

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

**ANÁLISE DO EFEITO DE ALTERAÇÕES DE PARÂMETROS DE PROJETO
EM COLETORES SOLARES PLANOS PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

GILDÁSIO DE PAULA SILVA

São Carlos, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

**ANÁLISE DO EFEITO DE ALTERAÇÕES DE PARÂMETROS DE PROJETO
EM COLETORES SOLARES PLANOS PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA**

GILDÁSIO DE PAULA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil do centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Orientador: Professor Dr. Douglas Barreto

São Carlos, 2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586a Silva, Gildásio de Paula
Análise do efeito de alterações de parâmetros de projeto em coletores solares planos para aquecimento de água / Gildásio de Paula Silva. -- São Carlos : UFSCar, 2016.
89 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.

1. Coletor solar. 2. Desempenho. 3. Simulação. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gildásio de Paula Silva, realizada em 29/08/2016:

Prof. Dr. Douglas Barreto
UFSCar

Profa. Dra. Elizabeth Marques Duarte Pereira
Una

Prof. Dr. Jose Carlos Paliari
UFSCar

A Deus em primeiro lugar, pois sem ele não teria chegado a lugar algum.

À minha família que nos momentos difíceis sempre esteve ali para me apoiar.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me ajudaram nessa batalha que foi este trabalho, à minha família que sempre esteve ao meu lado, aos professores que me motivaram e me deram forças nessa longa jornada, aos amigos que em todos os momentos estiveram ali dispostos a colaborar e dar o seu apoio.

Gostaria de dedicar esse trabalho a Deus que foi quem me deu o conhecimento e o instinto do questionamento, os quais utilizei para poder chegar até este momento.

Em especial, quero agradecer a minha esposa que direta e indiretamente esteve presente e me apoiando e nunca me deixou perder a coragem e o foco no resultado que planejamos para nosso futuro. Obrigado por sempre estar ao meu lado em todas as horas e momentos.

Ao meu orientador, amigo e professor Dr. Douglas, maravilhosa pessoa que nunca deixou de acreditar no meu potencial e que sempre esteve disposto a me conceder aquela palavra amiga e as vezes aquela palavra dura, mas que no fundo era para que possamos chegar até esse momento, muito obrigado Douglas sem você e seu auxílio esse momento nunca seria possível.

Aos meus amigos, são tantos que não posso aqui descrever todos mas sei que eles sabem que nesse trabalho tem um dedo de cada um, seja nas inúmeras correções que eles fizeram deste texto aos momentos de descontração que eles me proporcionaram para que nossa jornada fosse a melhor e a mais prazerosa em todas as situações.

A UFSCar e seus colaboradores, que foram tão solícitos em todos os momentos que necessitei do auxílio deles. Ao PPGE Civ, que sempre esteve ali fornecendo consistência e embasamento teórico ao qual esse texto demandou para a sua execução. A todos os técnicos que me auxiliaram na execução deste trabalho.

A Soltec Aquecedores, empresa que forneceu e construiu os equipamentos utilizados neste trabalho, um obrigado especial aos amigos e parceiros do time de colaboradores que me auxiliaram em todos os passos que precisei dar na construção dos equipamentos ao tempo que eles despenderam. A esses somente tenho que dizer um muito obrigado por tudo, vocês foram extraordinários e fenomenais em tudo.

Ao IPT em especial ao professor Dr. Daniel Setrak e seu time de colaboradores que de maneira super prestativa me disponibilizou o seu laboratório para a execução dos ensaios necessários, num momento onde a agenda de ensaios aparentava não ter fim eles gentilmente me cederam a sua estrutura para que eu pudesse utiliza-la. Muito obrigado mais uma vez, pois sem a ajuda de vocês esse trabalho poderia não ter acontecido.

Gostaria de citar aqui, algumas outras pessoas que também me ajudaram a chegar neste momento. A professora Dra. Elizabeth Marques, amiga que desde minha graduação esteve ao meu lado me fornecendo todo o conhecimento necessário e sempre deixando aquele gosto de quero mais, o qual me trouxe até essa vitória. Ao engenheiro do GREEN Thiago que no início deste trabalho me auxiliou em diversos momentos esclarecendo dúvidas e me fornecendo algumas dicas de como caminhar com esse trabalho. Ao mestre Paulo Ara do IPT outra pessoa admirável que também me auxiliou em diversos momentos deste trabalho fornecendo referências e esclarecendo dúvidas em diversos aspectos da pesquisa.

A todos, o meu muito obrigado e vocês estarão sempre no meu coração.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar os parâmetros de fabricação dos coletores solares, passíveis de modificação, resultando na melhoria do desempenho. Foi feita uma discretização dos componentes do coletor solar identificando os pontos passíveis de melhoria, a importância de cada um e a sua influência no funcionamento do coletor como um todo. Essas modificações foram simuladas por meio de um modelo matemático, a saber: a posição da superfície absorvedora; a distância entre superfície absorvedora e cobertura transparente; a relação entre espessura e largura da superfície absorvedora. Foi utilizado o software EES (Engineering Equation Solver) para realizar a simulação. O modelo que foi implementado no EES foi um coletor solar plano de 1,0 m². Após a realização da simulação foram construídos três protótipos, sendo um com características comuns aos coletores disponíveis no mercado e chamado de *Padrão* e mais dois fabricados com as modificações propostas. Todos os modelos foram enviados para ensaio de Eficiência Térmica em laboratório credenciado pelo INMETRO. Os resultados da simulação apontaram que a mudança na posição da superfície absorvedora evidencia um acréscimo de 0,11 m² na área absorvedora do coletor; A simulação computacional indicou que com o aumento na distância entre a superfície absorvedora e a cobertura transparente nos coletores gerou um aumento na perda de calor pelo topo do coletor de 0,058 W/m²K; A troca da espessura e largura da superfície absorvedora gerou uma redução na eficiência de 94% no coletor padrão para 90% no protótipo proposto. A combinação entre a posição de montagem e a distância entre superfície absorvedora e cobertura evidenciou-se um incremento de 5% na produção de energia desse coletor. Para os resultados dos ensaios laboratoriais foi observado que o protótipo com as modificações na espessura e largura da superfície absorvedora apresentou uma queda no seu desempenho e o protótipo com a combinação da posição de montagem com a distância entre superfície absorvedora não apresentou uma melhora no seu desempenho, o que contrariava o modelo matemático e que cuja explicação se deve a incerteza de $\pm 2,92\%$ da linha de produção da empresa fornecedora dos protótipos.

Palavras-chave: Coletor solar. Desempenho. Simulação.

ABSTRACT

The objective of this work is to present the manufacturing parameters of the solar collectors, subject to modification, resulting in improved performance. A discretization of the components of the solar collector was made, identifying the points that could be improved, the importance of each one and its influence on the operation of the collector as a whole. These modifications were simulated by means of a mathematical model, namely: the position of the absorber surface; The distance between the absorber surface and transparent cover; The relationship between thickness and width of the absorber surface. The EES (Engineering Equation Solver) software was used to perform the simulation. The model that was implemented in the EES was a flat solar collector of 1.0 m². After the simulation was carried out, three prototypes were built, one with characteristics common to the collectors available in the market and called the Standard and two more manufactured with the proposed modifications. All the models were sent to the Thermal Efficiency test in a laboratory accredited by INMETRO. The results of the simulation indicated that the change in the position of the absorber surface shows an increase of 0.11 m² in the absorber area of the collector; The computational simulation indicated that the increase in the distance between the absorber surface and the transparent cover in the collectors generated an increase in heat loss from the top of the collector of 0.058 W / m²K; The change of the thickness and width of the absorber surface generated a reduction in the efficiency of 94% in the standard collector to 90% in the proposed prototype. The combination of the mounting position and the distance between the absorber surface and the cover showed a 5% increase in the energy production of this collector. For the results of the laboratory tests it was observed that the prototype with the modifications in the thickness and width of the absorber surface showed a decrease in its performance and the prototype with the combination of the mounting position with the distance between the absorber surface did not show an improvement in its performance , Which was contrary to the mathematical model and whose explanation is due to the uncertainty of $\pm 2.92\%$ of the production line of the company supplying the prototypes.

Key words: Solar collector. Performance. Simulation.

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento

DaSOL – Departamento Nacional de Aquecimento Solar

EES – Engineering Equation Solver

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

OCP – Organismos de Certificação de Produtos

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição percentual do uso do aquecimento solar por setor.	13
Figura 2 – Componentes de um Coletor Solar Fechado.	16
Figura 3 – Superfície absorvedora conduzindo o calor absorvido para o fluido de trabalho. ...	18
Figura 4 – Condução de Calor.	21
Figura 5 – Transferência de calor por convecção.	22
Figura 6 – Exemplo de radiação.	23
Figura 7 – Diagrama esquemático dos fluxos de energia no coletor solar.	24
Figura 8 – ENCE do PBE no sistema voluntário de etiquetagem.	26
Figura 9 – ENCE do PBE no sistema compulsório de etiquetagem.	27
Figura 10 – Posicionamentos da aleta.	28
Figura 11 – Gráfico da variação da perda de calor pelo topo do coletor em função do espaçamento da superfície absorvedora.	34
Figura 12 – Gráfico da eficiência da superfície absorvedora versus combinação da largura e espessura.	35
Figura 13 – Fluxograma das atividades deste trabalho.	39
Figura 14 – Coletor padrão.	44
Figura 15 – Protótipo I.	45
Figura 16 – Protótipo II.	46
Figura 17 – Exemplos de fator de contato entre placa absorvedora e serpentina.	48
Figura 18 – Área coletora nos posicionamentos da aleta ou dos tubos.	49
Figura 19 – Processos de confecção da aleta.	53
Figura 20 – Confecção do conjunto absorvedor.	55
Figura 21 – Confecção da caixa externa do coletor.	57
Figura 22 – Montagem do coletor.	58
Figura 23 – Esquema montagem ensaio de desempenho térmico.	59
Figura 24 – Gráfico da perda de calor pelo topo do coletor em função do espaçamento da superfície absorvedora.	60
Figura 25 – Resultado ensaio coletor padrão.	87
Figura 26 – Resultado ensaio coletor protótipo I.	88
Figura 27 – Resultado ensaio coletor protótipo II.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das modificações propostas.	46
Tabela 2 – Comparativo entre as montagens propostas distância entre superfície absorvedora e cobertura.	50
Tabela 3 – Comparativo entre as montagens propostas largura e espessura da superfície absorvedora.	51
Tabela 4 – Produção de energia e eficiência dos coletores simulação computacional.	61
Tabela 5 – Produção de energia e eficiência dos coletores ensaio em laboratório.	61
Tabela 6 – Produção de energia simulação computacional aplicando incerteza.	63
Tabela 7 – Produção de energia ensaio laboratorial aplicando incerteza.	63
Tabela 8 – Registro dos valores de calibração dos equipamentos.	84
Tabela 9 – Incertezas de medição no processo produtivo.	84
Tabela 10 – Resultados do cálculo das Incertezas Combinadas e Expandidas.	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Protótipos construídos.....	41
---------------------------------------	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo.....	14
1.2	Estrutura da dissertação.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Coletor solar.....	16
2.1.1	Coletor solar fechado.....	16
2.1.2	Componentes do coletor solar fechado.....	16
2.2	Mecanismos da transferência de calor.....	20
2.2.1	Condução.....	20
2.2.2	Convecção.....	21
2.2.3	Radiação.....	23
2.2.4	Perdas no coletor.....	24
2.3	Normatização aplicável aos coletores.....	24
2.3.1	A norma brasileira.....	25
2.3.2	O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).....	25
2.4	Influência dos componentes internos do coletor.....	27
2.4.1	Posição da superfície absorvedora.....	28
2.4.2	Distância da cobertura transparente até a superfície absorvedora.....	28
2.4.3	Largura da superfície absorvedora versus espessura da superfície absorvedora.....	35
2.5	Incertezas de medição.....	36
2.5.1	Avaliação da incerteza no processo produtivo.....	36
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	Estratégia de pesquisa.....	39
3.2	Detalhamento.....	39
3.2.1	Revisão bibliográfica.....	39
3.2.2	Definição dos parâmetros a serem modificados.....	40
3.2.3	Simulação computacional.....	40
3.2.4	Construção dos protótipos.....	40
3.2.5	Ensaio dos protótipos.....	41
3.2.6	Análise dos resultados.....	42
4	RESULTADOS.....	43
4.1	Definição dos parâmetros a serem modificados.....	43
4.1.1	Características construtivas dos coletores.....	43
4.1.2	Características.....	46
4.1.3	Pontos passíveis de melhorias.....	47

4.2	Confeção dos protótipos dos coletores	51
4.2.1	Fabricação de coletores solares	51
4.3	Método de ensaio dos coletores.....	58
4.3.1	Definição do método de ensaio dos coletores	59
4.3.2	Equipamentos e montagem para o ensaio	59
4.4	A simulação computacional	60
4.5	Análise dos resultados	61
4.5.1	Resultados da simulação computacional.....	61
4.5.2	Resultados dos ensaios em laboratório.....	61
4.6	Incertezas do trabalho.....	62
4.6.1	Incerteza do processo produtivo.....	62
4.6.2	Incerteza da simulação computacional.....	62
4.6.3	Incerteza da bancada de teste	62
4.7	Análise dos resultados com base nas incertezas.....	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS	66
A1	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	70
A1.1	Coletor padrão	70
A1.2	Coletor protótipo I.....	74
A1.3	Coletor protótipo II.....	79
A2	CÁLCULOS DA INCERTEZA PRODUÇÃO	84
A3	RESULTADOS DOS ENSAIOS NO LABORATÓRIO DO IPT	86
A3.1	Coletor padrão	87
A3.2	Coletor protótipo I.....	88
A3.3	Coletor protótipo II.....	89

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia solar para aquecimento de água está presente no Brasil desde o início da década de 70, impulsionada de modo similar a outros países pela crise do petróleo. Na década de 70 foram criadas as primeiras empresas de aquecimento solar do Brasil: Tuma Industrial (1971); e Pantho e Colsol (1976), sendo que as duas primeiras estavam localizadas em Belo Horizonte (MG) e a última em Indaiatuba (SP) (VASCONCELLOS e LIMBERGER, 2012).

Apesar de, na década seguinte, o mercado não apresentar uma grande demanda por equipamentos, mesmo assim constatou-se uma grande especialização no setor tanto técnica como comercial, com o surgimento de novas empresas como a Soletrol (1981); Transen (1987); e Heliotek (1989), todas essas no Estado de São Paulo.

Na década de 90, com o aumento do número de empresas focadas exclusivamente ao aquecimento solar de água, uma maior profissionalização e um crescimento técnico e comercial do segmento demandaram a criação de um departamento próprio dentro da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado e Aquecimento (ABRAVA), denominado – Departamento Nacional de Aquecimento Solar DaSOL (VASCONCELLOS e LIMBERGER, 2012).

Como o número de equipamentos instalados no mercado estava crescendo cada vez mais surgiu a necessidade de se implantar o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) para Coletores Solares Planos em 1997. Num esforço conjunto da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), da ABRAVA, da Eletrobrás Procel e do governo representado pelo INMETRO, logo após sua implantação, oito empresas já aderiram ao programa e etiquetaram os seus produtos. Para aumentar a divulgação do programa em 2000, a Eletrobrás Procel passou a conceder o seu Selo Procel Eletrobrás de Economia de Energia aos equipamentos com classificação A no programa PBE Solar (VASCONCELLOS e LIMBERGER, 2012). Já no final de 2015 o programa PBE Solar contava com 41 empresas participantes e 303 equipamentos etiquetados.

Segundo Maitan (2011), em grande parte das residências brasileiras o maior consumo de energia se dá por meio do uso do chuveiro elétrico; já de acordo com Lee e Sharma (2007), em outros países, o grande consumidor de energia é devido ao uso de equipamentos para aquecimento de água para consumo ou para o arrefecimento. Com a utilização dos coletores solares, que são equipamentos que podem ser acrescentados à edificação e dar a elas um caráter

de maior sustentabilidade e a possibilidade de gerar a sua própria água quente e com isso economizar energia. De acordo com Pereira e Martins (2006), no Brasil tem-se altos níveis de radiação solar durante todo o ano e a melhor opção para a geração de água quente é a utilização de coletores solares.

Como pode ser visto na Figura 1, a maior utilização de aquecimento solar como finalidade de aquecimento de água está concentrada no uso residencial. No ano de 2013 apresentava uma taxa de 79% já no ano de 2014 essa taxa reduziu para 67%. Enquanto que, no mesmo período, o uso do aquecimento solar no segmento industrial apresentou um incremento de 3% para 17%, em vendas anuais.

Figura 1 – Distribuição percentual do uso do aquecimento solar por setor.



Fonte: (DASOL, 2015)

Siqueira (2009) apresentou em seu trabalho uma discussão sobre o desempenho de um coletor de baixo custo, mas não informou sobre as causas que levam o coletor a ter um baixo desempenho; Silva (2012) demonstra em seu trabalho a importância de cada componente no funcionamento do coletor solar e explica a relação que alguns itens principais têm com o desempenho do coletor solar.

Eletrobrás (2007), calcula que apenas 0,4% das residências brasileiras utilizam o sistema de aquecimento solar como fonte de aquecimento de água para banho e que 73,5% das residências utilizam o chuveiro elétrico como fonte de aquecimento de água. No mesmo trabalho avalia-se que 21,2% das residências que não possuem um sistema de aquecimento solar trocariam para este método de aquecimento “independente do custo da instalação”. Partindo-se desse ponto esse trabalho se propõe a contribuir na melhoria do equipamento “Coletor Solar Plano” para que este possa maximizar o seu desempenho térmico.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho foi identificar componentes dos coletores solares planos para aquecimento de água que poderiam receber modificações tecnológicas que resultassem em aumento de seu desempenho térmico.

Para tal foram propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar quais componentes podem sofrer modificações tecnológicas.
2. Desenvolver modelo matemático, a ser implementado na plataforma EES, para realizar simulações computacionais, do funcionamento teórico do coletor solar em condições pré-estabelecidas e, assim, obter-se resultados do desempenho térmico dos coletores. Dessa forma, as modificações propostas seriam previamente avaliadas com redução do número de ensaios laboratoriais requeridos.
3. Fabricar e avaliar experimentalmente, com base na normal ABNT NBR 15747:2009 dois protótipos modificados a partir de um coletor comercial padrão.
4. Avaliar a repetibilidade do processo produtivo atual na fabricação atual dos coletores solares, em termos da garantia de uniformidade dos parâmetros estudados em sua montagem final, além de possível impacto no desempenho térmico dos coletores produzidos.

Os parâmetros que serão estudados neste trabalho são os seguintes:

1. Posição da superfície absorvedora.
2. Distância da superfície absorvedora até a cobertura transparente.
3. Largura e espessura da superfície absorvedora.

1.2 Estrutura da dissertação

Nesta Dissertação, além deste capítulo introdutório, estão apresentados mais 5 capítulos e mais 3 apêndices contendo as principais fundamentações teóricas para o desenvolvimento do trabalho; metodologias utilizadas para alcançar os objetivos; e os resultados obtidos na análise dos dados.

No capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução do tema e é exposto o objetivo do trabalho. No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os coletores solares e sua normatização, bem como os mecanismos de transferência de calor. No mesmo capítulo são apresentadas as formas pelas quais serão estudadas as alterações nos coletores. No capítulo 3 é apresentada a metodologia escolhida para se realizar esse trabalho. No capítulo 4 são

analisados e comparados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e na simulação computacional. Finalmente no capítulo 5 são apresentadas as conclusões. No apêndice A1 são apresentadas as simulações computacionais executadas utilizando-se o Software EES. No apêndice A2 é apresentado o cálculo da incerteza do processo produtivo da empresa fornecedora dos coletores solares. Por último no apêndice A3 são apresentados os resultados do ensaio de desempenho térmico dos coletores solares deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, são apresentadas algumas obras da literatura da área de aquecimento solar, com objetivo de descrever sobre o funcionamento de coletores solares, seus principais componentes e características.

2.1 Coletor solar

O coletor solar é um equipamento que realiza a conversão da energia solar em outra forma de energia, podendo ser térmica ou elétrica. O equipamento coletor solar também pode ser dividido em Coletor solar fechado, Coletor solar aberto e Tubo à vácuo, sendo que cada um desses tipos de coletor solar apresenta uma particularidade.

2.1.1 Coletor solar fechado

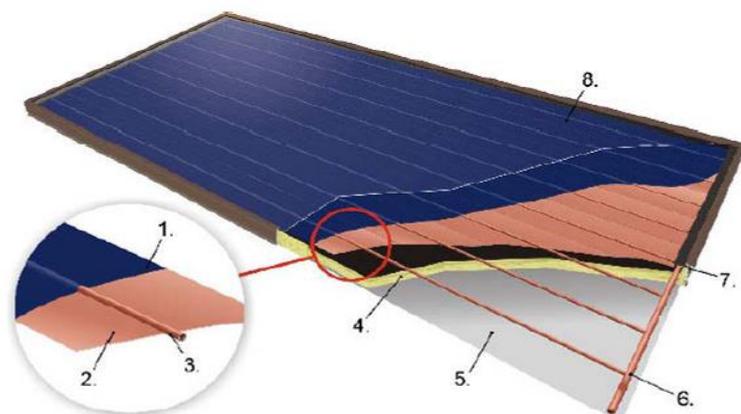
O Coletor Solar Fechado tem como característica básica uma caixa isolada termicamente, coberta por uma tampa de material transparente (normalmente vidro). No interior dessa caixa existe uma chapa enegrecida com tubos engastados (MANGUSSI, 2003).

2.1.2 Componentes do coletor solar fechado

O coletor solar fechado objeto do trabalho, pode ser visto na Figura 2, a seguir, na qual estão identificados seus componentes.

Figura 2 – Componentes de um Coletor Solar Fechado.

1. Cobertura das aletas;
2. Superfície absorvedora;
3. Tubo de elevação;
4. Isolamento térmico;
5. Caixa;
6. Calha coletora;
7. Vedação;
8. Cobertura transparente.



Fonte: (PEREIRA e ANDRADE, 2009)

Na sequência estão detalhados cada um destes componentes, com ênfase na sua função e importância no funcionamento do coletor solar fechado.

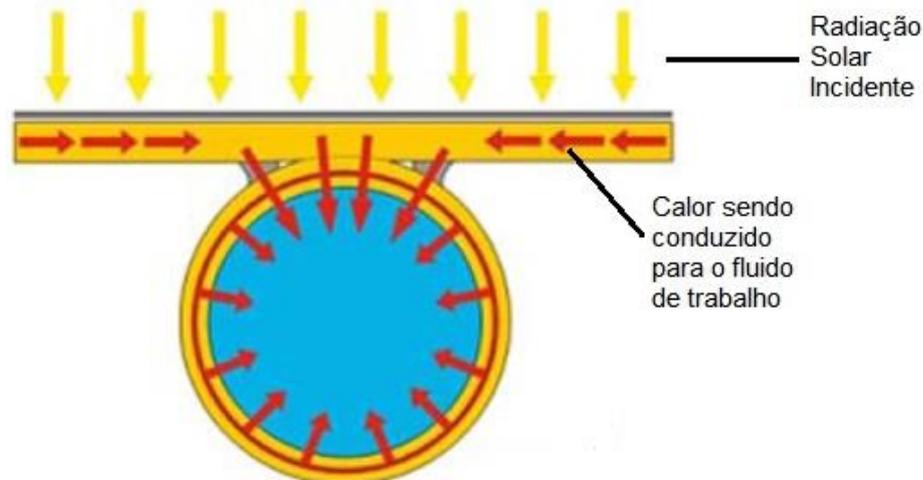
Cobertura das Aletas

O revestimento das aletas no coletor solar plano é de suma importância, pois como a maioria das aletas é fabricada com material reflexivo, é necessária a aplicação de um revestimento que reduza ao máximo essa refletividade, ou seja, é necessário trabalhar o binômio *Absortividade* (banda solar) e *Emissividade* (banda de emissão acima de três micrômetros). Normalmente, as aletas são cobertas por camada de tinta de cor preta comercial que apresenta uma absorvidade de 90%, só que esse material também apresenta uma emissividade de 90% na banda de emissão na faixa dos 3 micrômetros (PEREIRA e ANDRADE, 2009). As ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol, com comprimentos de onda de até 3 μ m são conhecidas como a *banda solar*, atingem a cobertura transparente do coletor, sendo a maior fração dessa energia transmitida através do vidro e atingindo a placa absorvedora enegrecida. Essa absorção é responsável por seu aumento de temperatura. Parte dessa energia é transferida para a água (objetivo do coletor solar) e parte é emitida na faixa de longos comprimentos de onda (região do infravermelho) e denominada *banda de emissão*. Como os vidros são opacos nessa faixa, a radiação emitida é retida em quase a sua totalidade, gerando o conhecido “efeito estufa”. O processo de revestimento por *Deposição Física por Vapor* de Cromo Negro ou Cristais Negros, em que há a deposição de certos componentes químicos no material da aleta provocando uma redução da emissividade para 5% ou 10% e conservando a absorvidade entre 90% e 98% (RAMLOW e NUSZ, 2011).

Superfície Absorvedora

Tem papel fundamental no funcionamento do coletor solar fechado, pois é o componente que tem como função conduzir a energia absorvida pela cobertura sob a forma de calor para o fluido de trabalho, perdendo a menor quantidade possível de calor para o meio (KALOGIROU, 2009). Na Figura 3 ilustra-se como o calor é transferido pela superfície absorvedora desde o momento em que a radiação solar incide sobre ela, a condução dentro do corpo metálico até atingir o fluido de trabalho do coletor.

Figura 3 – Superfície absorvedora conduzindo o calor absorvido para o fluido de trabalho.



Fonte: (PEREIRA e ANDRADE, 2009)

Neste trabalho utilizou-se o processo de solda por ultrassom para confeccionar as aletas, pois é um processo de união que apresenta um fator de contato entre a superfície absorvedora e tubo de elevação de 100%. Este tipo de solda é pouco utilizado na indústria nacional o que traz para esse trabalho um caráter inovador.

Tubo de Elevação

Fabricado em cobre, tem o papel de conduzir o fluido de trabalho do coletor e, com isso, receber o calor transferido da superfície absorvedora. Normalmente, os tubos de elevação são de cobre com diâmetros entre 9,52 mm e 12,5 mm (RAMLOW e NUSZ, 2011).

Isolamento Térmico

O isolamento térmico é necessário para evitar que o calor absorvido seja perdido pelo fundo e pelas laterais do coletor. Para tanto, o isolamento térmico é constituído por material com alto poder de isolamento e, ainda, resistente às temperaturas as quais estão sujeitos os coletores.

Caixa

A caixa, no coletor solar, tem função de proteção, ou seja, proporcionar ao coletor uma resistência mecânica maior, contra às intempéries, cargas de ventos e poeiras. Normalmente, este elemento é fabricado em alumínio extrudado, alumínio laminado ou peças extrudadas de fibra de vidro. Os coletores de maior porte utilizam caixas de alumínio extrudado. Na montagem da caixa não é recomendada a combinação de metais tais como alumínio e aço inox ou alumínio e aço galvanizado ou aço simples, pois pode provocar um processo de corrosão (RAMLOW e NUSZ, 2011).

Calhas Coletoras

As calhas coletoras, assim como os tubos de elevação, têm a função de distribuir o fluido de trabalho e é fabricada com tubos de cobre com diâmetro de 22 mm ou 28 mm (RAMLOW e NUSZ, 2011).

Vedação

As vedações impedem a entrada de umidade em seu interior, que causaria redução do desempenho térmico e de sua vida útil. O isolamento térmico, quando umedecido, perde de maneira significativa essa propriedade. Além disso, o vidro apresentaria condensação interna, reduzindo consideravelmente a sua transmitância. Se gotículas d'água entrar em contato com as aletas podem causar pontos de corrosão (MANGUSSI, 2003).

Cobertura Transparente

Conforme comentado anteriormente, o propósito da cobertura transparente é transmitir as ondas curtas da radiação solar, porem bloquear as ondas longas irradiadas pela superfície absorvedora, além de impedir seu contato direto do ar ambiente. Dessa forma, são reduzidas as perdas de calor por radiação e convecção pelo topo a partir da superfície absorvedora (GOSWAMI, KREITH e KREIDER, 2000). Na cobertura, podem ser utilizados vidros; plásticos transparentes como policarbonato e acrílico. A desvantagem de se utilizar o material plástico é que a transmitância para as ondas longas é mais elevada. Além de apresentar deterioração após exposição continuada à radiação ultravioleta. Por sua vez como vantagens podem ser citadas sua maior resistência a impactos de granizo ou pedras e peso relativamente inferior (GOSWAMI, KREITH e KREIDER, 2000; KALOGIROU, 2009). No Brasil, a predominância atual é o uso de vidro plano (tipo *Float*), surgindo os primeiros modelos com vidros temperados e semiendurecidos.

No vidro pode ser aplicada película ou superfície antirreflexiva para aumentar a transmitância do vidro. A presença de sujeiras e poeira na cobertura do coletor reduz sua transmitância. Entretanto durante a ocorrência de chuvas essa cobertura é lavada, o que retorna seu valor para a faixa 2% a 4% do seu limite máximo (KALOGIROU, 2009).

2.2 Mecanismos da transferência de calor

Em ciências térmicas, o calor é definido como uma forma de energia em trânsito causada pela diferença de temperatura entre dois sistemas ou partes de um mesmo sistema. O processo de transferência de calor pode ocorrer segundo três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação. As definições e conceitos apresentados a seguir são clássicos, mas foram incluídos para sua formalização e para introdução da nomenclatura adota no texto, conforme Incropera *et al.* (2009).

2.2.1 Condução

Propagação do calor que consiste na transferência de energia térmica entre as partículas que compõe o sistema. O fluxo de calor conduzido através de um determinado material é dado pela lei de Fourier¹ Equação (1).

$$q = -k \cdot A \frac{\partial T}{\partial X} \quad (1)$$

Onde:

q – Fluxo de calor por condução que atravessa o corpo na direção X (W);

k – Condutividade térmica do material (W/m·K), propriedade que caracteriza o comportamento dos materiais;

A – Secção transversal do corpo, perpendicular ao fluxo de calor (m²);

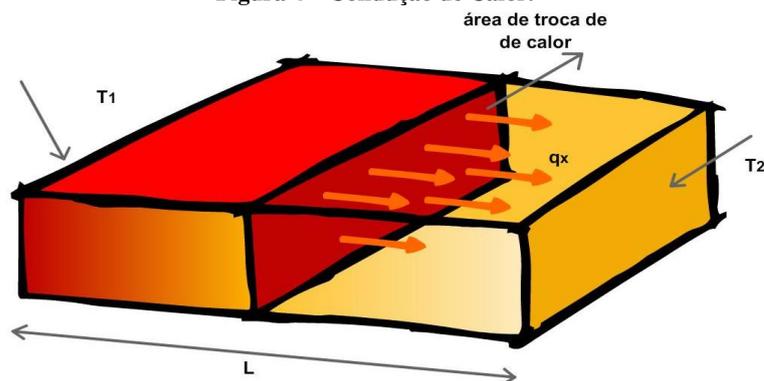
$\frac{\partial T}{\partial X}$ – Gradiente de temperatura (K) na direção X (m) do material;

O sinal negativo na Equação (1) indica que o sentido do fluxo de calor é contrário ao gradiente de temperatura, ou seja, o fluxo de calor vai da região de maior temperatura para a região de menor temperatura.

A Figura 4 ilustra como se dá o fluxo de calor unidimensional em uma superfície na qual ocorre o fenômeno da condução. Nesta Figura, o ponto 1 tem maior temperatura (T₁) e as setas identificadas por q_x mostram o fluxo de calor na superfície em direção ao ponto 2 de menor temperatura (T₂).

¹ Fourier, Jean Baptiste – (1768 – 1830), matemático francês que introduziu a expansão de funções nas séries trigonométricas (séries de Fourier) e desenvolveu um teorema sobre as raízes das equações algébricas.

Figura 4 – Condução de Calor.



Fonte: (PEREIRA e ANDRADE, 2009)

A condução ocorre com maior frequência nos materiais sólidos, pois as partículas destes materiais estão próximas umas das outras e, com isso, favorecem o contato que é necessário para a troca de calor por meio deste fenômeno.

2.2.2 Convecção

Propagação do calor que ocorre nos fluidos em geral em decorrência da diferença de densidade entre as partes que formam o sistema. A movimentação de partículas é comandada, unicamente pela diferença de densidade, já que os fluidos possuem a peculiaridade de se expandirem ou contraírem-se quando aquecidos ou resfriados.

O fenômeno convecção se divide em:

Convecção Natural: a diferença de densidade do fluido é causada por diferenças de temperaturas que causam a movimentação do fluido (empuxo gravitacional) em torno de uma superfície removendo o calor (INCROPERA, *et al.*, 2009).

Convecção Forçada: é causada pelo movimento relativo do fluido com uma superfície a uma diferente temperatura causando a transferência de calor (INCROPERA, *et al.*, 2009).

O calor transferido através da convecção pode ser calculado pela Equação da lei do resfriamento de Newton², que é indicada na Equação (2).

² Newton, Isaac (1642 – 1727), físico e matemático inglês que criou o cálculo (quase simultaneamente a Gottfried e Leibnitz). Considerado o pai da física clássica.

$$q = h \cdot A(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (2)$$

Onde:

q – Fluxo de calor por convecção (W);

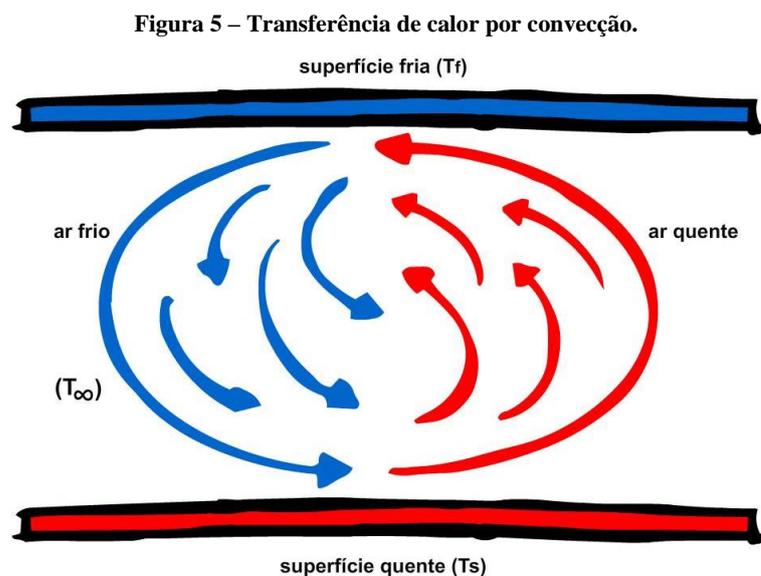
h – Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$);

A – Área de transferência de calor (m^2);

T_{sup} – Temperatura da superfície em contato com o fluido (K);

T_{∞} – Temperatura do fluido muito longe do ponto de contato com a superfície (K).

Na Figura 5 indica-se como o fluido, em contato com a superfície de maior temperatura, inicia a troca de calor e, com isso, cria uma corrente convectiva que vai retirando calor da superfície quente e o conduzindo até a superfície fria.



Fonte: (PEREIRA e ANDRADE, 2009)

Segundo Duffie e Beckman (2013), a convecção, no funcionamento do coletor solar, é a forma de transferência de calor de maior relevância, já que está ligada diretamente a maneira pela qual a energia é trocada no espaço entre a cobertura transparente e a superfície absorvedora e entre o tubo de elevação e o fluido de trabalho.

2.2.3 Radiação

Na radiação, a energia é transmitida por meio de ondas eletromagnéticas sem necessidade de meio para se propagar, podendo ocorrer, no vácuo. A lei fundamental que rege este tipo de transferência é denominada Lei de Stefan – Boltzmann e segue a seguinte lei:

- Qualquer objeto na natureza, com temperatura superior ao zero absoluto emite radiação.
- A quantidade líquida de energia recebida por um corpo é igual a diferença da energia total que ele emite e a que absorve.

A Lei de Stefan Boltzmann, que rege a transferência de calor por radiação, é apresentada na Equação (3).

$$q = \varepsilon\sigma AT^4 \quad (3)$$

Onde:

q – Fluxo de calor por convecção (W);

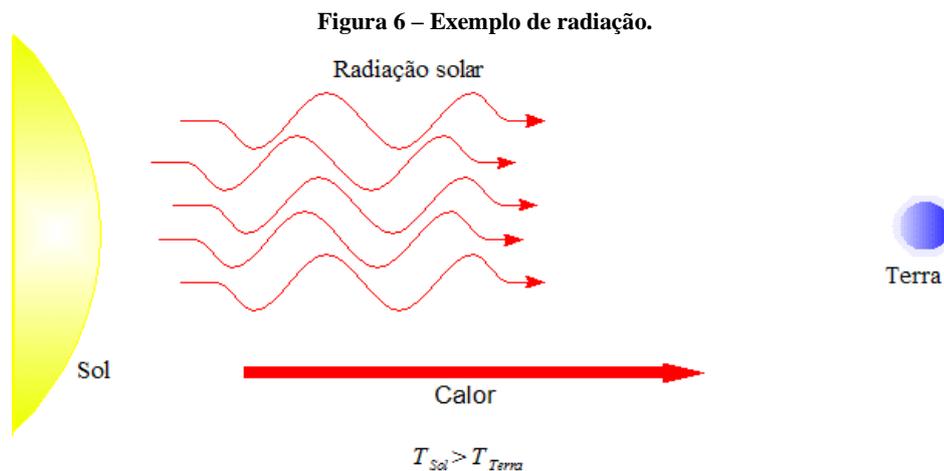
σ – Constante de Stefan – Boltzmann $5,669 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$;

ε – Emissividade da superfície (está entre zero e um);

A – Área de transferência de calor (m^2);

T – Temperatura absoluta da superfície (K).

Na Figura 6 ilustra-se a transferência de calor por radiação entre dois corpos.

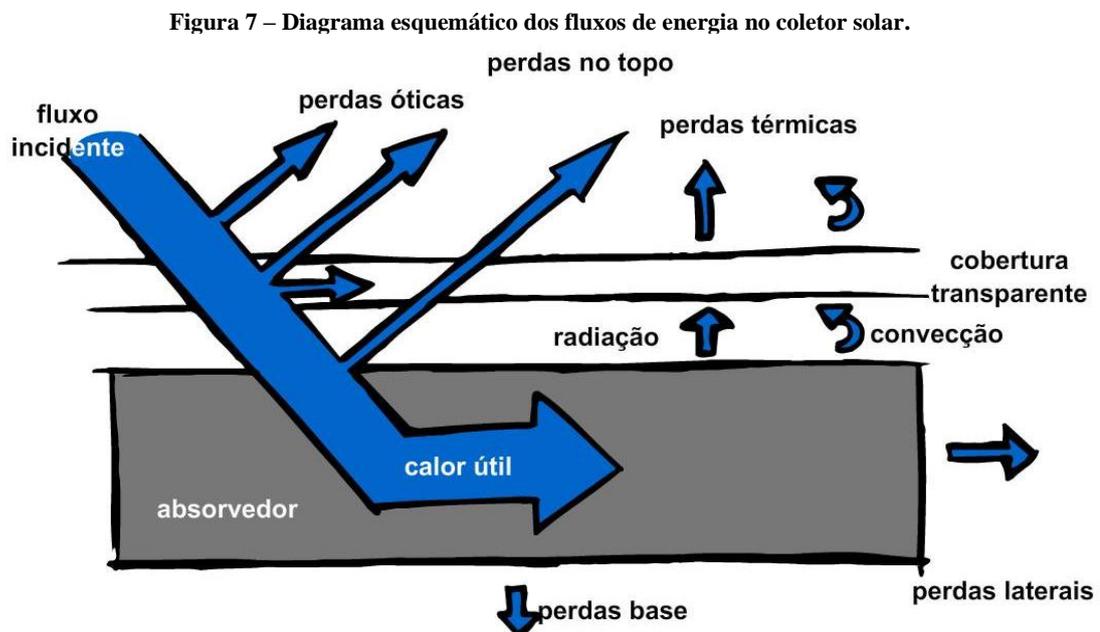


Fonte: (PEREIRA e ANDRADE, 2009)

Na figura ilustra-se a forma pela qual o planeta Terra é aquecido pelo Sol por meio do fenômeno da radiação.

2.2.4 Perdas no coletor

No coletor solar, ocorre uma combinação dos três mecanismos de transferência de calor. Na Figura 7, apresenta-se um diagrama com o balanço de energia no coletor solar: a energia que incide na cobertura e todas as perdas térmicas. Um bom projeto deve buscar a maximização da radiação incidente e a redução dessas perdas, fazendo com que a maior parte da energia que chega até a superfície absorvedora seja transferida para o líquido de trabalho (PEREIRA e ANDRADE, 2009).



Fonte: (PEREIRA e ANDRADE, 2009)

2.3 Normatização aplicável aos coletores

Os equipamentos comercializados e fabricados no Brasil para aquecimento solar de água devem ser ensaiados de acordo com a norma ABNT NBR 15.747³ (2009a; 2009b). Além dessa norma, os ensaios devem obedecer às portarias do INMETRO antes de serem comercializados. O programa de etiquetagem do INMETRO divulga uma tabela de classificação de todos os

³ NBR 15.747 – Sistemas Solares Térmicos e seus Componentes – Coletores Solares, Parte 1 – Requisitos gerais e Parte 2 – Métodos de ensaio.

coletores solares, com base na produção específica de energia de cada produto (INMETRO, 2016).

2.3.1 A norma brasileira

A norma brasileira ABNT NBR 15747 (2009a; 2009b) baseia-se na Norma Europeia EN 12975-1⁴ (2006). A norma brasileira substituiu a ABNT NBR 10184⁵ (1988). Assim, a nova norma foi dividida em duas partes, a primeira parte especifica os requisitos de durabilidade (incluindo resistência mecânica), confiabilidade, segurança e desempenho térmico dos coletores solares de aquecimento de líquidos. Também inclui as disposições para a avaliação das conformidades com esses requisitos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a). Já a segunda parte desta norma detalha os métodos de ensaios para a validação dos requisitos especificados na ABNT NBR 15747-1 (2009a; 2009b). Esta parte da norma inclui também três métodos de ensaio para a caracterização do desempenho térmico dos coletores de aquecimentos de líquido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

2.3.2 O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE)

O PBE é coordenado pelo INMETRO e fornece informações sobre o desempenho e características dos produtos, considerando atributos como o desempenho energético, o ruído e outros critérios que podem influenciar a escolha dos consumidores que, assim, poderão tomar decisões de compra mais conscientes. O programa também estimula a competitividade da indústria, que deverá fabricar produtos cada vez mais eficientes (INMETRO, 2012d).

Em 1984, o INMETRO iniciou, de forma pioneira, uma discussão com a sociedade sobre a conservação de energia com a finalidade de contribuir para a racionalização no seu uso no país, informando aos consumidores sobre a eficiência energética de cada produto, estimulando-os a fazer uma compra mais consciente. Este projeto cresceu e se transformou no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). A partir da lei nº 10.295, publicada em 17 de outubro de 2001 (conhecida como a Lei de Eficiência Energética) BRASIL (2001), o INMETRO, que estabelecia de forma voluntária programas de etiquetagem, passou a estabelecer programas de avaliação da conformidade compulsórios na área de eficiência energética (INMETRO, 2012c).

⁴ EN 12975 – Thermal Solar Systems and Components – Solar Collectors – Part 1: General Requirements e Part 2: Test Methods.

⁵ NBR 10.184 – Coletores Solares para Líquidos – Determinação do Rendimento Térmico.

A etiqueta é o Selo de Conformidade que atesta aos produtos nos pontos de venda, a evidência ao atendimento aos requisitos de desempenho estabelecidos em normas e regulamentos técnicos. Dependendo do critério de desempenho avaliado, ela recebe nomes diferentes. Quando a principal informação é a eficiência energética do produto, por exemplo, ela se chama Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), e classifica os produtos em faixas coloridas que variam da mais eficiente (A) a menos eficiente (de C até E, dependendo do produto), além de fornecer outras informações relevantes (como, por exemplo, o consumo de combustível dos veículos e a eficiência na lavagem e no uso da água em lavadoras de roupa). Cada linha de eletrodoméstico possui sua própria etiqueta, mudando de acordo com as características técnicas de cada produto INMETRO (2012a). A Figura 8 apresenta um exemplo da ENCE para os coletores de aquecimento solar no programa voluntário.

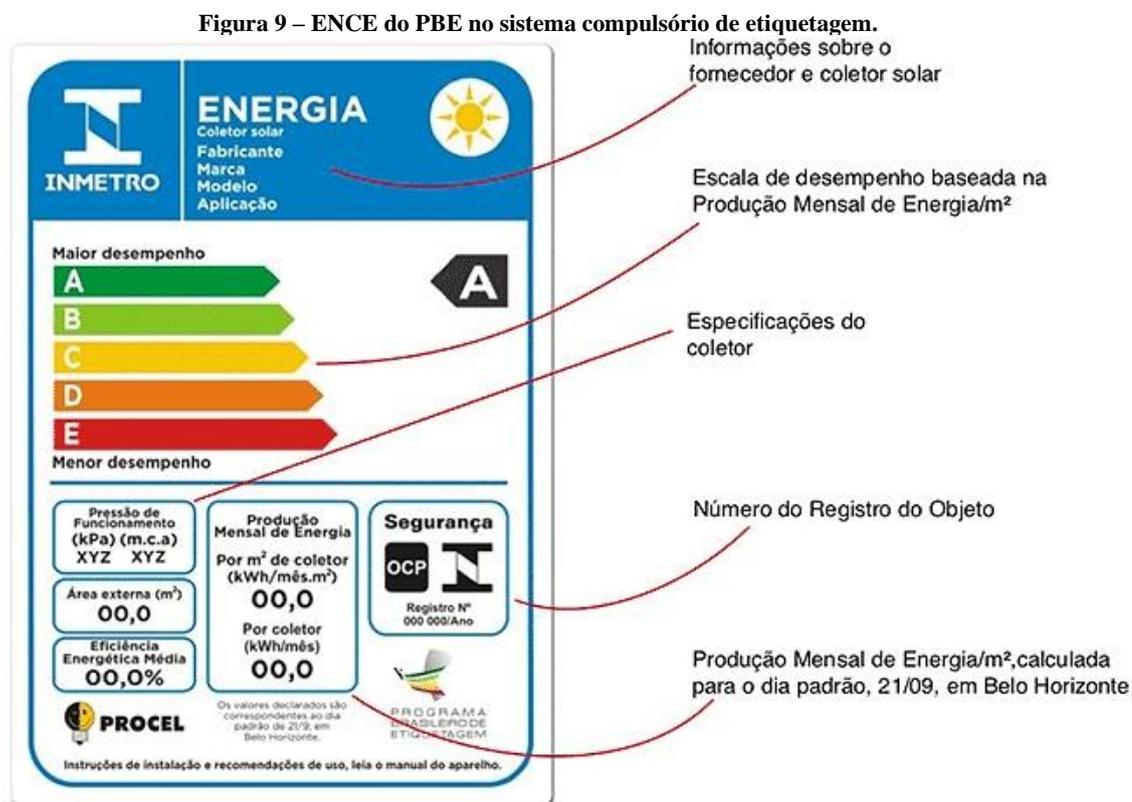
Figura 8 – ENCE do PBE no sistema voluntário de etiquetagem.

Energia (Solar) Fabricante Marca Modelo Pressão de Funcionamento (kPa) Aplicação (m.c.a.)		COLETOR SOLAR PLANO ABCDEF XYZ(Logo) IPQR XYZ XYZ banho	Neste campo, estão indicados o nome do fabricante, a marca e o modelo do equipamento, a pressão de funcionamento e a aplicação a que se destina, se banho ou piscina.
Mais eficiente Menos eficiente			Neste campo, está destacada a classificação dos coletores, em razão da Produção de Energia. A letra A indica que o produto obteve o melhor índice de produção de energia; a B, um pouco menos; e assim por diante até chegar à letra E, de menor produção.
Produção Mensal de Energia: - Por m2 de coletor (kWh/mês.m2) - Por coletor (kWh/mês) Área externa do Coletor (m ²)		00,0 00,0 0,00	Neste campo estão indicados os valores representativos da produção mensal de energia, que representa a produção de energia economizada com o uso das placas solares. É indicado também o tamanho da área externa do coletor, em m ² .
Eficiência Energética Média (%) <small>Regulamento Específico para Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água - RESP/000-SOL Instruções de instalação e recomendações de uso, leia o Manual do aparelho.</small>		XYZ	Neste campo está indicado, em percentual, o índice médio de eficiência dos coletores.
 PROCEL PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA <small>INMETRO</small>			Este campo traz as assinaturas do INMETRO e do PROCEL, responsáveis, respectivamente, pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem e Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

Fonte: (INMETRO, 2012b)

De acordo com INMETRO (2012e; 2012f) a partir da publicação das portarias 301 de 14 de junho 2012 e 352 de 06 de julho de 2012 o âmbito do PBE muda do caráter voluntário para o compulsório, ou seja, a partir do dia 10/09/2015 não foi mais permitido fabricar nem importar qualquer tipo de equipamento para aquecimento solar. Dentro dessas restrições estão todas as placas de aquecimento, reservatórios térmicos com volume de água armazenada menor ou igual

a 1000L e sistema de aquecimento acoplado (INMETRO, 2015). Na Figura 9 a seguir, é mostrado um exemplo da ENCE para os coletores de aquecimento solar no PBE compulsório.



Fonte: (CERTIFICASOL, 2014)

Na nova ENCE comparada a anterior, foram feitas modificações no layout na distribuição das informações e, também, adicionadas informações do Organismo de Certificação de Produtos (OCP) que efetuou a certificação daquele produto e o número do registro do objeto (produto) junto ao INMETRO.

2.4 Influência dos componentes internos do coletor

Como já foi visto no item 2.1.2, o coletor solar é um equipamento composto por diversos componentes que apresentam uma influência maior ou menor no desempenho final do equipamento. A importância dos coletores planos em processos térmicos é tal que o seu desempenho térmico é tratado em detalhes consideráveis. Isso é feito para desenvolver uma compreensão do impacto de cada componente no valor final do desempenho térmico. Em muitos casos práticos, os cálculos de projeto, as equações para o desempenho do coletor são reduzidas a formas relativamente simples (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

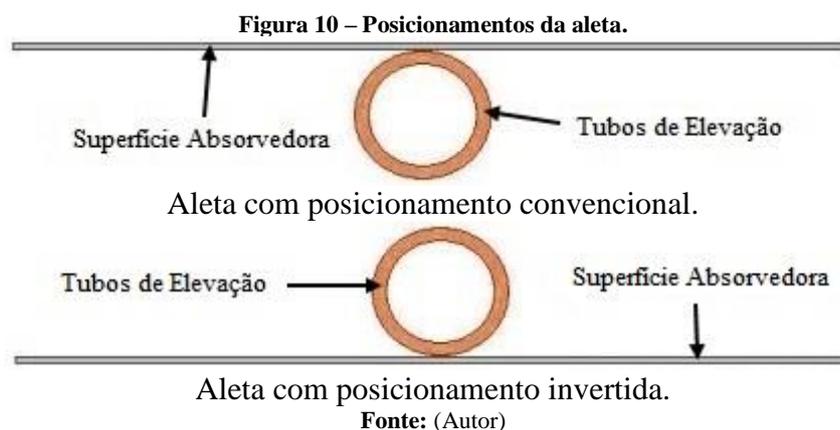
2.4.1 Posição da superfície absorvedora

Em Mangussi (2003), a montagem da superfície absorvedora do coletor é feita colocando-se os tubos de elevação voltados para a parte inferior do coletor, ou seja, eles não ficam diretamente expostos ao sol.

Assim, a radiação solar que está incidindo no coletor e atinge a superfície absorvedora é transferida por condução até o ponto de solda com os tubos de elevação e, neste ponto, a energia é transferida por condução através da parede dos tubos e por convecção para o fluido de trabalho que circula nos tubos.

Abreu (2009) demonstrou que a montagem da superfície absorvedora com os tubos de elevação voltados para o sol apresenta uma eficiência térmica cerca de 30% superior à montagem realizada por Mangussi (2003). Esse fato se justifica, segundo o autor, pelo fato da radiação solar já incidir diretamente nos tubos de elevação do coletor.

Na Figura 10 é possível ver os dois tipos de montagens das aletas que são descritas neste trabalho.



2.4.2 Distância da cobertura transparente até a superfície absorvedora

Mantendo os demais parâmetros de construção do coletor fixo e agora provocando uma modificação no espaçamento entre cobertura transparente e superfície absorvedora. Este espaçamento está ligado diretamente a transferência de calor por convecção e radiação no interior do coletor, ou seja, modificando esta distância altera-se a taxa de transferência de calor por convecção e radiação entre a superfície absorvedora e a cobertura transparente do coletor, o que afeta diretamente a perda de calor pelo topo do coletor para o exterior e essa perda está ligada diretamente no desempenho do equipamento como visto no item 2.2.4.

Duffie e Beckman (2013) apresentam uma sequência de cálculos que possibilita realizar um modelo matemático do funcionamento do coletor solar. Partindo deste ponto é preciso

encontrar o valor do coeficiente de perda de calor pelo topo do coletor (U_t) para se testar se a modificação na distância entre a superfície absorvedora e a cobertura transparente irá resultar numa possível melhora no desempenho do coletor. Para se encontrar o (U_t) primeiro é necessário encontrar o valor do coeficiente de transferência de calor por radiação entre superfície absorvedora e cobertura transparente ($h_{r,abs-cob}$) por meio da Equação (4). Só que para se realizar esse cálculo é necessário supor uma temperatura na cobertura transparente T_{cob} e uma temperatura na superfície absorvedora T_{abs} .

$$h_{r,abs-cob} = \frac{\sigma(T_{abs}^2 + T_{cob}^2)(T_{abs} + T_{cob})}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1}{\varepsilon_{cob}} - 1} \quad (4)$$

Onde:

$h_{r,abs-cob}$ – Coeficiente de transferência de calor por radiação entre superfície absorvedora e cobertura transparente ($W/m^2 \cdot K$);

σ – Constante de Stefan – Boltzmann $5,669 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$;

ε_{abs} – Emissividade da superfície absorvedora (pintura);

ε_{cob} – Emissividade da cobertura transparente.

Com o valor de $h_{r,abs-cob}$ obtido, na sequência é feito o cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação entre a cobertura transparente e o ambiente ($h_{r,cob-amb}$). Esse valor pode ser obtido pela Equação (5).

$$h_{r,cob-amb} = \varepsilon_{cob} \sigma (T_{cob}^2 + T_{amb}^2) (T_{cob} + T_{amb}) \quad (5)$$

Onde:

$h_{r,cob-amb}$ – Coeficiente de transferência de calor por radiação entre cobertura transparente e o ambiente ($W/m^2 \cdot K$);

T_{amb} – Temperatura da cobertura transparente (K);

Com o resultado de ($h_{r,cob-amb}$) agora necessitamos realizar o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície absorvedora e a cobertura transparente por meio da Equação (6).

$$h_{c,abs-cob} = Nu \frac{k_{abs}}{L} \quad (6)$$

Onde:

$h_{c,abs-cob}$ – Coeficiente de transferência de calor por convecção entre cobertura transparente e o ambiente ($W/m^2 \cdot K$);

Nu – Número de Nusselt;

k_{abs} – Condutividade térmica da superfície absorvedora ($W/m \cdot K$);

L – Espaço entre superfície absorvedora e cobertura transparente (m).

De posse destes dados, se calcula o coeficiente de perda de calor pelo topo do coletor pela Equação (7).

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{c,abs-cob} + h_{r,abs-cob}} + \frac{1}{h_{ven} + h_{r,cob-amb}} \right]^{-1} \quad (7)$$

Onde:

U_t – Coeficiente de perda de calor pelo topo do coletor ($W/m^2 \cdot K$);

h_{ven} – Coeficiente de transferência de calor por convecção gerado pelo vento ($W/m^2 \cdot K$).

Após efetuado o cálculo de U_t é possível chegar ao novo valor para a temperatura da cobertura por meio da Equação (8).

$$T_{cob2} = T_{abs} - \frac{U_t(T_{abs} - T_{amb})}{h_{c,abs-cob} + h_{r,abs-cob}} \quad (8)$$

Onde:

T_{cob2} – Nova temperatura da cobertura transparente (K);

Caso o valor de T_{cob} adotado no início do cálculo não seja igual ao valor encontrado pela Equação (8), será necessário utilizar o processo de cálculo iterativo, ou seja, utiliza-se o valor encontrado pela Equação (8) e a partir deste momento se retorna a Equação (4) e se reinicia os cálculos até se obter um novo valor de temperatura T_{cob} . Somente se encerram os cálculos quando o valor de T_{cob} atinge a precisão definida anteriormente, como critério de parada do processo iterativo, com este novo resultado se efetua o cálculo de U_t .

Como foi citado no início do processo de cálculo a temperatura da superfície absorvedora foi estimada.

Logo para se obter um valor bem próximo do real para essa temperatura é necessário continuar os cálculos, e por meio da Equação (9) pode-se calcular o coeficiente de perda de calor pelo fundo do coletor.

$$U_f = \frac{k_{iso}}{L_f} \quad (9)$$

Onde:

U_f – Coeficiente de perda de calor pelo fundo do coletor ($W/m^2 \cdot K$);

k_{iso} – Condutividade térmica isolamento ($W/m \cdot K$);

L_f – Espessura do isolamento do fundo (m).

Na sequência, é executado o cálculo do valor do coeficiente de perda de calor pelas laterais do coletor, por meio da Equação (10). É preciso salientar que nesse momento deve-se efetuar uma correção na área, pois todos os parâmetros de cálculos do coeficiente global de perdas são feitos com base na área do coletor.

$$U_l = \frac{\frac{k_{iso}}{L_l} PeH}{A_c} \quad (10)$$

Onde:

U_l – Coeficiente de perda de calor pela lateral do coletor ($W/m^2 \cdot K$);

k_{iso} – Condutividade térmica isolamento ($W/m \cdot K$);

L_l – Espessura do isolamento da lateral (m);

Pe – Perímetro do coletor (m);

A_c – Área do coletor (m^2);

H – Espessura (altura) do coletor (m).

Agora com os valores das Equações (7), (9) e (10), já é possível calcular o coeficiente global de perda de calor do coletor com a Equação (11).

$$U_L = U_t + U_l + U_f \quad (11)$$

Onde:

U_L – Coeficiente Global de perda de calor do coletor ($W/m^2 \cdot K$);

Com o valor da Equação (11) se calcula o parâmetro m por meio da Equação (12).

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_{abs}\delta_{abs}}} \quad (12)$$

Onde:

m – Parâmetro definido (m);

δ_{abs} – Espessura da superfície absorvedora (m).

Aplicando o resultado da Equação (12) na Equação (13) obtém-se a eficiência padrão da superfície absorvedora.

$$F = \frac{\tanh m \frac{(W-D)}{2}}{m \frac{(W-D)}{2}} \quad (13)$$

Onde:

F – Eficiência padrão da superfície absorvedora;

W – Largura da superfície absorvedora (m);

D – Diâmetro do tubo de elevação (m).

Por meio da Equação (14) se obtém a eficiência do coletor.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left\{ \frac{1}{U_L[D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right\}} \quad (14)$$

Onde:

F' – Eficiência do coletor;

C_b – Condutividade da solda;

D_i – Diâmetro interno do tubo de elevação (m);

h_{fi} – Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido de trabalho e o tubo de elevação ($W/m^2 \cdot K$).

Agora por meio da Equação (15), se encontra o parâmetro a .

$$a = \frac{\dot{m}C_p}{A_C U_L} \quad (15)$$

Onde:

a – Parâmetro definido;

\dot{m} - Vazão mássica (kg/s);

C_p – Calor específico ($J/kg.K$);

O valor do parâmetro a definido pela Equação (15) será utilizado para efetuar o cálculo do valor de F_R na Equação (16).

$$F_R = a \left[1 - e^{\left(-\frac{F'}{a}\right)} \right] \quad (16)$$

Onde:

F_R – Fator de remoção de calor;

Duffie e Beckman (2013, p. 264) dizem que a Equação (16) é a mais importante no estudo de coletores solares planos. Na sequência é calculado o valor da média do ganho de energia útil por unidade do coletor, por meio da Equação (17).

$$\frac{Q_u}{A_C} = q_u = F_R [S - U_L(T_{fi} - T_{amb})] \quad (17)$$

Onde:

q_u – Média do ganho de energia útil por unidade de área do coletor (W/m^2);

S – Radiação incidente no coletor (W/m^2);

T_{fi} – Temperatura de entrada do fluido de trabalho (K);

Substituindo o resultado da Equação (16) na Equação (18) tem-se.

$$T_{abs2} = T_{fi} + \frac{q_u}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (18)$$

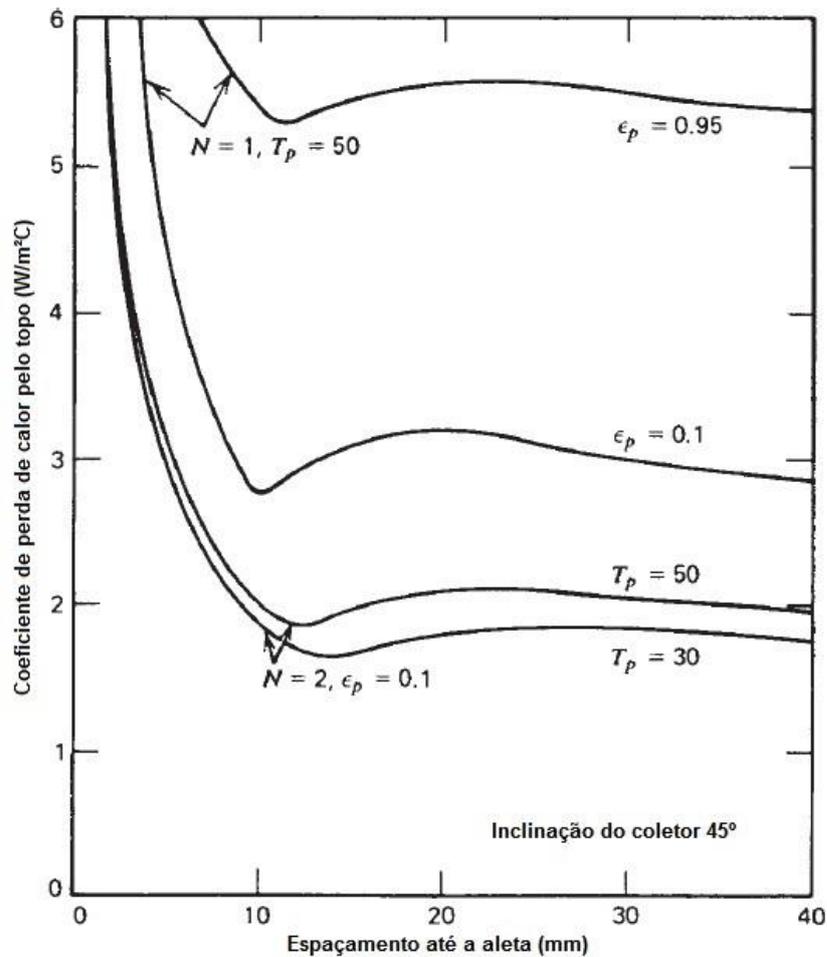
Onde:

T_{abs2} – Nova temperatura da superfície absorvedora (K);

Assim como foi feito no momento do cálculo de T_{cob} para se obter o valor de T_{abs} , necessita-se realizar o cálculo iterativo das equações citadas anteriormente. Logo o valor a ser adotado para o cálculo de U_t será o último resultado obtido de T_{abs} .

Duffie e Beckman (2013, p. 250) demonstram a influência que o espaçamento entre a superfície absorvedora e a cobertura transparente tem sobre a perda de calor pelo topo do coletor, conforme gráfico na Figura 11.

Figura 11 – Gráfico da variação da perda de calor pelo topo do coletor em função do espaçamento da superfície absorvedora.



Fonte: Adaptado de (DUFFIE e BECKMAN, 2013, p. 250)

Legenda do gráfico:

N – Número de coberturas;

T_p – Temperatura da superfície absorvedora;

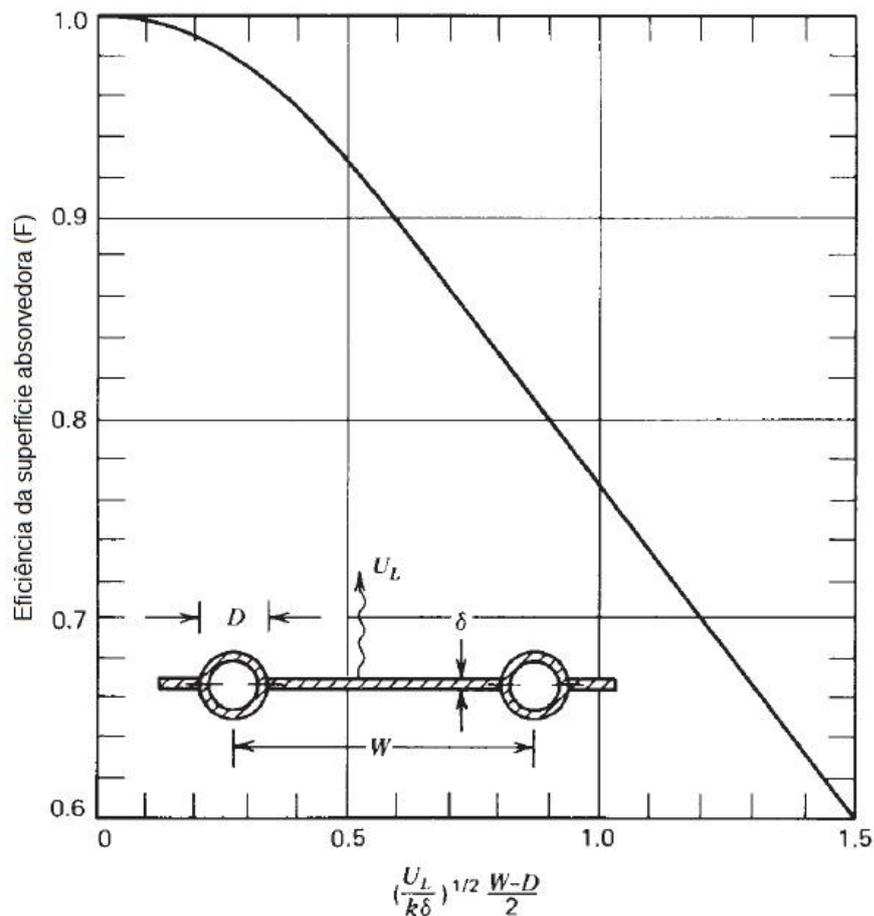
ϵ – Emissividade da superfície absorvedora (pintura).

No gráfico da Figura 11 verifica-se que o aumento do espaçamento entre a cobertura transparente e a superfície absorvedora traz uma redução na perda de calor pelo topo do coletor. Mas, o aumento nesse espaçamento não reduz as perdas indefinidamente.

2.4.3 Largura da superfície absorvedora versus espessura da superfície absorvedora

A largura da superfície absorvedora e também a sua espessura são modificações que afetam o desempenho do coletor, a combinação destas duas características está ligada a capacidade de a superfície absorvedora conduzir o calor oriundo do sol para o fluido de trabalho. Para se elaborar o gráfico mostrado na Figura 12 são utilizadas as Equações (12) e (13); para se verificar qual o impacto que modificações nestes itens terão no desempenho do coletor, podem-se calcular valores de F (Eficiência padrão da superfície absorvedora) para cada tipo de alteração.

Figura 12 – Gráfico da eficiência da superfície absorvedora versus combinação da largura e espessura.



Fonte: Adaptado de (DUFFIE e BECKMAN, 2013, p. 257)

Legenda do gráfico:

F – Eficiência da aleta;

U_L – Coeficiente global de perda de calor ($W/m^2 \cdot K$);

k – Condutividade térmica do material ($W/m \cdot K$);

δ – Espessura da superfície absorvedora (m);

W – Distância entre centros da aleta (largura da superfície absorvedora) (m);

D – Diâmetro do tubo de elevação (m).

Segundo Duffie e Beckman (2013, p. 257), a relação largura da aleta versus espessura do material é uma combinação que deve ser bem analisada, pois ao se modificar essa relação afeta-se o rendimento do coletor, sendo que a melhor situação é quando valor de F se aproxima de 1.

2.5 Incertezas de medição

Segundo, o Guide to the expression of uncertainty in measurement GUM (2008) a palavra “incerteza” no âmbito da metrologia significa “dúvida”. Desta forma “incerteza de medição” seria “dúvida sobre a validade do resultado de uma medição”.

Incerpi (2008) diz que a incerteza, está associada ao resultado da medição. Não corresponde ao erro aleatório do sistema de medição. Ela reflete a falta de conhecimento sobre o valor do mensurando. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda, tão somente uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos.

2.5.1 Avaliação da incerteza no processo produtivo

Para se avaliar a incerteza do processo produtivo pode-se utilizar o procedimento descrito por Incerpi (2008). Se considerado uma simplificação do procedimento descrito por GUM (2008). O método proposto está descrito na Equação (19) abaixo.

$$IM = I_C + \frac{ts}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

Onde:

IM – Incerteza de medição;

I_C – Incerteza da calibração do instrumento no ponto referente à média das medidas;

t – Fator de Student, para “ $n-1$ ” leituras realizadas e para o nível de confiança desejado;

s – Desvio padrão das medições realizadas;

n – Número de leituras realizadas.

Para se obter o valor da incerteza é preciso encontrar o valor do desvio padrão que é dado pela Equação (20).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_k - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (20)$$

Onde:

X_k – Resultado da medição atual;

\bar{X} – Média dos resultados;

n – Número de medições;

j – índice da medição atual.

Depois de calculadas todas as incertezas de cada medição feita no processo produtivo e calculada a incerteza combinada (u_c) dessas incertezas utilizando a Equação (21).

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n IM_i^2} \quad (21)$$

Onde:

u_c – Incerteza combinada;

IM_i – Incertezas de medição calculadas.

Segundo Incerpi (2008) o valor encontrado pela incerteza combinada não é real, pois representa uma probabilidade estatística de 68% de se encontrar um erro na medição, sendo assim não é uma boa aproximação. O recomendado é utilizar a incerteza expandida para se expressar o resultado, pois com ela pode-se utilizar níveis de confiança de 95%. A incerteza expandida é demonstrada na Equação (22).

$$U = k \cdot u_c \quad (22)$$

Onde:

k – Fator de abrangência para o nível de confiança desejado.

O valor de k é o fator de *Student* para um nível de confiança de 95% com certa quantidade de graus de liberdade. Para se encontrar o número de graus de liberdade que se deve utilizar no cálculo é preciso obter o *grau de liberdade efetivo*, o seu valor é obtido pela Equação (23).

$$V_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{IM_1^4}{V_1} + \frac{IM_2^4}{V_2} + \frac{IM_3^4}{V_3} + \dots + \frac{IM_i^4}{V_i}} \quad (23)$$

Onde:

V_{eff} – Grau de liberdade efetivo;

V_i – Graus de liberdade;

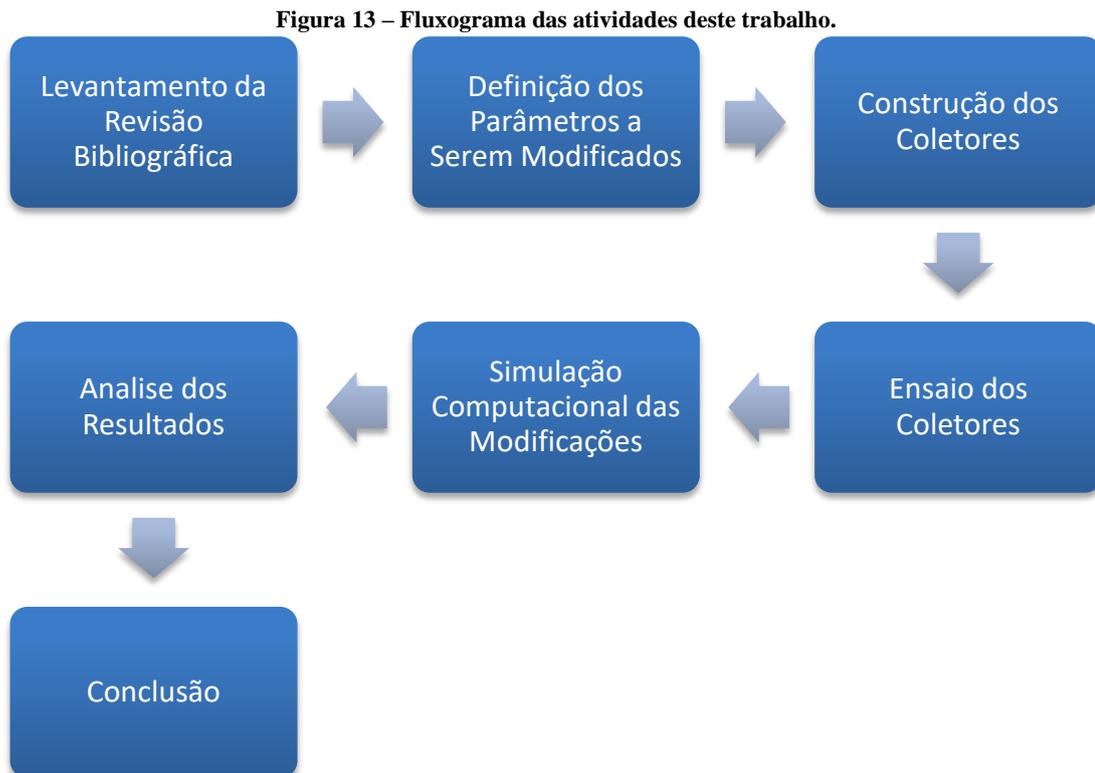
Assim, com o a aplicação das equações citadas pode-se obter a incerteza do processo produtivo em geral, e no presente caso da produção de coletores solares planos de um determinado fabricante.

3 METODOLOGIA

3.1 Estratégia de pesquisa

Pesquisa foi conduzida por meio de simulação matemática com auxílio do software EES e por meio de avaliações em laboratório de protótipos de coletores.

O delineamento da pesquisa é apresentado na Figura 13.



Fonte: (Autor)

3.2 Detalhamento

3.2.1 Revisão bibliográfica

O desenvolvimento desse trabalho teve como base uma revisão bibliográfica sobre o tema de coletores solares, suas características e eficiência térmica. Nesta revisão foi pesquisado no âmbito nacional e internacional, identificando estudos na área de aquecimento solar com foco direto no equipamento coletor solar nos últimos anos.

Com base na revisão bibliográfica foi possível identificar quais são as características passíveis de modificação e quais pontos não seriam relevantes de se modificar na busca do melhor desempenho. Na revisão, foram estudadas equações relacionadas ao modelamento do

coletor solar, possibilitando antever alguns resultados de como será a resposta do coletor em funcionamento real.

3.2.2 Definição dos parâmetros a serem modificados

A escolha dos parâmetros a serem testados levou em consideração as seguintes premissas:

- a) Impactarem no rendimento do coletor;
- b) Que não houvesse a necessidade de se modificar a linha de produção atual das empresas fabricantes.

Seguindo estas premissas, foram propostas mudanças nos seguintes parâmetros:

- Posição da superfície absorvedora.
- Distância da superfície absorvedora até a cobertura transparente.
- Largura e espessura da superfície absorvedora.

3.2.3 Simulação computacional

Para se confirmar a escolha desses parâmetros foram realizadas simulações de cada característica adotada por meio de um modelo matemático com o uso do software. Esse modelo matemático foi elaborado utilizando como base os estudos feitos por Duffie e Beckman (2013), onde eles demonstram todos os parâmetros e necessidades para se realizar a modelagem do funcionamento do coletor solar.

3.2.4 Construção dos protótipos

Por meio dos parâmetros definidos foi possível construir protótipos dos coletores para que se pudesse avaliar a eficácia das modificações propostas. Para se ter uma referência durante a análise de dados foi fabricado um coletor denominado padrão que possui características comuns nos equipamentos disponíveis no mercado.

No Quadro 1 são apresentadas as características dos protótipos construídos.

Quadro 1- Protótipos construídos.

Protótipo	Identificação	Características
1	Protótipo Padrão	Posição de pintura: Na face oposta aos tubos de elevação Distância sup. absorvedora até a cobertura: 15 mm Espessura sup. absorvedora: 0,50 mm Largura sup. absorvedora: 125 mm Número de aletas: 8
2	Protótipo I	Posição de pintura: Na face onde estão os tubos de elevação Distância sup. absorvedora até a cobertura: 25 mm Espessura sup. absorvedora: 0,50 mm Largura sup. absorvedora: 125 mm Número de aletas: 8
3	Protótipo II	Posição de pintura: Na face oposta aos tubos de elevação Distância sup. absorvedora até a cobertura: 15 mm Espessura sup. absorvedora: 0,40 mm Largura sup. absorvedora: 142 mm Número de aletas: 7

Fonte: (Autor)

3.2.5 Ensaio dos protótipos

Os três protótipos de coletores construídos, foram enviados para ensaio de eficiência térmica no Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento do Centro Tecnológico do Ambiente Construído do IPT, acreditado pelo INMETRO, para serem submetidos ao ensaio de desempenho térmico segundo a norma ABNT NBR 15747-2 (2009a; 2009b).

O ensaio de desempenho térmico executado no laboratório do IPT com um simulador solar seguindo os seguintes passos:

- Fixação do coletor na bancada do simulador;
- Incidir sobre o coletor uma radiação solar de no mínimo 700 W/m²;
- Durante a incidência da radiação solar devem ser obtidos pelo menos 4 pontos de temperatura de entrada do fluido, temperatura de saída do fluido e temperatura ambiente durante o ensaio;
- Gráfico da curva de eficiência versus diferença de temperatura reduzida ($(T_m - T_a) / G$).

São esperados resultados que demonstrem que a produção de energia dos protótipos I e protótipo II sejam superiores aos valores apresentado pelo protótipo padrão.

3.2.6 Análise dos resultados

De posse dos resultados do ensaio de eficiência térmica desses coletores, foram feitas duas análises dos dados: A primeira para validação dos resultados do modelo matemático e a segunda é uma análise crítica sobre os ganhos no desempenho térmico do coletor, gerados pelas modificações implementadas.

4 RESULTADOS

4.1 Definição dos parâmetros a serem modificados

Como resultado da revisão bibliográfica e das simulações realizadas, foram identificados alguns pontos passíveis de modificações e que poderiam ser implementadas com facilidade na linha de produção da empresa fabricante apoiadora deste trabalho.

4.1.1 Características construtivas dos coletores

a) Características do coletor padrão

O coletor padrão apresenta as seguintes características:

- Caixa externa em alumínio extrudado e com espessura de 1,0mm e altura de 61mm;
- Fundo em chapa de alumínio com espessura de 0,4mm;
 - 8 aletas compostas dos seguintes itens:
 - Tubos em cobre diâmetro 9,52mm e espessura de 0,4mm;
- Tira de alumínio com largura de 125mm e espessura de 0,5mm.
- As calhas coletoras são fabricadas com dois tubos de cobre com diâmetro de 22mm e espessura de 0,5mm;
- O isolamento do coletor é composto dos seguintes itens:
 - O fundo do coletor apresenta um isolamento composto por uma manta de lã de vidro com densidade de 16 kg/m³ e espessura de 25mm;
 - Na parte interna de todas as laterais são utilizadas placas de lã de vidro com densidade de 40 kg/m³e espessura de 12mm.
- A pintura da placa absorvedora é feita com uma tinta preta fosca comum;
- A cobertura do coletor é feita por um vidro comum do tipo *Float* incolor e transparente com 3,00 mm de espessura.

A solda para a junção da tira de alumínio aos tubos de cobre é por ultrassom, a pintura que é feita no conjunto absorvedor é realizada na face externa onde se encontram os tubos de elevação.

A vedação do coletor é feita com silicone neutro entre o vidro e perfil de alumínio, perfil de alumínio e chapa do fundo. A vedação entre a calha coletora e o perfil de alumínio é feita utilizando borrachas de EPDM (Etileno Propileno Dieno Monômero), Figura 14.

Figura 14 – Coletor padrão.



Fonte: (Autor)

Esse é o coletor que foi utilizado como referência para análise dos resultados dos demais equipamentos ensaiados.

b) Características do protótipo I

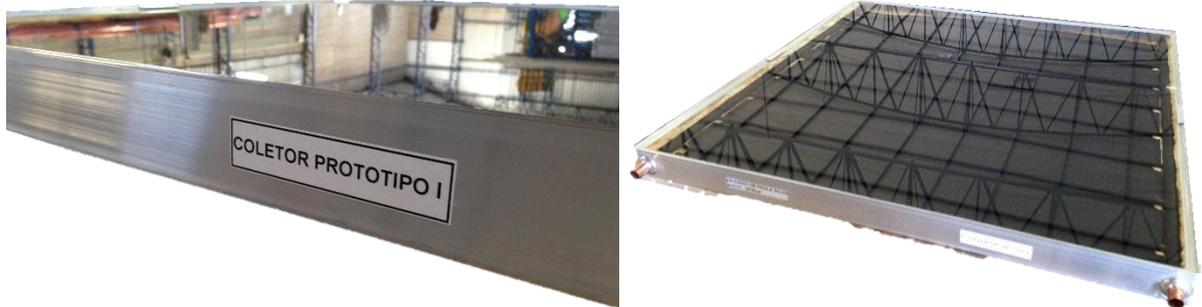
O coletor protótipo I apresenta as seguintes características:

- Caixa externa em alumínio extrudado e com espessura de 1,0mm e altura de 61mm;
- Fundo em chapa de alumínio com espessura de 0,4mm;
- 8 aletas compostas dos seguintes itens:
 - Tubos em cobre diâmetro 9,52mm e espessura de 0,4mm;
 - Tira de alumínio com largura de 125mm e espessura de 0,5mm.
- As calhas coletoras são fabricadas com dois tubos de cobre com diâmetro de 22mm e espessura de 0,5mm;
- O isolamento do coletor é composto do seguinte item:
 - O fundo do coletor apresenta um isolamento composto por uma manta de lã de vidro com densidade de 16 kg/m³ e espessura de 25mm;
 - Na parte interna de todas as laterais são utilizadas placas de lã de vidro com densidade de 40 kg/m³ e espessura de 12mm.
- A pintura da placa absorvedora é feita com uma tinta preta fosca comum;
- A cobertura do coletor é feita por um vidro comum do tipo *Float* incolor e transparente com 3,00 mm de espessura.

A solda para a junção da tira de alumínio aos tubos de cobre é por ultrassom, a pintura que é feita no conjunto absorvedor é realizada na face onde se encontram os tubos de elevação.

A vedação do coletor é feita com silicone neutro entre o vidro e perfil de alumínio, perfil de alumínio e chapa do fundo. A vedação entre a calha coletora e o perfil de alumínio é feita utilizando borrachas de EPDM, Figura 15.

Figura 15 – Protótipo I.



Fonte: (Autor)

Esse é o primeiro protótipo construído que apresenta modificações na montagem da posição do tubo de elevação e com isolamento lateral somente onde está localizada as calhas coletoras.

c) **Características do protótipo II**

O coletor protótipo II apresenta as seguintes características:

- Caixa externa em alumínio extrudado e com espessura de 1,0mm e altura de 61mm;
- Fundo em chapa de alumínio com espessura de 0,4mm;
- 7 aletas compostas dos seguintes itens:
 - Tubos em cobre diâmetro 9,52mm e espessura de 0,4mm;
 - Tira de alumínio com largura de 142mm e espessura de 0,4mm.
- As calhas coletoras são fabricadas com dois tubos de cobre com diâmetro de 22mm e espessura de 0,5mm;
- O isolamento do coletor é composto dos seguintes itens:
 - O fundo do coletor apresenta um isolamento composto por uma manta de lã de vidro com densidade de 16 kg/m³ e espessura de 25mm;
 - Na parte interna de todas as laterais são utilizadas placas de lã de vidro com densidade de 40 kg/m³e espessura de 12mm.
- A pintura da placa absorvedora é feita com uma tinta preta fosca comum;
- A cobertura do coletor é feita por um vidro comum do tipo *Float* incolor e transparente.

A solda para a junção da tira de alumínio aos tubos de cobre é por ultrassom, a pintura que é feita no conjunto absorvedor é realizada na face externa onde se encontram os tubos de elevação.

A vedação do coletor é feita com silicone neutro entre o vidro e perfil de alumínio, perfil de alumínio e chapa do fundo. A vedação entre a calha coletora e o perfil de alumínio é feita utilizando borrachas de EPDM, Figura 16.

Figura 16 – Protótipo II.



Fonte: (Autor)

Esse é o segundo protótipo construído que apresenta modificações na largura da tira da aleta, na espessura da aleta e com isolamento lateral somente onde está localizada as calhas coletoras.

4.1.2 Características

Com base nas informações descritas no item 2.1.2 foi estabelecida a confecção de três coletores, onde sendo um de referência e mais dois com modificações, conforme características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das modificações propostas.

Componentes	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
Local de pintura	Na face oposta ao tubo de 9,52mm	Na mesma face do tubo de 9,52mm	Na face oposta ao tubo de 9,52mm
Espaçamento entre cobertura e aleta	15mm	25mm	15mm
Número de aletas	8	8	7
Largura da aleta	125mm	125mm	142mm
Espessura da tira de alumínio da aleta	0,5mm	0,5mm	0,4mm

Fonte: (Autor)

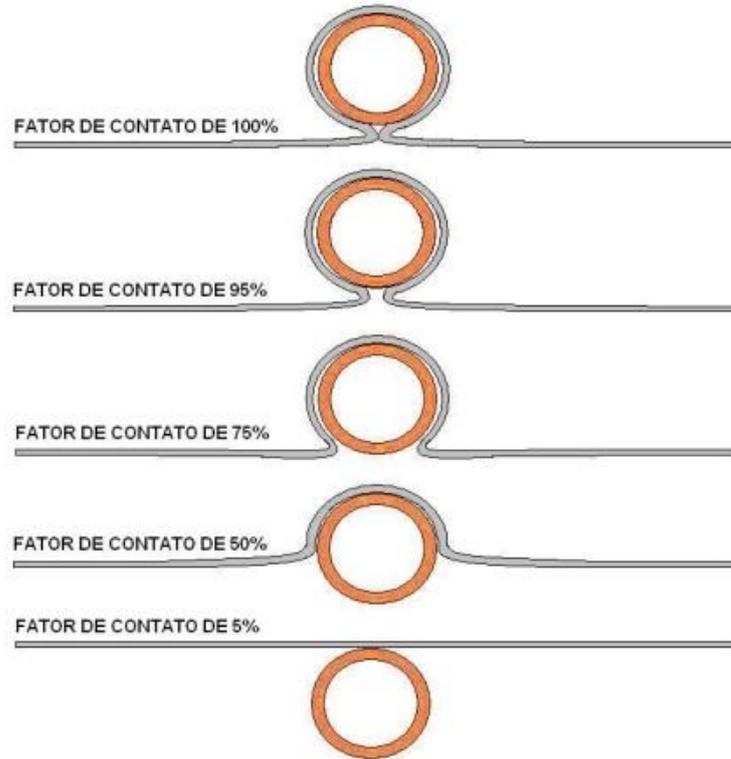
4.1.3 Pontos passíveis de melhorias

Como elucidado no tópico anterior foram efetuadas algumas modificações nos coletores construídos, com o objetivo de se obter uma melhora no seu desempenho térmico.

a) Posição da superfície absorvedora

Com os tubos de elevação, por onde circula o fluido de trabalho, voltados diretamente para a face que recebe a radiação solar, espera-se ter uma maior área da superfície absorvedora que, na nova configuração, inclui grande parte da área de exposição dos tubos de distribuição. Destaca-se, ainda, que com o processo de solda por ultrassom o ponto de contato da superfície absorvedora como tubo de elevação é cerca de 5% do perímetro externo do tubo (Figura 17). Na montagem utilizada no coletor padrão, todo o calor recebido do Sol deve ser transferido para o tubo passando por esse ponto de contato para, na sequência, ser conduzido ao fluido de trabalho. Considerando que os raios solares estão incidindo sobre o plano do coletor com um ângulo de 0° , o calor não mais estava limitado ao ponto de contato de 5% e sim a combinação dos 5% do ponto de contato 50% da área externa do tubo de elevação que estava recebendo a incidência solar direta naquele momento.

Figura 17 – Exemplos de fator de contato entre placa absorvedora e serpentina.



Fonte: (INMETRO, 2006)

Podemos calcular a nova de área de exposição, nos coletores ensaiados o tubo de elevação apresenta 929 mm de comprimento entre as calhas coletoras, tubos com diâmetro externo de 9,52 mm e no total tem-se oito tubos de elevação.

Calculando o perímetro do tubo de cobre, com a Equação (24).

$$P = \pi D \quad (24)$$

$$P = \pi \times 0,00952 \therefore P = 0,0299m$$

Onde:

P – Perímetro do tubo (m);

D – Diâmetro do tubo (m).

Com o resultado do perímetro foi possível calcular qual a área externa que cada tubo de elevação dispõe, por meio da Equação (25).

$$A_t = PL \quad (25)$$

$$A_t = 0,0299 \times 0,929 \therefore A_t = 0,0278m^2$$

Onde:

A_t – Área externa do tubo (m^2);

P – Perímetro do tubo (m);

L – Comprimento do tubo (m).

De posse da área externa de cada tubo multiplica-se por oito para obter qual a área proporcionada pelos tubos no coletor, Equação (26).

$$A_c = A_t \times 8 \quad (26)$$

$$A_c = 0,0278 \times 8 \therefore A_c = 0,2222m^2$$

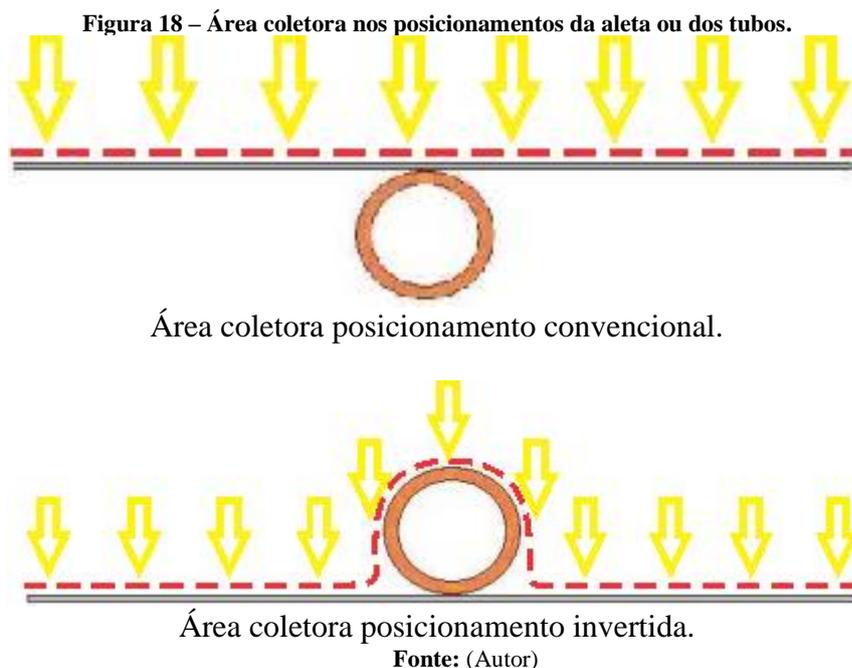
Onde:

A_c – Área externa no coletor (m^2);

A_t – Área externa do tubo (m^2).

Considerando que os raios solares estão com incidência normal ao plano do coletor, ou seja, tem-se 50% do perímetro do tubo de elevação recebendo a incidência dos raios solares, logo espera-se que do valor obtido pela Equação (26) o aumento proporcionado pela nova montagem tenha um acréscimo na área absorvedora do equipamento de 0,1111 m^2 .

Na Figura 18 é possível identificar o acréscimo na área coletora da aleta como descrito, em que a área coletora do novo posicionamento proposto que foi a aleta invertida é maior que o posicionamento convencional.



b) Distância da cobertura transparente até a superfície absorvedora

Para se obter os valores do coeficiente de perda de calor pelo topo do coletor é necessário encontrar os valores da temperatura na superfície absorvedora também para as três montagens. O cálculo desses valores fora obtido por meio de modelagem matemática utilizando o software EES (Engineering Equation Solver).

Para iniciar os cálculos foi adotado como $T_{cob} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Após o processo iterativo, considerada uma precisão melhor que $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ para critério de parada obteve-se como valor final para a temperatura da cobertura $32,94 \text{ }^\circ\text{C}$, que gera um coeficiente de perda para o topo da ordem de $4,669 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Assim como foi feito no momento do cálculo de T_{cob} para se obter o valor de T_{abs} necessita-se realizar o cálculo iterativo e foi escolhido como critério de parada uma precisão melhor que $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Os valores de T_{abs} após a primeira iteração reduzem-se de $T_{abs0} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ para $T_{abs1} = 45,89 \text{ }^\circ\text{C}$, na segunda iteração ao valor de $T_{abs2} = 46,30 \text{ }^\circ\text{C}$, na terceira iteração se obtém $T_{abs3} = 46,29 \text{ }^\circ\text{C}$ e após realizar a quarta iteração $T_{abs4} = 46,29 \text{ }^\circ\text{C}$ como o valor encontrado satisfaz o critério de parada, finaliza-se os cálculos. Assim o valor a ser adotado para U_t será o de T_{abs4} .

Os valores obtidos nos cálculos anteriores são referentes à montagem feita para o coletor padrão. Na Tabela 2 estão indicados os valores obtidos por simulação para T_{abs} , T_{cob} e U_t para as configurações dos coletores padrão, protótipo I e protótipo II. A variável l é o espaçamento entre a superfície absorvedora e a cobertura transparente. Os valores dessas variáveis para os protótipos estudados constam das simulações apresentadas no Apêndice A1.

Tabela 2 – Comparativo entre as montagens propostas distância entre superfície absorvedora e cobertura.

Variáveis	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
l	15 mm	25 mm	15 mm
T_{abs}	46,29 °C	43,26 °C	48,38 °C
T_{cob}	32,94 °C	31,83 °C	33,89 °C
U_t	4,701 W/m ² · K	4,759 W/m ² · K	4,763 W/m ² · K

Fonte: (Autor)

Na Tabela 2 conseguiu-se identificar que as temperaturas na cobertura e na superfície absorvedora do protótipo II são as maiores e os valores do coletor padrão e protótipo I são bem próximas já o coeficiente de perda de calor pelo topo no coletor padrão é menor resultado depois no protótipo I e o maior no protótipo II.

c) **Largura da superfície absorvedora versus espessura da superfície absorvedora**

Analisando a Figura 12 e os comentários feitos por Duffie e Beckman (2013), denota-se o quão importante a relação espessura e largura da superfície absorvedora é para um bom desempenho de um coletor solar. Para verificar uma possível melhora no desempenho foram propostas algumas montagens; e utilizando as Equações (12) e (13) para se verificar qual o impacto das modificações proposta tem no desempenho do coletor foram calculados os valores de F (Eficiência padrão da superfície absorvedora) para cada equipamento montado conforme indicado na Tabela 3. Para se verificar o passo a passo desses cálculos deve se executar as simulações expostas no Apêndice A1.

Tabela 3 – Comparativo entre as montagens propostas largura e espessura da superfície absorvedora.

Variáveis	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
F	0,9399	0,9398	0,9048
U_L	6,899 W/m ² · K	6,915 W/m ² · K	6,961 W/m ² · K
k	237 W/m · K	237 W/m · K	237 W/m · K
δ	0,50 mm	0,50 mm	0,40 mm
W	125 mm	125 mm	142 mm
D	9,52 mm	9,52 mm	9,52 mm

Fonte: (Autor)

Dos valores contidos na Tabela 3 é possível identificar que o valor de F para a montagem do protótipo I foi o maior valor, seguido pelo resultado do coletor padrão e por último a montagem do protótipo II.

4.2 Confeção dos protótipos dos coletores

Neste tópico, é mostrada a confecção dos coletores utilizados neste trabalho, sendo discriminados os componentes de cada equipamento.

4.2.1 Fabricação de coletores solares

Como já foi abordado no item 2.1.2 os coletores solares são compostos de diversos itens e componentes, estes têm suas funções e corroboram para gerar um desempenho satisfatório para o equipamento. A seguir será mostrada, a sequência de fabricação de um coletor solar, para facilitar foram divididas as etapas de fabricação em:

a) **Confecção das Aletas**

Como etapa inicial na sequência de fabricação, o conjunto aleta é montado, pois é o primeiro componente que integra expressivamente o coletor.

- ***Corte da Tira de Alumínio:***

A tira de alumínio é uma das peças fundamentais na fabricação da aleta do equipamento. No caso dos coletores confeccionados as tiras utilizadas são fabricadas em alumínio. Esse componente pode ser confeccionado também de cobre, ou seja, material bom condutor térmico. Como visto na Figura 19a, a tira de alumínio é cortada na medida necessária e segue para a fabricação da aleta.

- ***Chanfro da Tira de Alumínio:***

A tira de alumínio devido ao processo de montagem escolhido necessita que após ser cortada, ela passe por um processo de corte nas extremidades como visto na Figura 19b. Esse chanfro é efetuado para que no processo de solda brasagem que é efetuada quando se monta o conjunto absorvedor não danifique a tira de alumínio da aleta.

- ***Corte Tubo de Cobre 9,52 mm (Tubo de Elevação):***

O tubo de elevação assim como a tira de alumínio são os componentes da aleta do conjunto absorvedor do coletor, o tubo de cobre 9,52 mm como se vê na Figura 19c, deve ser cortado no comprimento pré-definido para que ele possa ser soldado na aleta do equipamento.

- ***Solda da Aleta:***

O processo de união da fita de alumínio com o tubo de cobre no caso dos equipamentos utilizados foi o de solda por ultrassom.

- ***Calibração Tubo da Aleta:***

Como circula água pelo tubo de cobre da aleta esse precisa ser calibrado em suas extremidades, corrigindo-se algum eventual amassamento.

- ***Corrugação da Aleta:***

Nesse momento a aleta passa pela máquina de corrugação como indicado na figura 19d. Com o objetivo de aumentar a área absorvedora e resistência mecânica.

Figura 19 – Processos de confecção da aleta.



a) Corte tira de alumínio



b) Chanfro da tira de alumínio



c) Corte tubo de cobre 9,52mm



d) Corrugação da aleta

Fonte: (Autor)

b) Confecção do Conjunto Absorvedor

Na sequência da montagem dos coletores, o próximo elemento é a montagem do conjunto absorvedor ou simplesmente absorvedor.

- ***Corte tubo de Cobre 22 mm (Calha Coletora):***

O corte do tubo de cobre de 22 mm é efetuado para que possam fabricar as calhas coletoras ou tubos flautas do coletor solar Figura 20a.

- ***Furação da Calha Coletora:***

A furação do tubo flauta é necessária para que possamos efetuar a montagem do conjunto absorvedor Figura 20b. Esse processo é de grande importância, pois durante o processo de montagem do conjunto absorvedor se deve ter cuidado para que os tubos de elevação não

influenciem o escoamento no interior da calha coletora, que impactaria na eficiência do coletor solar.

- ***Solda Brasagem:***

A solda brasagem é utilizada para se unir as aletas a calha coletora Figura 20c, após esse processo de união se tem um novo componente se chamar conjunto absorvedor.

- ***Teste de Estanqueidade:***

O teste de estanqueidade é realizado para se verificar pontos de falha no processo de soldagem, gerando eventuais pontos de vazamento e, também, se o conjunto irá suportar a pressão para o qual foi dimensionado (Figura 20d). Esse teste é efetuado em um tanque com água onde se aplica uma pressão de ar no interior do conjunto absorvedor igual a 1,5 vezes a pressão de trabalho. Se durante o teste é encontrado algum ponto com vazamento, a peça defeituosa volta para ser reparada.

- ***Pintura:***

O conjunto absorvedor após ser testado segue para a pintura (Figura 20e). Nesse momento, é definido qual o tipo de equipamento que será produzido, pois para o protótipo I a pintura é feita na face onde se encontram os tubos de elevação, enquanto que para o protótipo II em face de receber a tinta é a oposta aos tubos de elevação na aleta.

As características da tinta utilizadas no processo de pintura são as seguintes, tinta preta fosca desenvolvida pela empresa com absorvidade de 95% (α) e emissividade 5% (ϵ).

Processo de pintura utilizado na confecção dos equipamentos foi por aspersão onde a tinta é depositada num tanque que fica sob pressão, e no momento da aplicação ela é aspergida no conjunto absorvedor através de um revolver de pintura. Para se obter uma boa aplicação deve-se aplicar uma pequena camada de tinta, os equipamentos confeccionados foram pintados com espessura da camada de tinta numa faixa de 20 μm a 30 μm .

Depois de efetuada a pintura os conjuntos absorvedores são deixados para secagem á temperatura ambiente por período mínimo de 4 horas. A etapa seguinte é a montagem final do coletor.

Figura 20 – Confeção do conjunto absorvedor.



a) Corte tubo de cobre 22mm



b) Furação do tubo flauta



c) Solda brasagem do conjunto absorvedor



d) Teste de estanqueidade



e) Pintura do conjunto absorvedor

Fonte: (Autor)

c) Montagem Coletor

A última parte na construção do coletor solar é a sua montagem final, onde o equipamento fica com a aparência do coletor solar que todos conhecem.

- ***Corte do Perfil de Alumínio:***

O perfil de alumínio que é utilizado para se fabricar a caixa externa do coletor solar necessita ser cortado no comprimento para sua montagem Figura 21a.

- ***Furo e Chanfro no Perfil de Alumínio:***

O perfil de alumínio após ser cortado necessita que sejam feitos os furos para a passagem dos tubos da calha coletora do coletor e que sejam feitos também os chanfros para que a caixa seja dobrada e tome a sua forma final, Figura 21b e Figura 21c.

- ***Corte da Chapa do Fundo do Coletor:***

Similar ao processo de corte da tira de alumínio da aleta o processo de corte da chapa do fundo do coletor é preciso cortar uma chapa de alumínio no comprimento especificado para que se possa fechar o fundo do coletor solar Figura 21d.

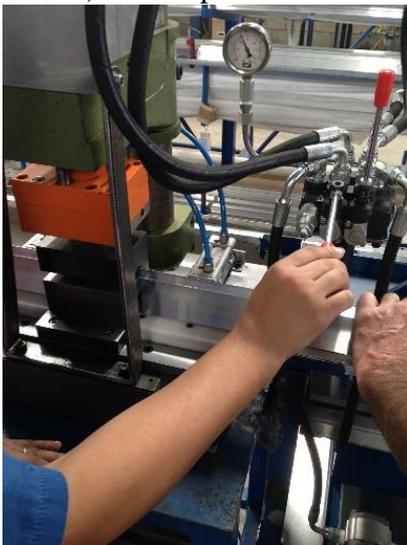
Figura 21 – Confeção da caixa externa do coletor.



a) Corte perfil alumínio



b) Furação do perfil



c) Chanfro no perfil de alumínio



d) Corte chapa de fundo do coletor

Fonte: (Autor)

- **Montagem da Caixa do Coletor:**

A montagem da caixa do coletor é feita dobrando-se o perfil de alumínio que foi cortado nos processos anteriores, para fixação da chapa do fundo na parte inferior do coletor e fechando a emenda com uma chapa de alumínio e rebites, Figura 22a.

- **Montagem do Isolante Térmico e Vedações do Coletor:**

A caixa do coletor após sua montagem vai para uma nova bancada de trabalho onde é colocado o isolamento térmico e as borrachas de vedação das calhas coletoras do coletor, Figura 22b.

- **Montagem do Conjunto Absorvedor na Caixa do Coletor:**

Após o conjunto absorvedor estar pintado e seco e a caixa do coletor montada, será colocado o conjunto absorvedor dentro da caixa do coletor, Figura 22c.

- **Montagem da Cobertura do Coletor:**

Assim que a caixa e o conjunto absorvedor estão montados, o coletor segue para o seu último passo que é a colocação da sua cobertura de vidro, Figura 22d.

Figura 22 – Montagem do coletor.



a) Montagem da caixa do coletor



b) Montagem do isolante térmico e vedações



c) Montagem do conjunto absorvedor na caixa do coletor



d) Montagem da cobertura de vidro do coletor

Fonte: (Autor)

4.3 Método de ensaio dos coletores

Neste tópico é abordado como e porque foi escolhido o ensaio de desempenho térmico do coletor como forma de avaliação dos protótipos.

4.3.1 Definição do método de ensaio dos coletores

Após a leitura das referências normativas descritas nos itens 2.3.1 e 2.3.2, foi possível estabelecer e identificar um método de ensaio que seja capaz de evidenciar os resultados provocados pelas mudanças que foram implementadas nos coletores protótipos e os resultados do coletor padrão.

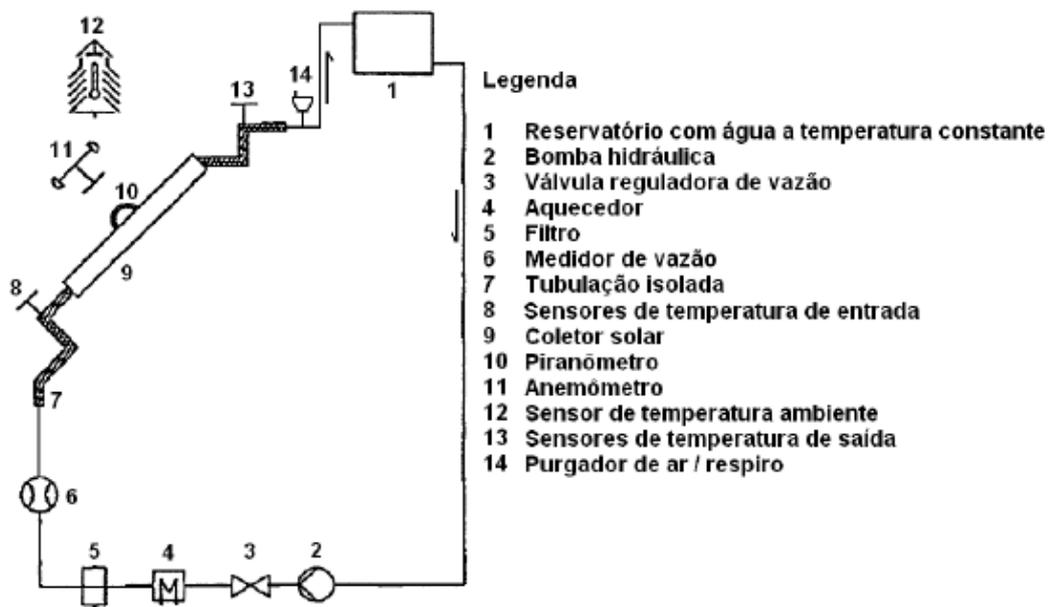
Neste trabalho com a colaboração do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) que disponibilizou o Laboratório de Instalações Prediais e Saneamento do Centro Tecnológico do Ambiente Construído, realizou-se o ensaio de desempenho térmico nos coletores. Salienta-se que o laboratório do IPT é acreditado pelo INMETRO para a realização dos ensaios de certificação de coletores solares.

4.3.2 Equipamentos e montagem para o ensaio

Para a avaliação do desempenho térmico dos coletores em questão, consideraram-se os seguintes equipamentos disponíveis, conforme ilustrado na Figura 23:

- Simulador solar;
- Sensores de temperatura;
- Medidores de radiação;
- Manômetro;
- Medidor de vazão.

Figura 23 – Esquema montagem ensaio de desempenho térmico.



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b, p. 35)

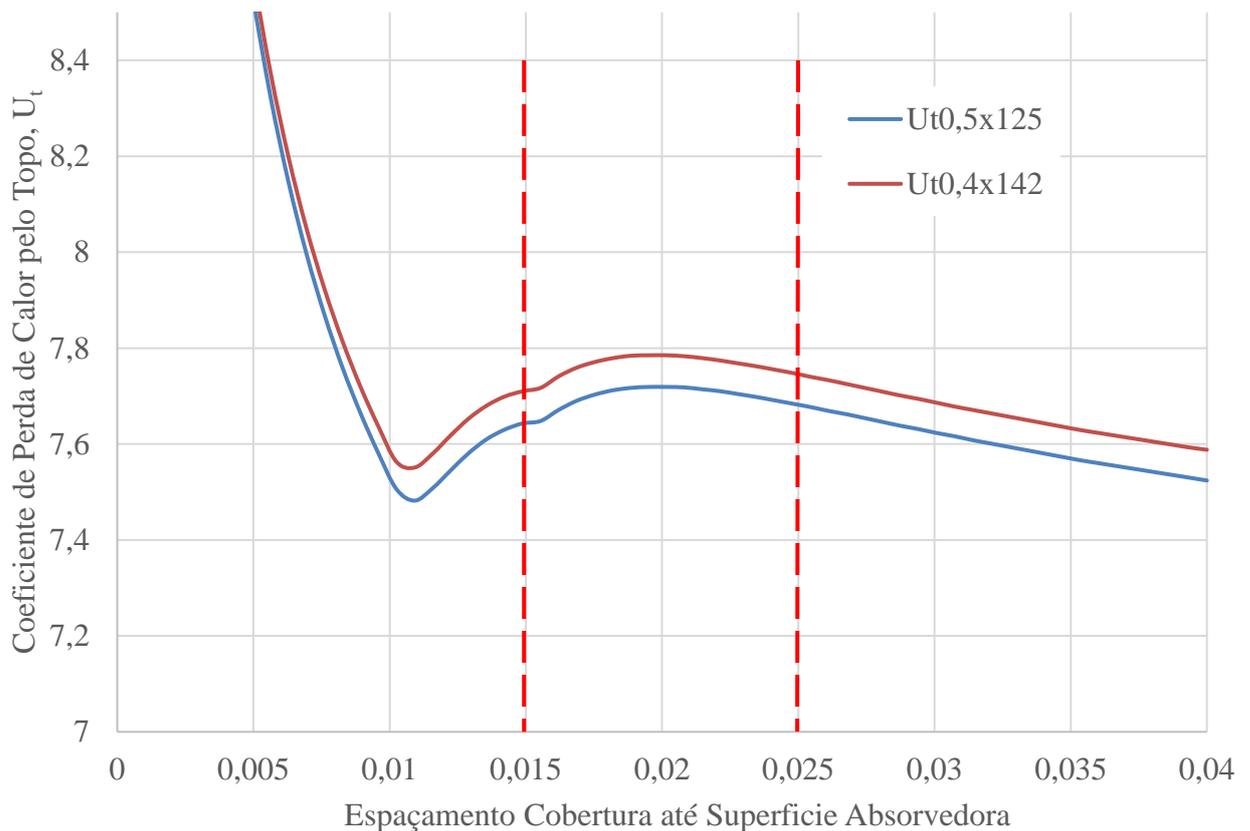
A Figura 23 apresenta o esquema da bancada de ensaio de desempenho térmico nos coletores solares. O procedimento deste ensaio é executado conforme norma ABNT NBR 15747 (2009b).

4.4 A simulação computacional

A simulação computacional executada foi modelada segundo cálculos determinados por Duffie e Beckman (2013) cujo resultado possibilitou a simulação dos parâmetros modificados nos coletores solares deste trabalho.

O gráfico da Figura 24 apresenta o resultado da simulação efetuada nos coletores para os diversos espaçamentos entre a superfície absorvedora e cobertura transparente.

Figura 24 – Gráfico da perda de calor pelo topo do coletor em função do espaçamento da superfície absorvedora.



Fonte: (Autor)

Com base nesta figura pode-se validar a simulação computacional realizada, pois a Figura 24 apresenta o mesmo perfil de curvas indicadas na Figura 11 elaboradas por Duffie e Beckman (2013), e que segundo os autores é a resposta que um coletor solar deve ter ao se realizar modificações no seu espaçamento superfície absorvedoras cobertura transparente.

O Apêndice A1 contém os detalhes da simulação computacional.

4.5 Análise dos resultados

A seguir estão expostos os resultados das modificações propostas tanto na simulação computacional, como nos ensaios do laboratório.

4.5.1 Resultados da simulação computacional

Com base nos resultados dos cálculos feitos utilizando do modelo matemático para se verificar a eficácia ou não das modificações; e a metodologia de cálculo do desempenho dos coletores conforme regulamento do INMETRO, foi possível compilar os resultados da produção de energia para os coletores estudados com as suas respectivas modificações, esses resultados foram obtidos por meio do software EES. Os resultados da compilação estão apresentados na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Produção de energia e eficiência dos coletores simulação computacional.

Variáveis	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
P_{med}	78,22 kWh/mês	82,06 kWh/mês	75,41 kWh/mês
$PMEe$	77,83 kWh/mês.m ²	81,66 kWh/mês.m ²	75,04 kWh/mês.m ²
η	0,559	0,586	0,539

Fonte: (Autor)

Na Tabela 4 pode-se observar que o protótipo I apresentou o maior valor de produção de energia; em seguida o coletor padrão; e com o menor valor de produção de energia, o protótipo II.

4.5.2 Resultados dos ensaios em laboratório

Os resultados dos ensaios realizados no laboratório do IPT estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Produção de energia e eficiência dos coletores ensaio em laboratório.

Variáveis	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
P_{med}	85,02 kWh/mês	79,2 kWh/mês	73,50 kWh/mês
$PMEe$	84,60 kWh/mês.m ²	78,2 kWh/mês.m ²	73,13 kWh/mês.m ²
η	0,609	0,567	0,526

Fonte: (Autor)

Na Tabela 5 observa-se que o coletor padrão apresentou o maior valor de produção de energia; em seguida o protótipo I; e com o menor valor de produção de energia o protótipo II.

O Apêndice A3 contém as curvas e equações de eficiências dos coletores ensaiados no laboratório do IPT.

4.6 Incertezas do trabalho

Neste tópico estão expostas as incertezas das medições consideradas nesse trabalho. As incertezas discriminadas aqui são as do processo de confecção dos coletores que foram enviadas para ensaio nos laboratórios do IPT; a referente a simulação computacional; e a incerteza da bancada de teste do laboratório.

4.6.1 Incerteza do processo produtivo

Por meio das informações descritas no item 2.5.1 foi calculado o valor da incerteza para o processo produtivo dos coletores utilizados neste trabalho. No Apêndice A2 está a planilha com os cálculos de cada incerteza que é gerada durante a produção do coletor solar. O valor da *Incerteza Combinada* é de $\pm 1,14\%$ e da *Incerteza Expandida* é $\pm 2,92\%$ que são os valores de interesse deste trabalho.

4.6.2 Incerteza da simulação computacional

No desenvolvimento do modelo matemático que gerou a simulação computacional foi necessário fazer algumas simplificações no modelo que podem contribuir com pequenas variações no resultado da simulação. A partir desta informação é preciso dizer que a simulação computacional apresenta alguma incerteza, mas não foi possível mensurar esse valor, o que se pode afirmar que é pequena, pois conforme apresentado no item 4.4, os resultados obtidos pela simulação convergem para valores muito próximos aos obtidos por Duffie e Beckman (2013).

4.6.3 Incerteza da bancada de teste

Conforme resultados recebidos do laboratório do IPT a bancada onde se realizou o ensaio de desempenho térmico apresenta uma incerteza de medição de aproximadamente $\pm 3,0\%$, ou seja, os valores obtidos da eficiência térmica média dos coletores ensaiados apresentam essa incerteza indicada.

4.7 Análise dos resultados com base nas incertezas

Aos valores da produção de energia dos coletores por meio da simulação e dos ensaios laboratoriais, deve-se aplicar as incertezas calculadas para se obter os valores finais de cada protótipo.

Nos valores obtidos por meio da simulação computacional foram aplicados os valores da incerteza calculada para o processo produtivo, ou seja, $\pm 2,92\%$. Na Tabela 9 são apresentados os intervalos de valores aceitáveis para a simulação computacional executada, segundo incerteza calculada.

Tabela 6 – Produção de energia simulação computacional aplicando incerteza.

Variáveis	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
$P_{med-Max}$	80,50 kWh/mês	84,46 kWh/mês	77,61 kWh/mês
P_{med}	78,22 kWh/mês	82,06 kWh/mês	75,41 kWh/mês
$P_{med-Min}$	75,94 kWh/mês	79,66 kWh/mês	73,21 kWh/mês

Fonte: (Autor)

Nos ensaios laboratoriais foi encontrada uma incerteza de $\pm 3,0\%$, como a bancada nos fornece o valor da eficiência dos coletores foi necessário calcular os valores da produção de energia para cada protótipo ensaiado. Na Tabela 10 são apresentados os intervalos de valores aceitáveis para o ensaio laboratorial executado, segundo incerteza da bancada de teste.

Tabela 7 – Produção de energia ensaio laboratorial aplicando incerteza.

Variáveis	Coletor		
	Padrão	Protótipo I	Protótipo II
$P_{med-Max}$	89,50 kWh/mês	83,61 kWh/mês	77,87 kWh/mês
P_{med}	85,02 kWh/mês	79,2 kWh/mês	73,50 kWh/mês
$P_{med-Min}$	81,09 kWh/mês	75,20 kWh/mês	69,47 kWh/mês

Fonte: (Autor)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As configurações propostas apresentaram resultados satisfatórios no âmbito da simulação computacional, em que a configuração do protótipo I apresentou o melhor resultado de produção de energia e eficiência, entre todos os equipamentos avaliados.

Salienta-se que o modelo matemático proposto neste trabalho apresenta limitações que podem não estar mostrando a real resposta que um equipamento, com as características descritas por esse trabalho pode apresentar em condições reais de funcionamento. Essas limitações são devidas às aproximações realizadas, pois os valores exatos de determinadas variáveis somente podem ser obtidos por meio de coleta de dados experimentais.

Ressalta-se que durante a execução deste trabalho o coletor Protótipo I, foi enviado para ensaio no laboratório do IPT, apresentou um resultado abaixo do que o modelo matemático estava indicando, portanto foi realizada uma reunião para discussão deste resultado em que foram encontradas diversas falhas construtivas no coletor, o que prejudicou de forma considerável o seu desempenho térmico.

Devido a esse problema construtivo reforça-se a importância do controle de qualidade do processo executivo, pois o equipamento coletor solar é simples e de construção fácil, mas pequenos detalhes podem afetar a resposta em uso, de modo a ser completamente diferente do que se projetou.

Conclui-se que a modificação proposta de troca do posicionamento de pintura e montagem da aleta do coletor, onde os tubos de elevação agora ficam voltados para a abertura do coletor, em condições de incidência solar normal ao plano do coletor, proporciona um incremento na área coletora do equipamento em $0,11 \text{ m}^2$, esse valor em um coletor de $1,0 \text{ m}^2$ de área externa significa um acréscimo de 11% na área de captação do equipamento.

A distância da superfície absorvedora até a cobertura transparente do coletor influencia na taxa de perda de calor pelo topo do equipamento, o que foi comprovado é que nos equipamentos utilizados o ideal é reduzir essa distância até um valor de aproximadamente 12 mm, pois aumentar esse espaçamento como foi proposto fez o valor da taxa de perda de calor pelo topo se elevar e com isso podendo reduzir o desempenho do coletor. Os valores para a perda de calor pelo topo do coletor obtido com o incremento de 10 mm não foram tão significativos, pois a perda de calor passou de $4,701$ para $4,759 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

A combinação dos parâmetros espessura e largura da aleta da superfície absorvedora nas modificações propostas não apresentou um resultado satisfatório, pois a combinação desses fatores da forma que foi proposta evidenciou valores do coeficiente global de perda de calor

elevada, ou seja, esse equipamento apresenta uma taxa de perda de calor para o ambiente maior que a do equipamento padrão, o valor da eficiência da aleta da superfície absorvedora também reduziu.

Foi constatado que a combinação das modificações levou a um incremento no resultado do coletor, ou seja, o equipamento protótipo I que apresenta uma combinação das modificações no espaçamento entre superfície absorvedora e cobertura e a mudança na posição de montagem da superfície absorvedora, teve um resultado satisfatório o que aponta que essa modificação trouxe benefícios para o desempenho térmico do coletor solar. Deve-se considerar que o resultado obtido refere-se à simulação computacional do funcionamento do coletor se comparado ao resultado do funcionamento deste equipamento no laboratório, denota-se não apresentou o desempenho esperado.

O motivo desta diferença de resultados para um mesmo equipamento se explica pelas incertezas que o processo produtivo apresenta em sua linha de produção. A incerteza da linha de produção é de $\pm 2,92\%$ o que gera uma margem para os resultados da produção média de energia (P_{med}), obtidos pela simulação computacional, oscilar de 79,66 até 84,46 kWh/mês.

O laboratório informou que sua bancada para teste apresenta uma incerteza de $\pm 3,0\%$ na execução do ensaio de eficiência média, desta forma o resultado obtido pelo laboratório pode oscilar de 75,20 até 83,61 kWh/mês. Desta forma pode-se validar os resultados obtidos pela simulação computacional, com ressalvas devido as simplificações, mas pode-se dizer que a combinação das modificações executadas no protótipo I realmente produziram um equipamento com rendimento superior ao coletor padrão.

A colaboração do IPT fornecendo suas instalações para executar os ensaios necessários foi de grande valia para esse trabalho, pois como o laboratório é acreditado pelo INMETRO, para a realização dos ensaios de etiquetagem dos coletores solares, os resultados obtidos nos ensaios se apresentam dentro dos padrões exigidos pelas normas vigentes e organismos certificadores.

Como comentado a barreira que foi encontrada para a perfeita execução e melhor consolidação dos dados foi o fato da empresa fabricante ter liberado alguns equipamentos que estão com um pequeno desvio de controle, o que gerou a produção de coletores que não são fidedignos aos projetos. Assim, pode-se concluir que é preciso auxiliar as empresas fabricantes a terem um melhor controle de sua linha produção a fim de garantir que os equipamentos que são disponibilizados no mercado apresentem o rendimento a qual eles foram projetados.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. F. D. **Estudo térmico de um sistema solar de aquecimento de água residencial para duas configurações de superfície absorvedora**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 72. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.184 - Coletores Solares p Líquidos - Determinação do Rendimento Térmico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15747-1: Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 11 p. ISBN 978-85-07-01682-3. Parte 1 - Requisitos Gerais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15747-2: Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 117 p. ISBN 978-85-07-01683-0. Parte 2 - Métodos de Ensaio.

BRASIL. **LEI No 10.295**. Brasília: [s.n.]. 2001. p. 1.

CERTIFICASOL. ENCE - Etiqueta nacional de conservação de energia. **Site CertificaSol**, 2014. Disponível em: <<http://www.certificasol.com.br/#!ence/c1t49>>. Acesso em: 02 Janeiro 2015.

DASOL. Parque solar térmico brasileiro gerou 7.354 GWh em 2014. **Sol Brasil**, São Paulo, n. 26, p. 28, Abril/Junho 2015.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Fourth Edition. ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013.

ELETROBRÁS. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Classe Residencial**. Rio de Janeiro: Departamento de Planejamento e Estudo de Conservação de Energia - DPS, 2007.

et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ª Edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods**. Geneva: CEN, 2006. 130 p. ISBN ISO/FDIS 9806:2013(E).

GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of Solar Engineering**. Second Edition. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 2000.

GUM. **Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM 2008**. JCGM. [S.l.], p. 141. 2008. (978-85-86920-13-4).

INCERPI, P. H. **INCERTEZA DE MEDIÇÃO – MÉTODO PRPOSTO PARA A ANÁLISE DA CONFORMIDADE DO PRODUTO**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. Itajubá, p. 139. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.

INMETRO. PET - Planilha de Especificações Técnicas, 2006. Disponível em: <<http://bhzgreensrv01.green.pucminas.br/gestaoV2/AcpPrdEns.nsf/frmPET?OpenForm>>. Acesso em: 13 Outubro 2015.

INMETRO. Etiqueta de eficiência energética. **Site do INMETRO**, 2012a. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php>. Acesso em: 02 Janeiro 2015.

INMETRO. Etiqueta de Eficiência Energética do Programa Brasileiro de Etiquetagem. **Site do INMETRO**, 2012b. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>>. Acesso em: 02 Janeiro 2015.

INMETRO. Histórico do Programa Brasileiro de Etiquetagem. **Site do INMETRO**, 2012c. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe/historico.php>>. Acesso em: 02 Janeiro 2015.

INMETRO. Programa Brasileiro de Etiquetagem. **Site do INMETRO**, 2012d. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php>. Acesso em: 02 Janeiro 2015.

INMETRO. **Portaria nº 301**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012e. 22 p. Regulamento Técnico da Qualidade para Equipamentos de Aquecimento Solar de Água.

INMETRO. **Portaria nº 352**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012f. 26 p. Requisitos de Avaliação da Conformidade para Equipamentos de Aquecimento Solar de Água.

INMETRO. Legislação INMETRO. **Site do INMETRO**, 03 Setembro 2015. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001864.pdf>>. Acesso em: 10 Setembro 2015.

INMETRO. Tabelas de consumo/Eficiência energética. **Site do INMETRO**, 2016. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>>. Acesso em: 10 Outubro 2016.

INSTITUO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Ensaio de Desempenho Térmico**. IPT. São Paula, p. 3. 2015.

JONES, G. F.; LIOR, N. Flow distribution in manifolded solar collectors with negligible buoyancy effects. **Solar Energy**, Março 1994. 289-300.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and systems**. 1st ed. ed. Burlington: Elsevier, 2009.

LEE, D. W.; SHARMA, A. Thermal performances of the active and passive water heating systems based on annual operation. **Solar Energy, Volume 81, Issue 2**, Republic of Korea, Fevereiro 2007. 207-215.

MAITAN, A. R. **Aplicação do modelo discreto-contínuo para o caso da escolha do sistema de aquecimento de água domiciliar e o efeito sobre o consumo de energia elétrica**. Escola de Economia de São Paulo. São Paulo, p. 69. 2011. (CDU 696.48). Dissertação (Mestrado Profissional) Escola de Economia de São Paulo.

MANGUSSI, C. R. **Aquecimento Solar de Água: Estudo experimental do Incremento no Desempenho de Coletor Solar para Utilização em Habitação**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, p. 110. 2003. Dissertação (Mestre em Habitação), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE. São José dos Campos, p. 60. 2006. (ISBN 85-17-00030-7 / ISBN 978-85-17-00030-0).

PEREIRA, E. M. D.; ANDRADE, A. S. D. **Curso de Capacitação em Aquecimento Solar**. Belo Horizonte: ABRAVA, 2009.

RAMLOW, B.; NUSZ, B. **Solar Water Heating**: A comprehensive guide to solar water and space heating systems. Second Printing. ed. Gabriola Island: New Society Publishers, 2011.

SILVA, D. D. S. **Ddesenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Dimensionamento de Coletores Solares de Placa Plana**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, p. 100. 2012. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica), Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo de Desempenho do Aquecedor Solar de Baixo Custo**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 143. 2009. (S618e). Dissertação (Mestre em Engenharia Química) Universidade Federal de Uberlandia, Programa de Graduação em Engenharia Química.

VASCONCELLOS, L. E. M. D.; LIMBERGER, M. A. C. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil**: Contribuições da Eletrobras Procel e Parceiros. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012.

A1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Abaixo temos os códigos que foram aplicados ao programa EES para se obter os valores do desempenho de cada coletor estudado.

A1.1 Coletor padrão

"Simulação para cálculo da temperatura do absorvedor durante o ensaio"

"Funções"

"Cálculo do Coeficiente de Radiação entre Superfície Absorvedora e Cobertura"

```
FUNCTION h_r.A.C( sigma ; TA ; TC ; epsilon_A ; epsilon_C )

TA:=converttemp(C;K;TA)
TC:=converttemp(C;K;TC)
h_r.A.C=(sigma * (TA^2 + TC^2) * (TA+TC)) / (1/epsilon_A+1/epsilon_C-1)

END
```

"Calculo do Coeficiente de Radiação entre Cobertura e Ambiente"

```
FUNCTION h_r.C.CE( epsilon_C ; sigma ; TC ; TCE )

TC:=converttemp(C;K;TC)
TCE:=converttemp(C;K;TCE)
h_r.C.CE=(epsilon_C*sigma * (TC^2 + TCE^2) * (TC+TCE))

END
```

"Calculo do Rayleigh"

```
FUNCTION Ra(T2;T1;L;Tmed)

Tmed:=converttemp(C;K;Tmed)
Pr=prandtl(air;t=Tmed)
mu=Viscosity(Air;T=Tmed)
P:=1*convert(atm;kpa)
rho=Density(Air;T=Tmed;P=P)
nu=mu/rho
Ra=(9,81[m/s^2]*(T2-T1)*L^3*Pr)/(Tmed*nu^2)

END
```

"Interações p/ T_Cob"

```
PROCEDURE Int_Tcob(T_abs;T_Cob0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob;h_r.cob.amb;h_c.abs.cob;U_t;T_Cob1)

T_med=(T_abs+T_Cob0)/2

h_r.abs.cob=h_r.A.C( sigma ; T_abs ; T_Cob0 ; epsilon_abs ; epsilon_vid )
```

$h_{r,cob,amb} = h_{r,C} \cdot CE(\epsilon_{vid}; \sigma; T_{Cob0}; T_{amb})$

$Ra = Ra(T_{abs}; T_{Cob0}; E_{cob,abs}; T_{med})$

Call Tilted_Rect_Enclosure_ND(Ra; teta; 1/E_cob_abs; Nusselt)

$k = \text{Conductivity}(\text{Air}; T = \text{converttemp}(C; K; T_{med}))$

$h_{c,abs,cob} = \text{Nusselt} \cdot k / E_{cob,abs}$

$U_t = (1 / (h_{c,abs,cob} + h_{r,abs,cob}) + 1 / (h_{ven} + h_{r,cob,amb}))^{-1}$

$T_{Cob1} = T_{abs} - (U_t \cdot (T_{abs} - T_{amb})) / (h_{c,abs,cob} + h_{r,abs,cob})$

END

PROCEDURE Int_Tabs(T_abs0; sigma; epsilon_abs ;
epsilon_vid; T_amb; teta; E_cob_abs; h_ven; K_iso; L_f; L_l; Pe; H; A_c; delta_abs; W; D; C_b; h_fi; m_dot; CP;
S; T_i; F; U_G; T_abs1)

"1ª Interação p/ T_Cob"

$T_{Cob0} = 35 \text{ [C]}$

Call Int_Tcob(T_abs0; T_Cob0; sigma; epsilon_abs ;
epsilon_vid; T_amb; teta; E_cob_abs; h_ven; h_r,abs,cob0; h_r,cob,amb0; h_c,abs,cob0; U_t0; T_Cob1)

"2ª Interação p/ T_Cob"

Call Int_Tcob(T_abs0; T_Cob1; sigma; epsilon_abs ;
epsilon_vid; T_amb; teta; E_cob_abs; h_ven; h_r,abs,cob1; h_r,cob,amb1; h_c,abs,cob1; U_t1; T_Cob2)

"3ª Interação p/ T_Cob"

Call Int_Tcob(T_abs0; T_Cob2; sigma; epsilon_abs ;
epsilon_vid; T_amb; teta; E_cob_abs; h_ven; h_r,abs,cob2; h_r,cob,amb2; h_c,abs,cob2; U_t2; T_Cob3)

"4ª Interação p/ T_Cob"

Call Int_Tcob(T_abs0; T_Cob3; sigma; epsilon_abs ;
epsilon_vid; T_amb; teta; E_cob_abs; h_ven; h_r,abs,cob3; h_r,cob,amb3; h_c,abs,cob3; U_t3; T_Cob4)

$U_f = K_{iso} / L_f$

$U_l = (K_{iso} / L_l \cdot Pe \cdot H) / A_c$

$U_G = U_{t3} + U_f + U_l$

$T_{abs0} = \text{converttemp}(C; K; T_{abs0})$

$K_{abs} = k_{\text{'Aluminum'}}(T_{abs0})$

$m = \sqrt{U_G / (K_{abs} \cdot \delta_{abs})}$

$F = \tanh(m \cdot (W-D)/2) / (m \cdot (W-D)/2)$

$F' = (1/U_G) / (W \cdot ((1/(U_G \cdot (D+(W-D) \cdot F))) + 1/C_b + 1/(\pi \cdot D \cdot h_{fi})))$

$a = (m_{dot} \cdot Cp) / (A_c \cdot U_G \cdot F')$

$$F_R = a \cdot (1 - \exp(-F'/a))$$

$$q_u = F_R \cdot (S - U_G \cdot (T_i - T_{amb}))$$

$$T_{abs1} = T_i + q_u / (F_R \cdot U_G) \cdot (1 - F_R)$$

END

"Propriedades conhecidas"

E_cob_abs = 15 [mm]*convert(mm;m) "Para usar a tabela de resultados ocultar essa variavel"

epsilon_abs=0,95

T_amb=23,9 [C]

h_ven=6,17 [W/m^2 K]

teta=45

epsilon_vid=0,88

sigma=5,67E-8 [W/m^2 K^4]

K_iso = 0,045 [W/m K]

L_f = 38 [mm]*convert(mm;m)

L_l= 12 [mm]*convert(mm;m)

Pe=4 [m]

H= 61 [mm]*convert(mm;m)

A_c= 0,9026 [m^2] "Área Coletor Padrão e Prototipo II = 0,9026 m² e Prototipo I = 0,9417 m²"

delta_abs = 0,5 [mm]*convert(mm;m)

W = 125 [mm]*convert(mm;m)

D = 9,52 [mm]*convert(mm;m)

C_b = 9,99e200

h_fi = 1000000 [W/m^2 K]

m_dot = 0,019 [kg/s]

T_i = 23,9 [C] "Para usar a tabela de resultados ocultar essa variavel, Pontos: p1 (20,3 C); p2 (39,9 C); p3 (59,5 C); p4 (78,4 C); p5 (59,8 C); p6 (39,9 C); p7 (20,3)"

T = converttemp(C;K;T_i)

P = 1 [atm]*convert(atm;kpa)

Cp=Cp(Water;T=T;P=P)

G_T= 800 [W/m^2]

"

"

"Calculo Tal Alfa b"

"Radiação incidente normal ao plano do coletor"

$$n_r = 1,526$$

$$r_0 = ((n_r - 1) / (n_r + 1))^2$$

$$\tau_{rb} = ((1 - r_0) / (1 + r_0))$$

$$K = 32 [m^{-1}]$$

$$L = 0,003 [m]$$

$$\theta_{2b} = 0 [degree]$$

$$\tau_{ab} = \exp(-((K \cdot L) / \cos(\theta_{2b})))$$

$$\tau_b = \tau_{ab} \cdot \tau_{rb}$$

$$\alpha_n = 0,90$$

$$\alpha_b = \alpha_n * (1 - 1,5879 * 10^{(-3)} * \theta_{2b} + 2,7314 * 10^{(-4)} * \theta_{2b}^2 - 2,3016 * 10^{(-5)} * \theta_{2b}^3 + 9,0244 * 10^{(-7)} * \theta_{2b}^4 - 1,8000 * 10^{(-8)} * \theta_{2b}^5 + 1,7734 * 10^{(-10)} * \theta_{2b}^6 - 6,9937 * 10^{(-13)} * \theta_{2b}^7)$$

$$\tau.\alpha_b = 1,01 * \tau_b * \alpha_b$$

"Radiação Absorvida pelo Coletor"

$$S = G_T * \tau.\alpha_b$$

"
_____"
_____"

"1ª Interação p/ T_Abs"

$$T_{abs0} = 100 \text{ [C]}$$

Call Int_Tabs(T_abs0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_0;U_G0;T_abs1)

"2ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs1;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_1;U_G1;T_abs2)

"3ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs2;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_2;U_G2;T_abs3)

"4ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs3;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_3;U_G3;T_abs4)

$$T_{abs5} = \text{converttemp}(C;K;T_{abs4})$$

$$K_{ab} = k('Aluminum'; T_{abs5})$$

$$ma = \sqrt{U_{G3}/(K_{ab} * \delta_{abs})}$$

$$F = \tanh(ma * (W-D)/2) / (ma * (W-D)/2)$$

$$F' = (1/U_{G3}) / (W * ((1/(U_{G3} * (D + (W-D) * F))) + 1/C_b + 1/(\pi * D * h_{fi})))$$

$$a = (m_{dot} * Cp) / (A_c * U_{G3} * F')$$

$$F_R = a * (1 - \exp(-F'/a))$$

$$q_u = F_R * (S - U_{G3} * (T_i - T_{amb}))$$

$$\eta = F_R * \tau.\alpha_b - (F_R * U_{G3} * (T_i - T_{amb})) / G_T$$

$$T_{fm} = T_i + q_u / (F_R * U_{G3}) * (1 - F_R / F')$$

$$T_m = T_i + (T_{fm} - T_i) / 2$$

$$v = (T_m - T_{amb}) / G_T$$

"Calculo Eficiencia Media"

$$\text{eta}_{med.Col.Padrao} = \text{integral}(-14,907 * x^2 - 6,2392 * x + 0,7054; x; 0; 0,044) / 0,044$$

"Calculo K_theta"

"Calculo Tal Alfa en"

$$\theta_{e.d} = 25$$

$$\theta_{2d} = \arcsin(\sin(\theta_{e.d}) / n_r)$$

$$r_{p.d} = (\sin(\theta_{2d} - \theta_{e.d})^2 / \sin(\theta_{2d} + \theta_{e.d})^2)$$

$$r_{ll.d} = (\tan(\theta_{2d} - \theta_{e.d})^2 / \tan(\theta_{2d} + \theta_{e.d})^2)$$

$$r_d = (r_{p.d} + r_{ll.d}) / 2$$

$$\tau_{rd} = ((1/2) * ((1 - r_{ll.d}) / (1 + r_{ll.d}) + (1 - r_{p.d}) / (1 + r_{p.d})))$$

$$\tau_{ad} = \exp(-((K * L) / \cos(\theta_{2d})))$$

$$\tau_d = \tau_{ad} * \tau_{rd}$$

$$\alpha_d = \alpha_n * (1 - 1,5879 * 10^{-3} * \theta_{e.d} + 2,7314 * 10^{-4} * \theta_{e.d}^2 - 2,3016 * 10^{-5} * \theta_{e.d}^3 + 9,0244 * 10^{-7} * \theta_{e.d}^4 - 1,8000 * 10^{-8} * \theta_{e.d}^5 + 1,7734 * 10^{-10} * \theta_{e.d}^6 - 6,9937 * 10^{-13} * \theta_{e.d}^7)$$

$$\tau_{\alpha.en} = 1,01 * \tau_d * \alpha_d$$

$$\{\tau_{\alpha.en} = \tau_{\alpha.b}\}$$

$$K_{\theta} = 0,6995 * 0,6786 / (F * \tau_{\alpha.en})$$

"Produção Media de Energia"

$$P_{med} = 30 * 1000 / 3600 * \text{eta}_{med.Col.Padrao} * K_{\theta} * 17,6 * 0,961374$$

"Produção Especifica de Energia"

$$PMEe = P_{med} / 1,005$$

A1.2 Coletor protótipo I

"Simulação para calculo da temperatura do absorvedor durante o ensaio"

"Funções"

"Calculo do Coeficiente de Radiação entre Superficie Absorvedora e Cobertura"

FUNCTION h_r.A.C(sigma ; TA ; TC ; epsilon_A ; epsilon_C)

TA:=converttemp(C;K;TA)

```
TC:=converttemp(C;K;TC)
h_r.A.C=(sigma * (TA^2 + TC^2) * (TA+TC)) / (1/epsilon_A+1/epsilon_C-1)
```

```
END
```

"Calculo do Coeficiente de Radiação entre Cobertura e Ambiente"

```
FUNCTION h_r.C.CE( epsilon_C ; sigma ; TC ; TCE )
```

```
TC:=converttemp(C;K;TC)
TCE:=converttemp(C;K;TCE)
h_r.C.CE=(epsilon_C*sigma * (TC^2 + TCE^2) * (TC+TCE))
```

```
END
```

"Calculo do Rayleigh"

```
FUNCTION Ra(T2;T1;L;Tmed)
```

```
Tmed:=converttemp(C;K;Tmed)
Pr=prandtl(air;t=Tmed)
mu=Viscosity(Air;T=Tmed)
P:=1*convert(atm;kpa)
rho=Density(Air;T=Tmed;P=P)
nu=mu/rho
Ra=(9,81[m/s^2]*(T2-T1)*L^3*Pr)/(Tmed*nu^2)
```

```
END
```

"Interações p/ T_Cob"

```
PROCEDURE Int_Tcob(T_abs;T_Cob0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob;h_r.cob.amb;h_c.abs.cob;U_t;T_Cob1)
```

```
T_med=(T_abs+T_Cob0)/2
```

```
h_r.abs.cob=h_r.A.C( sigma ; T_abs ; T_Cob0 ; epsilon_abs ; epsilon_vid )
```

```
h_r.cob.amb=h_r.C.CE(epsilon_vid ; sigma ; T_Cob0 ; T_amb )
```

```
Ra=Ra(T_abs;T_Cob0;E_cob_abs;T_med)
```

```
Call Tilted_Rect_Enclosure_ND(Ra;teta;1/E_cob_abs:Nusselt)
```

```
k=Conductivity(Air;T=converttemp(C;K;T_med))
```

```
h_c.abs.cob= Nusselt*k/E_cob_abs
```

```
U_t=(1/(h_c.abs.cob+h_r.abs.cob)+1/(h_ven+h_r.cob.amb))^-1
```

```
T_Cob1=T_abs-(U_t*(T_abs-T_amb)/(h_c.abs.cob+h_r.abs.cob))
```

```
END
```

```
PROCEDURE Int_Tabs(T_abs0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;CP;
S;T_i:F;U_G;T_abs1)
```

"1ª Interação p/ T_Cob"

T_Cob0=35 [C]

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob0;h_r.cob.amb0;h_c.abs.cob0;U_t0;T_Cob1)

"2ª Interação p/ T_Cob"

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob1;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob1;h_r.cob.amb1;h_c.abs.cob1;U_t1;T_Cob2)

"3ª Interação p/ T_Cob"

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob2;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob2;h_r.cob.amb2;h_c.abs.cob2;U_t2;T_Cob3)

"4ª Interação p/ T_Cob"

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob3;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob3;h_r.cob.amb3;h_c.abs.cob3;U_t3;T_Cob4)

$U_f = K_{iso}/L_f$

$U_l = (K_{iso}/L_l * Pe * H) / A_c$

$U_G = U_{t3} + U_f + U_l$

$T_{abs0} = \text{converttemp}(C;K;T_{abs0})$

$K_{abs} = k('Aluminum'; T_{abs0})$

$m = \text{sqrt}(U_G / (K_{abs} * \Delta_{abs}))$

$F = \tanh(m * (W-D) / 2) / (m * (W-D) / 2)$

$F' = (1/U_G) / (W * ((1/(U_G * (D + (W-D) * F))) + 1/C_b + 1/(pi * D * h_{fi})))$

$a = (m_{dot} * C_p) / (A_c * U_G * F')$

$F_R = a * (1 - \exp(-F'/a))$

$q_u = F_R * (S - U_G * (T_i - T_{amb}))$

$T_{abs1} = T_i + q_u / (F_R * U_G) * (1 - F_R)$

END

"Propriedades conhecidas"

E_cob_abs = 25 [mm]*convert(mm;m) "Para usar a tabela de resultados ocultar essa variavel"

epsilon_abs=0,95

T_amb=23,9 [C]

h_ven=6,17 [W/m^2 K]

teta=45

epsilon_vid=0,88

sigma=5,67E-8 [W/m^2 K^4]

K_iso = 0,045 [W/m K]

L_f = 38 [mm]*convert(mm;m)

L_l= 12 [mm]*convert(mm;m)

Pe=4 [m]

H= 61 [mm]*convert(mm;m)

$A_c = 0,9417 \text{ [m}^2\text{]}$ "Área Coletor Padrão e Prototipo II = 0,9026 m² e Prototipo I = 0,9417 m²"
 $\Delta_{abs} = 0,5 \text{ [mm]} * \text{convert}(\text{mm};\text{m})$
 $W = 50 \text{ [mm]} * \text{convert}(\text{mm};\text{m})$
 $D = 9,52 \text{ [mm]} * \text{convert}(\text{mm};\text{m})$
 $C_b = 9,99e200$
 $h_{fi} = 1000000 \text{ [W/m}^2\text{ K]}$
 $m_{dot} = 0,019 \text{ [kg/s]}$
 $T_i = 23,9 \text{ [C]}$ "Para usar a tabela de resultados ocultar essa variavel, Pontos: p1 (20,3 C); p2 (39,9 C); p3 (59,5 C); p4 (78,4 C); p5 (59,8 C); p6 (39,9 C); p7 (20,3)"
 $T = \text{converttemp}(\text{C};\text{K};T_i)$
 $P = 1 \text{ [atm]} * \text{convert}(\text{atm};\text{kpa})$
 $C_p = C_p(\text{Water};T=T;P=P)$
 $G_T = 800 \text{ [W/m}^2\text{]}$

"

"

"Calculo Tal Alfa b"

"Radiação incidente normal ao plano do coletor"

$n_r = 1,526$

$r_0 = ((n_r - 1)/(n_r + 1))^2$

$\tau_{rb} = ((1 - r_0)/(1 + r_0))$

$K = 32 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

$L = 0,003 \text{ [m]}$

$\theta_{2b} = 0 \text{ [degree]}$

$\tau_{ab} = \exp(-((K * L)/\cos(\theta_{2b})))$

$\tau_b = \tau_{ab} * \tau_{rb}$

$\alpha_n = 0,90$

$\alpha_b = \alpha_n * (1 - 1,5879 * 10^{-3} * \theta_{2b} + 2,7314 * 10^{-4} * \theta_{2b}^2 - 2,3016 * 10^{-5} * \theta_{2b}^3 + 9,0244 * 10^{-7} * \theta_{2b}^4 - 1,8000 * 10^{-8} * \theta_{2b}^5 + 1,7734 * 10^{-10} * \theta_{2b}^6 - 6,9937 * 10^{-13} * \theta_{2b}^7)$

$\tau.\alpha_b = 1,01 * \tau_b * \alpha_b$

"Radiação Absorvida pelo Coletor"

$S = G_T * \tau.\alpha_b$

"

"

"1ª Interação p/ T_Abs"

$T_{abs0} = 100 \text{ [C]}$

Call Int_Tabs(T_{abs0} ;sigma;epsilon_abs ;
 epsilon_vid; T_{amb} ;teta; E_{cob_abs} ;h_ven;K_iso;L_f;L_L;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
 S; T_i ;F_0;U_G0; T_{abs1})

"2ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs1;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_1;U_G1;T_abs2)

"3ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs2;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_2;U_G2;T_abs3)

"4ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs3;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_3;U_G3;T_abs4)

$T_{abs5} = \text{converttemp}(C;K;T_{abs4})$

$K_{ab} = k('Aluminum'; T_{abs5})$

$ma = \sqrt{U_{G3}/(K_{ab} \cdot \delta_{abs})}$

$F = \tanh(ma \cdot (W-D)/2) / (ma \cdot (W-D)/2)$

$F' = (1/U_{G3}) / (W \cdot ((1/(U_{G3} \cdot (D + (W-D) \cdot F))) + 1/C_b + 1/(\pi \cdot D \cdot h_{fi})))$

$a = (m_{dot} \cdot Cp) / (A_c \cdot U_{G3} \cdot F')$

$F_R = a \cdot (1 - \exp(-F'/a))$

$q_u = F_R \cdot (S - U_{G3} \cdot (T_i - T_{amb}))$

$\eta = F_R \cdot \tau \cdot \alpha_b - (F_R \cdot U_{G3} \cdot (T_i - T_{amb})) / G_T$

$T_{fm} = T_i + q_u / (F_R \cdot U_{G3}) \cdot (1 - F_R / F')$

$T_m = T_i + (T_{fm} - T_i) / 2$

$v = (T_m - T_{amb}) / G_T$

"Calculo Eficiencia Media"

$\eta_{med.Col.Protl} = \text{integral}(-16,158 \cdot x^2 - 6,4665 \cdot x + 0,7386; x; 0; 0,044) / 0,044$

"Calculo K_theta"

"Calculo Tal Alfa en"

$\theta_{e.d} = 25$

$\theta_{2d} = \arcsin(\sin(\theta_{e.d}) / n_r)$

$r_{p.d} = (\sin(\theta_{2d} - \theta_{e.d})^2 / \sin(\theta_{2d} + \theta_{e.d})^2)$

$r_{ll.d} = (\tan(\theta_{2d} - \theta_{e.d})^2 / \tan(\theta_{2d} + \theta_{e.d})^2)$

$$r_d = (r_{p,d} + r_{ll,d})/2$$

$$\tau_{rd} = ((1/2)*((1-r_{ll,d})/(1+r_{ll,d})+(1-r_{p,d})/(1+r_{p,d})))$$

$$\tau_{ad} = \exp(-((K*L)/\cos(\theta_{2d})))$$

$$\tau_d = \tau_{ad} * \tau_{rd}$$

$$\alpha_d = \alpha_n * (1 - 1,5879*10^{-3}*\theta_{e,d} + 2,7314*10^{-4}*\theta_{e,d}^2 - 2,3016*10^{-5}*\theta_{e,d}^3 + 9,0244*10^{-7}*\theta_{e,d}^4 - 1,8000*10^{-8}*\theta_{e,d}^5 + 1,7734*10^{-10}*\theta_{e,d}^6 - 6,9937*10^{-13}*\theta_{e,d}^7)$$

$$\tau.\alpha_{en} = 1,01 * \tau_d * \alpha_d$$

$$\{\tau.\alpha_{en} = \tau.\alpha_b\}$$

$$K_{\theta} = 0,7344"0,6778" / (F*\tau.\alpha_{en})$$

"Calculo Produção de Energia Media"

$$P_{med} = 30*1000/3600*\eta_{med}.Col.Protl * K_{\theta}*17,6*0,961374$$

"Calculo Produção de Energia Especifica"

$$PMEe = P_{med}/1,005$$

A1.3 Coletor protótipo II

"Simulação para calculo da temperatura do absorvedor durante o ensaio"

"Funções"

"Calculo do Coeficiente de Radiação entre Superficie Absorvedora e Cobertura"

FUNCTION h_r.A.C(sigma ; TA ; TC ; epsilon_A ; epsilon_C)

TA:=converttemp(C;K;TA)

TC:=converttemp(C;K;TC)

h_r.A.C=(sigma * (TA^2 + TC^2) * (TA+TC)) / (1/epsilon_A+1/epsilon_C-1)

END

"Calculo do Coeficiente de Radiação entre Cobertura e Ambiente"

FUNCTION h_r.C.CE(epsilon_C ; sigma ; TC ; TCE)

TC:=converttemp(C;K;TC)

TCE:=converttemp(C;K;TCE)

h_r.C.CE=(epsilon_C*sigma * (TC^2 + TCE^2) * (TC+TCE))

END

"Calculo do Rayleigh"

FUNCTION Ra(T2;T1;L;Tmed)

Tmed:=converttemp(C;K;Tmed)

Pr=prandtl(air;t=Tmed)

mu=Viscosity(Air;T=Tmed)

```

P:=1*convert(atm;kpa)
rho=Density(Air;T=Tmed;P=P)
nu=mu/rho
Ra=(9,81[m/s^2]*(T2-T1)*L^3*Pr)/(Tmed*nu^2)

```

END

"Interações p/ T_Cob"

```

PROCEDURE Int_Tcob(T_abs;T_Cob0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob;h_r.cob.amb;h_c.abs.cob;U_t;T_Cob1)

```

```

T_med=(T_abs+T_Cob0)/2

```

```

h_r.abs.cob=h_r.A.C( sigma ; T_abs ; T_Cob0 ; epsilon_abs ; epsilon_vid )

```

```

h_r.cob.amb=h_r.C.CE(epsilon_vid ; sigma ; T_Cob0 ; T_amb )

```

```

Ra=Ra(T_abs;T_Cob0;E_cob_abs;T_med)

```

```

Call Tilted_Rect_Enclosure_ND(Ra;teta;1/E_cob_abs:Nusselt)

```

```

k=Conductivity(Air;T=converttemp(C;K;T_med))

```

```

h_c.abs.cob= Nusselt*k/E_cob_abs

```

```

U_t=(1/(h_c.abs.cob+h_r.abs.cob)+1/(h_ven+h_r.cob.amb))^(1)

```

```

T_Cob1=T_abs-(U_t*(T_abs-T_amb)/(h_c.abs.cob+h_r.abs.cob))

```

END

```

PROCEDURE Int_Tabs(T_abs0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;CP;
S;T_i:F;U_G;T_abs1)

```

"1ª Interação p/ T_Cob"

```

T_Cob0=35 [C]

```

```

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob0;h_r.cob.amb0;h_c.abs.cob0;U_t0;T_Cob1)

```

"2ª Interação p/ T_Cob"

```

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob1;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob1;h_r.cob.amb1;h_c.abs.cob1;U_t1;T_Cob2)

```

"3ª Interação p/ T_Cob"

```

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob2;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob2;h_r.cob.amb2;h_c.abs.cob2;U_t2;T_Cob3)

```

"4ª Interação p/ T_Cob"

```

Call Int_Tcob(T_abs0;T_Cob3;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven:h_r.abs.cob3;h_r.cob.amb3;h_c.abs.cob3;U_t3;T_Cob4)

```

```

U_f = K_iso/L_f

```

```

U_l = (K_iso/L_l*Pe*H)/A_c
U_G = U_t3 + U_f + U_l
T_abs0:=converttemp(C;K;T_abs0)
K_abs = k_('Aluminum'; T_abs0)
m = sqrt(U_G/(K_abs*delta_abs))
F = tanh(m*(W-D)/2)/(m*(W-D)/2)
F' = (1/U_G)/(W*((1/(U_G*(D+(W-D)*F)))+1/C_b+1/(pi*D*h_fi)))
a = (m_dot*Cp)/(A_c*U_G*F')
F_R = a*(1-exp(-F'/a))
q_u = F_R*(S-U_G*(T_i-T_amb))
T_abs1 = T_i+q_u/(F_R*U_G)*(1-F_R)
END

```

"Propriedades conhecidas"

```

E_cob_abs = 15 [mm]*convert(mm;m) "Para usar a tabela de resultados ocultar essa variavel"
epsilon_abs=0,95
T_amb=23,9 [C]
h_ven=6,17 [W/m^2 K]
teta=45
epsilon_vid=0,88
sigma=5,67E-8 [W/m^2 K^4]
K_iso = 0,045 [W/m K]
L_f = 38 [mm]*convert(mm;m)
L_l= 12 [mm]*convert(mm;m)
Pe=4 [m]
H= 61 [mm]*convert(mm;m)
A_c= 0,9026 [m^2] "Área Coletor Padrão e Prototipo II = 0,9026 m² e Prototipo I = 0,9417 m²"
delta_abs = 0,4 [mm]*convert(mm;m)
W = 142 [mm]*convert(mm;m)
D = 9,52 [mm]*convert(mm;m)
C_b = 9,99e200
h_fi = 1000000 [W/m^2 K]
m_dot = 0,019 [kg/s]
T_i = 23,9 [C] "Para usar a tabela de resultados ocultar essa variavel, Pontos: p1 (20,3 C); p2 (39,9 C); p3 (59,5 C); p4 (78,4 C); p5 (59,8 C); p6 (39,9 C); p7 (20,3)"
T =converttemp(C;K;T_i)
P = 1 [atm]*convert(atm;kpa)
Cp=Cp(Water;T=T;P=P)
G_T= 800 [W/m^2]

```

"Calculo Tal Alfa b"

"Radiação incidente normal ao plano do coletor"

$$n_r = 1,526$$

$$r_0 = ((n_r - 1) / (n_r + 1))^2$$

$$\tau_{rb} = ((1 - r_0) / (1 + r_0))$$

$$K = 32 \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

$$L = 0,003 \text{ [m]}$$

$$\theta_{2b} = 0 \text{ [degree]}$$

$$\tau_{ab} = \exp(-((K * L) / \cos(\theta_{2b})))$$

$$\tau_b = \tau_{ab} * \tau_{rb}$$

$$\alpha_n = 0,90$$

$$\alpha_b = \alpha_n * (1 - 1,5879 * 10^{-3} * \theta_{2b} + 2,7314 * 10^{-4} * \theta_{2b}^2 - 2,3016 * 10^{-5} * \theta_{2b}^3 + 9,0244 * 10^{-7} * \theta_{2b}^4 - 1,8000 * 10^{-8} * \theta_{2b}^5 + 1,7734 * 10^{-10} * \theta_{2b}^6 - 6,9937 * 10^{-13} * \theta_{2b}^7)$$

$$\tau.\alpha_b = 1,01 * \tau_b * \alpha_b$$

"Radiação Absorvida pelo Coletor"

$$S = G_T * \tau.\alpha_b$$

"
_____"

"1ª Interação p/ T_Abs"

$$T_{abs0} = 100 \text{ [C]}$$

Call Int_Tabs(T_abs0;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_0;U_G0;T_abs1)

"2ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs1;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_1;U_G1;T_abs2)

"3ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs2;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_2;U_G2;T_abs3)

"4ª Interação p/ T_Abs"

Call Int_Tabs(T_abs3;sigma;epsilon_abs ;
epsilon_vid;T_amb;teta;E_cob_abs;h_ven;K_iso;L_f;L_l;Pe;H;A_c;delta_abs;W;D;C_b;h_fi;m_dot;Cp;
S;T_i:F_3;U_G3;T_abs4)

$$T_{abs5} = \text{converttemp}(C;K;T_{abs4})$$

$K_{ab} = k('Aluminum'; T_{abs5})$
 $ma = \sqrt{U_{G3}/(K_{ab} \cdot \delta_{abs})}$
 $F = \tanh(ma \cdot (W-D)/2) / (ma \cdot (W-D)/2)$
 $F' = (1/U_{G3}) / (W \cdot ((1/(U_{G3} \cdot (D+(W-D) \cdot F))) + 1/C_b + 1/(\pi \cdot D \cdot h_{fi})))$
 $a = (m_{dot} \cdot C_p) / (A_c \cdot U_{G3} \cdot F')$
 $F_R = a \cdot (1 - \exp(-F'/a))$
 $q_u = F_R \cdot (S - U_{G3} \cdot (T_i - T_{amb}))$
 $\eta = F_R \cdot \tau \cdot \alpha_b - (F_R \cdot U_{G3} \cdot (T_i - T_{amb})) / G_T$
 $T_{fm} = T_i + q_u / (F_R \cdot U_{G3}) \cdot (1 - F_R/F')$
 $T_m = T_i + (T_{fm} - T_i) / 2$
 $v = (T_m - T_{amb}) / G_T$

"Calculo Eficiencia Media"

$\eta_{med.Col.Protil} = \text{integral}(-13,023 \cdot x^2 - 6,1565 \cdot x + 0,6823; x; 0; 0,044) / 0,044$

"Calculo K_Theta"

"Calculo Tal Alfa en"

$\theta_{e.d} = 25$
 $\theta_{2d} = \arcsin(\sin(\theta_{e.d}) / n_r)$
 $r_{p.d} = (\sin(\theta_{2d} - \theta_{e.d})^2 / \sin(\theta_{2d} + \theta_{e.d})^2)$
 $r_{ll.d} = (\tan(\theta_{2d} - \theta_{e.d})^2 / \tan(\theta_{2d} + \theta_{e.d})^2)$
 $r_d = (r_{p.d} + r_{ll.d}) / 2$
 $\tau_{rd} = ((1/2) \cdot ((1 - r_{ll.d}) / (1 + r_{ll.d}) + (1 - r_{p.d}) / (1 + r_{p.d})))$
 $\tau_{ad} = \exp(-((K \cdot L) / \cos(\theta_{2d})))$
 $\tau_d = \tau_{ad} \cdot \tau_{rd}$
 $\alpha_d = \alpha_n \cdot (1 - 1,5879 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{e.d} + 2,7314 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_{e.d}^2 - 2,3016 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_{e.d}^3 + 9,0244 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_{e.d}^4 - 1,8000 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_{e.d}^5 + 1,7734 \cdot 10^{-10} \cdot \theta_{e.d}^6 - 6,9937 \cdot 10^{-13} \cdot \theta_{e.d}^7)$
 $\tau \cdot \alpha_{en} = 1,01 \cdot \tau_d \cdot \alpha_d$

{ $\tau \cdot \alpha_{en} = \tau \cdot \alpha_b$ }

$K_{\theta} = 0,676 \cdot 0,6558 / (F' \cdot \tau \cdot \alpha_{en})$

"Calculo Produção de Energia Media"

$P_{med} = 30 \cdot 1000 / 3600 \cdot \eta_{med.Col.Protil} \cdot K_{\theta} \cdot 17,6 \cdot 0,961374$

"Calculo Produção de Energia Especifica"

$$PM_{Ee} = P_{med}/1,005$$

A2 CÁLCULOS DA INCERTEZA PRODUÇÃO

Abaixo temo a planilha com os cálculos para as incertezas de produção dos coletores estudados.

Tabela 8 – Registro dos valores de calibração dos equipamentos.

Equipamento:	Equipamento:	Equipamento:	Equipamento:	Equipamento:
Trena	Micrometro Plano	Paquímetro	Micrometro Tubos	Manômetro
ITM ₁₀₀₀ 0,059	ITM 0,006	ITM 0,006	ITM 0,0058	ITM 0,12
Kc ₁₀₀₀ 2	Kc 2	Kc 2	Kc 2	Kc 2
Ic ₁₀₀₀ 0,0295	Ic 0,003	Ic 0,003	Ic 0,0029	Ic 0,06
ITM ₂₀₀₀ 0,081	n 2	n 2	n 2	n 2
Kc ₂₀₀₀ 2	Prob. 95%	Prob. 95%	Prob. 95%	Prob. 95%
Ic ₂₀₀₀ 0,0405	t 12,7062	t 12,7062	t 12,7062	t 12,7062
ITM ₃₀₀₀ 0,11				
Kc ₃₀₀₀ 2				
Ic ₃₀₀₀ 0,055				
ITM ₄₀₀₀ 0,13				
Kc ₄₀₀₀ 2				
Ic ₄₀₀₀ 0,065				
n 2				
Prob. 95%				
t 12,7062				

Fonte: (Autor)

Tabela 9 – Incertezas de medição no processo produtivo.

Corte da Tira	n1	n2	Instrumento	Desvio Padrão (s)	Incerteza (IM)
Largura	125,01	125,01	Paquímetro	0	0,003
Espessura	0,49	0,49	Micrometro Plano	0	0,003
Comprimento	921	921	Trena 1000 mm	0	0,0295
Corte da Tubo 9,52	n1	n2			
Diâmetro	9,5	9,5	Micrometro Plano	0	0,003
Espessura	0,39	0,39	Micrometro Tubos	0	0,0029
Comprimento	935	935	Trena 1000 mm	0	0,0295

Corte da Tubo 22	n1	n2		
Diâmetro	22,01	22,01	Micrometro Plano	0,003
Espessura	0,49	0,49	Micrometro Tubos	0,0029
Comprimento	1070	1070	Trena 1000 mm	0,0295
Montagem Abs.	n1	n2		
Teste de Estanqueidade	6	6	Manômetro	0
Largura Abs.	978	978	Trena 1000 mm	0,0295
Corte do Perfil	n1	n2		
Largura	61	61	Paquímetro	0
Espessura	1,2	1,2	Micrometro Plano	0
Comprimento	4002	4002	Trena 4000 mm	0
Furação do Perfil	n1	n2		
Furo 1	525	525	Trena 1000 mm	0
Furo 2	1477	1477	Trena 2000 mm	0
Furo 3	2525	2525	Trena 3000 mm	0
Furo 4	3476	3476	Trena 4000 mm	0
Chanfro do Perfil	n1	n2		
Corte 1	501	501	Trena 1000 mm	0
Corte 2	1500	1500	Trena 2000 mm	0
Corte 3	2502	2502	Trena 3000 mm	0
Corte 4	3500	3500	Trena 4000 mm	0
Corte Chapa Fundo	n1	n2		
Largura	1000	1000	Trena 1000 mm	0
Espessura	0,4	0,4	Micrometro Plano	0
Comprimento	995	995	Trena 1000 mm	0
Corte Isolamento	n1	n2		
Largura	1000	1000	Trena 1000 mm	0,0295
Comprimento	1090	1090	Trena 1000 mm	0,0295
Montagem Cobertura	n1	n2		
Largura	998	998	Trena 1000 mm	0,0295
Espessura	2,89	2,89	Micrometro Plano	0,003
Comprimento	993	993	Trena 1000 mm	0,0295

Fonte: (Autor)

Tabela 10 – Resultados do cálculo das Incertezas Combinadas e Expandidas.

Incerteza Combinada (u_c)	0,0114	Grau de Liberdade Efetivo (V_{eff})	5,8495
$k_{95\%}$	2,5706	Incerteza Expandida (U)	0,0292

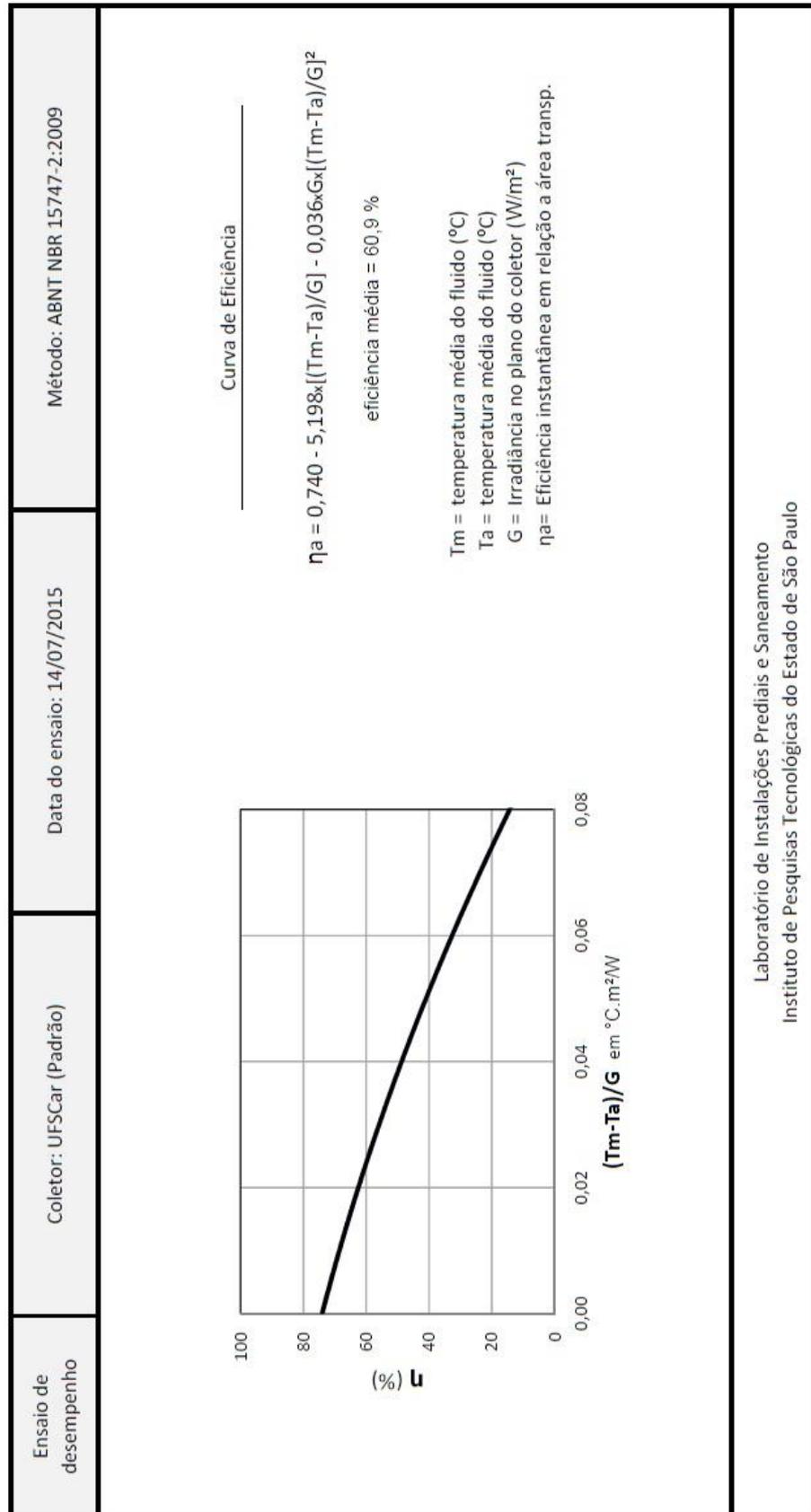
Fonte: (Autor)

A3 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO LABORATÓRIO DO IPT

Abaixo temos os resultados do ensaio de eficiência térmica dos coletores estudados.

A3.1 Coletor padrão

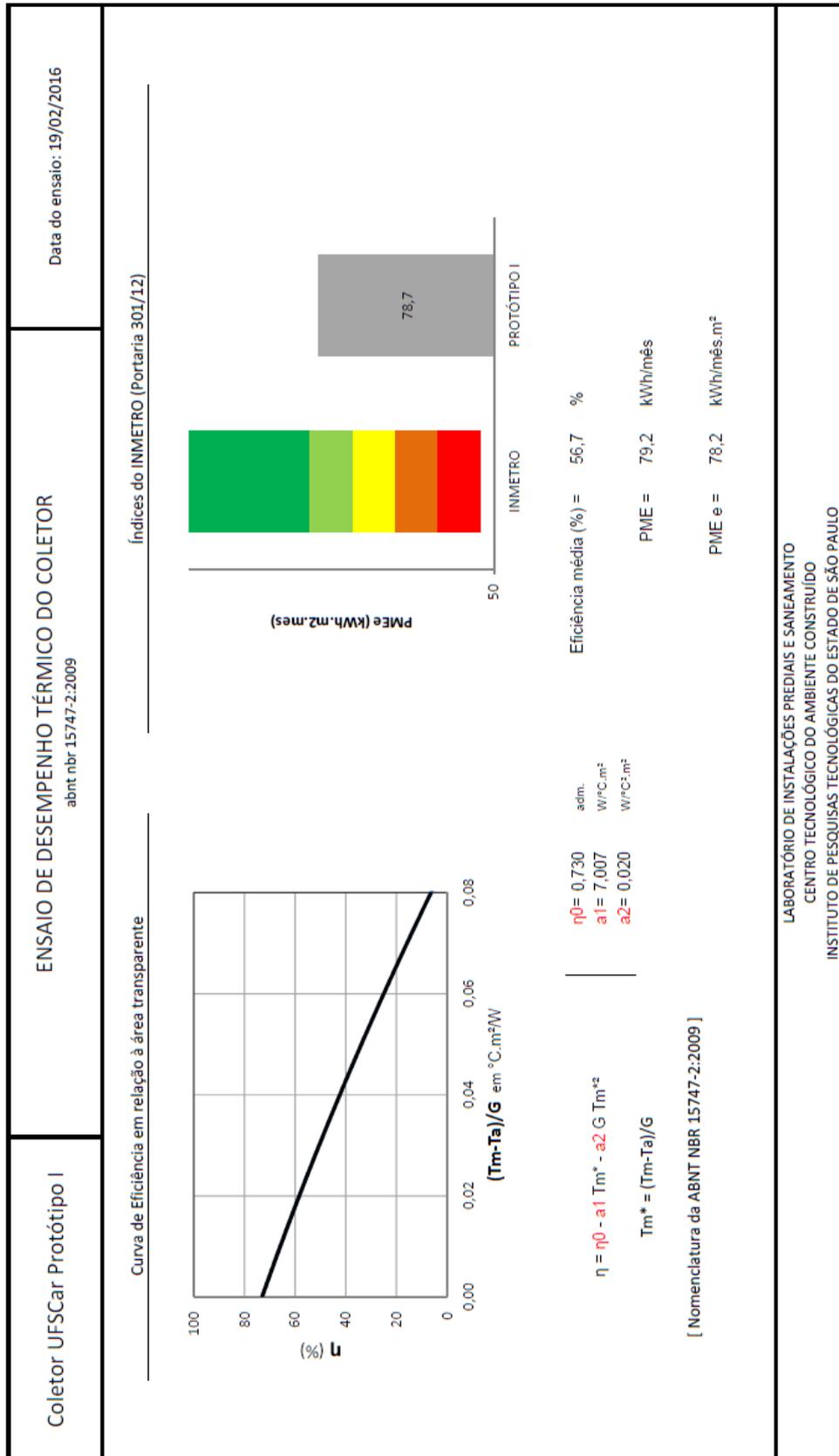
Figura 25 – Resultado ensaio coletor padrão.



Fonte: (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2015)

A3.2 Coletor protótipo I

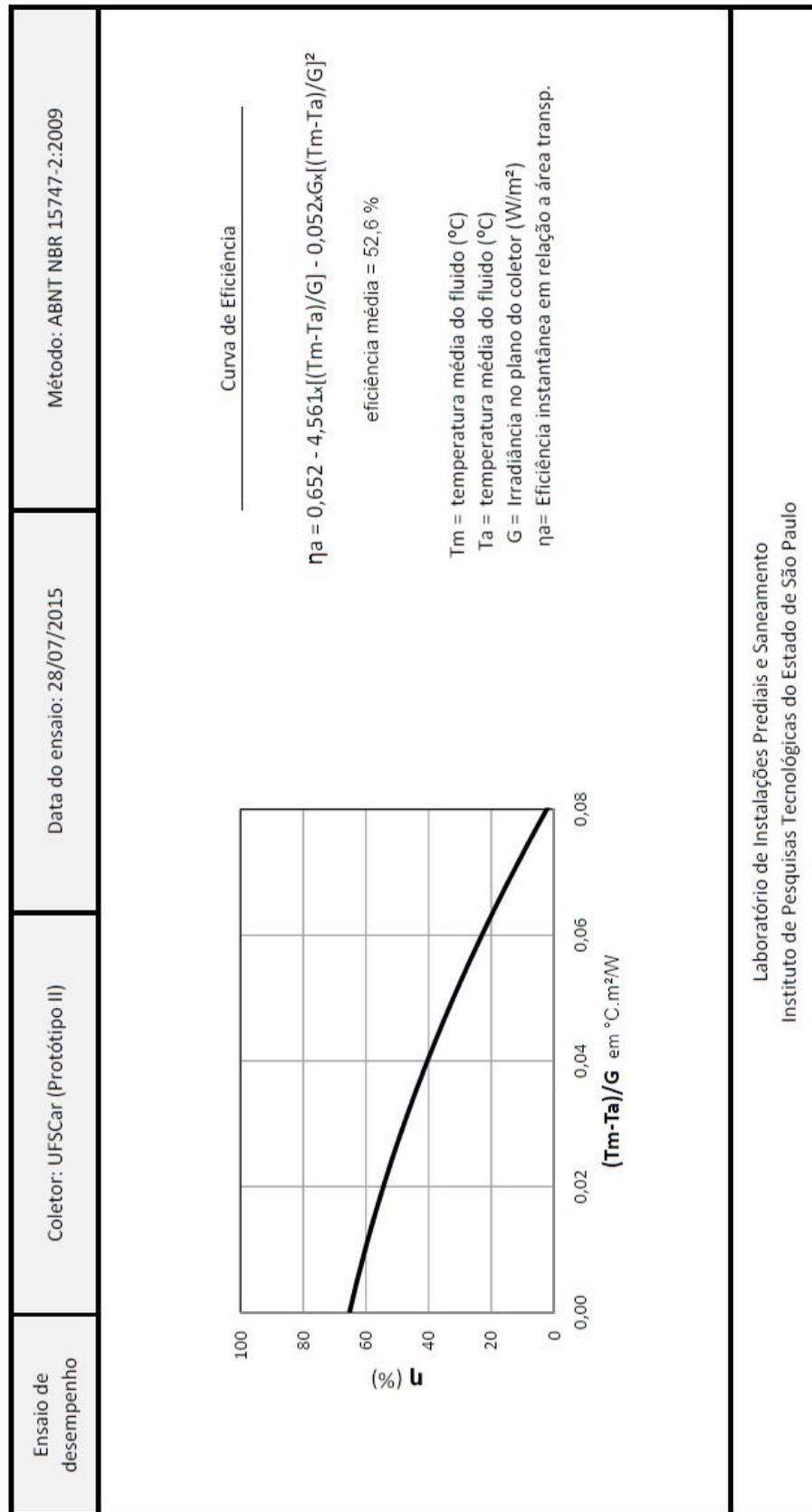
Figura 26 – Resultado ensaio coletor protótipo I.



Fonte: (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2015)

A3.3 Coletor protótipo II

Figura 27 – Resultado ensaio coletor protótipo II.



Fonte: (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2015)