de controle 1 fazendo que feche o circuito de alimentação, este bloqueio deve haver pois o material CPVC suporta com segurança temperaturas de até 70°C. Outro aspecto é que quando a água entra com temperaturas relativamente altas no coletor solar, o gradiente de temperatura será baixo ocasionando eficiência útil relativamente baixa. Sendo assim, no momento que a válvula de controle 1 fechar, a válvula de controle 2 deve ser acionada para abrir, para continuar alimentando os coletores com água, pois os coletores solares não podem ficar sem água, pois se ficarem na ausência de água, ocorrerá elevada temperatura no mesmo, ocasionando danos ao coletor solar por causa dos limites de temperaturas dos materiais que o compõem. No circuito de saída de água quente do coletor solar para o reservatório térmico, deve conter válvula de retenção para garantir que não ocorra o retorno de água quente para os coletores solares. Outra característica necessária para o sistema na parte solar é que necessita possuir um meio que controle o congelamento da água para as regiões frias ao qual no inverno a temperatura ambiente apresenta-se menor ou igual a zero grau Celsius. Para isso há duas possibilidades, a utilização de etileno-glicol e propileno-glicol ou por meio de válvula anticongelamento a qual drena a água quando o sensor de temperatura 2 ler que água que está entrando nos coletores solares está próximo de 0°C, isso deve haver para garantir a integridade do coletores solares.

O trocador de calor que está instalado na chaminé é alimentado através da água no reservatório térmico por meio de tubulação de CPVC, e a medida que recebe energia térmica dos gases de exaustão aquece a água, transportando-a para

o reservatório térmico por tubulação de PEX multicamada, esse material de tubulação suporta temperatura de serviço de até 95°C e de temperatura de pico 110°C (TIGRE, 2017, p. 06). Entretanto, se a água passar pelo sensor de temperatura 3 e o mesmo ler que a mesma está maior que 70°C a válvula de controle térmico 3 deve ser acionada para a posição fechada e ao mesmo tempo a válvula de controle 4 deve abrir-se para continuar alimentando o trocador de calor.

Assim sendo, o sistema 1 apresenta algumas vantagens e limitações, que são:

#### Vantagens

- Boa eficiência entre a parte solar como na parte do fogão;
- Comodidade para o usuário, pois sistema é totalmente controlado;
- Temperatura de armazenamento da água no reservatório térmico

relativamente alta.

#### Limitações

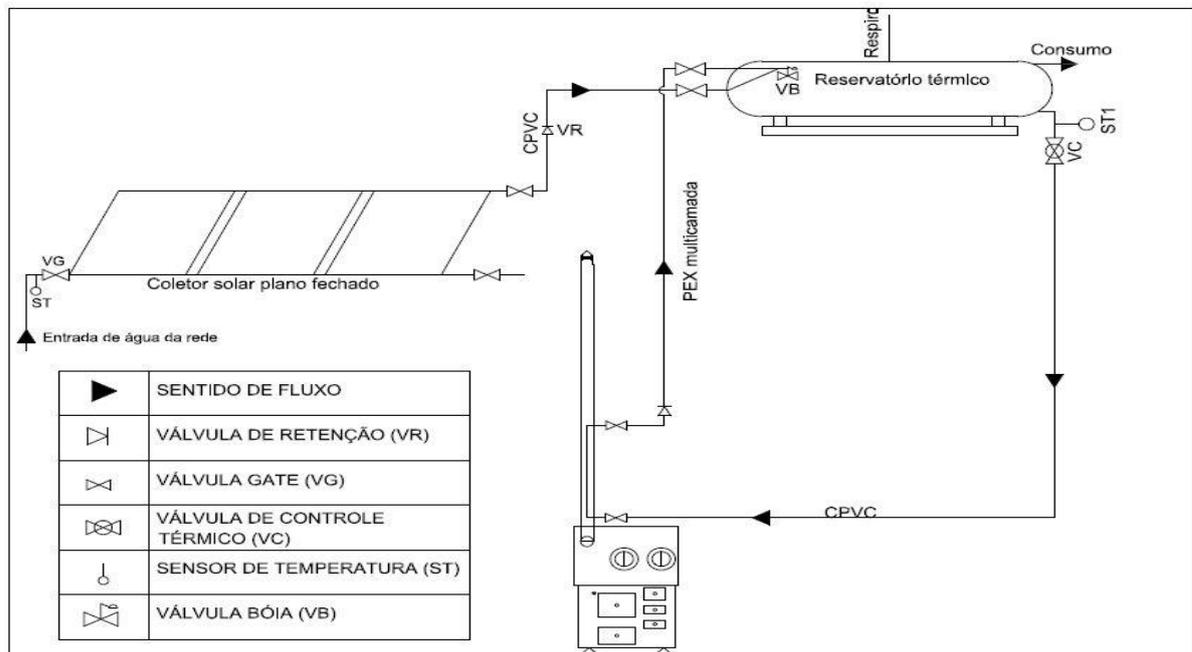
- Custo alto em função do sistema de controle (componentes);
- Controle tem de ser automatizado para evitar falhas e danos ao sistema e
- O sistema deve possuir um plano de manutenção para averiguar o correto

funcionamento das válvulas e sensores.

### 3.3.7 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 02

No sistema da Figura 22, estudou-se a possibilidade da alimentação da água de entrada nos coletores solares diretamente da rede de saneamento, assim à medida que os coletores recebem irradiação solar (energia térmica) a água será aquecida e direcionada para o reservatório térmico.

**Figura 22 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 02**



**Fonte – Autoria própria**

Entretanto, na entrada da água tem de haver um controle de alívio de pressão e vazão para que a água entre nos coletores com a pressão adequada a de trabalho do mesmo, bem como a vazão tem de ser relativamente baixa, para que o fluxo do fluido nos coletores absorva mais irradiação. Para este sistema, na parte solar não há necessidade de um sistema de sensores de temperaturas e controle de válvulas térmicas, pois não ocorrerá um ciclo entre reservatório térmico e coletores, o que ocasiona menores temperaturas de aquecimento da água.

Já no aquecimento no fogão a lenha a água é alimentada por meio do reservatório térmico, o qual recebe a energia térmica dos gases de exaustão e retorna ao reservatório térmico por circulação natural. Porém, se o sensor de temperatura 1 ler que a temperatura está maior que 70°C a válvula controle térmico fecha para garantir a integridade do CPVC e por consequência interrompe a circulação para o aquecimento do fogão a lenha. Essa interrupção não provocará danos ao trocador de calor fabricado em cobre foforoso DHP C12200 o qual suportará com segurança as temperaturas dos gases de exaustão.

Diante disso, este sistema 2, apresenta as seguintes vantagens e desvantagens.

### Vantagens

- Pré-aquecimento da água que flui no circuito do trocador de calor no fogão a lenha, aumentando a eficiência do sistema no fogão a lenha.

### Desvantagens

- Baixa temperatura de aquecimento da água no coletor solar por não possuir um ciclo entre coletor solar e reservatório térmico, por consequência baixa eficiência no sistema solar;

- Temperatura relativamente baixa de armazenamento no reservatório, quando o fogão está em modo off;

- Custo intermediário, pois há necessidades de apenas alguns componentes de controle e alguns materiais apresentam custo relativamente alto;

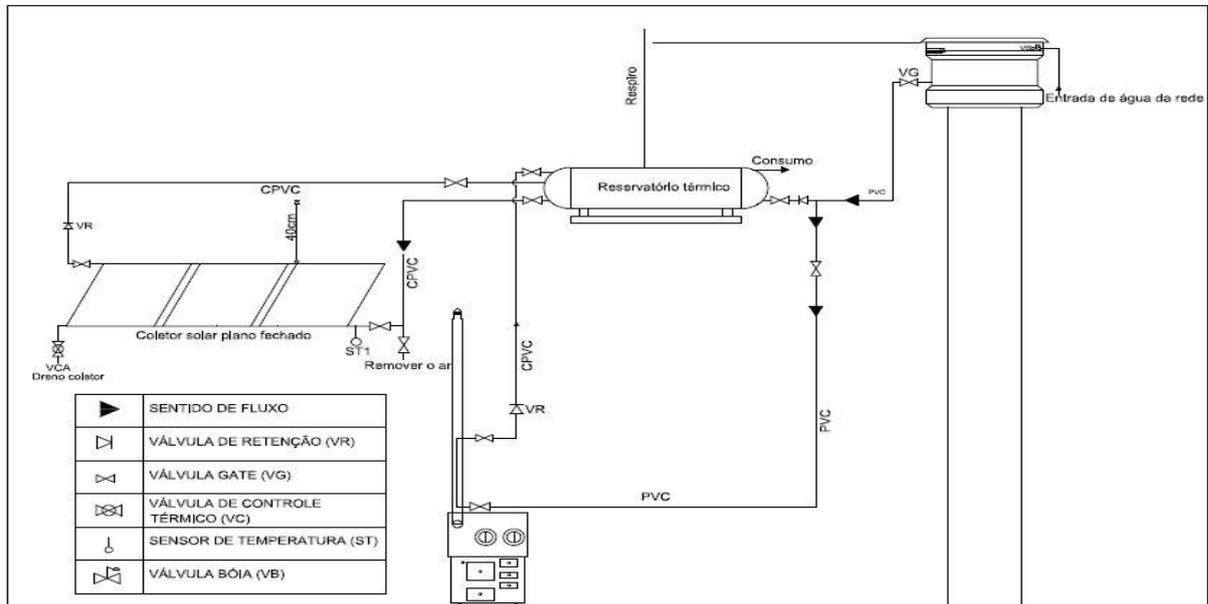
- Se o nível do reservatório térmico estiver no limite, e ao mesmo tempo mantiver aceso o fogo no fogão a lenha e o trocador de calor possuir água, ocorrerá aumento da temperatura e pressão no trocador de calor (TC), possibilitando danos ao mesmo e tornando-o inseguro;

- Possibilidade de congelamento nos coletores solar. Pois, como o sistema é alimentado pela água da rede de saneamento não pode fazer o dreno dos coletores, pois o sistema todo ficaria sem água, bem como não há possibilidade de adicionar um fluido refrigerante que impeça o congelamento.

### 3.3.8 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 03

O sistema 03, Figura 23, apresenta a possibilidade da instalação do reservatório térmico e caixa de água para alimentação do sistema em nível diferente, estudou-se essa escolha de desnível para situações onde a caixa de água está em uma altura mais elevada de onde será instalado o reservatório térmico.

Figura 23 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 03



Fonte – Autoria própria

Sendo assim, o controle de nível do reservatório térmico é realizado por meio do respiro, o qual deve ser instalado a uma altura de no mínimo 30 cm acima da tampa da caixa d'água.

Nesse sistema, a caixa d'água alimenta o reservatório térmico que o mesmo alimenta os coletores solares. A alimentação do fogão a lenha é realizada diretamente da caixa d'água. Porém, neste caso o circuito solar e do fogão a lenha não necessitam de válvulas de controle térmico, pois no circuito na parte solar a água descerá para alimentação dos coletores solares somente se a temperatura na linha da tubulação e nos coletores solar estiver acima da temperatura da água interna ao reservatório térmico. Entretanto, existe a possibilidade da água que sai dos coletores solares sair a temperaturas acima de 70°C, o qual poderá comprometer a integridade das tubulações de CPVC onde flui água quente.

Este sistema três apresenta um único modo de controle, o qual é destinado para quando o sensor de temperatura 1 identificar que a temperatura na entrada dos coletores estiver próxima de 0°C, assim a válvula de controle anti-congelamento abre para realizar o dreno e impossibilitar que a água presente nos coletores congele.

#### Vantagens

- Menor custo;
- Apenas um sistema de controle;
- Boa eficiência no circuito no fogão a lenha, pois a diferença de temperatura nesse circuito será alta;

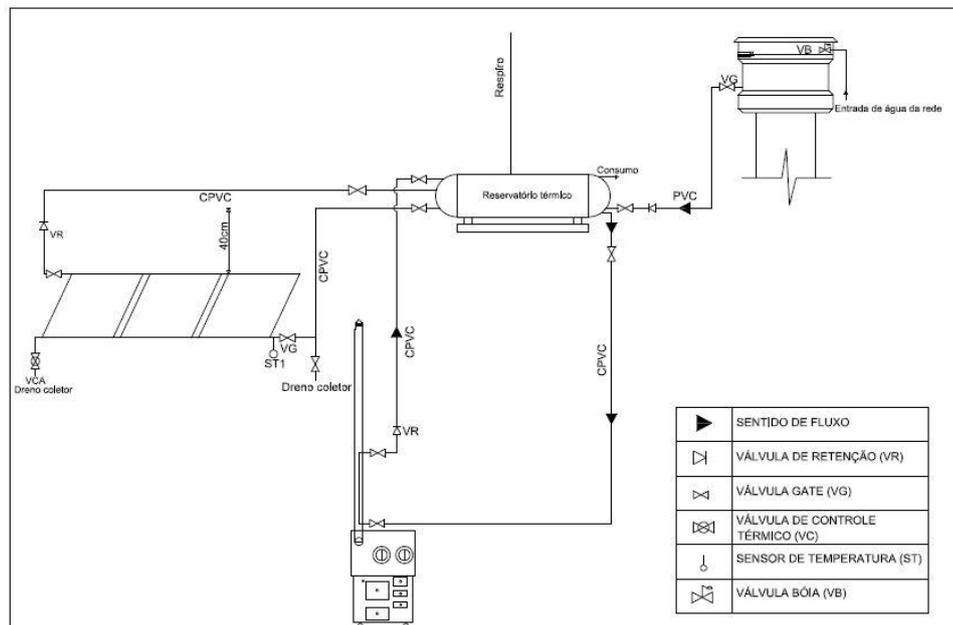
#### Desvantagens

- Intermediária eficiência global do sistema
- Possível baixa temperatura de saída no circuito do fogão a lenha, pois apresenta apenas um ciclo de troca de calor;
  - Se a água de alimentação do circuito solar estiver acima de 70°C prejudicará a tubulação e irá baixar a eficiência nesse circuito, pois começará a ceder energia térmica para o meio.
- Ausência de controle do sistema;
- Insegurança aos componentes da instalação;

### 3.3.9 Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 04

Para este sistema. Figura 24, o último a ser analisado, o funcionamento é praticamente da mesma maneira que o sistema três o qual a caixa d'água e o reservatório térmico estão em níveis diferentes para haver controle de nível ser realizado por meio do respiro.

**Figura 24 – Sistema misto de aproveitamento de energia térmica 04**



**Fonte – Autoria própria**

Para o sistema funcionar por meio da circulação natural (termossifão) o reservatório térmico está posicionado acima dos coletores solares. Assim, a caixa d'água abastece o reservatório térmico o qual alimenta os coletores solares e o trocador calor no fogão a lenha.

Nesse sistema, os dois circuitos, solar e fogão a lenha, não necessitam de controle de válvulas térmicas, pois os dois possuem tubulações de CPVC, a escolha da tubulação de CPVC para esse sistema ocorreu pelo fato desse material ter um custo de mercado menor em relação ao PEX multicamada, e como o admite-se que a temperatura de trabalho não passará de 70°C é mais adequado à utilização deste material.

Esse sistema necessita de controle de válvula anticongelamento quando instalado em regiões de clima frio. O funcionamento dessa válvula é realizado a partir de temperaturas configuradas para abertura e fechamento da válvula. Por exemplo, quando o sensor de temperatura 1 ler que a água está entrando nos coletores solares a temperatura menor de 4°C a válvula de controle abre-se para realizar o dreno e evitar o congelamento, assim a medida que retorna água mais

quente a válvula é configurada para fechar quando o sensor de temperatura ler que a água está próximo a 14°C.

#### Vantagens

- Boa eficiência no sistema;
- Custo intermediário;
- Comodidade ao usuário, pois existe controle anticongelamento;
- Segurança dos componentes;
- Temperatura de armazenamento relativamente alta, sendo assim, auxilia nas perdas de armazenamento;

#### Desvantagens

- Custo intermediário

### 3.3.10 Avaliação do sistema

De acordo com as configurações e os critérios apresentados nos sistemas acima, escolhe-se para estudo o sistema 4, devido as suas vantagens e desvantagens.

#### Considerações:

- Adotando uma temperatura de armazenamento de 50°C, pois essa temperatura é facilmente obtida por coletores solares vítreos.

- Considerando uma residência com 3 pessoas

- Considerando um banho diário com duração média de 12 min por pessoa

- Considerando uma vazão de 5 litros por minuto no chuveiro,

tem-se que.

$$Vol_{cons} = 3 \text{ pessoas} \cdot 5 \frac{l}{min} \cdot 12 \text{ min} = 180l \quad (32)$$

onde,  $Vol_{cons}$  é o volume de consumo de água em um dia em função dos banhos.

Como a temperatura da água em  $50^{\circ}\text{C}$ , o seu calor específico  $c_{p_{50^{\circ}\text{C}}} = 4,181 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$ , e a densidade da água  $\rho = 988,1 \text{ kg/m}^3$  (ÇENGEL, 2006, p. 854).

Então, como tendo o volume de água consumida em um dia, encontra-se a massa de água (equação 33).

$$m_{consumida} = 988,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,18\text{m}^3 = 177,85 \text{ kg} \quad (33)$$

Assim, determina-se a quantidade de energia necessária para aquecer a massa de água, pela equação 34.

$$Q = m_{consumida} \cdot c_{p_{50^{\circ}\text{C}}} \cdot \Delta T \quad (34)$$

onde  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a inicial ( $25^{\circ}\text{C}$ ) e a final que adotamos ( $50^{\circ}\text{C}$ ) facilmente obtida em coletores solares e no trocador de calor no fogão a lenha.

Tem-se que a energia necessária para essa quantidade de água em um dia é apresentada na equação 35.

$$Q = 18590 \text{ kJ} = 5,16\text{kWh} \quad (35)$$

Esta é a energia necessária para 03 banhos de 12 min por dia.

Analisando agora a quantidade de energia que um chuveiro gasta para aquecer a mesma quantidade de água, mesmo período de tempo (0,2h), embora em temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , pois, é a temperatura limite para uso humano.

A maioria dos chuveiros elétricos na região sul do Brasil tem potência na faixa de 7000 W (TABELA DE CONSUMO..., 2016) então, calcula-se o quanto um chuveiro dessa potência elétrica consome para aquela quantidade de tempo informada acima pela equação 36.

$$E = P \cdot \Delta T \quad (36)$$

onde  $E, P, \Delta T$  são a energia consumida, potência elétrica do chuveiro e tempo de uso, respectivamente.

Assim, da equação 36, tem-se que a energia consumida para um banho em um dia é de  $E = 1,4 \text{ kWh}$ .

Para três banhos diários logo tem-se  $4,2 \text{ kWh}$ . Para um mês de 30 dias, tem-se que a energia necessária é de  $126 \text{ kWh}$ .

Calculando o valor em reais para esse total de energia, o qual o valor do kWh de acordo com a Copel é de 0,40609 sem os impostos para um consumo superior de 220kWh (COPEL, 2017). Então, através da equação 37, obtêm-se o valor.

$$\text{Custo } ch = Et \cdot \text{tarifa} \quad (37)$$

onde  $\text{Custo } ch, Et, \text{tarifa}$ , são o valor do custo de consumo de energia do chuveiro em reais, energia total (126kWh) e tarifa de energia.

Tem-se que o valor destinado ao consumo de água quente por meio do chuveiro nas condições definidas acima é de R\$ 51,16.

Fazendo uma relação da quantidade de lenha necessária para a energia de  $Q = 5,16 \text{ kWh}$  (equação 35). Utiliza-se lenha com (40% de água) de Eucalipto, assim da equação 38, encontra-se a massa de lenha necessária para a energia calculada.

$$Q = m_{\text{lenha}} \eta \cdot PCI \quad (38)$$

onde, seu poder calorífico inferior (PCI) é de 2500 kcal/kg (10450 kJ/kg), peso específico 600 kg/m<sup>3</sup>, (RESÍDUOS FLORESTAIS, 2017) e de acordo com Borges (1994) adota-se que energia perdida pelos dos gases seja de 10% da lenha ( $\eta=10\%$ ), tem-se que a massa da lenha é

$$m_{lenha} = 17,79kg$$

Para a quantidade de massa de lenha utilizada, tendo o valor (R\$) do metro cúbico de eucalipto de R\$100,00/m<sup>3</sup>, calcula-se o custo de lenha em um dia para a energia e as condições definidas, pela equação 39.

$$Custo_{massa\ lenha} = \frac{m_{lenha}}{\text{peso específico}} \cdot \$ = \frac{11,79g}{600kg/m^3} \cdot \frac{R\$100}{m^3} = R\$2,96 \quad (39)$$

Para um mês (30 dias) tem-se o custo de R\$88,94 utilizando-se lenha para aquecimento da água para as condições definidas.

Dimensiona-se agora a parte solar, o qual de acordo com o método de dimensionamento da norma NBR 15569 para o volume de 180 litros por dia, irradiação solar média para a latitude e longitude de Pato Branco – PR de 4,33kWh/m<sup>2</sup> (CRESESB, 2017), orientação norte geográfico, inclinação dos coletores de 30°,  $Fr_{(\tau\alpha)_n} = 0,749$ ,  $Fr_{UL} = 6,074$  (INMETRO, 2016). Assim, tem-se uma área coletora de 1,58m<sup>2</sup> e o reservatório comercial mais próximo é de 200 litros. Os valores dos produtos, coletor solar de área coletora 2,0m<sup>2</sup> e reservatório térmico de 200 litros são, R\$2.360,00 (Americanas, 2017).

Como o chuveiro representa 20% da conta de energia de uma residência (Ghisi et al, p. 2007), é possível calcular o payback (retorno) para a instalação solar, através da equação 40.

$$Payback_{solar} = \frac{\text{Valor Total equipamento}}{\text{Valor da economia}} = \frac{R\$2.360,00}{R\$51,16} = 46,12\text{ meses} \quad (40)$$

Verifica-se que a instalação solar se pagaria em 3 anos e 8 meses. Após esse período o valor do consumo do chuveiro elétrico de R\$51,16 seria uma economia para a residência, ou seja, lucro.

Analisando-se o sistema misto, ou seja, aquecimento solar e fogão lenha, avalia-se o payback para junção dos sistemas. Onde, o custo do equipamento (trocador de calor) para aproveitar a energia dos gases de exaustão para as dimensões definidas no trabalho permeou-se na ordem de R\$150,00. Através da equação 41, tem-se o payback do sistema misto.

$$Payback_{misto} = \frac{\text{Valor equipamento solar e fogão a lenha}}{\text{Valor economia}} \quad (41)$$

Tem-se que o retorno do investimento no sistema misto de aproveitamento de energia térmica, seria de 4 anos e 1 mês.

### 3.4 RESULTADOS

Através do estudo e procedimento realizado, foi possível perceber a coerência dos resultados, o qual a área do tubo trocador de calor calculado (0,021m<sup>2</sup>) esteve na mesma ordem de grandeza da área do tubo trocador de calor fabricado (0,037m<sup>2</sup>). Então, caso as condições pré-definidas no trabalho sejam implementadas na prática, principalmente em regiões onde existem fogões a lenha, possivelmente resultariam nos resultados encontrados.

Para a parte solar, o qual o estudo não foi focalizado muito, pois existem diversas referências que relatam que as temperaturas em coletores solares de placa plana vitrificada chegam superior a 50°C, assim, foi possível realizar os cálculos para finalidade do estudo.

Também, nota-se como informado no referencial o utensílio doméstico, chuveiro elétrico, é o grande vilão na conta de energia elétrica em uma residência familiar, assim, caso o estudo realizado seja implementado, poderíamos obter reduções relativamente satisfatórias na conta de energia elétrica, proporcionando economia às famílias e trazendo renda extra, pois o valor da economia poderia ser destinada a outras finalidades, por exemplo, conta da água.

## 4 CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram alcançados, tendo em vista que diversas alternativas para recuperar a energia térmica desperdiçada do fogão a lenha para aquecer a água foram estudadas, tais como, serpentina na parte interna à câmara de combustão, serpentina em toda a superfície interna inferior da chapa condutora de calor, serpentina na parte posterior do fogão a lenha, serpentina na chaminé e etc. Assim, diante destas e outras alternativas, selecionou-se um trocador de calor de tubo concêntrico na chaminé, para recuperar a energia térmica presentes nos gases de exaustão do fogão a lenha e o circuito funcionar por meio da circulação natural (termossifão). Realizou-se o dimensionamento para as condições fixadas, demonstrando satisfatórios os resultados, onde o coeficiente global de transferência de calor ( $U_e \cong 3,095\text{w/m}^2.\text{C}$ ) foi aproximadamente igual ao coeficiente de transferência de calor por convecção externo ( $h_o = 3,15\text{w/m}^2.\text{C}$ ), isso se deu pelo fato de  $h_i \gg h_o$ , assim o coeficiente global de transferência calor é dominado pelo menor coeficiente de troca de calor quando a diferenças entre eles for relativamente grande.

Estudou-se também diversos sistema de aquecimento solar. Diante dos sistemas estudados, optou-se pelo sistema de aquecimento solar passivo direto, pois esse sistema apresenta custo relativamente menor e para condições de uso em residências familiares do sul do Brasil, torna-se adequado sua utilização.

O sistema misto de aproveitamento de energia térmica 04, apresenta-se como o mais viável, pois as vantagens mencionadas são consideravelmente adequadas aos perfis dos habitantes da região sul do Brasil, o qual o mesmo torna-se tecnicamente eficaz.

Nota-se, que a comparação entre chuveiro elétrico em relação ao aquecimento da água por meio do fogão a lenha, não é viável economicamente se for utilizado somente para aquecimento de água, visto que o aquecimento através do fogão a lenha é mais caro. Porém, como utiliza-se o fogão a lenha para outros fins, cocção de alimento e aquecimento do ambiente interno residencial, o sistema misto torna-se economicamente viável, pois utilizaram-se a energia perdida pelos gases

de exaustão para promover o aquecimento da água para o banho, reduzindo o custo de energia residencial.

Percebe-se que o aquecimento solar proporciona um retorno de investimento não muito demorado, assim, mostra-se satisfatório investir-se em sistemas de aquecimento solar para gerar economia no meio residencial como substituição ao chuveiro elétrico.

Constata-se que o sistema misto de aproveitamento de energia térmica para aquecimento de água em estudo apresentou-se retorno de investimento relativamente baixo (4 anos e 1 mês), tornando-se viável técnica e economicamente para residências do sul do Brasil.

Portanto, a execução deste sistema em residências que proporcionam a sua instalação resultariam em reduções de consumo de energia elétrica residencial e conseqüentemente alivia-se a matriz elétrica regional. Como informado no referencial teórico existem uma relativa quantidade de pessoas que usufruem da biomassa lenhosa para fins de cocção de alimento e aquecimento, sendo assim, torna-se viável a instalação destes trocadores de calor a fim de reduzir o consumo de energia elétrica destinado a aquecimento de água nesses locais.

Possíveis trabalhos futuros podem ser realizados para complementar este sistema misto de aproveitamento de energia térmica. Como por exemplo, pode-se estudar uma análise de viabilidade econômica detalhada, com o intuito de comparar diversos investimentos, existe possibilidade de analisar e comparar o fogão a lenha entre um ar condicionado para a estação do inverno.

Outra possibilidade é a implementação do estudo, ou seja, instalar o(s) sistema(s) e realizar a tomada de temperaturas iniciais e finais, tanto na parte do fogão a lenha quanto na parte solar, a fim de obter valores experimentais e desenvolver alternativas que vinculam a maior eficiência possível. Ainda, existe a possibilidade de modificar a geometria e/ou configuração do trocador de calor, ou seja, como por exemplo, colocar aletas no tubo para aumentar o coeficiente global de transferência de calor e a troca de calor e estudar as diferenças e/ou realizar comparações.

## REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2002. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 1ª edição. Brasília, 2002.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2008. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª edição. Brasília, 2008.

AMERICANAS. Disponível em: <  
[http://www.americanas.com.br/produto/6701799/coletor-solar-2-0x1-0m-cobre-komeco?condition=NEW&pfm\\_carac=Aquecedor+Solar&pfm\\_index=4&pfm\\_page=categori&pfm\\_pos=grid&pfm\\_type=vit\\_product\\_grid](http://www.americanas.com.br/produto/6701799/coletor-solar-2-0x1-0m-cobre-komeco?condition=NEW&pfm_carac=Aquecedor+Solar&pfm_index=4&pfm_page=categori&pfm_pos=grid&pfm_type=vit_product_grid)>. Acesso em 20/05/2017.

ARRUDA, L.B. **Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos**. 2004. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7198: Projeto e execução de instalações prediais de água quente**. Rio de Janeiro, 1993.

Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA). Disponível em: < <http://www.dasolabrava.org.br/>>. Acesso em: 14 de abril 2016.

BORGES, T.P.F. **Fogão a lenha de combustão limpa**. 1994. Não paginado. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPEL, novembro de 1999.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em 25/05/2017.

CENTRO NACIONAL DE REFERENCIAL EM BIOMASSA (CENBIO). Disponível em: < <http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>>. Acesso em: 14 de abril 2016.

COSTA, E. R. **Limitações no uso de coletores solares sem cobertura para sistemas domésticos de aquecimento de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia**. Disponível em:< <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fc28b22b01ad9182403257488005939bb>>. Acesso em:18 de maio de 2017.

COUTO, Carolina Meincke. **Estimativa do poder calorífico de madeira de acácia negra e eucalipto do município de Pelotas – RS**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia ambiental e sanitária). Centro de engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2014. 56p.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras**. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

ÇENGEL, Y. A., **Termodinâmica**; Tradução Katia Aparecida Roque. – 5 ed. – São Paulo: Mi McGraw-Hill, 2006.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE FEERAL DO PARANÁ. Disponível em: < <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>>. Acesso em: 02 de maio 2016.

DIOFFO, A. M. **Energia Solar e Desenvolvimento**. In: Seminário Alternativas de Desenvolvimento: Energia solar, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Economia e Planejamento: São Paulo, SEP, 1976. (Série Documentos, 6).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano Base 2014** / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Planted forests in sustainable forest management: a statement of principles, 2010. Disponível em <[www.fao.org.br/forestry/plantedforests](http://www.fao.org.br/forestry/plantedforests)>. Acesso em: 10/05/2016.

FERREIRA, M. C. C. **Consumo Doméstico de Biomassa Lenhosa e Emissões Atmosféricas na Cidade de Bragança**. Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Fundação SHELL 2007. "**Brazil market analysis for improved stoves**". Final Report, Stage 1, By Winrock International. April 2007.

GHISI, E., GOSCH, S., LAMBERTS, R. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4107-4120, 2007.

GOLDEMBERG, J. , LUCON, O. **Energias Renováveis: Um futuro Sustentável**. Revista Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T. **Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass**. In *Energy Policy* 32 (2004) 711–714.

GUARDABASSI, P. M.. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, 2006. São Paulo, 2006, p.123.

GUARIENTE, L. J. **Estudo comparativo do desempenho térmico de um sistema de aquecimento de água por energia solar com circulação natural e com circulação forçada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005. 158p.

HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Tradução Luiz Claudio de Queiroz Faria; revisão técnica Marco Aurélio dos Santos. – Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HUDSON, L.G.; MARKELL, J. **Solar technology**. Reston: Reston Publishing Company, 1985.

INCROPERA, P.F. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2012. 2013**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa\\_resultados.php?id\\_pesquisa=45](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=45)>. Acesso em: 10/05/2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas brasileiro de energia solar**. Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e Ricardo Rütger. – São José dos Campos: INPE, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água – Coletores solares 03/2016**.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA), 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy for cooking in Developing Countries, 2006**. World Energy Outlook, Chapter 15, pp. 419 a 445.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

KAMMEN, D. M. **From energy efficiency to social utility: Lessons from cookstove design, dissemination and use**. In Goldemberg J., Johansson T. B. (Editors), Energy as an instrument for socio economic development, UNDP, New York, 1995.

KAREKESI, S., Lata, K., Coelho, S. T., **Traditional Biomass Energy: Improving Its Use and Moving to Modern Energy Use**. In: Dirk Abmann, Ulrich Laumanns; Dieter Uh. (Org.). Renewable Energy - A Global Review of Technologies, Policies and Markets. 1 ed. London: Earthscan (2006), p. 231-261.

LAFAY, J.M.S. **Análise energética de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás**. 2005. 153p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIMA, J.B.A. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS**. 2003. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LÓPEZ, J. C. F.; SILVA, A. L. **Consumo residencial de lenha em Cachoeira de Santa Cruz, Viçosa-MG, Brasil**. Revista *Árvore*, v.24, n.1, p63-71. Viçosa-MG, 2000.

LUCON, O., Coelho, S. T., Goldemberg, J. (2004). **LPG in Brazil: lessons and challenges**. *Energy for Sustainable Development*. v. VIII. n. 3. September 2004.

MARTINI, P. R. R. **Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos**. 2009. Dissertação (mestrado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria: 2009

Martins, G. (1992). **Geladeira de Absorção Acionada por um Fogão a Lenha – um Estudo Teórico-Experimental**. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. 187 páginas.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balço Energético Nacional, 2015**. Rio de Janeiro. 2015.

World Energy Assessment - **Energy and the Challenge of Sustainability** - Overview. Disponível em: <<http://collections.infocollections.org/ukedu/uk/d/Jh1429e/6.4.html>>. Acesso em: 05 de maio de 2016.

NOGUEIRA, L. A. H. **Bioenergias e Sustentabilidade: nexos e métodos São Paulo**. Janeiro, 2005.

PEREIRA, E. M.D. et al. **Energia Solar Térmica**. In: Fontes Renováveis de Energia do Brasil. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003. p. 239 – 279.

PRADO, R. T. A. et al. **Levantamento do estado da arte: Energia solar**. Projeto – Tecnologias para construção habitacional mais sustentável, São Paulo, 2007.

PROCOBRE: INSTITUTO BRASILEIRO DE COBRE. **Qualidade em instalações de aquecimento solar: Boas práticas**. São Paulo, dezembro, 2009.

QUIRINO, W. F. et al. **Poder calorífico da madeira e de materiais línocelulósicos**. Revista da Madeira, n. 89, abril 2005, p. 100-106.

REGUEIRA, T. M. **Comparação entre a eficiência de dois modelos de fogão a lenha e seus impactos sobre ao desmatamento da caatinga**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Ciências Ambientais, Recife, 2010. 26p.

RODERO, P., Mira, A., 2012. **Handbook for the quality labe of domestic solid biofuls**. Avebiom.

SANGA, G. A. **Avaliação de impactos de tecnologias limpas e substituição de combustíveis para cocção em residências urbanas na Tanzânia**. UEC. 2004.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açucar para fins energéticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em ciências, programa: recursos florestais – USP). Piracicaba. 2012.

SERIVÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas do Brasil em resumo 2013: dados de 2007-2012**. Serviço Florestal Brasileiro. Brasília: SFB, 2013. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/consumo>>. Acesso em: 11/05/2016.

**SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS**. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/consumo>>. Acesso em: 11/05/2016.

SOLAR ENERGIA. Disponível em: < <http://pt.solar-energia.net/solar-termica>>. Acesso em 18/05/2016.

SOARES, T. S.; CARNERIRO, A. C. O.; GONÇALVES, E. O.; LELLES, J., G. **USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA**. Revista científica eletrônica de engenharia florestal - issn 1678-3867. Publicação científica da faculdade de agronomia e engenharia florestal de garça/faef. Ano iv, número, 08, agosto de 2006. Periodicidade: semestral.

**TABELA DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA CHUVEIROS ELÉTRICOS – INMETRO – 2016.**

TIGRE. Disponível em: <<http://www.tigre.com.br/tubo-aquathermr-3-m>>. Acesso em 10/05/2017.

VARELLA, F. K. O. M. **Tecnologia solar residencial: inserção de aquecedores solares de água no distrito de Barão Geraldo – Campinas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, São Paulo, 2004.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2009. Disponível em: <[http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas\\_trabalhos\\_utfpr.pdf](http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas_trabalhos_utfpr.pdf)>. Acesso em: 04 maio de 2016. (modelo de referência de material disponível na versão eletrônica).