

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ

ANGELO DIEGO DALBERTO JUVIAKI

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TROCA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR
ALTERNATIVO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

CASCATEL – PR

2018

ANGELO DIEGO DALBERTO JUVIAKI

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TROCA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR
ALTERNATIVO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Me. Eng. Roberson Roberto Parizotto

CASCADEL – PR

2018

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ
ANGELO DIEGO DALBERTO JUVIAKI

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TROCA TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR DE
BAIXO CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho apresentado no curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Roberson Roberto Parizotto.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Professor Me. Eng. Roberson Roberto Parizotto
Centro Universitário FAG
Engenheiro Mecânico



Professor Me. Eng. Sergio Henrique Rodrigues Mota
Centro Universitário FAG
Engenheiro Mecânico



Professor Me. Eng. Geovane Duarte Pinheiro
Centro Universitário FAG
Engenheiro de Controle e Automação

Cascavel, 19 de junho de 2018.

RESUMO

A utilização da energia solar como meio alternativo é bastante abrangente, e a partir disso, foi introduzida a questão de qual material teria o melhor custo benefício para construção de um modelo alternativo de coletor solar. Para realização deste estudo, foi construído um protótipo seguindo regras básicas de termodinâmica e transferência de calor, de modo que este modelo alternativo de coletor solar tenha um mínimo de componentes para que ele possa funcionar de forma satisfatória. Este protótipo foi então submetido a testes que apresentaram o poliuretano como material possuindo melhor custo-benefício no caso apresentado.

Palavras chave: termodinâmica, simplificado, condutividade térmica.

ABSTRACT

The use of solar energy as an alternative means is quite broad, and from that, the question was raised of which material would have the best cost benefit for the construction of an alternative model of solar collector. To accomplish this study, a prototype was built following basic rules of thermodynamics and heat transfer, so that this alternative model of solar collector has a minimum of components so that it can function satisfactorily. This prototype was then submitted to tests that presented the polyurethane as material having the best cost-benefit in the presented case.

Keywords: thermodynamics, simplified, thermal conductivity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do coletor solar	12
Figura 2 – Representação de um tubo	14
Figura 3 – Representação da incidência dos raios solares	17
Figura 4 – Material utilizado para montagem da caixa	21
Figura 5 – Primeira etapa da montagem	21
Figura 6 – Montagem do fundo da caixa	22
Figura 7 – Esquema para furação da caixa (medidas em mm)	22
Figura 8 – Apoios para o vidro	23
Figura 9 – Diagrama para furação dos MDF (medidas em mm)	23
Figura 10 – Fixação dos tubos	24
Figura 11 – Utilização das abraçadeiras plásticas	24
Figura 12 – Pintura	25
Figura 13 – Coletor montado para testes	27

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Calor transferido em um tubo	15
Equação 2 – Energia transferida por convecção	16
Equação 3 – Calor incidente por radiação	16
Equação 4 – Volume Específico.....	18
Equação 5 – Energia Transferida.....	18
Equação 6 – Vazão	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Condutividade Térmica.....	15
Quadro 2 – Resultados dos testes realizados	28
Quadro 3 – Resultados tratados.....	28
Quadro 4 – Energia transferida	29
Quadro 5 – Custo-benefício	30

LISTA DE NOTAÇÕES E UNIDADES

°C – Graus Celsius

h – Hora

kcal – Quilocaloria

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

l – Litro

m – Metro

m² – Metro quadrado

m³ – Metro cúbico

min – Minuto

mm – Milímetro

s – Segundo

W – Watt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3 JUSTIFICATIVA	11
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA	12
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	13
2.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	13
2.4 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	14
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO	14
2.6 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	15
2.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	16
2.8 RADIAÇÃO TÉRMICA	16
2.9 ABSORVIDADE, REFLETIVIDADE E TRANSMISSIVIDADE	17
2.10 VOLUME ESPECÍFICO	18
2.11 CÁLCULO DA ENERGIA TRANSFERIDA	18
2.12 VAZÃO DE UM FLUÍDO	19
3 METODOLOGIA	20
3.1 MATERIAIS	20
3.2 MÉTODO	20
3.2.1 Montagem do Coletor Solar	20
3.2.2 Realização do experimento	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5 CONCLUSÃO	31
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
ANEXO - TABELA	35
ANEXO 1 - Propriedades termodinâmicas da água	36

1 INTRODUÇÃO

A energia solar já é explorada em larga escala em todo o mundo por ser considerada uma energia renovável, de fácil acesso, além de ser gratuita. Essa energia é utilizada principalmente na produção de energia elétrica e aquecimento de água.

Na captação de energia solar para geração de energia elétrica são usados painéis fotovoltaicos, e para aquecimento de água são utilizados os coletores solares. A nível residencial, a utilização de painéis fotovoltaicos ainda é pequena devido ao custo mais elevado de todo o conjunto de aparelhos necessários. Já no caso dos coletores solares, seu custo é bem mais atrativo.

Apesar dos preços acessíveis, não é toda população que consegue investir nos coletores solares. Com isso, surgem soluções alternativas, com designs simples, que permitem construir coletores solares utilizando materiais de baixo custo.

Os coletores solares captam a energia solar, que é a radiação emitida pelo Sol, e transferem essa energia para água que passa por dentro da tubulação contida dentro do painel.

A energia transferida em um coletor solar pode ser quantificada utilizando conhecimentos de Termodinâmica e Transferência de Calor. O que possibilita saber antes mesmo de construir um coletor solar, dados como: quantidade de água aquecida, temperatura de saída da água, entre outros.

Neste trabalho, serão apresentados os conhecimentos necessários para criação de um coletor solar, além de avaliada a capacidade de troca térmica de um design específico de coletor solar montado utilizando três tubulações de materiais diferentes.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é desenvolver e avaliar um design específico de coletor solar utilizando materiais com capacidade de troca térmica diferentes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Montar um protótipo seguindo o design simplificado do coletor solar;
- Especificar as constantes e variáveis a serem utilizadas nos cálculos;
- Realizar testes para obter os dados necessários para calcular a capacidade de troca de calor de cada material.

1.3 JUSTIFICATIVA

O intuito desse estudo é avaliar a capacidade de aquecimento um design de coletor solar que segue os princípios da Termodinâmica e da Transferência de Calor, e verificar o desempenho para cada material, e com isso afirmar se a diferença entre o custo dos materiais pode ser justificada pelo seu desempenho.

Assim, é possível apresentar a melhor solução para quem quer construir seu próprio aquecedor solar e reduzir seus gastos com energia elétrica.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema central deste estudo é verificar se cada material possui um desempenho prático compatível com seu desempenho teórico, e se essa diferença de desempenho pode vir a justificar a diferença de custo nesta aplicação em específico.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo será focado apenas no coletor solar, desconsiderando o sistema de abastecimento, armazenamento e distribuição da água.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

Os coletores solares são utilizados para aquecer fluídos, normalmente água, e podem ser classificados em coletores concentrados e coletores planos.

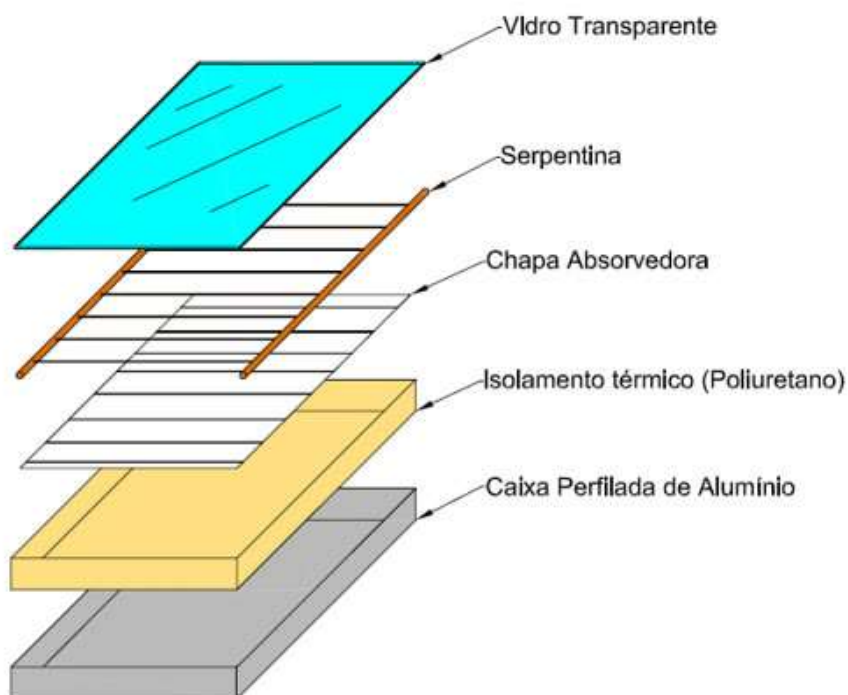
Os coletores concentrados utilizam dispositivos para concentrar a radiação solar que atinge uma determinada área, e focá-la em uma área menor, aumentando o aquecimento dessa área. Nesse tipo de aplicação, atinge-se temperaturas superiores a 100 °C, podendo chegar a 400 °C quando o fluído é utilizado para acionamento de turbinas para geração de energia elétrica.

Já os coletores planos, que utilizam somente a radiação incidente em sua própria área, trabalham em temperaturas mais baixa, geralmente em torno de 60 °C, e são mais utilizados para aquecimento de água para banho e água de piscinas.

Os coletores planos são utilizados em grande escala visando a redução do consumo de energia elétrica, ou gás, para aquecimento de água (PINHO, 2014).

A Figura 1 mostra como é composto um coletor solar comercial.

Figura 1 – Estrutura do coletor solar



O vidro tem a função de proteger o conjunto interno das intempéries, permitir a passagem da radiação solar, e reduzir a perda de calor do sistema pelo contato direto com o ar externo.

A serpentina contém o líquido que flui pelo sistema, e recebe o calor coletado pela chapa absorvedora, cuja função é maximizar a área de absorção de radiação solar.

O isolamento térmico reduz a troca de calor entre a chapa absorvedora e a caixa de contenção, reduzindo a perda térmica do sistema.

O sistema simplificado apresentado neste estudo não utiliza o isolamento térmico e a chapa absorvedora devido ao foco no desempenho dos materiais e não no desempenho do sistema.

2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida quando há a conversão direta da luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Essa conversão é feita pela célula fotovoltaica, que é fabricada em material semicondutor (PINHO, 2014).

O efeito fotovoltaico ocorre quando a luz solar incide sobre o material semicondutor, e os elétrons desse material tendem a mudar de camada de valência. Essa mudança gera um campo elétrico no material, e assim, gerando corrente elétrica.

Para a geração de energia elétrica, além do painel fotovoltaico, é necessário ainda sistemas de armazenamento e condicionamento de potência, e ambos ainda possuem custo elevado e vida útil inferior à dos painéis.

2.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica define a conservação da energia, de modo que ela não aparece ou desaparece simplesmente, e sim, é convertida em outra forma ou transferida de para outro local (VAN WYLEN, 2006).

Alguns exemplos destas transformações são a geração de energia elétrica pela conversão da energia cinética das turbinas hidroelétricas, ou a transformação da energia elétrica em energia luminosa nas lâmpadas.

2.4 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

A Segunda Lei da termodinâmica indica que a energia se move entre duas ou mais áreas onde há diferença de temperatura, e a energia sempre será transferida da área com maior temperatura para a área com menor temperatura, até o ponto onde ambas as áreas possuam a mesma temperatura (ÇENGEL, 2006).

É possível perceber esse fenômeno com uma xícara de café, que esfria quando deixado em cima da mesa, ou um suco gelado, que aumenta sua temperatura fora da geladeira.

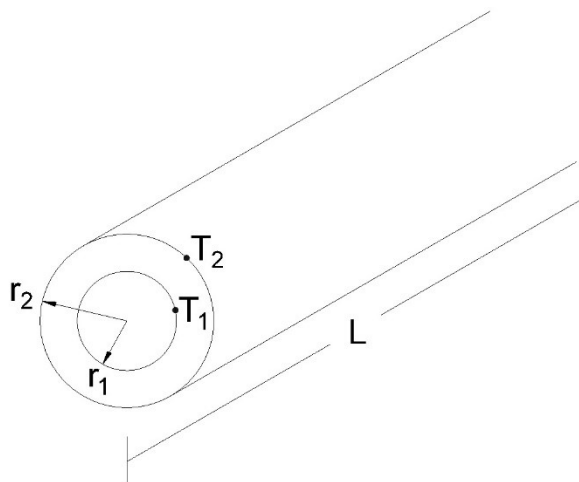
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

Trata-se da transferência de energia entre partículas de diferentes cargas enérgicas dentro de um mesmo meio, podendo ocorrer em líquidos, sólidos e gases (ÇENGEL, 2012).

É possível observar que se aquecermos uma ponta de uma faca, logo o cabo também irá apresentar um aumento de temperatura, e isso se dá pela condução de energia das partículas da ponta para as do cabo.

A Figura 2 ilustra as variáveis da Equação 1.

Figura 2 – Representação de um tubo



Fonte: O autor (2018)

A transferência de calor em um tubo pode ser calculada pela Equação 1.

$$\dot{q} = \frac{k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}{\left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right]} \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Onde:

$\dot{q}$: calor transferido por metro de tubo (W/m)

k : condutividade térmica do material (W/m.°C)

L : comprimento total do tubo (m)

r_1 : raio interno do tubo (mm)

r_2 : raio externo do tubo (mm)

T_1 : temperatura da superfície interna do tubo (°C)

T_2 : temperatura da superfície externa do tubo (°C)

2.6 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

É a capacidade que o material possui para transferir energia dentro de si, saindo de um ponto mais quente para um ponto mais frio. Cada material possui uma condutividade térmica diferente (ÇENGEL, 2012).

Essa diferença de condutividade fica visível ao compararmos dois matérias como aço e madeira, se aquecermos uma ponta de uma faca, o a outra ponta logo atinge uma temperatura similar, e no caso de um pedaço de madeira com o mesmo comprimento da faca, o calor de uma ponta levará muito tempo para chegar na outra. Assim é possível constatar que aço possui uma condutividade muito maior que a madeira.

Os valores da condutividade térmica dos materiais utilizados neste trabalho podem ser encontrados em (ÇENGEL, 2012) e (HAYNES, 2014). Sendo também estes valores apresentados na Quadro 1.

Quadro 1 – Condutividade Térmica

Material do tubo	Condutividade Térmica
Alumínio	237 W/m.°C
Cobre	401 W/m.°C
Polietileno	0,49 W/m.°C

2.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A convecção é o modo que a energia é transferida entre um sólido e um fluido que estão em contato, sendo este fluido líquido ou gás. Quanto mais rápido o fluido se move, e maior a diferença de temperatura entre os dois, maior será a transferência de energia (ÇENGEL, 2012).

O fenômeno da transferência de calor por convecção é bastante explorado nas áreas onde se deseja transferir calor para o ambiente ou retirar calor dele, como é o caso dos radiadores de automóveis, e aparelhos de ar condicionado.

A transferência de calor por convecção pode ser calculada pela Equação 2.

$$\dot{q} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde:

$\dot{q}$: calor transferido por convecção (kcal/h)

h : coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película (kcal/m².°C)

A : área da superfície (m²)

ΔT : diferencial de temperatura entre a superfície e o ambiente (°C)

2.8 RADIAÇÃO TÉRMICA

O espectro eletromagnético pode ser dividido em vários tipos diferentes de ondas como: raios X, luz visível, radiação térmica, micro-ondas e outros. A radiação térmica é uma forma de energia emitida pela matéria, onde essa radiação é emitida e absorvida, em certo grau, por todos os corpos que possuem temperatura superior ao zero absoluto (ÇENGEL, 2012).

A quantidade de energia incidente a uma superfície pode ser calculada utilizando a Equação 3.

$$\dot{q}_{rad} = K \cdot A \quad (3)$$

Onde:

$\dot{q}$: calor transferido por convecção (W)

K : taxa de incidência de radiação (W/m^2)

A : área plana projetada da superfície (m^2)

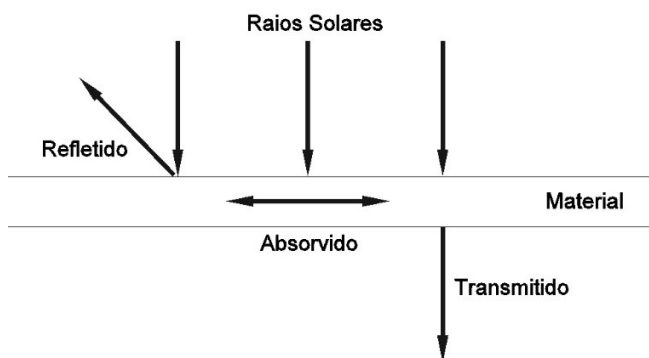
O valor de K varia de acordo com a região, época do ano e condições climáticas.

2.9 ABSORVIDADE, REFLETIVIDADE E TRANSMISSIVIDADE

A radiação que atinge os corpos que possuem volume pode ser absorvida por eles, aumentando sua energia interna e temperatura; refletida, de modo que essa energia volte para o meio; transmitida, fazendo com que essa energia passe através desses corpos; ou uma combinação de dois ou mais (ÇENGEL, 2012).

A Figura 3 ilustra o comportamento dos raios solares em um material translúcido.

Figura 3 – Representação da incidência dos raios solares



Fonte: O autor (2018)

Nos materiais opacos, ocorre absorção e reflexão dos raios solares. Em materiais translúcidos, ocorre também a transmissão. A percepção das cores do material é dependente da luz que ele reflete, quanto mais escuro é o material, haverá menor reflexão e maior absorção de raios solares.

Considerando que a luz do Sol contém radiação térmica, um vidro com película em uma janela irá absorver uma parte da radiação, refletir uma parte para fora, e transmitir o resto para o ambiente.

2.10 VOLUME ESPECÍFICO

É o volume que um sólido ou fluído ocupa, divididos por uma unidade de massa (VAN WYLEN, 2006).

Pode ser calculado pela Equação 4.

$$v = \frac{V}{m} \quad (4)$$

Onde:

v : volume específico (m³/kg)

V : volume ocupado (m³)

m : massa (kg)

2.11 CÁLCULO DA ENERGIA TRANSFERIDA

A energia transferida pelo aquecedor solar à água pode ser calculada utilizando a Equação 2.

$$Q = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (5)$$

Onde:

Q : energia transferida (kJ)

m : massa (kg)

h_2 : entalpia na temperatura de saída (kJ/kg)

h_1 : entalpia na temperatura de entrada (kJ/kg)

Os valores de entalpia para água são tabelados e podem ser encontrados no Anexo 1.

2.12 VAZÃO DE UM FLUÍDO

A vazão de um fluído é o volume do fluído que escoa por uma unidade de tempo (VAN WYLEN, 2006).

Pode ser calculada utilizando a Equação 3.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (6)$$

Onde:

$\dot{V}$: vazão (m³/s)

V : volume (m³)

t : tempo (s)

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Para a montagem do coletor e realização dos testes foram utilizados os seguintes materiais:

- 15 m de tubo de cobre com diâmetro externo de $\frac{1}{4}$ ";
- 15 m de tubo de alumínio com diâmetro externo de $\frac{1}{4}$ ";
- 15 m de mangueira de polietileno com diâmetro externo de $\frac{1}{4}$ ";
- 4 caibros de madeira de 40 x 60 mm, dois com comprimento de 600 mm e dois com comprimento de 680 mm;
- 10 ripas de 60 mm de largura com 680 mm de comprimento;
- Vidro com 3 mm de espessura e 600 mm de comprimento e largura;
- 3 placas de MDF com medidas 595 x 595 mm para afixar os tubos;
- Furadeira;
- Martelo;
- Pregos;
- Broca para madeira diâmetro 3,5 mm;
- Broca para madeira diâmetro 10 mm;
- 180 abraçadeiras plásticas com 2,5 x 100 mm;
- Spray de tinta cor preto fosco;
- Termômetro químico com escala interna -10 +110 °C;
- Recipiente milimetrado;
- Trena.

3.2 MÉTODO

3.2.1 Montagem do Coletor Solar

Neste projeto em específico, foram utilizados caibros de madeira com 40 x 60 mm, mas podem ser utilizadas outros materiais contanto que o espaço interno tenha

600 x 600 x 60 mm, de modo que seja possível acomodar os MDF com os tubos afixados e o vidro logo acima.

Neste caso foram usados dois caibros com 600 mm de comprimento e dois com 680 mm.

A Figura 4 ilustra os materiais utilizados na montagem da caixa.

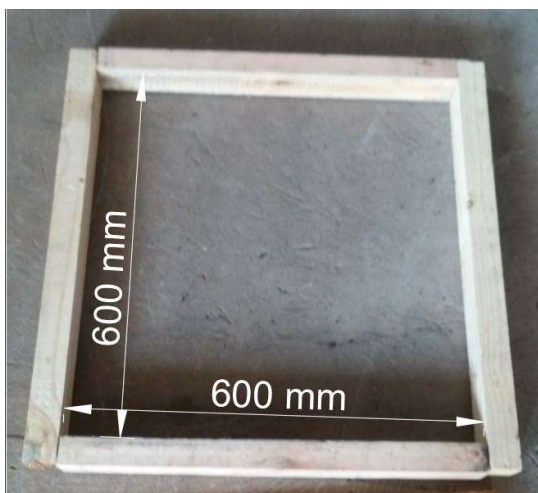
Figura 4 – Material utilizado para montagem da caixa



Fonte: O autor (2018)

A primeira etapa da montagem é pregar os quatro caibros de forma a manter o espaço interno em ambos os lados com pelo menos 600 mm e no máximo 605 mm, como é visto na Figura 5.

Figura 5 – Primeira etapa da montagem



Fonte: O autor (2018)

Após a montagem da estrutura inicial, foi montada a base da caixa, feita utilizando 10 ripas com 680 mm de comprimento e afixadas com dois pregos em cada uma de suas extremidades, como visto na Figura 6.

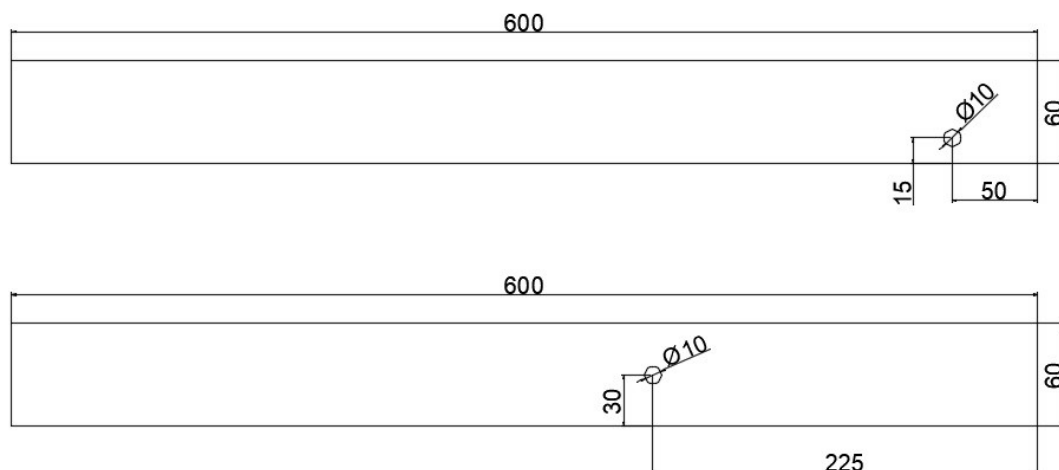
Figura 6 – Montagem do fundo da caixa



Fonte: O autor (2018)

A etapa seguinte foi furar dois caibros opostos, utilizando furadeira com broca de diâmetro 10 mm, seguindo o esquema da Figura 7.

Figura 7 – Esquema para furação da caixa (medidas em mm)



Fonte: O autor (2018)

Na sequência foram colocados 4 pregos na parte interior da caixa para apoiar o vidro. Foram deixados cerca de 5 mm de distância entre a cabeça do prego e o caibro. A Figura 8 ilustra a fixação dos apoios para o vidro.

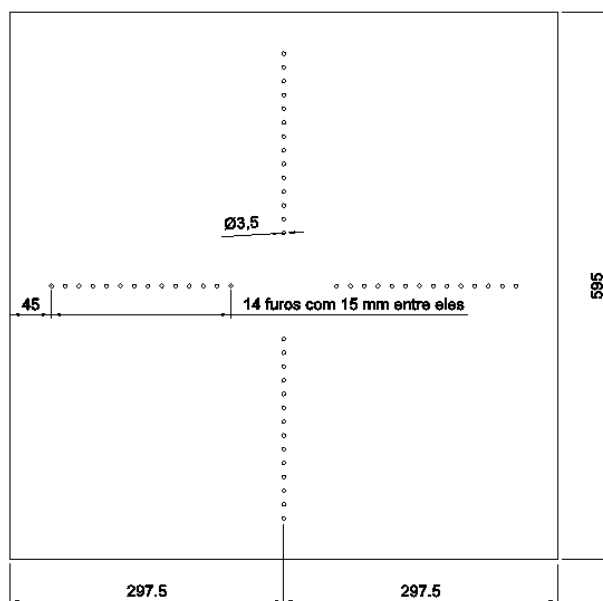
Figura 8 – Apoios para o vidro



Fonte: O autor (2018)

Para fixar os tubos nas placas de MDF, foram feitos diversos furos com diâmetro 3,5 mm utilizando uma furadeira e seguindo o diagrama da Figura 9 a seguir.

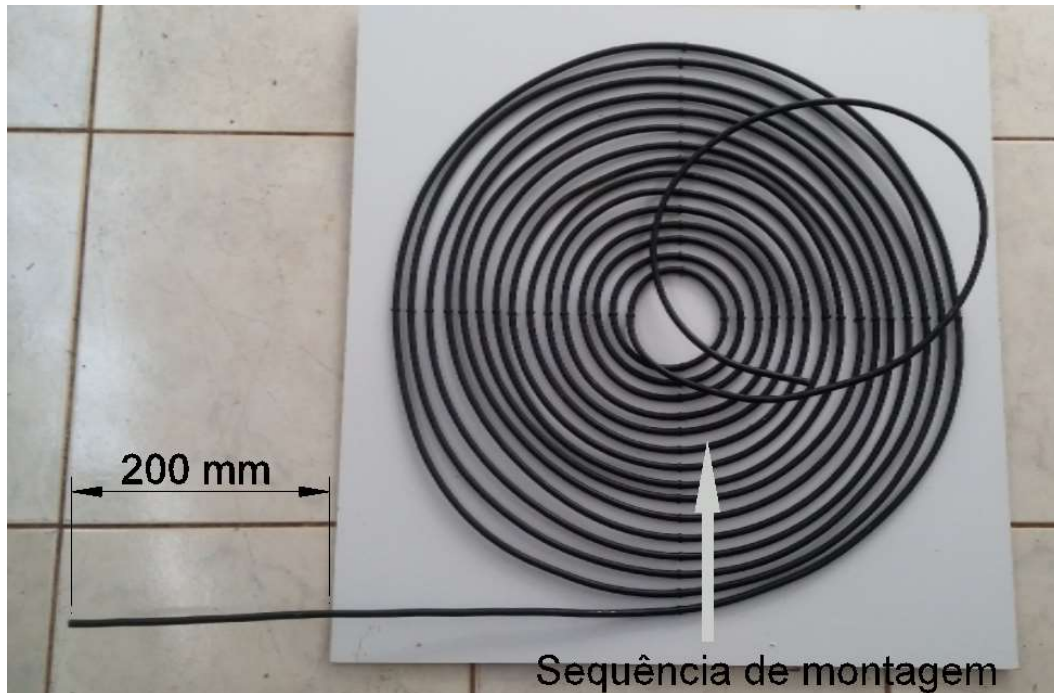
Figura 9 – Diagrama para furação dos MDF (medidas em mm)



Fonte: O autor (2018)

Na sequência, foram fixados os tubos nas placas de MDF, começando pelo anel mais externo e seguindo até o anel mais interno. No primeiro anel externo deixou-se cerca de 200 mm sobrando para fora do MDF, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Fixação dos tubos



Fonte: O autor (2018)

A fixação dos tubos foi feita utilizando as abraçadeiras plásticas de forma que a ponta mais fina passe por baixo do MDF, dê a volta por cima do tubo e volte pelo mesmo furo, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Utilização das abraçadeiras plásticas

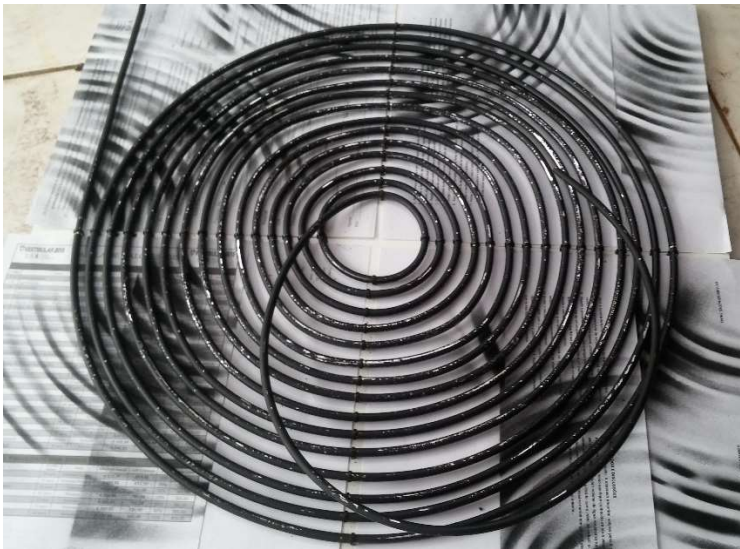


Fonte: O autor (2018)

A pintura dos tubos foi feita após a fixação dos mesmos nas placas de MDF. Foram colocados folhas de papel entre os tubos e o MDF para que a tinta tivesse contato somente com os tubos.

Com o spray de tinta cor preto fosco, foi aplicada tinta em toda área visível dos tubos de forma com que houvesse cobertura total da cor natural dos tubos. A Figura 12 ilustra o processo de pintura.

Figura 12 – Pintura



Fonte: O autor (2018)

3.2.2 Realização do experimento

Para realizar uma comparação entre os três materiais é necessário definir qual variável será utilizada nesta comparação. Tendo em vista que este estudo é baseado nos conhecimentos de Termodinâmica e Transferência de Calor, a variável escolhida é a quantidade de calor transferida por hora, onde o valor será em quilojoules por hora.

Durante a realização do experimento, as variáveis que podem ser controladas são apenas a temperatura de saída da água e a vazão de água, sendo que os dois serão inversamente proporcionais. Para melhor visualizar é possível combinar as equações 4 e 5.

$$v = \frac{V}{m} \quad (4)$$

Isolando m :

$$m = \frac{V}{v} \quad (7)$$

Aplicando a Equação 7 na equação 5:

$$Q = \frac{V}{v} \cdot (h_2 - h_1) \quad (8)$$

Onde v , h_1 e h_2 dependem da temperatura e podem ser obtidos no Anexo 1.

E V pode ser obtido através da Equação 6.

Como ainda existem duas variáveis, sendo elas temperatura e vazão, deve-se que transformar uma das duas em constante, e como o objetivo de um coletor solar é o aquecimento de água de forma a alcançar uma determinada temperatura, iremos definir a temperatura alvo como 10 °C acima da temperatura da água na entrada do coletor. Portanto tenho como variável a vazão d'água para cada um dos três tubos.

Vale lembrar que a temperatura de entrada da água é a temperatura da água da fonte pública de abastecimento, e, portanto, deve-se tentar manter as mesmas condições de fonte de água para os testes dos três tubos.

O procedimento para a coleta de dados seguiu os seguintes passos:

1. Colocar o MDF com o tubo dentro da caixa de madeira, posicionando corretamente as duas pontas do tubo nos furos feitos nas laterais da caixa;
2. Em local externo apoiar a caixa de forma que ela fique completamente plana e receba plena luz solar;
3. Verificar a temperatura da água da fonte de abastecimento público de água a ser utilizada;
4. Anotar o resultado do item anterior;
5. Conectar a ponta da espiral mais externa do tubo coletor à fonte de abastecimento público de água;
6. Abrir a torneira de forma a sair pouca água e aguardar 5 minutos;
7. Verificar a temperatura de saída da água e se necessário ajustar a vazão, para mais ou para menos, utilizando a torneira;
8. Repetir o processo anterior até que a temperatura de saída da água atinja 10 °C acima da temperatura de entrada;
9. Com o ajuda de um recipiente milimetrado e um cronômetro, verificar a quantidade de água que flui em um período de um minuto;

10. Anotar o resultado do item anterior;
11. Sem desligar a torneira, retirar a fonte de água do tubo e medir a temperatura da água proveniente da fonte de abastecimento para verificar se houve alterações. Se existirem alterações, deve-se reiniciar o procedimento a partir do item 3;
12. Anotar o resultado do item anterior;
13. Retirar o MDF com o tubo e colocar outro MDF com material diferente repetindo a sequência a partir do passo 1. Realizar este processo até que os três tubos sejam testados.

A Figura 13 ilustra o coletor solar montado, pronto para iniciar os testes.

Figura 13 – Coletor montado para testes



Fonte: O autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes foram iniciados às 11 horas, com céu limpo e nuvens esparsas, onde a temperatura ambiente era cerca de 19 °C. O local utilizado para os testes recebia incidência direta de luz solar e não havia correntes de ar. Os testes foram finalizados às 13 horas.

Os testes apresentaram os seguintes resultados, mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados dos testes realizados

Material do tubo	Temperatura de entrada da água	Temperatura de saída da água	Vazão de água
Alumínio	25 °C	35 °C	0,26 l/min
Cobre	25 °C	35 °C	0,30 l/min
Polietileno	25 °C	35 °C	0,20 l/min

Para calcular o calor transferido, foram utilizados valores baseados em horas para dar maior grandeza aos resultados. Além disso, para fins de cálculo, os valores da vazão serão convertidos em m³.

Considerando que 1 litro é igual a 1/1000 m³, e uma hora contém 60 minutos, a vazão de cada um dos itens deve ser multiplicada pelo fator de 60/1000, onde a unidade de medida da vazão deixa de ser l/min e passa a ser m³/h.

Os resultados desta conversão estão dispostos no Quadro 2. Também no Quadro 2, foram inseridos os valores da entalpia da água no estado de líquido saturado (h_l) nas temperaturas de entrada e saída da água no coletor solar. Os valores da entalpia foram retirados da tabela do Anexo 1.

Quadro 3 – Resultados tratados

Material do tubo	Entalpia da água a 25 °C	Entalpia da água a 35 °C	Vazão de água
Alumínio	104,87 kJ/kg	144,66 kJ/kg	0,0156 m ³ /h
Cobre	104,87 kJ/kg	144,66 kJ/kg	0,0180 m ³ /h
Polietileno	104,87 kJ/kg	144,66 kJ/kg	0,0120 m ³ /h

Também do Anexo 1, foi encontrado o valor do volume específico da água no estado de líquido saturado. Devemos utilizar o volume específico na temperatura de saída da água no coletor solar pois foi onde a vazão foi medida.

O valor encontrado para o volume específico da água foi $0,001006 \text{ m}^3/\text{kg}$. Tendo os valores acima, é possível então, utilizando a equação 8, encontrar os valores da energia transferida em cada tubo, sendo os resultados apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Energia transferida

Material do tubo	Energia transferida
Alumínio	617,02 kJ/h
Cobre	711,95 kJ/h
Polietileno	474,63 kJ/h

Observando a Equação 1, entende-se que o valor da condutividade térmica dos materiais teria a maior influência sobre os resultados do teste, já que as outras variáveis seriam as mesmas para os três tubos.

Analisando o Quadro 1 apresentado anteriormente, que contém os valores para condutividade térmica, é possível inferir que o valor da energia transferida utilizando o tubo de cobre deveria ser quase o dobro da energia transferida no tubo de alumínio, e mais de mil vezes a energia transferida no tubo de polietileno. Contudo, na prática esses valores não apresentaram os resultados esperados.

O tubo de cobre apresentou um desempenho apenas 1,15 vezes superior ao tubo de alumínio e 1,5 vezes superior ao tubo de polietileno.

Isso mostra que outros parâmetros influenciam no desempenho prático dos materiais, como a escala do projeto, ou as perdas de calor mesmo que tenha sido utilizado as mesmas condições e dimensões nos três testes.

Considerando o ponto de vista do custo-benefício de cada material, teremos o resultado apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Custo-benefício

Material do tubo	Custo total	Custo por kJ/h
Alumínio	R\$ 60,00	R\$ 0,0972
Cobre	R\$ 95,00	R\$ 0,1334
Polietileno	R\$ 45,00	R\$ 0,0948

O Quadro 5 indica que o material com melhor custo-benefício neste estudo em específico é o polietileno. Mesmo apresentando a menor taxa de transferência de energia, seu menor custo viabiliza a sua utilização.

5 CONCLUSÃO

Considerando que todas as medidas dos materiais e as condições do teste foram mantidas constantes, e que as únicas diferenças foram as características dos materiais dos tubos, ao analisar seus coeficientes de condutividade térmica é possível estipular que o material que deveria apresentar o melhor desempenho seria o cobre com $401 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, alumínio na sequência com $237 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, e por último o polietileno com $0,49 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Os testes demonstraram que os materiais realmente apresentaram desempenho na ordem estipulada. Entretanto os resultados numéricos não foram compatíveis com os valores de seus coeficientes de condutividade térmica. Os valores para energia transferida foram de $711,95 \text{ kJ/h}$ para o cobre, $617,02 \text{ kJ/h}$ para o alumínio, e $474,63 \text{ kJ/h}$ para o polietileno. Analisando a Equação 1 e considerando que para os três materiais a única diferença é o coeficiente de condutividade térmica, os valores da energia transferida deveriam ser proporcionais ao coeficiente de condutividade térmica, sendo o cobre quase o dobro do alumínio e quase mil vezes o polietileno. Contudo, são observadas diferenças bem menores entre eles. Pode-se concluir, então, que há outros fatores que influenciam o desempenho de troca térmica destes materiais no modelo de coletor solar utilizado nos testes.

Deve ser ressaltado que o material com melhor custo-benefício neste teste foi o polietileno, que mesmo sendo o que apresentou menor calor transferido, também possui o menor custo total, resultando em um custo de R\$ 0,0948 por kJ/h , onde o cálculo foi feito dividindo o valor da energia transferida pelo valor comercial do tubo – os valores para cobre e alumínio foram R\$ 0,1334 por kJ/h e R\$ 0,0972 por kJ/h respectivamente. Porém, esse resultado não deve ser tomado como regra, já que os materiais aplicáveis a este teste em específico foram poucos devido às dimensões selecionadas, além de estarmos optando por tubos com maior maleabilidade para montagem do coletor solar. Caso houvesse a utilização de tubos rígidos e com maiores diâmetros, existiria uma diversidade maior de materiais disponíveis, além de outros tipos de construção do próprio coletor solar.

Nas condições utilizadas neste trabalho, o coletor solar trabalhando de forma independente não possui capacidade suficiente para substituir um modelo comercial. Também vale ressaltar que os coletores solares comerciais utilizam a recirculação da água, devido à diferença de densidade entre a água quente e a água fria, para aumentar

e manter a temperatura da água armazenada, diferente do ocorrido no experimento onde a água circulava apenas uma vez pelo sistema.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um trabalho similar utilizando tubos com bitolas maiores e outros materiais;
- Verificar a influência da chapa de absorção no coletor solar;
- Verificar a influência da cor do coletor solar;
- Realizar um estudo com um aquecedor completo que utiliza a recirculação de água por diferença de densidade para aumentar a temperatura da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. **Termodinâmica**. 5.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. 4.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

HAYNES, W. M.; LIDE, D. R.; BRUNO, T. J. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**, 95th Edition. Boca Raton: CRC Press, 2014.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CRESEB Cepel, Rio de Janeiro, 2014.

TEMPERSOL – AQUECEDORES SOLARES. **Coletor Solar**. Disponível em <<https://www.tempersol.com.br/produtos/coletor-solar>> acesso em: 15 de mar. 2018.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

ANEXO - TABELA

ANEXO 1 - Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1 Água saturada: tabela em função da temperatura												
Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v _l	v _v	u _l	u _h	u _v	h _l	h _h	h _v	s _l	s _h	s _v
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857