

ESTUDO DA CONVECÇÃO NATURAL NO INTERIOR DE CAVIDADES PARA APLICAÇÃO
EM ISOLAMENTO TRANSPARENTE DE COLETOR SOLAR PLANO

RAFAEL PAIVA GARCIA

Bauru-SP

2014

ESTUDO DA CONVECÇÃO NATURAL NO INTERIOR DE CAVIDADES PARA APLICAÇÃO
EM ISOLAMENTO TRANSPARENTE DE COLETOR SOLAR PLANO

RAFAEL PAIVA GARCIA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:
Fenômenos de Transporte

Orientador:
Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Bauru-SP

2014

Garcia, Rafael Paiva.

Estudo da convecção natural no interior de cavidades para aplicação em isolamento transparente de coletor solar plano / Rafael Paiva Garcia, 2014
119 f.

Orientador: Dr. Vicente Luiz Scalon

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Coletor solar plano. 2. Isolamento Transparente.
3. Convecção natural. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RAFAEL PAIVA GARCIA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de julho do ano de 2014, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ALCIDES PADILHA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO do(a) Coordenação de Engenharia Mecânica/UTFPR/Guarapuava, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RAFAEL PAIVA GARCIA, intitulado "ESTUDO DA CONVECÇÃO NATURAL NO INTERIOR DE CAVIDADES PARA APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO TRANSPARENTE EM COLETOR SOLAR PLANO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON



Prof. Dr. ALCIDES PADILHA



Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
RAFAEL PAIVA GARCIA

DE: "ESTUDO DA CONVECÇÃO NATURAL NO INTERIOR DE CAVIDADES PARA APLICAÇÃO DE ISOLAMENTO TRANSPARENTE EM COLETOR SOLAR PLANO"

PARA:

ESTUDO DA CONVECÇÃO NATURAL NO INTERIOR DE
CAVIDADES PARA APLICAÇÃO EM ISOLAMENTO TRANS-
PARENTE DE COLETOR SOLAR PLANO

Bauru, 10 de julho de 2014.

Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Orientador

*“Nenhuma grande descoberta foi
feita, sem um palpite ousado.”*

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria José Paiva Garcia e Getúlio Garcia de Castro, e a meu irmão Ricardo Paiva Garcia que me deram muito apoio e não mediram esforços para que eu chegasse a mais essa etapa de minha vida.

Ao meu orientador professor Dr. Vicente Luiz Scalon por todo o apoio e conhecimento transmitido ao longo desta pesquisa, que brilhantemente conduzi-me a ser uma pessoa melhor, tanto profissionalmente como pessoalmente, a quem tenho como um grande amigo.

Ao professor e colega de trabalho Marcos Roberto Ruybal Bica por sua brilhante consultoria na automação eletrônica do projeto, a qual foi fundamental para a conclusão do projeto.

A todos os meus professores que passaram em minha vida, em especial aos meus professores da graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) e meus professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB). Todos foram fundamentais para que eu chegasse onde estou.

A todos meus familiares e amigos que sempre me apoiaram nos meus desafios e objetivos de vida e que fizeram a diferença nas horas mais importantes de minha vida.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Atualmente a disponibilidade de energia é uma grande preocupação da humanidade, pois a maior porcentagem da energia consumida é oriunda da exploração de recursos naturais, como o carvão mineral, gás natural e petróleo. Neste cenário, as energias renováveis têm um papel muito importante. As hidroelétricas, biomassa, eólica, geotérmica, solar, entre outras são a solução da disponibilidade de energia para o futuro. Dentre tais energias, a energia solar merece um destaque pelo seu enorme potencial, porém muito ainda é preciso progredir para aumentar a eficiência destas fontes. Com este intuito, este trabalho tem como foco estudar a influência na eficiência de coletores solares planos ao introduzir barreiras em sua cavidade interna, a fim de bloquear a livre circulação do ar, desta maneira, diminuindo a perda de calor pela convecção interna. Foi realizado testes experimentais com as mesmas características térmica e geométricas dos espaços de confinamento de ar. O fluxo de calor é introduzido através de resistências elétricas e acompanhado de um controle eletrônico para garantir que a temperatura permaneça constante ao longo de toda a base (chapa de alumínio). Com a monitoração e coleta dos dados da potência elétrica dissipada e as temperaturas do volume de controle estudado, foi analisado o comportamento do coeficiente convectivo natural, possibilitando a análise ao variar o número de barreiras (cavidades) assim como sua inclinação, sendo possível notar uma redução do coeficiente convectivo com o uso de barreiras.

PALAVRAS-CHAVE: Coletor Solar Plano, Convecção Interna, Eficiência Térmica, Sistema de Isolamento Transparente.

ABSTRACT

Currently the availability of energy is a major concern of humanity, for the largest percentage of energy consumed comes from the exploitation of natural resources, such as coal, natural gas and oil. In this scenario, renewable energies have a very important role. Hydroelectric, biomass, wind, geothermal, solar, among others are the solution to the availability of energy for the future. Among these energies, solar energy deserves a highlight because of its enormous potential, however much progress is still needed to increase the efficiency of these sources. To this end, this work focuses on studying the influence on the efficiency of solar collector plans to introduce barriers in its internal cavity in order to block the free flow of air, thus, reducing heat loss by internal convection. Experimental testing was performed with the same thermal and geometrical characteristics of the air spaces of confinement. The heat flow is introduced through electrical and accompanied by an electronic control to ensure that the resistance temperature remains constant over the entire base (aluminum plate). With monitoring and data collection of dissipated electrical power and temperature control volume studied was verified behavior of the coefficient of the film, allowing the analysis to vary the number of barriers (wells) and the slope, which was noticeable reduction convective coefficient using barriers.

KEYWORDS: Solar Collector Plan, Convection, Efficiency, transparent insulation system.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURA.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
NOMENCLATURA.....	xi
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3 - METODOLOGIA.....	19
3.1-Montagem do sistema de controle e medição.....	25
3.2-Procedimento de tomada de medidas.....	41
3.3-Tratamento e cálculos dos balanços energéticos do sistema.....	44
3.4-Avaliação empírica do coeficiente de convecção.....	48
3.5-Avaliação numérica do coeficiente de convecção.....	50
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.1- Resultados para posição horizontal (0°).....	58
4.2- Resultados para 30 graus de inclinação.....	59
4.3- Resultados para 45 graus de inclinação.....	60
4.4-Resultados para 60 graus de inclinação.....	62
4.5- Variação da inclinação para um número de cavidades fixas.....	64
5 - CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	69
Anexo A - Programa usado no Arduino para controle de temperatura.....	72
Anexo B - Programa de monitoramento das temperaturas da placa e do vidro.....	74
Anexo C - Programa usado no Microcontrolador.....	82
Anexo D - Gráficos da curva de calibração.....	85
Anexo E - Programa de monitoração da voltagem e temperatura ambiente.....	87

Anexo F - Valores das resistências.....	94
Anexo G - Programa realizado no MatLab - Cálculo do Balanço Energético.....	95

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Terminal portuário movido a energia solar em Taiwan.....	2
Figura 2: Máquina térmica de Mouchot.....	3
Figura 3: Células fotovoltaicas para aproveitamento direto de energia.....	4
Figura 4: Esquema de uma “Hot Box” utilizada por Sassure.....	5
Figura 5: Área de coletores instalados ao ano.....	6
Figura 6: Evolução de instalação de Aquecimento Solar Brasileiro.....	6
Figura 7: Distribuição da capacidade instalada de coletores no ano de 2011.....	7
Figura 8: Fluxo da energia solar em coletores solares.....	7
Figura 9: Diferentes esquemas de isolamento transparente.....	10
Figura 10: Representação do coletor estudado por Abou-Ziyan & Richards (1997).....	15
Figura 11: Representação do reservatório estudado por Kaushika e Reddy (1999).....	16
Figura 12: Vista lateral do protótipo estudado.....	19
Figura 13: Visualização da convecção interna no interior do protótipo, (“A”)sem barreira, (“B”) com 4 barreira entre a placa absorvedora e a cobertura de vidro.....	19
Figura 14: Representação dos fluxos de calor e resistências térmicas entre a placa absorvedora, vidro e a vizinhança.....	20
Figura 15: Vista parcial do protótipo.....	21
Figura 16: Vedação do protótipo.....	21
Figura 17: Vista superior, com destaque dos sensores fixados no vidro.....	22
Figura 18: Parte inferior da chapa de alumínio, com as resistências elétricas e os sensores de temperaturas fixados.....	23
Figura 19: Fio de kanthal e adesivo para alta temperatura.....	23
Figura 20: Isolamento térmico da parte inferior do volume de controle de estudo.....	24
Figura 21: Vista das cavidades.....	24
Figura 22: Visualização do posicionamento do sensor de temperatura.....	25
Figura 23: Fluxograma esquemático do controle de temperatura.....	26
Figura 24: "A" disparo no começo da onda (máxima potência), "B" disparo no meio da	

onda, "C" disparo no final da onda (mínima potência).....	27
Figura 25: "A" = Período do semi-ciclo e "B" = Intervalo de discretização.....	27
Figura 26: Osciloscópio Digital.....	28
Figura 27: Comportamento da temperatura na placa e da potência dissipada na resistência elétrica, do início do ensaio ate que atinja um equilíbrio.....	29
Figura 28: Fluxo esquemático do controle elétrico.....	30
Figura 29: Controle feito com um Arduino.....	30
Figura 30: Circuito eletrônico da placa de controle de temperatura.....	32
Figura 31: Passos da confecção da placa de circuito eletrônico.....	33
Figura 32: Imagem em papel fotográfico da placa de controle de temperatura.....	33
Figura 33: Parte inferior da placa de controle de temperatura com as trilhas.....	33
Figura 34: Placa de controle de temperatura, contendo os componentes eletrônicos.....	34
Figura 35: Fonte de alimentação dos microcontroladores (PIC12F).....	34
Figura 36: Circuito eletrônico da placa de retificação do sinal da fonte.....	35
Figura 37: Placa PICKIT2.....	36
Figura 38: Imagem para corrosão da placa de conversão da voltagem.....	37
Figura 39: Circuito eletrônico da placa de conversão da voltagem.....	37
Figura 40: Parte inferior da placa de condicionamento da voltagem.....	37
Figura 41: Placa conversão da voltagem, contendo os componentes eletrônicos.....	38
Figura 42: Circuito eletrônico da placa chaveadora.....	39
Figura 43: Imagem das trilhas da placa chaveadora.....	39
Figura 44: Placa chaveadora.....	40
Figura 45: Painel de controle.....	40
Figura 46: Visualização das cavidades.....	41
Figura 47: Visualização dos apoios.....	42
Figura 48: Visualização das verificações dos ângulos de inclinação.....	42
Figura 49: Vista geral do experimento.....	43
Figura 50: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 0° de inclinação.....	59
Figura 51: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 30° de inclinação.....	60
Figura 52: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 45°	

de inclinação.....	62
Figura 53: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 60°	
de inclinação.....	63
Figura 54: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades em todas as inclinações.....	64
Figura 55: Variação do coeficiente de convecção, para todas cavidades, ao variar a inclinação.....	65
Figura 56: Variação do coeficiente de convecção através da variação da inclinação para uma cavidade.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condição de contorno usado na simulação numérica.....	55
Tabela 2: Resultados sem inclinação com a horizontal (0°).....	58
Tabela 3: Resultados para 30° de inclinação.....	59
Tabela 4: Resultados para 45° de inclinação.....	61
Tabela 5: Resultados para 60° de inclinação.....	62

NOMENCLATURA

n	Correspondência da 10 divisões da chapa de alumínio.
\bar{q}_n	Média do fluxo de calor dissipado em cada resistência.
\bar{A}	Área total da chapa de alumínio.
\bar{T}_n	Temperatura média dos sensores fixados na chapa.
\bar{T}_v	Temperatura média dos sensores fixados no vidro.
$(\bar{Pot})_n$	Potência elétrica média.
\bar{V}_n	Voltagem média.
R_n	Resistência.
g	Aceleração gravitacional (9,8 m/s ²).
β	Coefficiente de expansão volumétrica.
\bar{T}_p	Temperatura média da chapa.
\bar{T}_v	Temperatura média da chapa.
θ	Ângulo de inclinação do protótipo.
L	Distância do vidro a chapa.
Pr	Número de Prandtl.
ν	Viscosidade cinética.
K	Condutividade térmica.
α	Difusividade térmica.

1 - INTRODUÇÃO

A energia solar vem sendo utilizada pelo homem desde a pré-história. Ela foi a principal fonte de energia térmica até o domínio do fogo. Este tipo de energia consiste na base elementar das quais derivam as outras fontes de energia, mas o seu aproveitamento direto é, muitas vezes, subestimado. Este panorama vem mudando frequentemente com o tempo. O resultado disto, é que a energia solar é uma alternância histórica entre a relevância do aproveitamento solar direto e a seu descrédito. Atualmente, a energia solar vem sendo apresentada como uma importante fonte de energia alternativa capaz de minimizar impactos ambientais e, principalmente o efeito estufa. O conhecimento da evolução do aproveitamento da energia solar pode ajudar a compreender a sua importância, além de permitir uma maturação de projetos já desenvolvidos. Uma importante fonte de informações sobre esta evolução histórica pode ser vista em Cleveland et al (2004).

Como já foi destacado, as primeiras formas de aproveitamento de energia solar consistiam na construção de moradias aproveitando a energia solar para melhorar o condicionamento térmico do ambiente. Diversas civilizações antigas como os gregos, romanos e mesmo culturas antigas da América pré-colombiana faziam uso destes artificios. Estes tipos de aproveitamento, vem sendo difundidos ao longo do tempo e ainda hoje estes princípios de “arquitetura solar” ainda são largamente discutidos como uma forma de melhorar as condições ambientais sem aumentar o consumo de energia. Princípios da arquitetura solar foram, inclusive, incrementados com sistemas de captação de energia solar como mostrado na Figura 1.

Fonte: <http://sesolarblog.blogspot.com.br/2011/03/arquitetos-americanos-criam-terminal.html>

Figura 1: Terminal portuário movido a energia solar em Taiwan.

Outra forma de aproveitamento energético de energia solar consiste, na geração de potência mecânica a partir da energia do sol. Dispositivos deste tipo, foram concebidos desde a história antiga, com a utilização de lentes convexas para a concentração da energia solar. Esta mesma ideia foi discutida séculos mais tarde, quando Leonardo da Vinci propôs a criação de um raio solar para incendiar embarcações a partir da reflexão em múltiplos espelhos. Entretanto, a primeira máquina efetivamente operacional, que se utilizava energia solar, foi um motor térmico para movimentar uma prensa concebida por Mouchot, no século XIX, mostrada na Figura 2. Desde então, uma série de outros dispositivos térmicos vem sendo desenvolvidos para aproveitamento de energia solar, destacando-se os sistemas de torre central e de coletores concentradores. A necessidade de alta temperatura para uma geração de potência com boa eficiência faz com que os dispositivos solares deste tipo sejam ativos, e utilizem sistemas de bombeamento acoplado a mecanismos com acompanhamento do movimento solar.

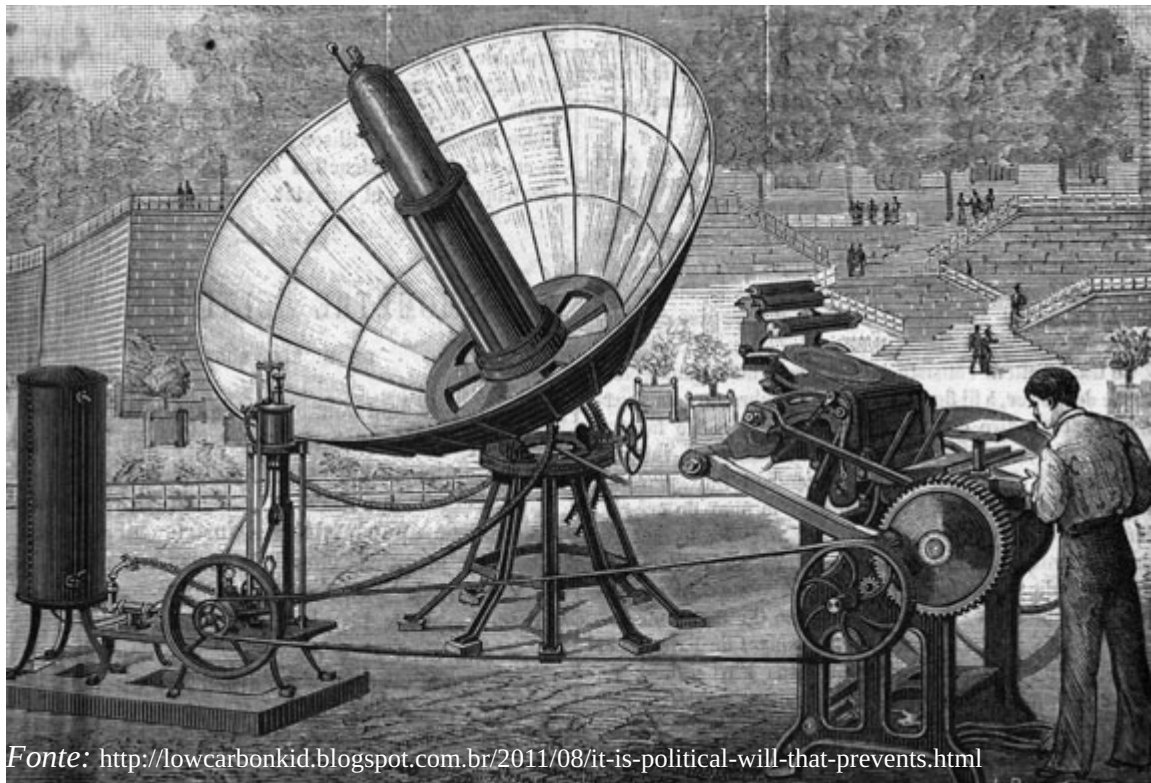


Figura 2: Máquina térmica de Mouchot.

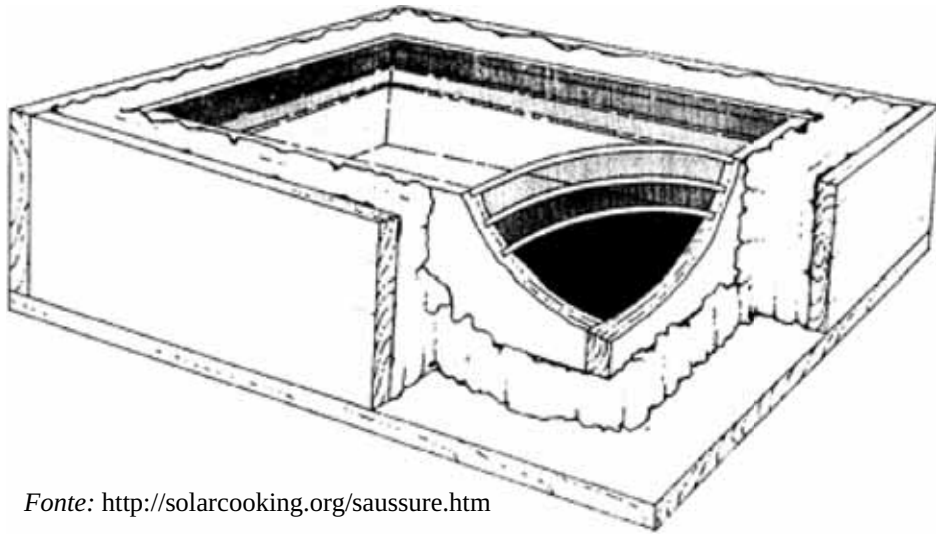
Uma outra forma de produzir potência é a geração direta de energia elétrica a partir do efeito fotovoltaico apresentado por alguns materiais. A descoberta do efeito ocorreu, segundo Cleveland et al (2004), a partir do estudo de diversos cientistas europeus no final do século XIX sobre a influência da luz em cabos de telégrafo submarinos feitos de selênio. William Grylls Adams e o seu aluno Richard Evans Day, a partir da observação de experimentos, verificaram que a luz poderia fazer com que alguns materiais gerassem energia elétrica. O aproveitamento prático deste efeito para energia solar apenas após da descoberta dos efeitos de dopagem do silício que levaram ao surgimento dos transistores realizados na Bell Laboratories em 1953. A partir desta descoberta a conversão de energia luminosa em energia elétrica desenvolveu-se significativamente e atualmente já se encontram dispositivos comerciais com eficiências de conversão próximas a 20% da energia incidente. Um esquema de um coletor fotovoltaico pode ser visto na Figura 3.

Fonte: <http://www.uslpv.com/>



Figura 3: Células fotovoltaicas para aproveitamento direto de energia.

Finalizando, a aplicação mais comum para energia solar são os sistemas de aquecimento de água para consumo direto. Estas aplicações embora utilizada há longa data só teve a sua eficiência efetivamente melhorada a partir da implementação da chamada “Solar Hot Box”. Este dispositivo consiste na utilização do efeito estufa para melhorar a eficiência da captação de energia solar. Este efeito foi primeiramente observado pelo naturalista suíço Horace de Saussure na década de 1760. Embora não conhecesse a explicação do fenômeno, este cientista demonstrou que com a utilização de uma caixa com coberturas de vidro, similar à apresentada na Figura 4, conseguiu temperaturas de 109°C. Estas descobertas, serviram de princípio para a construção dos primeiros coletores solares. A primeira aplicação comercial conhecida ocorreu nos EUA, na década de 1890, com um sistema com coletor e armazenador integrados.



Fonte: <http://solarcooking.org/saussure.htm>

Figura 4: Esquema de uma “Hot Box” utilizada por Sassure.

Baseando-se nestes princípios, o primeiro coletor comercializado e patenteado por Clarice Kemp em 1891, em Maryland, EUA. A partir desta data houve um grande desenvolvimento da tecnologia. Uma etapa importante foi a patente de William J. Bayley, que separou o coletor do tanque armazenador em 1909. Contribuiu muito para este desenvolvimento também a política de altos preços de energia na Flórida na década de 1910, viabilizando a utilização destes dispositivos e sua popularização.

Atualmente este tipo de dispositivo está espalhado pelas mais diversas regiões do mundo, possuindo tecnologias mais adequadas para cada região do globo. É possível verificar nas Figuras 5 e 6 que a capacidade instalada de coletores solares tem aumentado muito nos últimos anos.

Relatórios da AIE (Agência Internacional de Energia), como Weiss e Mauthner (2013), mostram estes dados. Cabe ressaltar a elevadíssima capacidade instalada na China, a maior do mundo e quase 10 vezes maior que os EUA, o segundo colocado, como pode ser visto na Figura 7. Este crescimento demonstra a importância da energia solar como fonte alternativa para o futuro.

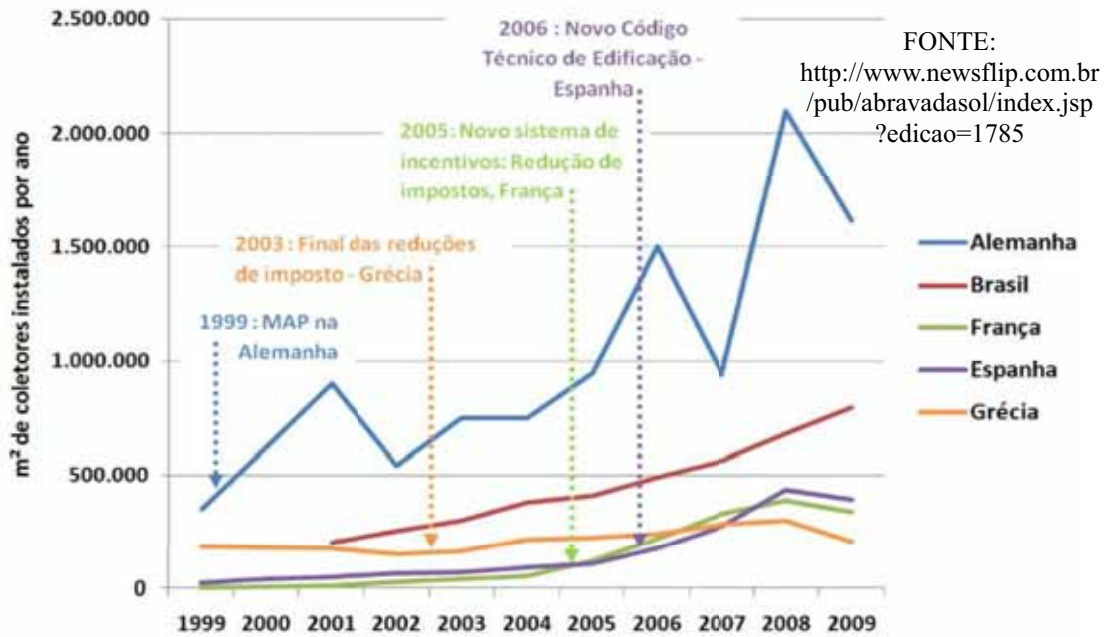


Figura 5: Área de coletores instalados ao ano.

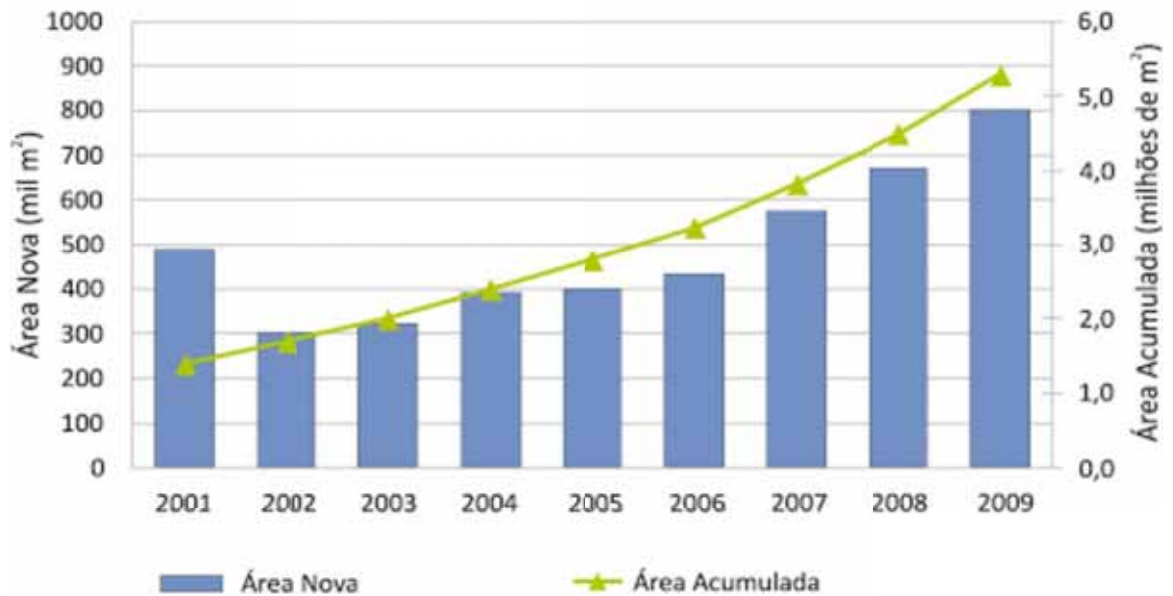


Figura 6: Evolução de instalação de Aquecimento Solar Brasileiro.

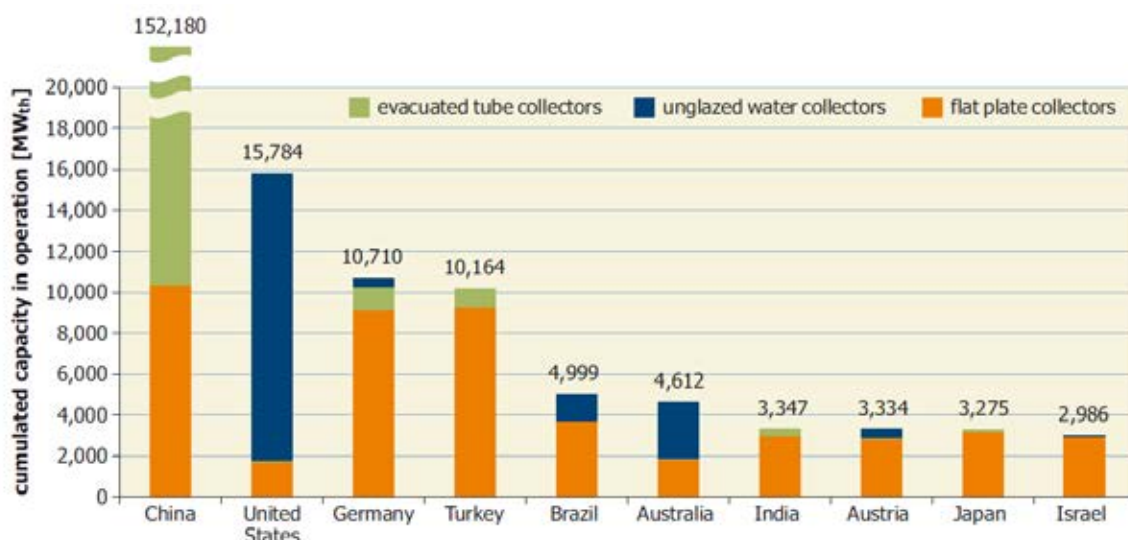


Figura 7: Distribuição da capacidade instalada de coletores no ano de 2011.

Este trabalho procura abordar um importante fator limitador no projeto de coletores solares ao analisar as perdas de calor pela superfície exposta ao sol. Quando se avalia o isolamento do coletor solar, a face superior precisa receber a radiação direta e não pode receber os isolantes térmicos opacos que tradicionalmente revestem as demais superfícies do coletor. Esta necessidade de transparência na face superior faz com que a maioria das perdas de calor do coletor para o meio ambiente ocorra por esta superfície.

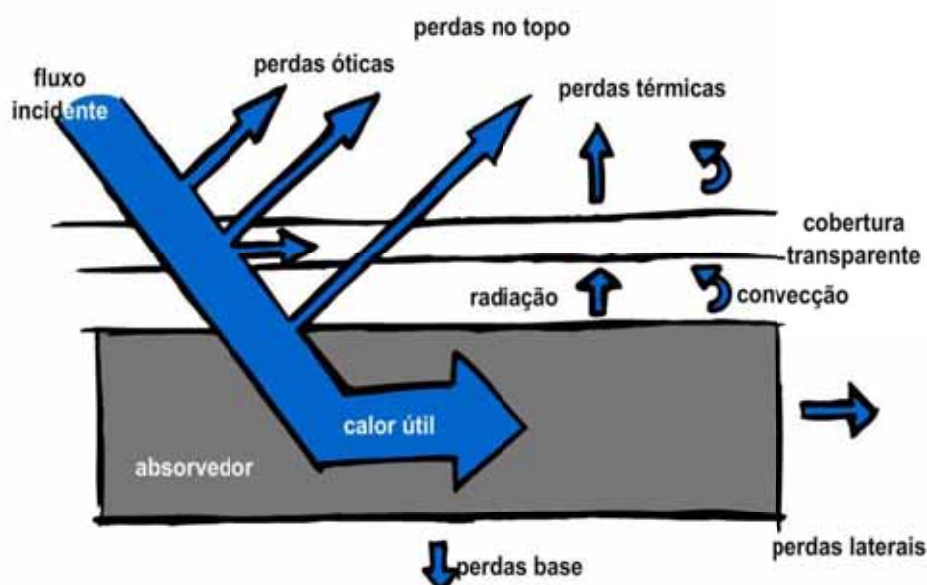


Figura 8: Fluxo da energia solar em coletores solares.

Diversas alternativas foram testadas e foram propostos alguns materiais denominados de isolantes transparentes (sigla *TIM* – *Transparent Insulation Material*) que atuavam no sentido de diminuir estas perdas.

Embora uma série de estudos tenha sido realizados, ainda não foram apresentadas soluções efetivas para o problema. Em regiões mais frias, sistemas de isolamento com vidro duplo e de tubos evacuados são mais comuns. Uma alternativa para isolamento transparente simples é o posicionamento de barreiras, que impeçam que a convecção se desenvolva ao longo de toda a extensão do coletor. Para avaliar este efeito sobre as perdas térmicas, foi montado um aparato experimental onde poderiam ser variados os espaçamentos entre as barreiras e a altura da cavidade e, assim verificar o comportamento das perdas por convecção natural da placa inferior. Variações de inclinação do dispositivo também foram avaliadas.

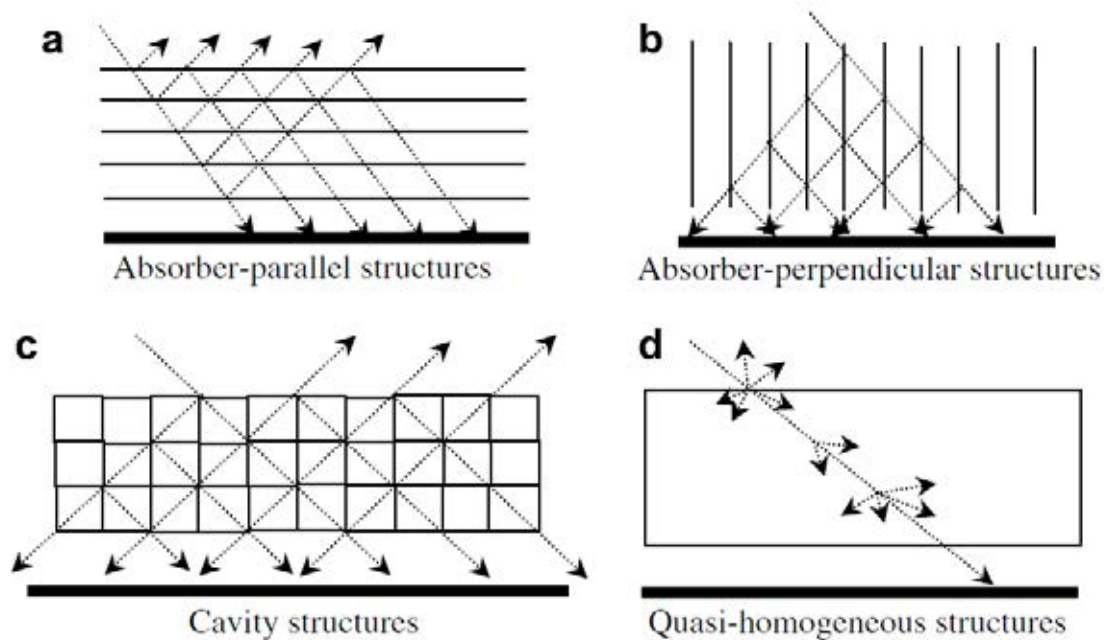
Além disto, um modelo numérico utilizando o OpenFoam, definido a partir de temperaturas constantes na placa também foi desenvolvido. Um sistema de dimensões generalizados foi utilizado para permitir avaliar a influência dos parâmetros geométricos estabelecidos sobre o resultado. Os resultados teórico e experimentais permitem avaliar os impactos efetivos da distribuição de barreiras sobre o problema de convecção em cavidades, e estabelecer o impacto de cada caso sobre as perdas convectivas. Os resultados poderiam corroborar muito para minimizar as perdas térmicas em coletores solares com uma redução do coeficiente de convecção natural e, desta forma, permitir o projeto de coletores solares de maior eficiência.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A popularidade dos dispositivos de captação de energia solar associada ao interesse que desperta fez com que este tema fosse objeto de um grande número de pesquisas em diferentes locais do mundo. Resultado disso é uma grande diversidade de trabalhos envolvendo o tema culminando, inclusive, em revistas dedicadas exclusivamente a pesquisas envolvendo energia solar. Será apresentado neste capítulo alguns trabalhos relevantes sobre coletores solares, assim como o uso de sistemas de isolamento transparente para minimização das perdas térmicas.

Um aspecto importante dos sistemas de isolamento transparente é o esquema utilizado para minimizar as perdas térmicas. Uma revisão realizada por Wong, Eames e Perera (2007) são apresentadas uma classificação dos diversos esquemas possíveis de utilização de isolamento transparente. De acordo com este trabalho, pode-se dividir os isolamentos transparentes em quatro grandes grupos, de acordo com seus aspectos construtivos. Um esquema de cada uma destas alternativas pode ser vista na Figura 9. Estes grupos, podem ser classificados em:

- **Sistemas com barreiras paralelas à placa absorvedora:** seriam dispositivos térmicos onde são colocadas diversas camadas de placas transparentes, como mostrado na Figura 9a. Estas placas usam um espaçamento mínimo entre si de maneira a dificultar a movimentação do ar e, conseqüentemente, o processo de convecção natural. Desta forma, como o ar, substância de baixa condutividade térmica como todos os gases, está sem movimento, transfere calor apenas por condução térmica e assim, consegue-se um excelente efeito isolante. As placas com dupla cobertura de vidro são um excelente exemplo deste tipo de aplicação. O inconveniente maior neste tipo de dispositivo é a necessidade da radiação cruzar todas as superfícies até chegar à placa absorvedora.



Fonte: Wong, Eames & Perera (2007)

Figura 9: Diferentes esquemas de isolamento transparente.

Como estes materiais não são totalmente transparentes, o incremento no número de camadas reduz significativamente a radiação que chega até a superfície da placa absorvedora e, conseqüentemente, a sua eficiência também.

- **Sistemas com barreiras perpendiculares à placa absorvedora:** seriam sistemas onde as barreiras seriam ortogonais à placa absorvedora, como mostrado na Figura 9b. Estes sistemas apresentam uma redução de transparência muito menor, uma vez que não afetam a maior parte da área de superfície do vidro. Neste caso, o efeito isolante viria da formação de diversas células de convecção que reduzem a movimentação do ar e/ou alteram suas características. Nestes casos a redução está associada a estas mudanças e deve ser estudada em cada caso, pois dependendo do posicionamento, pode haver incremento indesejado no processo de troca de calor.
- **Sistemas de isolamento estruturados:** onde são utilizados outras combinações de barreiras não uniformes e que, inclusive podem ser uma mistura das anteriores, como mostrado na Figura 9c. São construídos normalmente de material plástico e transparente e que formam geometrias determinadas para limitar o desenvolvimento da convecção entre o vidro e placa absorvedora. Diversas estruturas podem ser utilizadas, entretanto a de formato *honeycomb* (colmeia) é mais comumente utilizada. O inconveniente maior nestes casos é o material a ser utilizado para confecção do

isolamento estruturado, uma vez que a maioria dos plásticos tem baixo ponto de fusão e vai se degenerando com o tempo de operação dos coletores.

- **Sistemas de isolamento em aerogel:** sistemas onde é utilizado um sistema composto por aerogel e, substituição à cobertura original do coletor e reduzindo-se o espaço para o desenvolvimento da convecção, como mostrado na Figura 9d. Nestes casos, embora o material possa possuir alta transparência, existe uma certa difusão da radiação à medida que a radiação penetra no material. Os materiais utilizados são normalmente porosos e de alta densidade.

Além desta caracterização, ainda pode ser encontrado no trabalho de Wong, Eames e Perera (2007) uma série de materiais que já foram utilizados como matéria-prima de sistemas de isolamento transparente, testes de aplicações realizadas anteriormente, retorno financeiro destas aplicações nas mais diversas geometrias. Por fim os autores ressaltam a importância da utilização deste tipo de dispositivos como maneira de melhorar a eficiência dos coletores solares, principalmente nos períodos mais frios.

Descritas as principais formas construtivas de isolamento construtivo será apresentada uma revisão reportando alguns trabalhos realizados nos últimos anos e a evolução tecnológica associada a estes dispositivos.

De acordo com Lior (1990), os estudos envolvendo as perdas de calor convectivo surgiram muito antes do termo introduzido como “isolamento transparente”. Em 1929, pesquisadores russos investigavam a possibilidade de utilização de material isolante térmico, porém com a absorção de radiação solar nas suas paredes. O termo “isolamento transparente” surgiu numa frente de pesquisa de materiais isolantes transparentes, que por sua transparência permitem a passagem de radiação solar e ao mesmo tempo uma boa isolamento térmica. Usando isolamentos estruturados em formatos padrões, tais como o retangular, circular e hexagonal. Essas estruturas são conhecidas como colmeia (*Honeycomb*), devido a sua semelhança do formato de uma colmeia.

Posteriormente, um estudo teórico das estruturas em formato de colmeia entre absorvedor e tampa de vidro exterior de um coletor solar de placa plana para suprimir a convecção térmica nessa região foi desenvolvida por Hollands (1965). Em 1969, segundo Lior (1990), foram desenvolvidos estudos por tabor em Israel usando estruturas em formato de colmeia feitos de material plástico, com características térmicas e transparência ainda não estavam disponíveis para coletores solares planos.

Existem ideias baseadas em estruturas mais simples. Barreiras térmicas na forma de placas ao longo do coletor, com ou sem cruzamento de barreiras térmicas foram avaliadas. Buchberg e Edwards (1976) inclusive propuseram uma série de estruturas formando o isolamento estruturado com base em cilindros de vidro. Estes estudos mostram que o uso de sistemas de espaçamento muito próximo implicam em uma importante redução da transparência em sua superfície, impactando negativamente no desempenho do coletor.

De acordo Kuhn, Bühler e Platzer (2001) com os estudos posteriormente desenvolvidos, no Instituto Fraunhofer para Energia Solar System (FISES) encontram-se os pioneiros nesta área de pesquisa. No Instituto foram realizados diversos testes utilizando diferentes materiais para suprimir a transferência de calor por convecção e radiação.

Um trabalho muito importante no seu desenvolvimento do tema foi desenvolvido por Hollands (1965). Este estudo mostra a importância de materiais isolantes transparentes no interior de coletores solares, uma vez que permite estimar as perdas térmicas por conta da convecção interna natural e como estas podem ser suprimidas. Além de reduzir as perdas de calor por radiação a partir da placa absorvedora. O autor também observa uma maior eficiência em temperaturas na faixa de 90°C à 150°C.

Esta preocupação com as perdas térmicas é fundamental para a otimização dos coletores solares. Em seu trabalho, Simon (1976), mostra que o projeto de um coletor solar sofre influência de diversos parâmetros, tais como:

- Utilização de superfícies do coletor reduzem a perda por radiação; Diminuição ou eliminação das perdas por convecção;
- Uso, ou não, de sistemas de isolamento transparente;
- Uso de vidros antirreflexo para aumentar a quantidade de energia solar coletada;
- Uso de coberturas feitas de materiais altamente transparentes para melhor aproveitamento dos raios solares; e
- Uso de coberturas absorvedoras de calor para evitar perdas.

Simon (1976) alerta ainda que existem empecilhos no desenvolvimento e a implantação dos sistemas de isolamento transparente, tais como: a imperfeição na manufatura reduzindo o rendimento do sistema, as temperaturas de trabalho baixas dos plásticos, alto custo e o possível superaquecimento do sistema, além da falta de informações importantes e ainda desconhecidas sobre o assunto.

Estudando os meios para reduzir a troca de calor pela superfície dos coletores, Marcus (1983) realiza uma análise analítica e experimental no fluxo de calor no interior de coletores solares planos com utilização de barreiras (honeycombs). Análises dos resultados numéricos mostram que estão dentro do desvio de 20 por cento dos valores experimentais.

Hollands, Marshall e Wedel (1978) apresentam um tratamento que redundava num conjunto explícito de equações para a transmitância do sistema em formato de colmeia. O método incorpora reflexões especulares, absorção e dispersão e, embora o efeito de polarização não esteja incluído, o método pode ser modificado para levá-lo em consideração.

Uma alteração relevante nesta abordagem foi proposta por Hollands e Lynjatan (1985) onde foi verificado o comportamento do coletor solar ao deixar uma folga de cerca de 10 milímetros entre a placa e as barreiras em formato de colmeia. O estudo mostrou que a folga não anula a capacidade da colmeia de suprimir a transferência de calor por conta da convecção natural.

Kaushika e Priya (1991) realizaram ainda um estudo óptico dos materiais transparentes. Foram analisadas a refração e dispersão numa vasta gama de ângulos de incidência dos raios solares, comparando suas formulações com observações experimentais do piranômetro. A comparação de resultados se mostrou muito satisfatória.

Um outro trabalho que merece destaque é o elaborado por Platzer (1992), onde é montado um procedimento para avaliar o comportamento da radiação no interior das cavidades formadas pelo sistema de isolamento transparente. Com base no desenvolvimento de uma solução analítica com diversos parâmetros físicos estimados, inclusive o coeficiente de transferência de calor por convecção, foi possível avaliar o comportamento do fluxo de calor ao longo da cavidade. A influência do ângulo de inclinação do coletor também foi avaliada. Por fim o autor afirma que o ideal seria possuir mais resultados experimentais para poder melhorar a metodologia.

Uma investigação do comportamento de coletores que também se utilizavam de barreiras foi realizado por Rommel e Wagner (1992). No trabalho, os autores constataram uma melhora na eficiência, essencialmente em temperatura acima de 80°C, gerando altas temperaturas de estagnação. As temperaturas elevadas, inclusive, causaram danos aos materiais isolantes transparentes usados nas barreiras. Com base neste estudo verificou-se a necessidade do desenvolvimento de materiais adequados com boa resistência em altas temperaturas para aplicação neste tipo de isolamento.

Steinfeld e Schubnell (1993), algum tempo depois propuseram um estudo onde o sistema de isolamento de coletores concentradores e sua eficiência em função da distância do topo e raio do tubo são avaliados. Neste estudo, os autores desenvolvem correlações do comportamento da radiação térmica no interior de coletores e sua aplicação na otimização da eficiência em coletores solares parabólicos.

Nesta mesma época, Hollands e Iynkaran (1993), usaram aproximações polinomiais para prever o comportamento térmico das células de convecção do isolamento transparente tipo colmeia (*honeycomb*). Esta análise foi baseada nas condições do problema utilizando uma camada de ar entre o isolamento transparente e a placa absorvedora. Os resultados analíticos foram comparados com uma série de resultados experimentais. Em todos os casos uma boa concordância foi verificada. Segundo resultados teóricos deste artigo, o espaçamento inferior de ar, quando este for superior a 7 mm, ocorre um aumento da transferência de calor em 5% entre as cavidades.

Kaushika e Sharma (1994), estudaram a utilização de estruturas de colmeia (*honeycombs*) com paredes de materiais transparentes (acrílico ou plástico Lexan®) e colocadas transversalmente às paredes do coletor. Nesta geometria, espaços preenchidos por ar se formam entre as paredes e são os responsáveis pelas taxas de convecção de calor. Ensaio realizados nesse estudo comprovaram que a utilização deste tipo de isolante transparente no coletor pode resultar em ganhos na eficiência de um coletor de até 40%.

Neste mesmo ano, Kaushika et al (1994), desenvolveram um modelo numérico que permitia a simulação do comportamento dinâmico do coletor solar protegido por um sistema de isolamento celular. Diversas condições de teste foram proposta e analisadas. Os resultados mostraram que os melhores resultados são obtidos para o coletor com ângulo de inclinação próximo a 30°.

Arulanantham e Kaushika (1996) modelaram o sistema de colmeia (*honeycomb*) com ar desprezando os efeitos da convecção. Baseado neste pressuposto, o ar no interior das células permanecia estacionário e o efeito predominante na transferência de calor passa a ser o processo condutivo ao invés do convectivo. Apesar da simplificação do processo pela condução do ar, que os autores afirmam se tratar de uma boa hipótese para razões geométricas para cavidades superiores a 25 mm, o tratamento dado à transferência de calor por radiação é bem completo. Por fim os autores não verificaram diferenças significativas entre cavidades com paredes negras e com paredes transparentes. Ressalto entretanto que num modelo incluindo

efeitos convectivos, a utilização de superfícies negras tende a acentuar muito o processo.

Um trabalho similar usando isolamento transparente mas com uma camada absorvedora de concreto ou areia foi apresentado nesta mesma época por Avanti, Arulanantham e Kaushica (1996). Neste trabalho foi utilizado um isolante estruturado no formato *honeycomb* transparente. O comportamento dinâmico do sistema é obtido a partir da simulação transiente fundamentalmente para análise da energia armazenada no concreto/areia. O modelo prevê que a operação destes dispositivos se daria numa faixa de 30 a 60% de eficiência.

Um outro relevante estudo em coletores solares planos com barreiras, introduzindo aberturas de ar superiores e inferiores foi proposto por Abou-Ziyan e Richards (1997), conforme mostrado na Figura 10. Investigando as possíveis combinações, o trabalho demonstrou que o mecanismo mais eficaz na supressão da convecção natural interna é a utilização de um único espaço de ar abaixo das barreiras.

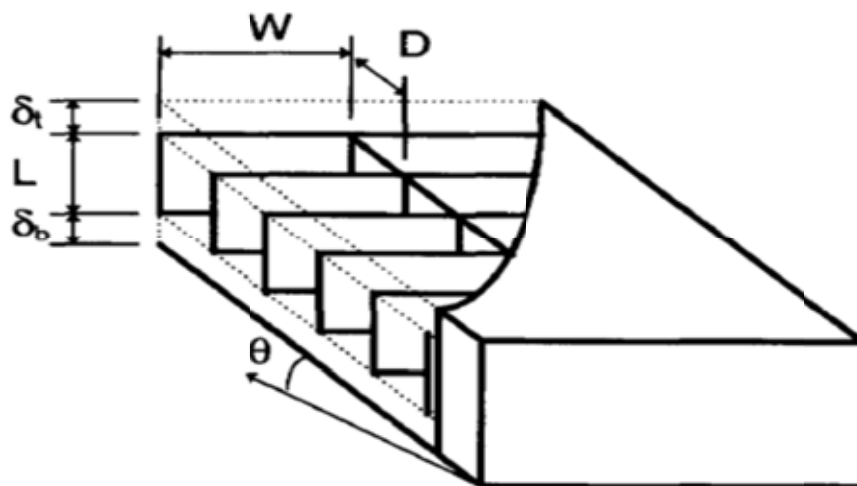


Figura 10: Representação do coletor estudado por Abou-Ziyan & Richards (1997)

Uma utilização de isolante tipo colmeia em reservatórios térmicos, conforme mostrado na Figura 11, foi feita por Kaushika e Reddy (1999). A aplicação deste tipo de isolante faz com que os reservatórios absorvam diretamente a radiação solar, sem utilizar coletores, e obtendo uma melhora significativa no armazenamento de energia.

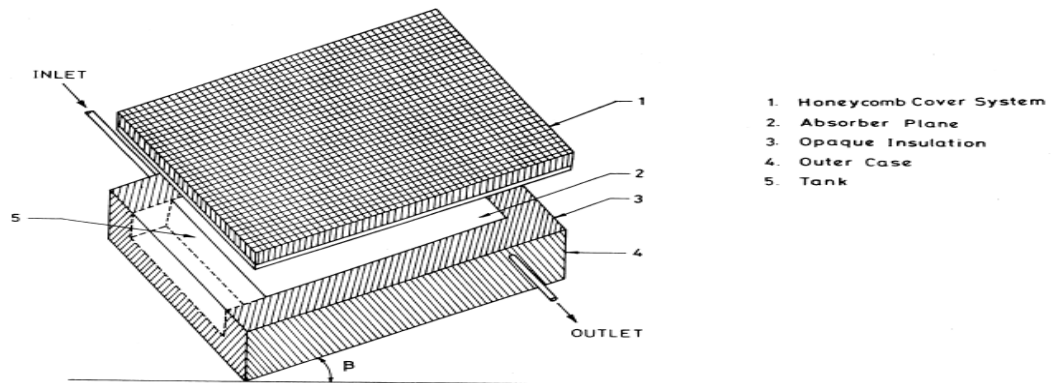


Figura 11: Representação do reservatório estudado por Kaushika e Reddy (1999)

Uma outra visão geral sobre isolamento transparente em coletores foi apresentada por Kaushika e Sumathy (2003). Neste trabalho aparece uma classificação do sistema de isolamento transparente muito similar à apresentada por Wong, Eames e Perera (2007), com a diferença que a classe de isolamentos estruturados aparece subdividido em duas outras classes. Além disto é feita uma revisão da metodologia sobre uma abordagem física dos sistemas de isolamento com base nos trabalhos publicados até então. Por fim, os autores alertam para a questão do uso deste tipo de isolamentos em sistemas não domésticos (a altas temperaturas) e para o fato de que, apesar dos ganhos na eficiência, os testes se limitam a dispositivos não comerciais. Uma outra revisão que também pode ser consultada, embora seja direcionada principalmente para coletores de ar, foi apresentada por Varun Saini e Singal (2007).

Outro trabalho abordando este tema foi desenvolvido por Ghoneim (2005). Segundo este estudo, os sistemas com *honeycombs* apresentam algumas desvantagens. Esses tipos de isolamentos transparentes, embora eficientes na redução das perdas térmicas, podem reduzir a eficiência ótica (reflexão dos raios solares) e eventualmente reduzir a eficiência do coletor solar. Seus estudos mostraram que a incidência dos raios solares deve ser de 70° para evitar que ocorra essa perda reflexiva causada pelos *honeycombs*. Ainda foi constatado em seus estudos que pequenos espaços embaixo do isolamento devem ser considerados no projeto para minimizar essas perdas.

De forma semelhante, mas focando no fenômeno da convecção natural Kumar e Kaushika (2005) estudaram os efeitos da inclinação de coletores com isolamentos transparentes. Com base nestes estudos, os autores concluíram que nos sistemas horizontais existe muita instabilidade e são necessárias células maiores e mais profundas para conter a convecção, ou seja, haveria a necessidade de aumentar as dimensões dos coletores. Já nos

sistemas com inclinação, os movimentos do fluido são mais adequados para serem aplicados nas condições pré-estabelecidas. A angulação ideal dessa inclinação, entretanto, não foi determinada.

Uma outra opção que vem sendo usada recentemente é a substituição do ar no interior da cavidade por outros tipos de gases. Considerando esta alternativa, Vestlund, Rönnelid e Dalenbäck (2009), fizeram uma análise comparativa de como se comportam as perdas térmicas com 5 tipos de gases diferentes. Além do ar foram utilizados: dióxido de carbono, argônio, kriptônio e xenônio. Os resultados mostraram que pode-se conseguir uma significativa redução das perdas de calor com esta técnica. Os maiores problemas reportados neste caso são a necessidade de estanqueidade do coletor e o custo dos gases.

Uma alternativa de isolamento transparente, já discutida nas alternativas mas ainda pouco aplicada foi avaliada por Dowson et al (2012): o aerogel. Para fazer esta análise foram construídos diferentes tipos de coletores de aquecimento de ar: com camada simples e dupla de vidro e com aerogel. Os resultados do balanço energético para os coletores mostram que o de aerogel é o de maior eficiência. No entanto, por custar mais caro, este tipo de cobertura leva mais tempo para a recuperação do investimento inicial. No caso estudado, os autores consideram um prazo de 4 a 6 anos para obtenção do retorno do capital investido.

Embora os trabalhos foquem bastante na aplicação de sistemas de isolamento transparente em coletores planos, a sua importância em coletores parabólicos pode ser, até mesmo, maior em função da diferença de temperaturas. Tendo em vista este aspecto, Horta, Henriques e Collares-Pereira (2012), analisaram a influência de barreiras verticais e a substituição do gás na diminuição da perda convectiva de um coletor cilindro-parabólico. Para estimar as perdas térmicas um modelo numérico foi elaborado. Com base em resultados numéricos e experimentais verificou-se que em condições críticas o coletor com barreiras de convecção e gás substituto (Argônio) apresentou as melhores eficiências.

Uma outra análise numérica através de um modelo de coletor solar foi realizada por Kessentini et al (2012), onde se estuda cada cavidade do isolante separadamente, bem como suas interações com a vizinhança e as condições de contorno. Ainda segundo o autor, essa simulação numérica é importante para prever as perdas de calor e a performance térmica do modelo geométrico, além de ajudar a entender o fenômeno de transferência de calor do fluido dentro das cavidades. Os resultados obtidos neste caso foram apresentados em forma de velocidade, nos eixos vertical e horizontal, e temperatura, com um número de Rayleigh de

3,7.10⁴. O gradiente de temperatura na superfície absorvedora até as paredes do isolamento transparente foi avaliado e a presença de recirculação na qual o ar sobe pela parede quente e desce pela parede fria também foi verificada. A utilização de isolamentos transparentes induziu recirculações periódicas nas cavidades de ar, com velocidades de recirculação menores. Segundo esse estudo, esse efeito de recirculação menor contribuiu efetivamente para a diminuição das perdas e aumento da eficiência global do coletor.

Partindo dos trabalhos apresentados nota-se um grande esforço para otimizar os sistemas de isolamento transparente e viabilizar sua utilização comercial. Este estudo se enquadra dentre estes, com o objetivo de verificar experimentalmente a influência do espaçamento entre as placas num sistema de isolamento com barreiras perpendiculares na direção transversal aos tubos dos trocadores. Os resultados obtidos podem colaborar muito no sentido desta otimização almejada.

3 - METODOLOGIA

Para o estudo da perda térmica de coletores, simulou-se as suas condições térmicas, tendo foco no espaçamento entre a placa (aleta) absorvedora e o vidro. Nesta região, existe uma massa de ar confinado responsável pelas perdas térmicas por convecção natural. A Figura 12 apresenta uma vista lateral das dimensões do protótipo, onde será possível estudar e quantificar a diminuição desta perda ao se introduzir barreiras que impeçam sua livre movimentação, conforme ilustração da Figura 13.



Figura 12: Vista lateral do protótipo estudado.

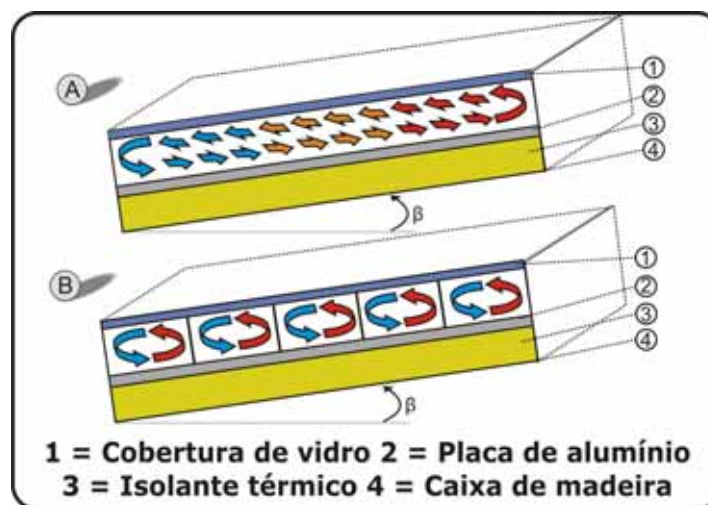
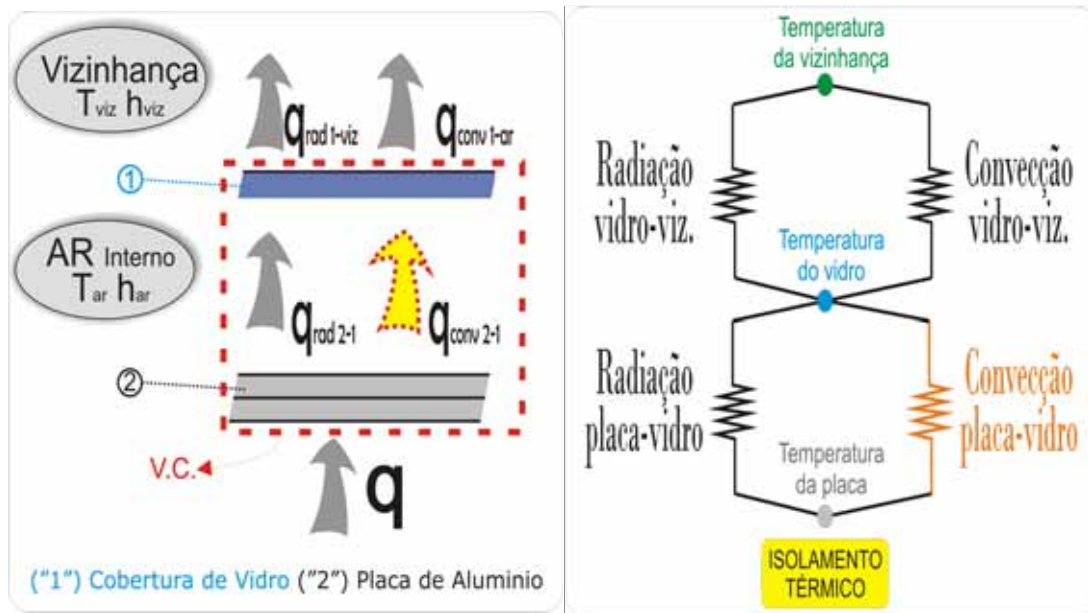


Figura 13: Visualização da convecção interna no interior do protótipo, ("A") sem barreira, ("B") com 4 barreira entre a placa absorvedora e a cobertura de vidro.



(a) Fluxos de calor inerentes ao problema

(b) Circuito térmico equivalente para cálculo dos fluxos de calor.

Figura 14: Representação dos fluxos de calor e resistências térmicas entre a placa absorvedora, vidro e a vizinhança.

As Figuras 14a e 14b ilustram as trocas térmicas observadas num volume de controle representativo, entre a área da placa absorvedora e a cobertura de vidro. Com base nesta representatividade os fluxos de calor envolvidos podem ser determinados a partir de equações gerais de balanço de energia unidimensional. O protótipo construído apresenta os mesmos fluxos térmicos apresentados, entretanto a origem da energia diferente, de natureza elétrica, e não da radiação solar. Cabe ainda ressaltar que, apesar de todos os componentes estarem presentes, o foco do trabalho será a transferência de calor por convecção natural entre o vidro e a placa. Este direcionamento se deve ao fato que é justamente o fenômeno de convecção térmica que sofre a maior influência pela presença das barreiras.

No ensaio, a placa absorvedora (aleta) e o vidro estão espaçados por 40 mm. O protótipo foi construído de madeira de 22 mm de espessura, um vidro transparente de 4 milímetros de espessura na parte superior e uma chapa de alumínio de 0,1 mm de espessura na parte inferior. O volume de controle estudado possui, portanto, dimensões de 1050 x 520 mm e altura de 40 mm, conforme Figura 15.

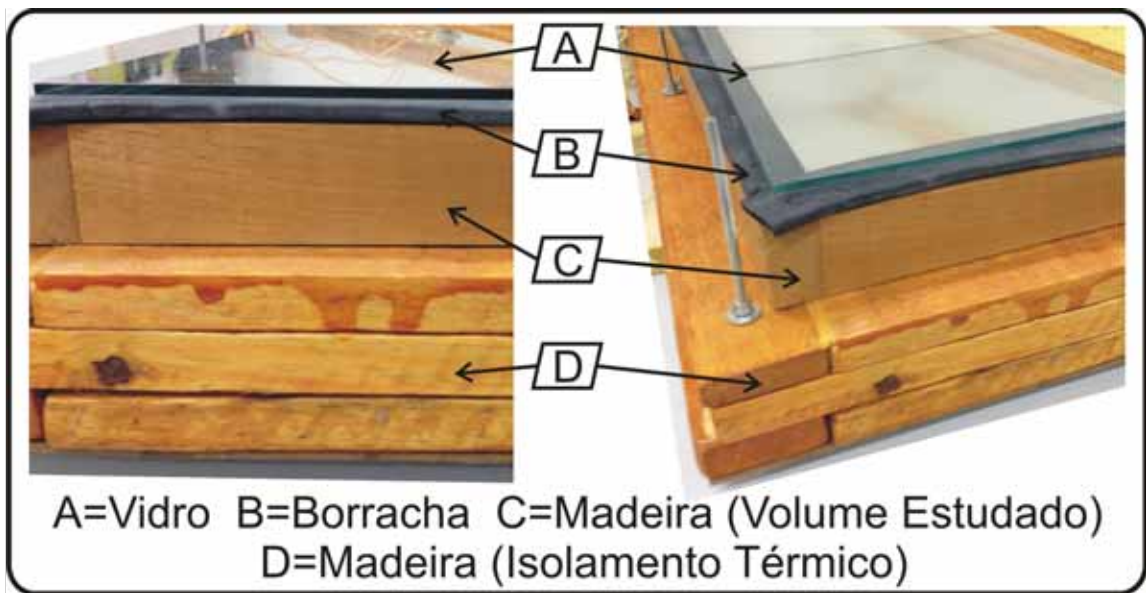


Figura 15: Vista parcial do protótipo.

Para a vedação entre a chapa de alumínio e a madeira foi usado silicone resistente a alta temperatura, entre a madeira e o vidro foi usado borracha, haja vista que o vidro é desmontado a cada experimento, usando doze parafusos de rosca sem fim com porca borboleta para a fixação do vidro, conforme ilustrado na Figura 16.

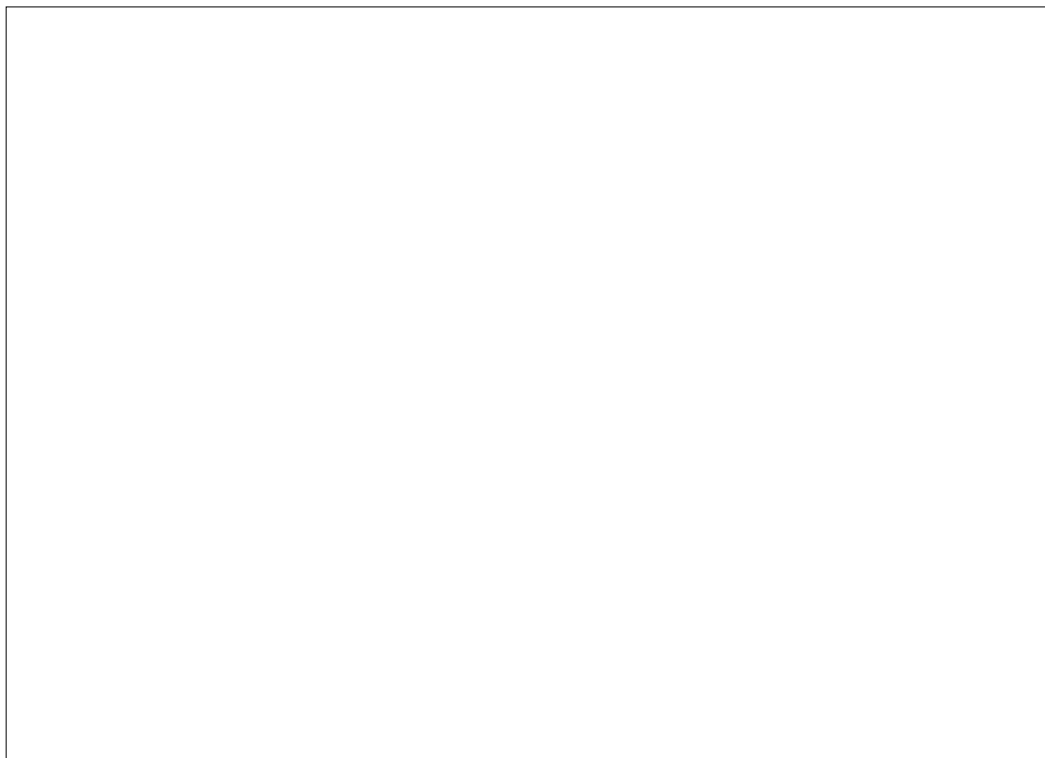


Figura 16: Vedação do protótipo.



Figura 17: Vista superior, com destaque dos sensores fixados no vidro.

Seis sensores de temperatura (LM35) foram fixados no vidro, com silicone de alta temperatura, para medir as temperaturas na superfície do vidro, conforme Figura 17. O fluxo de calor, por sua vez, será fornecido por 10 resistências elétricas fixadas em contato com a parte inferior da chapa de alumínio, espaçadas em 100 mm, conforme Figura 23.

A resistência é um fio de kanthal com 0,08 milímetro de diâmetro e resistência elétrica de $285 \Omega/\text{m}$. Uma fita adesiva de poliamida de alta resistência ao calor foi colada na placa de alumínio para produzir uma isolamento elétrica da resistência. Uma segunda camada é colocada como cobertura da resistência, para obter uma isolamento do ambiente. A Figura 19 mostra o esquema montado com o fio e a fita adesiva. Adicionou-se ainda, sobre o fio e a fita adesiva, uma camada de massa corrida para aumentar a proteção ao calor gerado.

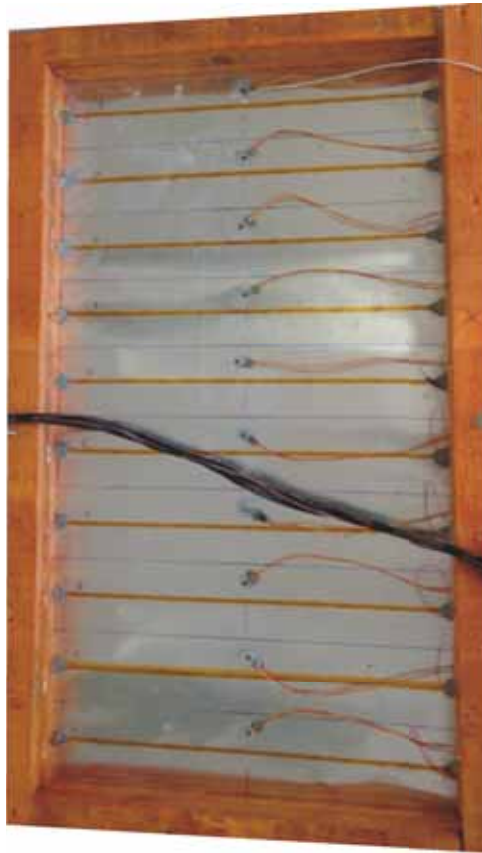


Figura 18: Parte inferior da chapa de alumínio, com as resistências elétricas e os sensores de temperaturas fixados.

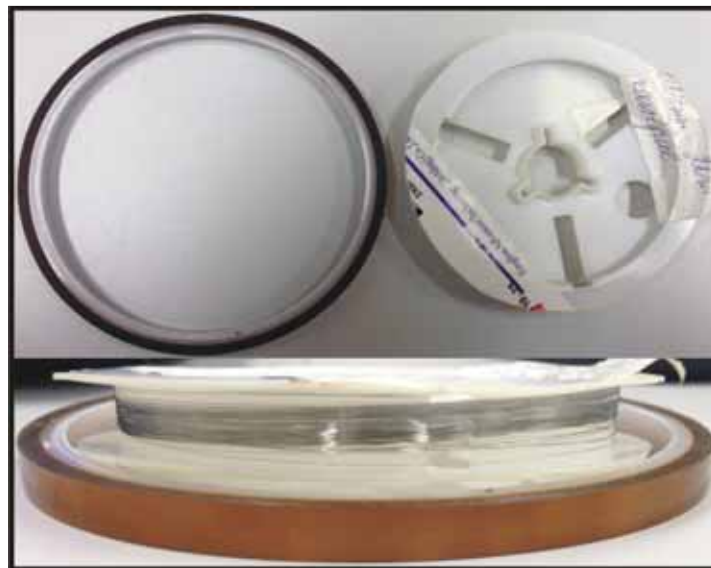


Figura 19: Fio de kanthal e adesivo para alta temperatura.

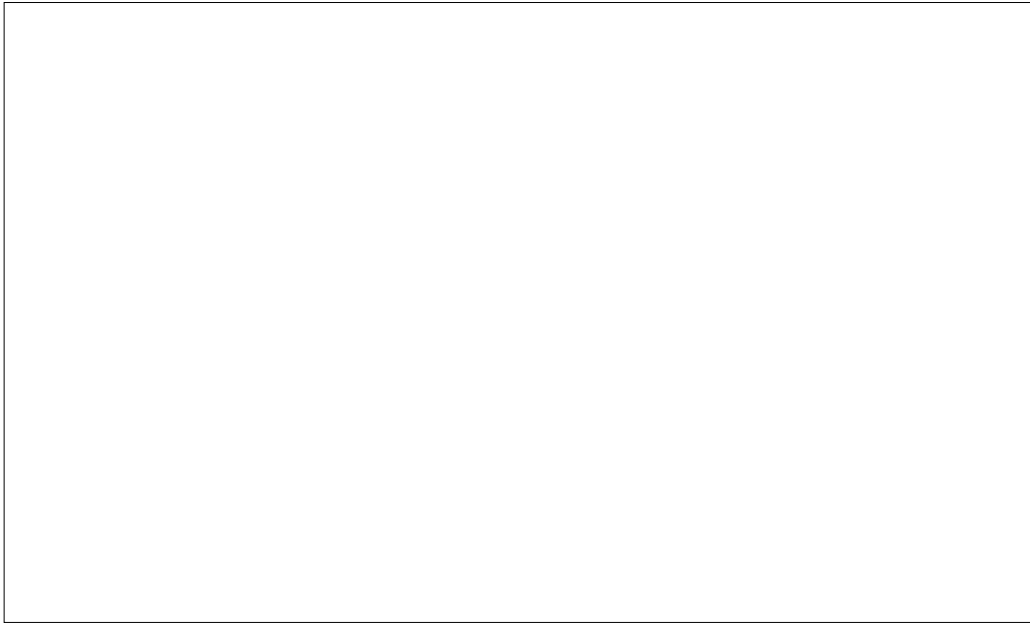


Figura 20: Isolamento térmico da parte inferior do volume de controle de estudo.

Na parte inferior da placa de alumínio, foi adicionado um isolamento térmico com duas camadas de lã de vidro de espessura de 20 mm e uma placa de isopor de 10 mm. Este conjunto é fechado com uma tampa de madeira de 3 mm de espessura, garantindo que o fluxo de calor oriundo das resistências elétricas esteja completamente direcionado para volume de controle, conforme Figura 20. Para criar as cavidades foram adicionados anteparos de madeira de espessura de 3 mm e aplicada cola quente nas extremidades melhorando o isolamento entre as cavidades, conforme Figura 21.

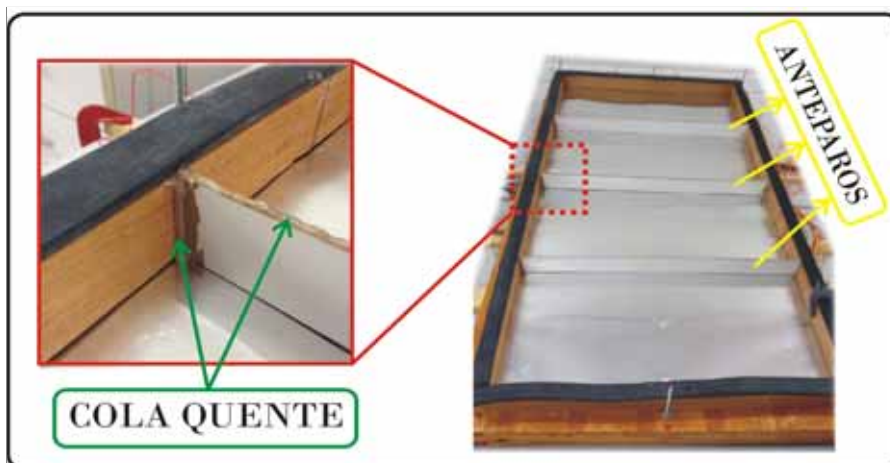


Figura 21: Vista das cavidades

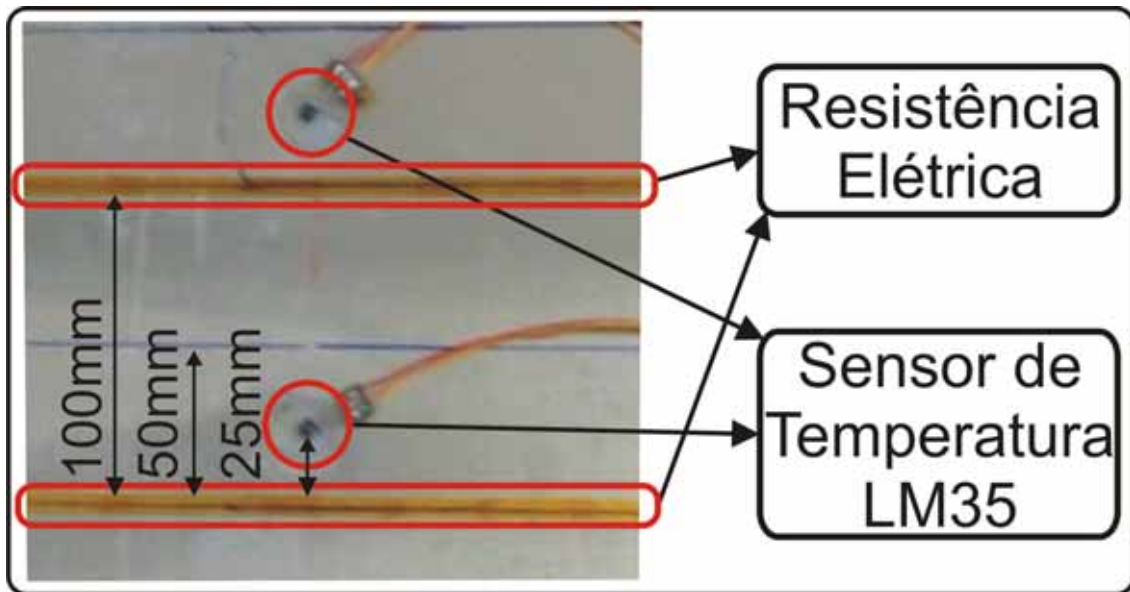


Figura 22: Visualização do posicionamento do sensor de temperatura.

3.1- Montagem do sistema de controle e medição.

Para analisar a convecção interna, será fornecido um fluxo de calor controlado por resistência de maneira a manter uma uniformidade da temperatura da chapa de alumínio. O controle será feito de forma constante ao longo do tempo de duração dos testes, através de um dispositivo eletrônico para controlar a voltagem que alimenta as resistências elétricas.

A chapa de alumínio, tem baixa capacidade térmica devido a sua pequena espessura e alta condutibilidade térmica. Desta forma, espera-se que a transferência de calor seja relativamente uniforme ao longo de toda área da chapa e com boa uniformidade de temperatura em toda a área da chapa.

Cada dispositivo eletrônico de controle da potência elétrica que alimenta cada resistência elétrica de forma independentemente tem um sensor de temperatura dedicado ao seu controle. Este sensor (LM35) monitora a temperatura a partir de um ponto médio entre a resistência elétrica mais próxima e o ponto intermediário entre as duas, conforme Figura 22.

Neste caso, as resistências elétricas foram montadas separadas de 100 mm e na região onde estão fixadas se espera-se obter as maiores temperaturas na placa. Por outro lado, considerando o ponto médio entre duas resistências adjacentes, a 50 mm, tem-se a região de menor temperatura.

Portanto, espera-se que a uma distância de 25 mm de cada uma das resistências seja

possível obter uma temperatura intermediária. Por conta disto, os sensores de temperatura para o controle da potência elétrica e medidas foram fixados nesta região. Ao longo da placa de 1 m de comprimento foram posicionadas 10 resistências elétricas e 10 sensores.

O dispositivo eletrônico é programado com uma temperatura de referência igual para todas as regiões. O controle consiste em monitorar a temperatura do sensor, e através desta informação, aumentar ou diminuir a potência sobre a resistência elétrica, garantindo a uniformidade da temperatura da placa. Um fluxograma do funcionamento do sistema de controle pode ser visto na Figura 23.

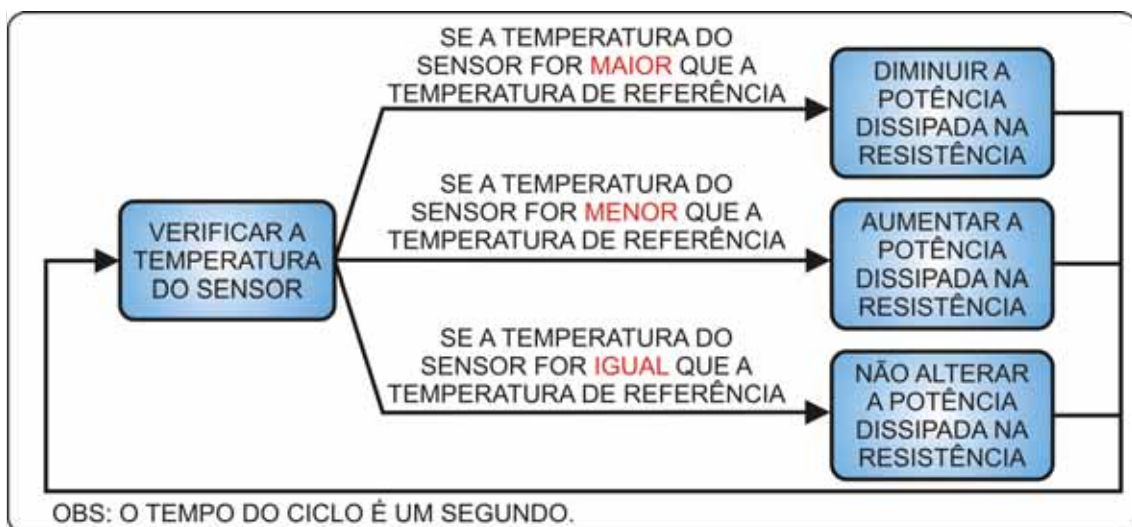


Figura 23: Fluxograma esquemático do controle de temperatura.

O circuito controlador de potência tem como princípio de funcionamento o controle do ângulo de disparo para condução de um Triac, aumentando ou diminuindo a potência. O controle é feito pela abertura do Triac em pontos definidos do sinal senoidal da rede elétrica, deixando passar apenas uma parte desta onda. O tempo de disparo é definido a partir do ponto onde o sinal passa pelo nível zero, ou seja, a cada início de semi-ciclo de uma onda senoidal. Se o disparo for feito no início do semi-ciclo, a máxima potência é conduzida. No entanto, se o disparo for feito no final do semi-ciclo, pequena parcela da energia é liberada. Uma variável independente é utilizada para controlar o tempo de disparo de cada Triac, sendo que quanto maior este tempo, menor a potência liberada. A Figura 24 mostra uma ilustração da onda do Triac a partir do disparo (em vermelho) e a onda senoidal original de entrada da rede (na forma tracejada).

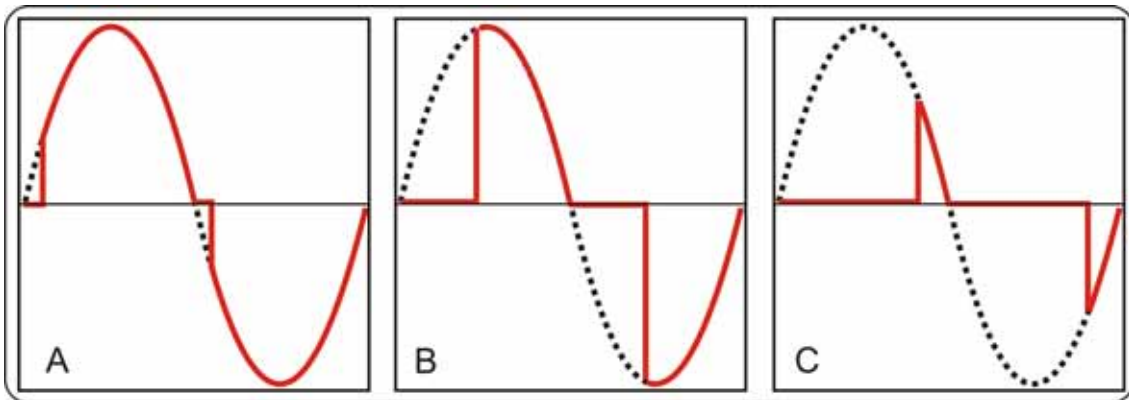


Figura 24: "A" disparo no começo da onda (máxima potência), "B" disparo no meio da onda, "C" disparo no final da onda (mínima potência).

Na instalação elétrica, um polo da resistência elétrica é conectado diretamente à rede elétrica. O segundo polo da resistência, por sua vez, está conectado ao terminal anodo 1 do TRIAC. O outro polo da rede elétrica está conectado ao terminal anodo 2 do TRIAC. Com esta montagem, a partir de um sinal elétrico de controle, injetado no terminal *gate* do TRIAC, ocorre a polarização entre os terminais anodo 1 e anodo 2 do TRIAC, liberando a passagem da corrente elétrica e permanecendo aberto até que o nível de tensão elétrica esteja próximo de zero.

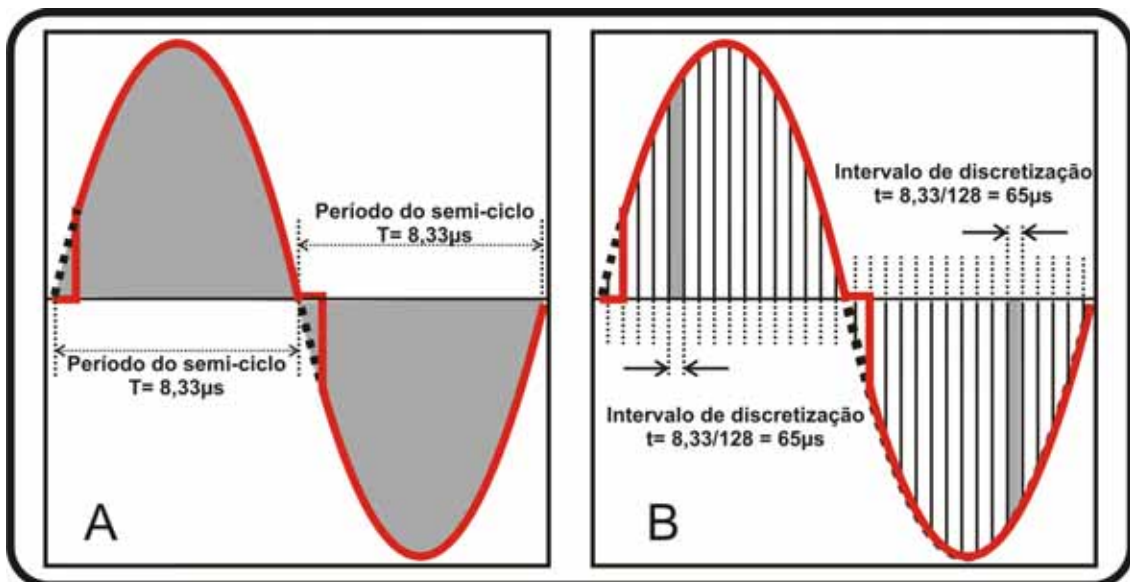


Figura 25: "A" = Período do semi-ciclo e "B" = Intervalo de discretização.

A alteração da potência ocorre através da divisão da senoide em aproximadamente 128 partes em cada $\frac{1}{2}$ onda, que é o valor indicado no caso de um controlador de 8 bits. Esta divisão determina a discretização do sinal e o tempo mínimo de controle do pulso. No caso da rede brasileira de 60 Hz, este tempo seria $\frac{1}{2}/60/128 = 65 \mu\text{s}$, conforme mostrado na Figura 25. Desta maneira, consegue-se mudanças suaves no valor da potência fornecida.

Na programação do PIC é usada uma variável “dimmer” que está relacionada ao tempo de espera para o disparo do sinal no terminal gate, após a voltagem passar pelo nível zero. Porém, uma característica de funcionamento do TRIAC implica numa dificuldade de controle: ele necessita de um mínimo de potência para manter a condução da corrente elétrica após o disparo de um sinal no terminal gate do TRIAC. Por conta desta característica, foi necessário pré-condicionar o sinal elétrico para que o ponto de disparo ocorresse numa região de maior potência do sinal elétrico (afastado das extremidades da onda). Utilizou um osciloscópio digital da marca Minipa, modelo MO2061, para monitorar os sinais aplicados nas resistências, conforme Figura 26.

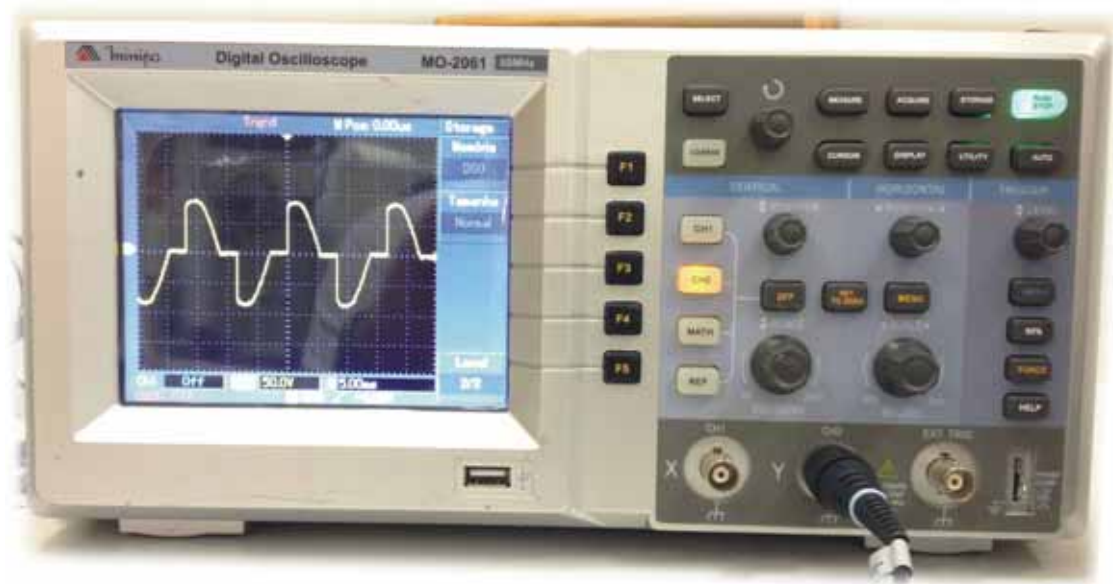


Figura 26: Osciloscópio Digital.

Desta maneira, existe um intervalo de potência adequado para o controle de potência atingir a condição de equilíbrio térmico. Ao ligar o controle diretamente na rede elétrica de 127 Volts, tem-se, na mínima potência, uma temperatura média na placa de 120°C . Por conta disso, foi necessário utilizar uma relação de transformador de maneira a diminuir a voltagem da rede e operar na faixa adequada do TRIAC.

Ao dar início ao funcionamento do sistema existe um regime transiente até que as condições atinjam um regime estacionário, conforme mostra a Figura 27. Nesta condição de equilíbrio a potência elétrica da resistência se equilibra com o fluxo de calor dissipado, garantindo a estabilidade da temperatura na região.

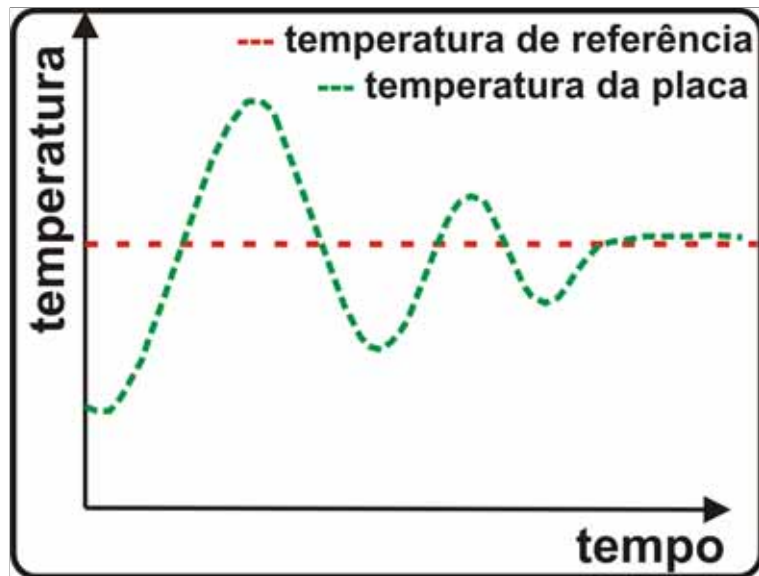


Figura 27: Comportamento da temperatura na placa e da potência dissipada na resistência elétrica, do início do ensaio até que atinja um equilíbrio.

A Figura 28 ilustra um fluxo esquemático do controle eletrônico desenvolvido. O sensor de temperatura emite um sinal para o microcontrolador que, através da sua programação, emite um sinal de baixa potência para o acoplador óptico. Este, por sua vez, transfere o sinal para o circuito elétrico de alta potência que alimenta o TRIAC e controla a potência da resistência elétrica. A potência elétrica é convertida em energia térmica, que será monitorada pelo sensor de temperatura, fornecendo o *feedback* para ciclo de controle fechado.

Inicialmente, um sistema na plataforma Arduino que possui um microcontrolador da marca Atmel, família AVR, foi usado no controle, conforme mostrado na Figura 29. Embora o sistema tenha funcionado a contento, em função de sua velocidade de processamento não foi possível controlar mais de uma resistência com um único Arduino. Com a necessidade do uso de diversas placas optou-se pela utilização de um sistema com microprocessadores independentes, que seria mais barato. A rotina de programação utilizada, e que serviu de base para a utilizada nos microprocessadores pode ser vista no Anexo A.

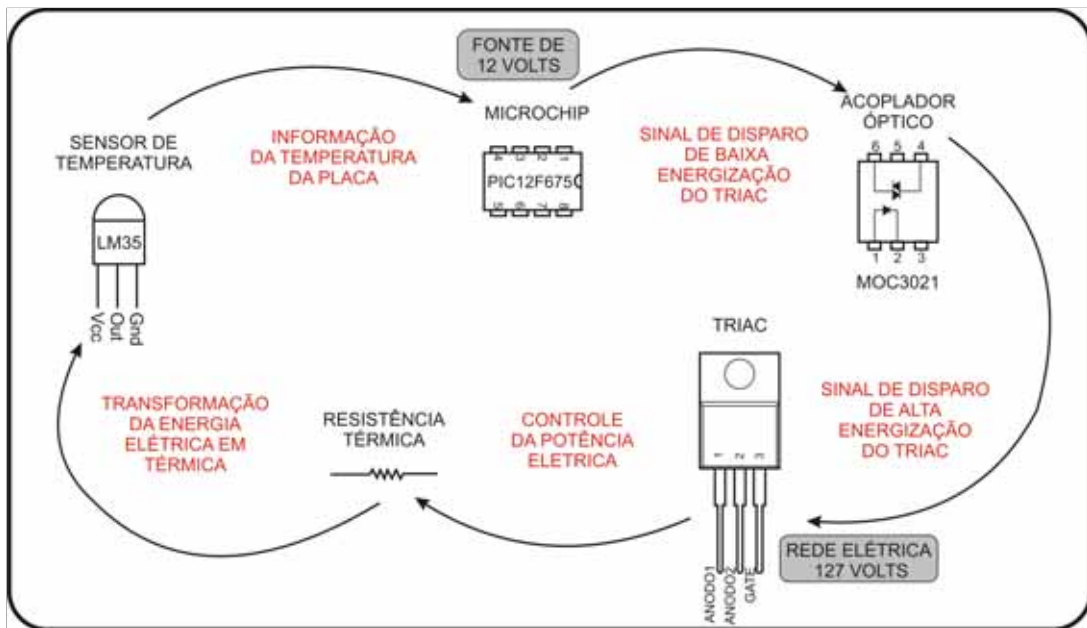


Figura 28: Fluxo esquemático do controle elétrico.

Em função destes problemas foi desenvolvido um circuito eletrônico usando o microcontrolador PIC12F675, como mostrado na Figura 30. Este conjunto possui as características necessárias para a implementação do controle e tem custo e tamanho menores se comparados ao Arduino.

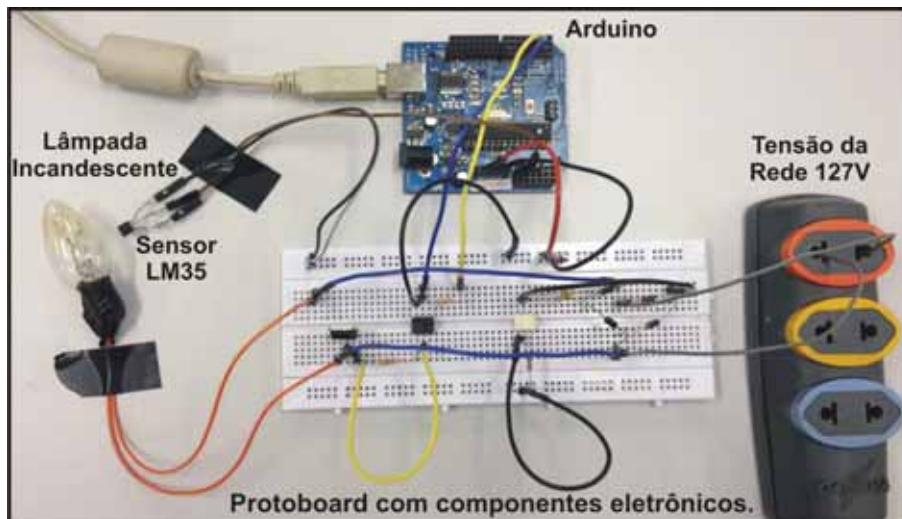


Figura 29: Controle feito com um Arduino.

A programação usado no microcontrolador pode ser vista no Anexo C, a qual foi adaptado da programação comentada e testada no Arduino.

Para a confecção da placa do circuito eletrônico, primeiramente foi desenhado o lay-out do circuito, utilizando o software *Eagle* (Versão 5.11), e impresso a laser numa folha de papel fotográfico. Depois disto, com a superfície da placa limpa, fixou-se o papel com a face da impressão sobre a placa. O mesmo foi então pressionado com um ferro de passar roupas quente por aproximadamente por 5 minutos. Desta maneira, o toner do papel é transferido para o cobre da placa. Depois disto, a placa é mergulhada num recipiente com água à temperatura ambiente para a retirada do papel com movimentos de fricção dos dedos contra a placa. Com o desenho do circuito, a placa é imersa em uma solução de percloroato de ferro por alguns minutos. Em seguida, a placa é limpa com palha de aço para a retirada do toner e perfurada com um furador para a soldagem dos componentes. Todo este processo pode ser visto nas Figuras 31 à 33.



Figura 31: Passos da confecção da placa de circuito eletrônico.

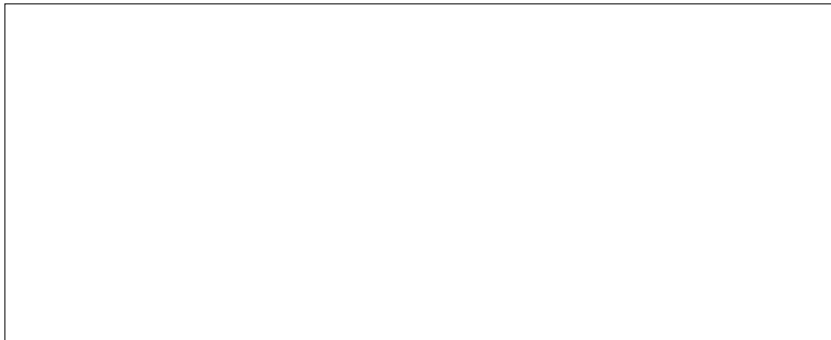


Figura 32: Imagem em papel fotográfico da placa de controle de temperatura.



Figura 33: Parte inferior da placa de controle de temperatura com as trilhas.

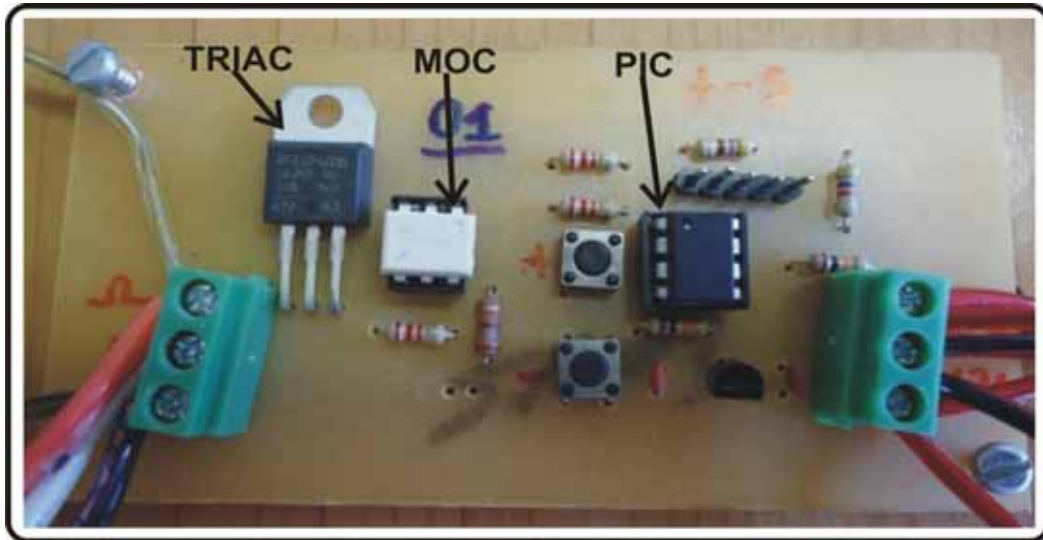


Figura 34: Placa de controle de temperatura, contendo os componentes eletrônicos.

O circuito eletrônico montado é alimentado por uma fonte externa composta por um transformador 12+12 volts, conforme observado na Figura 35. Um circuito retificador da onda, mostrado na Figura 36, é utilizado para obtenção do sinal pulsado, permitindo monitorar mais facilmente o ponto de tensão nula da senoide da tensão elétrica.

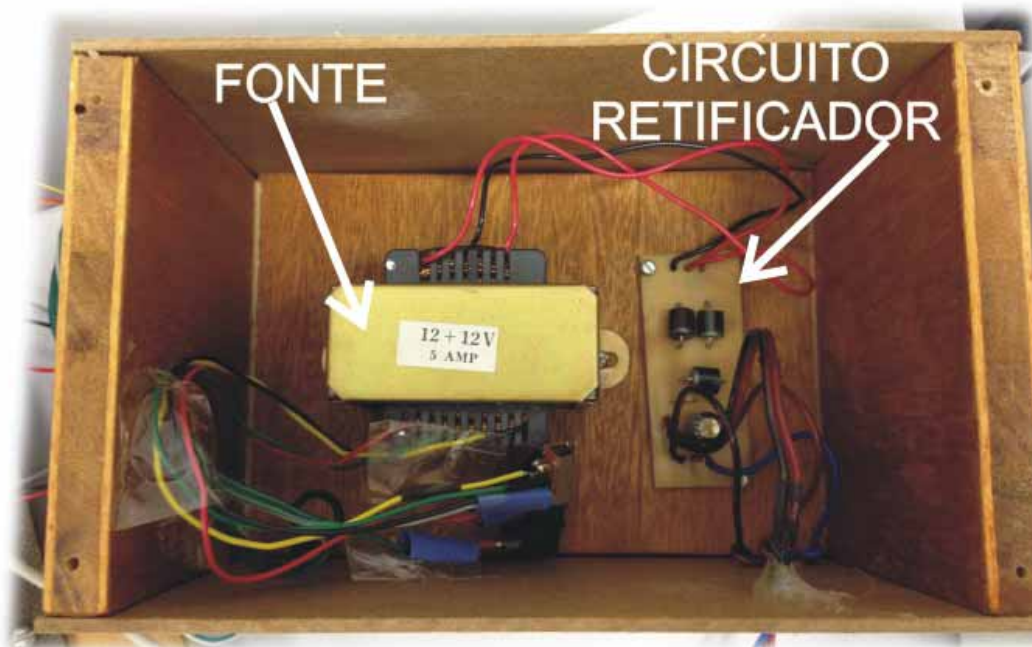


Figura 35: Fonte de alimentação dos microcontroladores (PIC12F).

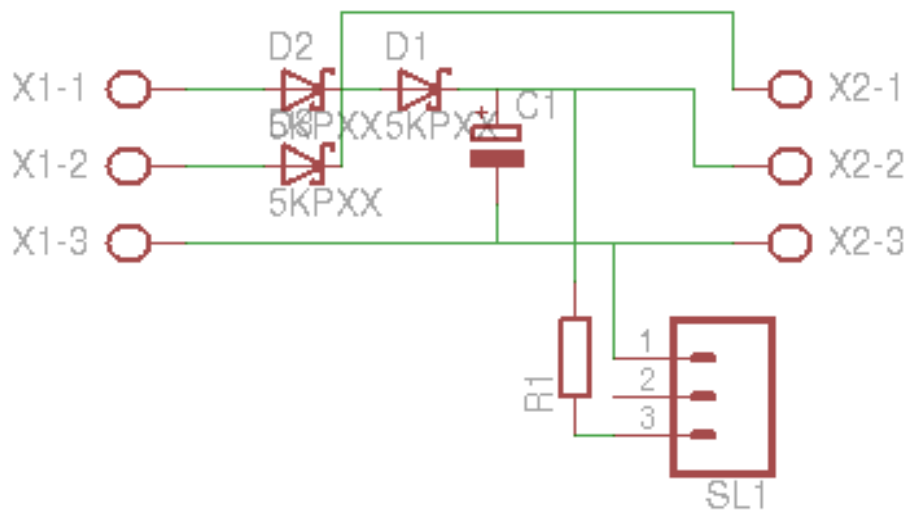


Figura 36: Circuito eletrônico da placa de retificação do sinal da fonte.

Esta alimentação possui ainda um circuito regulador de voltagem e fornece a energia necessária ao microcontrolador PIC12F675 e para alimentação do circuito eletrônico. O sistema eletrônico que alimenta o microprocessador é composto por um acoplador óptico MOC-3021 e um TRIAC-BTA12 (Triode for Alternating Current). O acoplador óptico permite o acoplamento da linha de alta potência à eletrônica de baixa potência, passando o sinal de controle para o terminal gate do TRIAC. A potência elétrica para a resistência na seção de testes é fornecida pela rede elétrica de 127 volts, passando pelo TRIAC, com o pulso controlado pelo microprocessador como mostrado Figura 28.

No circuito envolvendo o Arduino, a conexão com o computador é feita diretamente pela USB. A transferência do código de controle, neste caso, é feita diretamente por uma IDE de código livre, desenvolvida exclusivamente para este fim. A temperatura é mantida no valor estabelecido na programação do microcontrolador, apresentada no Anexo C. O programa utilizado no PIC foi desenvolvido na plataforma MPLAB IDE Versão 8.6 e descarregado com a placa PICKIT2 mostrado na Figura 37.



Figura 37: Placa PICKIT2.

Como foi destacado anteriormente, para uniformidade de temperatura foram construídos 10 placas de controle que atuavam de forma independente em cada resistência com o seu respectivo sensor de temperatura. Os dez sensores de temperatura utilizados para cada uma das placas de controle também forneciam, simultaneamente, os dados para um Arduino Mega. O Arduino descarregava os dados na porta serial do computador e estes eram impressos em um terminal de onde, posteriormente, eram transferidos para uma planilha.

A potência fornecida em cada resistência também é monitorada para quantificar o fluxo de calor dissipado por efeito Joule na entrada de cada volume de controle estudado. Para isso, foi construído um circuito eletrônico mostrado nas Figuras 38 à 41. Este circuito condiciona o sinal de tensão utilizada na alimentação das resistências para uma tensão contínua de até 5 V. Com esta tensão retificada menor e compatível a entrada analógica do Arduino foi possível a coleta de dados de forma similar à da temperatura.

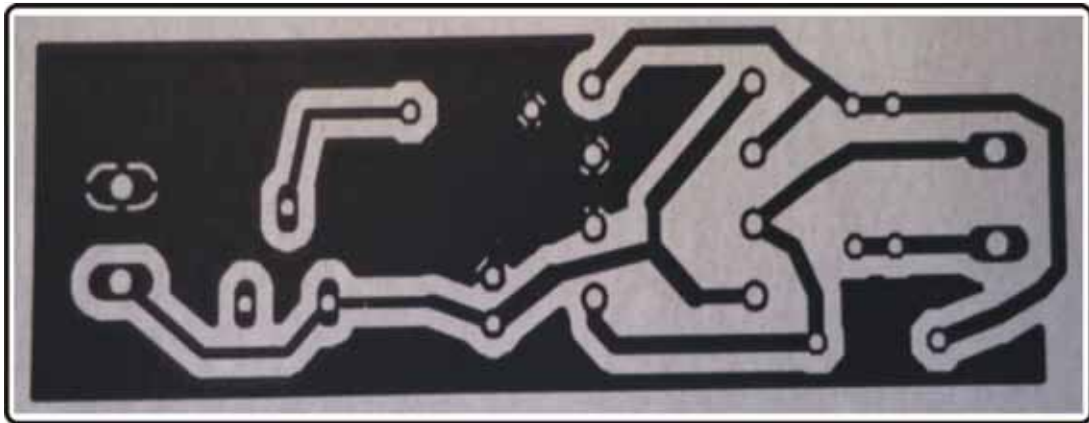


Figura 38: Imagem para corrosão da placa de conversão da voltagem.

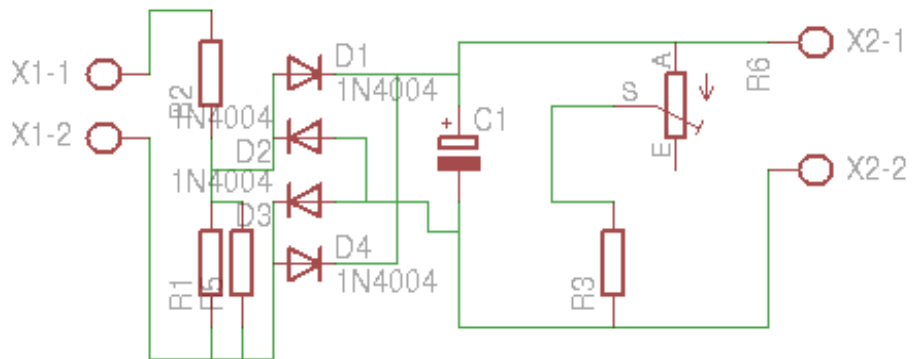


Figura 39: Circuito eletrônico da placa de conversão da voltagem.



Figura 40: Parte inferior da placa de condicionamento da voltagem.

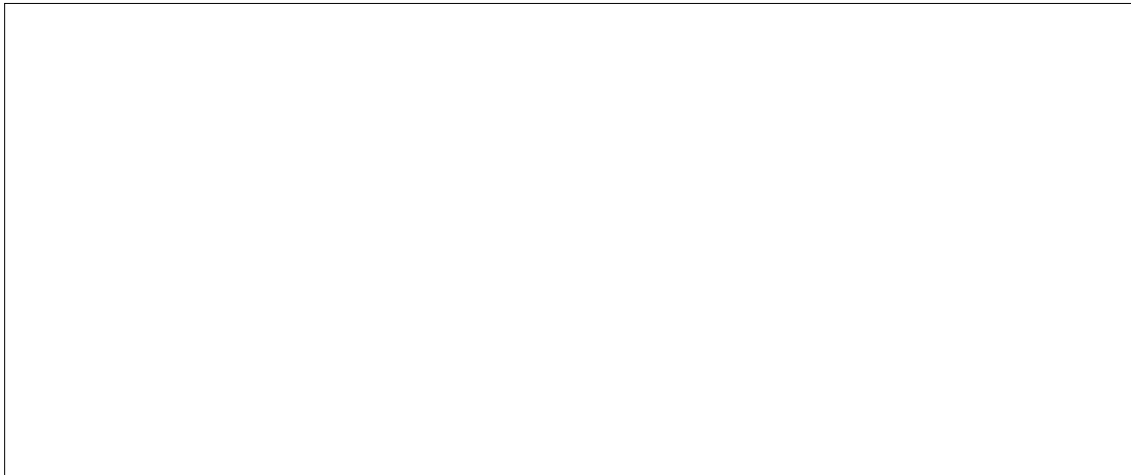


Figura 41: Placa conversão da voltagem, contendo os componentes eletrônicos.

Como cada placa possui componentes variáveis, foi levantada a curva de calibração para a relação entre o sinal de entrada, de alta voltagem medido por um multímetro, e o sinal de saída, de baixa voltagem monitorando pelo Arduino. Com base nestes valores, foram estabelecidos gráficos e equações de interpolação para cada uma das placas. No Anexo D estão apresentados os gráficos utilizados para este fim.

Durante a operação foi verificada a impossibilidade de conectar simultaneamente o sinal de tensão de todas as placas que levou, inclusive, a um superaquecimento e posterior inutilização da placa de aquisição. Uma justificativa encontrada foi que, pelo fato do controle de potência ser diferente em cada uma da resistência em função do tempo, induzia-se o surgimento de uma tensão “parasita” entre as placas no polo negativo (*ground*).

Para resolver esta questão foi construído um circuito eletrônico chaveador, Figuras 42 à 44, para fazer o isolamento elétrico através de dois relés, no momento de cada leitura. Com este circuito, somente o relés referente ao canal que será monitorado no instante é conectado à placa. Após o registro da informação este relé do respectivo canal é desligado. Toda esta sequência de conexões e controle dos relés é realizada por um sistema eletrônico independente e controlada por outra placa Arduino, cuja a programação utilizada pode ser visualizada no Anexo E.

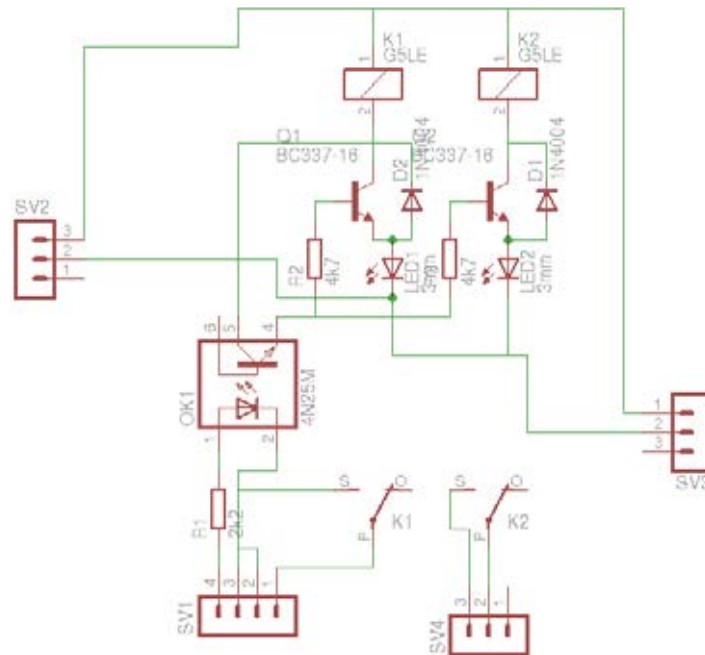


Figura 42: Circuito eletrônico da placa chaveadora.

Com estes dados e conhecendo-se o valor de cada resistência utilizada é possível calcular a energia fornecida num determinado intervalo de tempo. Segue no Anexo F os valores de cada resistência fixada na placa (em torno de 140Ω cada).

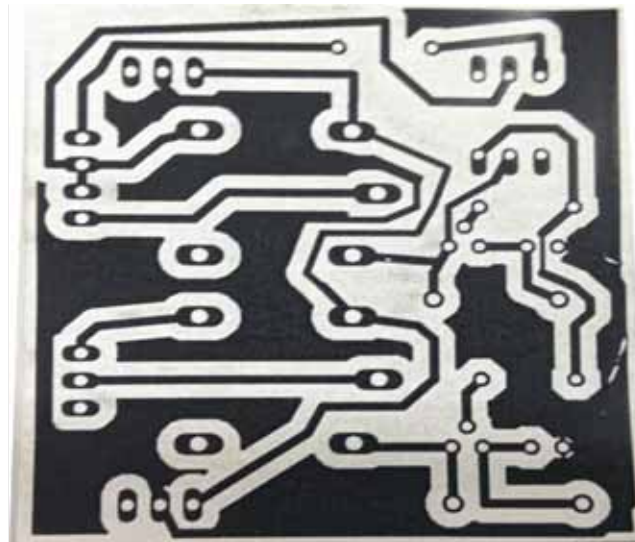


Figura 43: Imagem das trilhas da placa chaveadora.

A Figura 45 mostra o painel de controle com todas as placas de controle de temperatura, placas de monitoração da voltagem, placas chaveadoras e os Arduínos utilizados na monitoração.

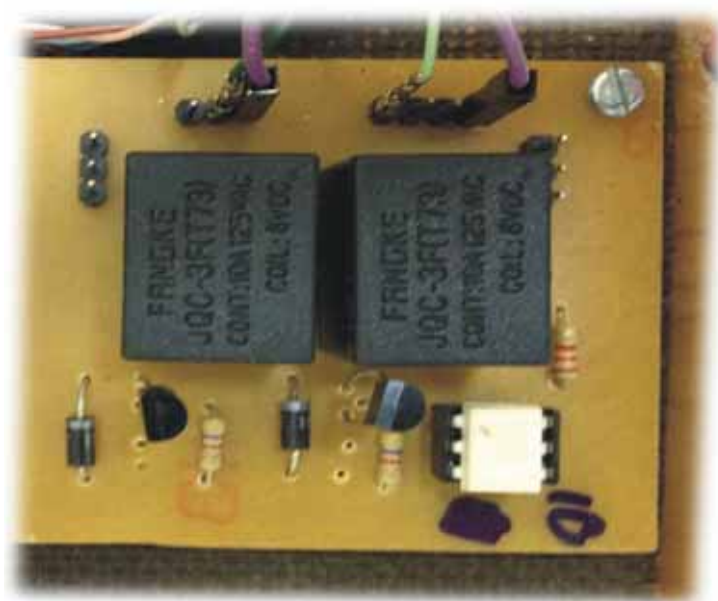


Figura 44: Placa chaveadora.

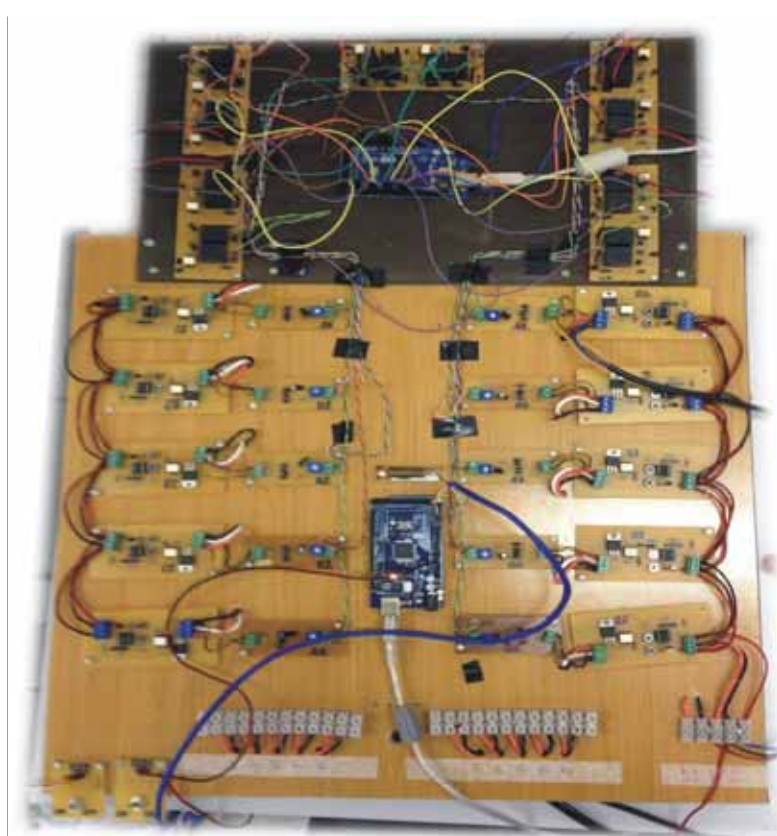


Figura 45: Painel de controle.

3.2- Procedimento de tomada de medidas.

Os ensaios foram realizados com a temperatura da placa mantida em torno de 100°C, temperatura usual de superfície em coletores de placa planas. No estudo variava-se ainda a quantidade de cavidades entre uma à cinco, equivalente a nenhuma barreira à quatro barreiras respectivamente, conforme mostrado na Figura 46. Os testes foram feitos ainda para diferentes inclinações, de 0°, 30°, 45° e 60°, conforme Figura 47. Este conjunto de variações resultou num total de 20 experimentos ($5 \times 4 = 20$).

Para evitar a necessidade de se medir a inclinação a cada experimento foram fixadas madeiras com grampo (sargentos) numa mesa em posições determinadas. Estas madeiras eram utilizadas para apoiar o protótipo e o ajuste da inclinação foi realizado com uma impressão dos ângulos definidos, conforme Figura 47 e 48.

Desconsiderando o intervalo de tempo inicial para atingir o regime permanente e garantindo uma uniformidade das condições ambientes (temperatura ambiente, velocidade do vento, etc), os dados foram coletados num intervalo de 30 minutos para cada experimento.



Figura 46: Visualização das cavidades.



Figura 47: Visualização dos apoios.

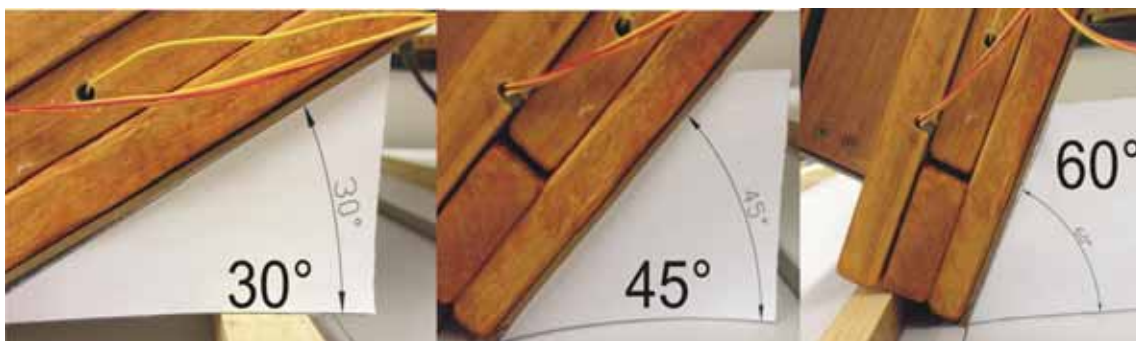


Figura 48: Visualização das verificações dos ângulos de inclinação.

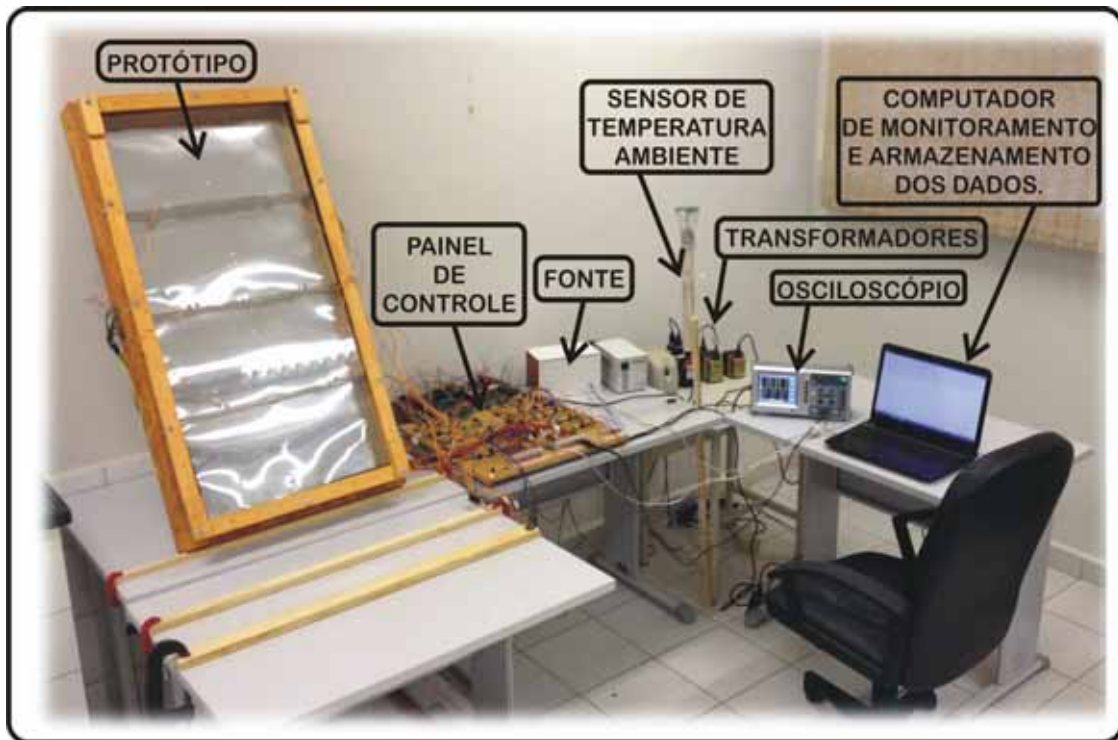


Figura 49: Vista geral do experimento.

Os dados foram registrados após o tempo de 30 minutos dos próprios terminais ligados a cada Arduino Mega, como destacado anteriormente, e transferidos para planilhas eletrônicas onde foram processados. Como apresentado anteriormente, um dos Arduínos é responsável pelo monitoramento das 10 temperaturas da placa de alumínio e das 6 temperaturas do vidro. No outro Arduino, o sinal das 10 voltagens dissipadas nas resistências e a temperatura ambiente são adquiridos. A Figura 49 mostrada uma visualização geral do experimento.

3.3- Tratamento e cálculos dos balanços energéticos do sistema

Com o procedimento de aquisição de dados e sua transferência para uma planilha eletrônica, foi possível dar início ao tratamento dos dados. Os dados coletados dos sensores de temperatura e dos sinais das placas de monitoramento da voltagem, aplicada nas resistências apresentaram desvios de leitura em função de interferências e/ou oscilações na instrumentação. Por conta disto, para descartar os erros grosseiros na coleta de sinais fornecidos por sensores e circuitos eletrônicos é utilizado o método estatístico de Chauvenet, como detalhado por Taylor (1997).

A aplicação do método de Chauvenet propõe que sejam descartadas as medidas com desvios significativos. O valor e as condições de descarte dependem basicamente do tamanho da amostra n utilizada. O critério de descarte depende da curva de distribuição normal, dentro de um nível de confiança que é estabelecido pelo descarte de pontos localizados em ambas as caudas da distribuição. A probabilidade de estar localizada na cauda pode ser calculada pela equação (1) e está associada ao nível de confiança de 99%:

$$P(Z_l) = \frac{0,5}{(2 \cdot n)} \quad (1)$$

Para aplicação deste método, como em qualquer distribuição normal é necessário o cálculo da média e do desvio padrão, conforme equações (2) e (3), respectivamente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

Em seguida, calcula-se o desvio máximo aceitável, através da equação:

$$d_{max} = t_L \cdot \sigma_a \quad (4)$$

Onde o valor de t_L é obtido da função inversa da distribuição normal, tal função é obtida por uma função do Matlab:

$$t_L = F^{-1}(1 - P(Z_l)) \quad (5)$$

Feito isto, pode-se eliminar todos os pontos que estão fora do intervalo definido em torno da média pela expressão:

$$d_{max} - \bar{x} \leq \text{faixa aceitável} \leq d_{max} + \bar{x} \quad (6)$$

Depois de aplicado o método de Chauvenet e descartados os pontos, calcula-se uma nova média e o um novo desvio padrão que passam a ser os valores representativos dos experimentos e utilizados nos demais cálculos. Com este procedimento, e utilizando o novo número de amostras n , pode-se calcular as incertezas estatísticas das medidas através da expressão:

$$W_a = \pm t_s \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Onde t_s é função inversa da distribuição de Student que no caso foi utilizada para um nível de confiança de 99%.

Com este procedimento, obtém-se um valor da média das temperaturas e voltagem aplicada das resistências elétricas e suas respectivas incertezas:

$$T_n = (T_n) \pm W_m \quad (8)$$

$$V_n = (V_n) \pm W_{vn} \quad (9)$$

Como o objetivo do estudo está relacionado no comportamento térmico do volume de controle, é necessário obter um valor médio da temperatura do vidro, assim, com os cálculos das médias e a incerteza dos seis sensores do vidro, é necessário calcular a média destes sensores através da equação (2) e um valor quadrático médio das incertezas ou RMS (do inglês *root mean square*).

Para o cálculo da RMS das incertezas em grandezas derivadas, o procedimento é baseado na média e na incerteza de cada variável envolvida. Assim, numa função no formato $F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ a incerteza, segundo Taylor (1997), é definida pela equação:

$$W_f = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

Sendo W_f a incerteza resultante, X_1, X_2, \dots, X_n as variáveis da função e W_1, W_2, \dots, W_n as incertezas correspondentes das variáveis.

Sendo T_{v1} , T_{v2} , T_{v3} , T_{v4} , T_{v5} e T_{v6} os valores dos sensores de temperatura fixados no vidro e a média destes valores \bar{T}_v e o valor RMS das incertezas das temperaturas do vidro, podem ser calculados através das equações:

$$\bar{T}_v = \frac{T_{v1} + T_{v2} + T_{v3} + T_{v4} + T_{v5} + T_{v6}}{6} \quad (11)$$

$$W_v = \left[\left(\frac{\partial(\bar{T}_v)}{\partial T_{v1}} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial(\bar{T}_v)}{\partial T_{v2}} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial(\bar{T}_v)}{\partial T_{v6}} w_6 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Que pode ser simplificada na forma:

$$W_v = \frac{[(w_{Tv1})^2 + (w_{Tv2})^2 + (w_{Tv3})^2 + (w_{Tv4})^2 + (w_{Tv5})^2 + (w_{Tv6})^2]^{\frac{1}{2}}}{6} \quad (13)$$

Sendo a temperatura do vidro dada por $T_v = (T_v) \pm W_v$.

Para avaliação das incertezas da medida da seção de teste foi necessário a determinação do procedimento de medida. A seção de testes foi medida com uma trena, obtendo 0,52 m de largura por 1,05 m de comprimento. No caso, a menor medida possível é de 0,001 m e a incerteza de medida foi adotada como sendo 0,0005 m, a metade do menor valor medido pela trena.

Para o cálculo do coeficiente de convecção natural na cavidade entre a placa e o vidro foi calculado o seu valor em cada região das dez resistências, para depois calcular uma média. Desta forma, a área utilizada na determinação de cada coeficiente de convecção natural pode ser calculada através da expressão:

$$\bar{A} = (\text{Comprimento} \cdot \text{Largura}) / 10 \quad (14)$$

Sendo que, no caso, $\bar{A} = 0,0546 \text{ m}^2$ e a incerteza:

$$W_a = \left[\left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial \text{Comprimento}} 0,0005 \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial \text{Largura}} 0,0005 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Que para o caso pode ser calculada na forma:

$$W_a = \frac{[(\text{Largura} * 0,0005)^2 + (\text{Comprimento} * 0,0005)^2]^{\frac{1}{2}}}{10}$$

Resultando em $W_a = 5.85e-04$. Por conta disto, a área de convecção de cada caso é

dada por $A = \bar{A} \pm W_a = 0,0546 \pm 0,0006$ m.

As medidas das resistências elétricas montadas na placa foram realizadas através de um multímetro da marca Minipa, modelo ET-2053 DMM. Este instrumento possui precisão de $0,1 \Omega$ e, assim, a incerteza da medida corresponde a metade deste valor: $W_r = 0,05 \Omega$. Os valores medidos (\bar{R}_n) e as respectivas incertezas (W_r) podem ser vistos no Anexo F.

Considerando a Lei de Resfriamento de Newton:

$$\bar{q}_n = \bar{h}_n \bar{A} (\bar{T}_n - \bar{T}_v) \quad (16)$$

E pode-se calcular o coeficiente de convecção natural a partir da taxa de calor dissipado:

$$\bar{h}_n = \frac{\bar{q}_n}{\bar{A} (\bar{T}_n - \bar{T}_v)} \quad (17)$$

A taxa de transferência de calor pode ser calculada com base na potência elétrica dissipada por efeito Joule em cada resistência a partir da voltagem média em cada secção:

$$\bar{q}_n = Pot_n = \frac{\bar{V}_n^2}{\bar{R}_n} \quad (18)$$

Com isso é possível calcular o coeficiente de convecção natural experimental em cada uma das regiões de cada resistência (\bar{h}_n) através da equação.

$$\bar{h}_n = \frac{1}{\bar{A} (\bar{T}_n - \bar{T}_v)} \frac{\bar{V}_n^2}{\bar{R}_n} \quad (19)$$

A incerteza resultante neste cálculo do coeficiente de convecção natural pode ser obtido de forma análoga às anteriores:

$$Wh_n = \left[\left(\frac{\partial \bar{h}_n}{\partial V_n} w_{V_n} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{h}_n}{\partial A} w_A \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{h}_n}{\partial T_n} w_{T_n} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{h}_n}{\partial T_v} w_{T_v} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{h}_n}{\partial R_n} w_{R_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Onde as derivadas são dadas por:

$$\frac{(\partial \bar{h}_n)}{(\partial V_n)} = \frac{(2V)}{(\bar{A} \cdot \bar{R} \cdot (\bar{T}_n - \bar{T}_v))} \quad (21)$$

$$\frac{(\partial \bar{h}_n)}{(\partial A)} = \frac{-V^2}{(\bar{A}^2 \cdot \bar{R} \cdot (\bar{T}_n - \bar{T}_v))} \quad (22)$$

$$\frac{(\partial \bar{h}_n)}{(\partial T_n)} = \frac{-V^2}{(\bar{A} \cdot \bar{R} \cdot (\bar{T}_n - \bar{T}_v)^2)} \quad (23)$$

$$\frac{(\partial \bar{h}_n)}{(\partial T_v)} = \frac{V^2}{(\bar{A} \cdot \bar{R} \cdot (\bar{T}_n - \bar{T}_v)^2)} \quad (24)$$

$$\frac{(\partial \bar{h}_n)}{(\partial R_n)} = \frac{-V^2}{(\bar{A}^2 \cdot \bar{R} \cdot (\bar{T}_n - \bar{T}_v))} \quad (25)$$

E com os quais é possível obter o valor e a incerteza $h_n = \bar{h}_n \pm Wh_n$ para as dez regiões de teste.

O coeficiente de transferência médio de todo o volume de controle estudado, considerando que todas as áreas são iguais é dado por:

$$\bar{h}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{h}_i}{10} \quad (26)$$

E a incerteza resultante é calculada através da equação:

$$Wh_n = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Wh_i)^2}}{n} \quad (27)$$

Que possibilita a comparação do coeficiente de convecção nos diversos experimentos.

3.4- Avaliação empírica do coeficiente de convecção.

Uma metodologia empírica para o cálculo do coeficiente de convecção em espaços confinados de cavidades retangulares foi proposta por Hollands e pode ser encontrada em diversas referências como Incropera 1998 e Duffie e Beckman 1980. Esta expressão pode ser utilizada na comparação com os resultados obtidos:

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - 1708 \frac{[\text{sen}(1,8\theta)]^{1,6}}{(Ra \cos\theta)} \right] \left[1 - \frac{1708}{(Ra \cos\theta)} \right]^{\frac{1}{4}} + \left[\frac{(Ra \cos\theta)}{5830} - 1 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (28)$$

Que pode ser aplicada para $H/L \leq 12$, sendo H a altura da cavidade e L a distância entre a placa de alumínio e o vidro. A notação $[\]^{\frac{1}{4}}$ implica que, se a grandeza entre colchetes for negativa, seu valor deve ser tomado igual a zero.

No caso do ensaio realizado, a comparação com esta expressão só pode ser aplicada para os experimentos sem barreira (uma cavidade) e com uma barreira (duas cavidades), uma vez

que para os outros casos, a restrição $H/L \leq 12$ não é obedecida.

O número de Rayleigh, utilizado na expressão, é calculado por:

$$Ra = \frac{(g \beta Pr)}{\nu^2} (T_p - T_v) L^3 \quad (29)$$

Sendo que os valores das propriedades físicas foram retirados de tabela para o ar, com base na temperatura média \bar{T} :

$$\bar{T} = \frac{(T_p + T_v)}{2} \quad (30)$$

Exceto pelo valor do coeficiente de expansão térmica, que para gases pode ser aproximado por:

$$\beta = \frac{1}{\bar{T}} \quad (31)$$

Onde \bar{T} deve ser utilizada numa escala absoluta [K].

O cálculo do coeficiente de convecção natural em cada caso depende do conhecimento da definição do número de Nusselt:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{K} \text{ ou } h = \frac{K}{L} \cdot Nu \quad (32)$$

Onde o valor de Nu é calculado com base na equação (28).

O código de programação escrito na plataforma MatLab (2009) está apresentado no Anexo G e foi desenvolvido para agilizar e padronizar os resultados. A programação importa os dados de arquivos salvos em cada experimento no formato *xlsx* da planilha.

3.5- Avaliação numérica do coeficiente de convecção.

A análise numérica foi simulada pelo software OpenFOAM® (Open Field Operation And Manipulation) que, em português, significa “Operação e manipulação em ambiente aberto” (software livre), que permite o desenvolvimento e adaptação de solucionadores (solvers) numéricos e utilidades na área da mecânica de meios contínuos, o que engloba especialmente a área da Fluidodinâmica Computacional, mais conhecida em inglês pela sigla CFD.

OpenFOAM® é constituído por uma série de ferramentas para modelação, pré/pós-processamento e visualização de dados. Permite a resolução de problemas de hidráulica envolvendo interação de fluidos com superfícies, escoamentos turbulentos, fluidos incompressíveis, modelos de transporte, entre outros. Disponível para o sistema operacional Linux, utilizando a linguagem de programação C++.

É utilizado para criar executáveis, conhecidos como programas. Esses programas são divididos em duas categorias: solvers que são feitos para resolver problemas específicos da mecânica e utilities que são feitos para realizar manipulação dos dados. Detalhes e princípios de funcionamento do código podem ser encontrados em OpenFoam, (2013).

Pelo fato de ser um código aberto, este software permite total personalização por parte do utilizador, que pode acrescentar novas funcionalidades, de acordo com as necessidades do trabalho em questão. O software é também modular, possuindo uma série de bibliotecas independentes, que podem ser incluídas em aplicações desenvolvidas pelo utilizador.

O OpenFOAM® não apresenta uma interface gráfica, portanto todo o desenvolvimento do projeto é realizado através da adição e modificação de arquivos em determinados diretórios. Nesses arquivos estão contidas informações sobre a forma geométrica, os dados numéricos, as propriedades físicas e os tipos de solver.

A pasta do software é criada após a sua instalação e lá estão os tutoriais fornecidos pelo programa. O usuário pode criar os diretórios de suas simulações dentro dessa pasta previamente criada ou criar a sua própria pasta.

Cada simulação deve conter seu próprio diretório e nele deverão, obrigatoriamente, estar contidas as seguintes pastas:

- Pasta “0”: contém os arquivos que determinarão os parâmetros da simulação como

tempo e condições de contorno.

- Pasta “constant”: contém os arquivos que determinam as propriedades físicas, a geometria da malha e as constantes necessárias.
- Pasta “system”: contém os arquivos que determinam o tipo de solução e quais equações o software deverá usar, bem como o método numérico. Neste diretório são encontrados três arquivos;
 - ◆ fvSchemes; onde são fornecidas informações sobre o esquema de interpolação de cada variável nas equações principais.
 - ◆ fvSolution; onde são informadas as técnicas de solução a serem aplicadas a cada uma das equações do problema e outras informações como a tolerância para finalizar o processo iterativo em cada caso.
 - ◆ ControlDict; onde são informados os parâmetros globais da solução como tempos inicial e final, formatos dos arquivos de saída, etc.
 - ◆ decomposeParDict, arquivo utilizado apenas se a solução for paralelizada, explicitando número de subdivisões da malha e algumas características de como isto é feito. Se não for utilizada a paralelização este arquivo não é necessário.

O usuário deve inserir os dados nas pastas correspondentes, escolher o tipo de solver que utilizará na sua simulação, para só então obter resultados após o processamento das equações. Por isso, o software necessita de conhecimento prévio do usuário das leis da física, dos métodos mecânicos e da linguagem de programação.

Por ser um software sem interface amigável com o usuário, todos os comandos da simulação são dados em linhas no terminal do Linux, após toda a introdução dos dados nas pastas, explanada anteriormente.

O primeiro comando deve ser o blockMesh, que é um comando de pré-processamento. O pré-processamento analisa e gera as malhas de acordo com as formas geométricas, dados físicos e propriedades determinadas do projeto. Depois da malha ser gerada, o próximo comando dado pelo usuário deve ser o solver. É ele que fará o real processamento da simulação utilizando todos os dados previamente determinados e tipos de modelagens matemáticas. A escolha do solver depende do problema e das análises que deverão ser feitas após o processamento e cada um é nomeado de acordo com a descrição do caso a ser

simulado.

Já o pós-processamento é realizado através de um outro software chamado ParaView através de uma ferramenta chamada ParaFoam. Nele é possível visualizar o comportamento dos dados apresentados, gráficos e tabelas. O ParaFoam fornece uma interface mais amigável para que o usuário obtenha uma melhor visualização dos resultados.

Após a simulação, aparece, no diretório da simulação, novas pastas nomeadas por números que representam os intervalos de tempo da simulação e dentro dessas pastas estão contidos os resultados parciais em cada tempo. Além disso, as outras três pastas iniciais são mantidas.

Para realizar a simulação do projeto foi necessário criar uma malha que representasse as cavidades, que simularam a geometria real do protótipo estudado.

Após a criação dessa malha inicial realiza-se um processo para empilhar as cavidades e criar uma malha representativa do protótipo com paredes que representam os isolamentos transparentes.

Esse procedimento foi feito para duas, três, quatro e cinco cavidades. Foi considerado que o protótipo tem um metro de comprimento, portanto cada cavidade tem comprimento proporcional ao número de cavidades. Após a criação das malhas, os resultados puderam ser obtidos e analisados e isso foi feito através do pós-processamento das malhas no ParaView.

De posse da malha, é necessário ajustar o modelo físico às condições esperadas para a solução do problema. Foram adotadas as seguintes hipóteses:

Escoamento em regime transiente, com o objetivo de se obter a resposta para a condição estacionária;

Utilização do solver Boussinesq, onde embora a massa específica do fluido seja tratada como constante, o seu coeficiente de expansão térmica é utilizado para determinar as forças de empuxo sobre o fluido;

Propriedades físicas do ar foram admitidas constantes na faixa considerada com $\nu=10^{-5}$ m²/s, $\beta=3,3 \times 10^{-3}$ 1/K e $Pr=0,7$.

Quanto ao regime do fluxo do ar em convecção natural foi adotado como laminar. Para verificação desta hipótese foi utilizado um caso turbulento, mas a energia turbulenta não foi significativa, portanto, todos os casos foram tratados como fluxo laminar.

O solucionador que melhor se adaptou às condições físicas foi buoyantBoussinesqPimpleFoam, o qual foi utilizado na solução do problema. Este solver utiliza um método chamado PIMPLE que é um acoplamento entre o método tradicional PISO e SIMPLE.

OpenFOAM® utiliza o método de volume finito com uma técnica de separação de equações para corrigir a pressão. Com base neste procedimento, as equações de Navier Stokes associados ao balanço energético que foram utilizadas para solução são apresentados nas Equações (33) à (37).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (33)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} - [(\rho - \rho_\infty) \cdot g]_x \quad (34)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} - [(\rho - \rho_\infty) \cdot g]_y \quad (35)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} - [(\rho - \rho_\infty) \cdot g]_z \quad (36)$$

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (37)$$

Os métodos de abordagem de cada termo das equações pode ser estabelecida de forma independente.

Neste caso, todas as magnitudes avaliadas foram discretizadas com um esquema *upwind* e usando diferenças centrais quando se trata de termos difusivos ou Laplaciano.

Na solução matricial foi utilizada o esquema conjugado de gradientes com uma tolerância de 10^{-8} para a pressão. O mesmo método foi usado para a pressão, mas adaptado para uma tolerância de 10^{-6} .

A malha utilizada foi ortogonal e não foi utilizado qualquer correção para compensar os desvios.

As condições de contorno foram estabelecidas de forma agrupada.

A Figura 1 apresenta, ao lado do esquema de montagem do bloco, a posição de cada uma das superfícies.

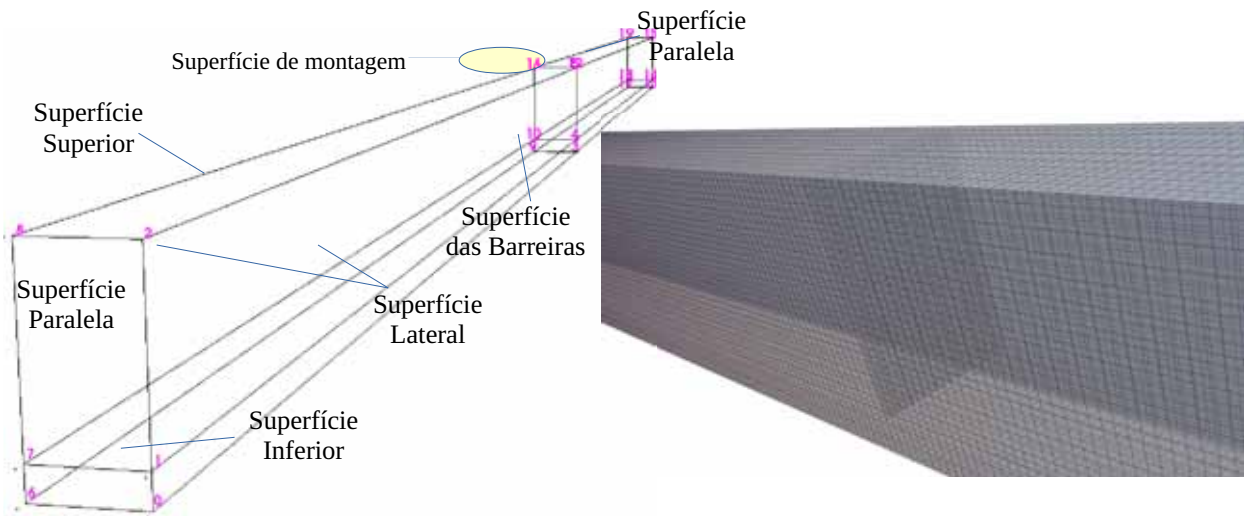


Figura 1: Blocos para montagem da malha e detalhes da região das barreiras.

Assim, de acordo com a natureza do problema, as paredes foram modeladas com as condições mostradas a seguir.

$$\begin{aligned}
 \text{– Velocidade:} & \left\{ \begin{array}{l} \text{Superfície Lateral: } \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0 \text{ (simetria)} \\ \text{Outras Superfícies: } u = v = w = 0 \end{array} \right. \\
 \text{– Temperatura:} & \left\{ \begin{array}{l} \text{Superfície da Barreira, Lateral e Paralela: } \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0 \text{ (adiabática)} \\ \text{Superfície Superior: Temperatura média do vidro} \\ \text{Superfície Inferior: Temperatura média da placa} \end{array} \right. \quad (38) \\
 \text{– Pressão:} & \text{Distribuição Estática}
 \end{aligned}$$

Usando OpenFOAM®, ao definir as superfícies e seus nomes, utilizou as mesmas condições nas superfícies que têm congruências.

O grupo foi formado usando os números de nós que se uniram para compor a superfície.

A ligação foi feita, representando as condições de contorno da Equação (38) expresso de uma forma apresentada na Tabela 1, com a linguagem do Open FOAM.

Tabela 1: Condição de contorno usado na simulação numérica.

Superfícies	Tipo	Velocidade	Temperatura	Pressão (p_rgh)
Barreira e Lateral	wall	Type fixedValue; value uniform (0 0 0);	type zeroGradient;	Type BuoyantPressure; gradient uniform 0; rho rhok; value uniform 0
Superior	wall		type fixedValue; value uniform 300	
Base	wall		type fixedValue; value uniform 373	
Lateral	empty	empty		

Com as condições de contorno definidas, foi necessário definir a condição inicial no diretório “0”.

Para este caso foram inicializadas as variáveis T, U , p , p_rgh e kappat, que representam temperatura, pressão, pressão - pgh e difusividade turbulenta.

Para este código, a difusividade turbulenta deve ser definida mesmo quando não for necessária usar o modo turbulento. Nestas simulações, a difusibilidade turbulenta não foi alterada.

Outras considerações foram utilizadas através dos dados obtidos nos experimentos, tais como; inclinação do protótipo, temperatura da placa, temperatura do vidro.

Com isso foi possível calcular o coeficiente de convecção numérico e visualizar o comportamento térmico do volume de controle estudado.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os valores obtidos experimentalmente e comparados, quando possível, com resultados empíricos e com os obtidos a partir da simulação numérica. Os testes foram realizados no protótipo descrito anteriormente, com controle de potência definido para a temperatura de referência no valor de 100°C.

Para cada experimento foram coletados dados por cerca de 30 minutos. As medidas dos sensores de temperatura e de monitoramento da voltagem aplicada em cada resistência foram tomados em intervalos de 40 segundos. Os valores foram obtidos após o intervalo de tempo necessário para que as temperaturas e as voltagens aplicadas nas resistências estivessem num regime uniforme e após a coleta dos dados foram analisados estatisticamente.

Este tratamento consistiu, primeiramente, no cálculo das médias e desvios padrão na aplicação do Critério de Chauvenet, para descartar pontos fora da tolerância. Os resultados apresentados nos Gráficos e Tabelas representam as médias sem considerar os pontos descartados pelo critério. Os valores das médias dos dados experimentais são utilizados no cálculo do coeficiente de convecção natural.

Os resultados obtidos a partir da expressão empírica de Hollands, somente podem ser aplicados nas condições experimentais verificadas nos casos de uma e duas cavidades. Esta limitação, se deve ao fato de que a aplicação desta expressão esta limitada à condição $H/L \leq 12$, como já descrito na metodologia. No caso da altura utilizada $L=4$ cm, o valor mínimo seria $H=48$ cm, sendo atendido apenas os casos mencionados anteriormente.

A simulação numérica foi realizada no software OpenFOAM para todas as inclinações contendo uma e três cavidades e para todas as quantidades de cavidades com a inclinação de 30 graus. Nos cálculos dos resultados empírico e na simulação numérica foram utilizados os mesmos valores das dimensões do projeto, bem como as médias das temperaturas e das voltagens aplicadas nas resistências.

As Tabelas 2 à 5 contém as principais médias do estudo. Cada Tabela se refere a uma

inclinação submetida nos experimentos 0° , 30° , 45° e 60° respectivamente.

Tais Tabelas mostram valores das médias e erros padrão determinados após a aplicação do critério de Chauvenet, para eliminação dos pontos fora do critério estatístico estabelecido. Cabe destacar ainda com relação aos valores apresentados nas Tabelas de todos os ensaios:

- A temperatura média da placa está vinculada aos dados coletados pelos 10 sensores fixados na mesma. Foi utilizada uma placa de espessura fina e alta condutividade térmica que garantiu uma boa uniformidade de temperatura nos experimentos.
- A temperatura média do vidro é calculada a partir dos valores obtidos em 6 sensores fixados ao mesmo.
- A temperatura ambiente média durante cada experimento foi obtida por um sensor montado num dispositivo, como descrito na Metodologia.
- A potência total foi obtida da somatória das médias de potência elétricas dissipadas em cada resistência. Isto se faz necessário, pois cada resistência elétrica fixada na placa de alumínio tem valores distintos de resistência elétrica e voltagem média aplicada.
- Com base nos valores de cada seção é calculado um coeficiente de transferência de calor por convecção médio experimental de cada região.
- Coeficiente de convecção médio experimental, considerando todo o volume de controle estudado.
- Coeficiente de convecção médio empírico calculado nas cavidades que atendem as restrições da expressão empírica de Hollands.

Os valores experimentais ainda apresentam as incertezas com base numa determinação do erro padrão num nível de confiança de 99% ou por sua propagação nos cálculos realizados de acordo com os procedimentos apresentados.

Pela complexidade da expressão empírica de Hollands, apesar de serem utilizadas as temperaturas experimentais, não foi realizado o cálculo da propagação de incertezas. No caso dos resultados numéricos também foram utilizadas as temperaturas experimentais, mas o cálculo da propagação de incertezas neste caso não é possível.

4.1- Resultados para posição horizontal (0°).

A Tabela 2 mostra os valores experimentais do comportamento dos coeficientes de convecções médios ao adicionarmos as barreiras de convecção e, com isso, aumentar o número de cavidades. Os resultados mostrados são para a posição horizontal e nota-se, que os valores experimentais apresentados estão muito próximos dos resultados empíricos e numéricos, quando disponíveis, com desvios menores que 21%.

Tabela 2: Resultados sem inclinação com a horizontal (0°).

Qtd. De Cavidade	1	2	3	4	5
Temperatura Média da placa (°C)	100,94 ± 0,11	100,87 ± 0,11	100,93 ± 0,12	101,16 ± 0,10	101,12 ± 0,10
Temperatura Média do Vidro (°C)	42,875 ± 0,09	34,79 ± 0,09	35,66 ± 0,03	34,39 ± 0,04	36,39 ± 0,03
Temperatura Média do Ambiente (°C)	25,709 ± 0,24	26,06 ± 0,26	25,75 ± 0,19	26,45 ± 0,28	25,86 ± 0,21
Somatório da Média da Potência Dissipada	86,114 ± 5,94	96,16 ± 5,26	91,20 ± 6,12	86,26 ± 5,50	88,36 ± 5,54
H Experimental	2,7157 ± 0,19	2,6681 ± 0,15	2,5592 ± 0,17	2,367 ± 0,15	2,5001 ± 0,16
H Empírico	2,955	3,043	-	-	-
Desvio Empírico	8,80%	14,06%	-	-	-
H Numérico	3,261	-	2,450	-	-
Desvio Numérico	20,07%	-	4,27%	-	-

O comportamento do coeficiente de convecção natural médio experimental do protótipo de acordo com o número cavidades para a posição horizontal está mostrado na Figura 50. Embora não se observe variações acentuadas nesta Figura, verifica-se uma redução gradual do coeficiente de convecção desde a condição sem barreiras até a condição de três barreiras (quatro cavidades). Quando o protótipo está com cinco cavidades nota-se um leve aumento do coeficiente de convecção natural.

Conforme ilustrado na Tabela 2, a Figura 50 apresentam os valores experimentais com os valores das incertezas verificadas. Resultados numéricos e empírico disponíveis também são apresentados, sendo possível comparar os resultados obtidos.

Analisando a relação entre o menor coeficiente de convecção registrado no experimento com quatro cavidades e à observada no protótipo sem nenhuma barreira, observou-se uma

redução de 2,71 W/m²K para 2,36 W/m²K. Esta redução implica numa variação de 12,9%.

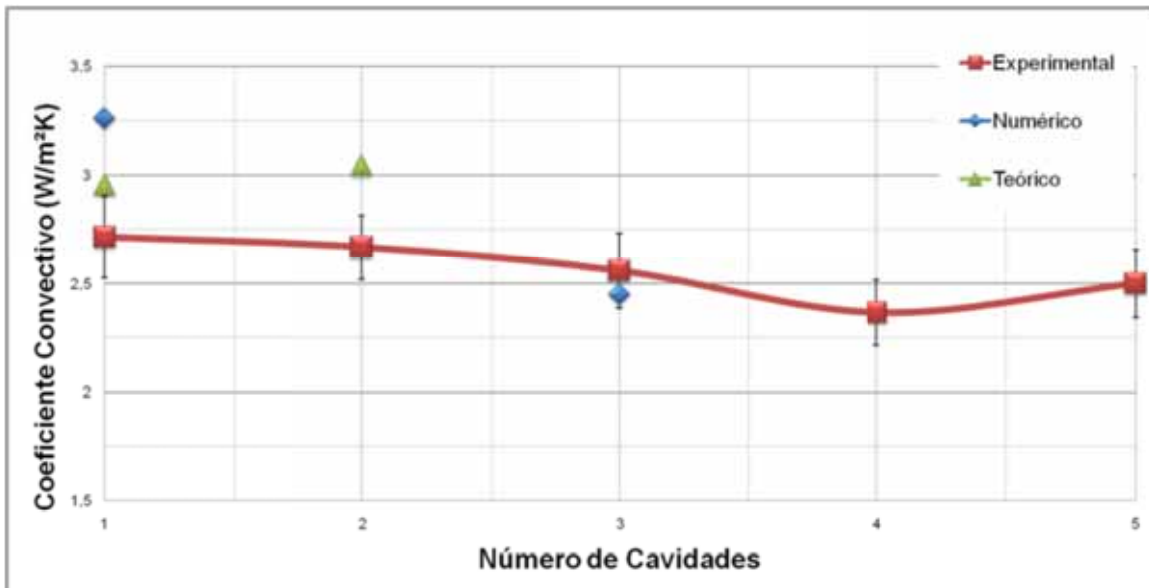


Figura 50: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 0° de inclinação.

4.2- Resultados para 30 graus de inclinação.

A Tabela 3 tem o mesmo enfoque da Tabela 2, porém os resultados mostrados são para a inclinação de 30° e nota-se, que os valores experimentais para duas cavidades apresentados estão muito próximos dos resultados empíricos e numéricos com desvio a baixo de 19%, entretanto, os outros resultados tiveram uma divergência, com desvio entorno de 20% à 30%.

Tabela 3: Resultados para 30° de inclinação.

Qtd. De Cavidade	1	2	3	4	5
Temperatura Média da placa (°C)	101,01 ± 0,10	101,22 ± 0,11	101,06 ± 0,10	101,17 ± 0,10	101,13 ± 0,09
Temperatura Média do Vidro (°C)	42,70 ± 0,06	36,20 ± 0,02	34,78 ± 0,02	35,54 ± 0,03	35,38 ± 0,01
Temperatura Média do Ambiente (°C)	25,64 ± 0,29	26,78 ± 0,21	26,07 ± 0,26	26,61 ± 0,32	26,02 ± 0,24
Somatório da Média da Potência Dissipada	84,62 ± 5,74	88,04 ± 5,18	91,01 ± 5,75	89,90 ± 5,27	90,38 ± 5,83
H Experimental	2,66 ± 0,18	2,48 ± 0,15	2,52 ± 0,16	2,51 ± 0,15	2,52 ± 0,16
H Empírico	1,959	2,012	-	-	-
Desvio Empírico	26,39%	18,99%	-	-	-
H Numérico	2,187	2,479	1,676	1,777	1,869
Desvio Numérico	17,83%	0,21%	33,41%	29,22%	25,90%

O comportamento do coeficiente de convecção natural médio experimental do protótipo de acordo com o número de cavidades para a inclinação de 30° está mostrado na Figura 51. Embora não se observe variações acentuadas nesta Figura, verifica-se uma redução do coeficiente de convecção na condição sem barreiras para a condição de uma barreira (duas cavidades), não apresentando uma variação do mesmo até a condição de quatro barreiras (cinco cavidades).

Conforme a Tabela 3, a Figura 51 apresentam os valores experimentais com os valores das incertezas verificadas. Resultados numéricos e empíricos disponíveis também são apresentados, sendo possível comparar os resultados obtidos.

Analisando a relação entre o menor coeficiente de convecção registrado no experimento com duas cavidades e à observada no protótipo sem nenhuma barreira, observou-se uma redução de 2,66 para 2,48. Esta redução implica numa variação de 6,8%.

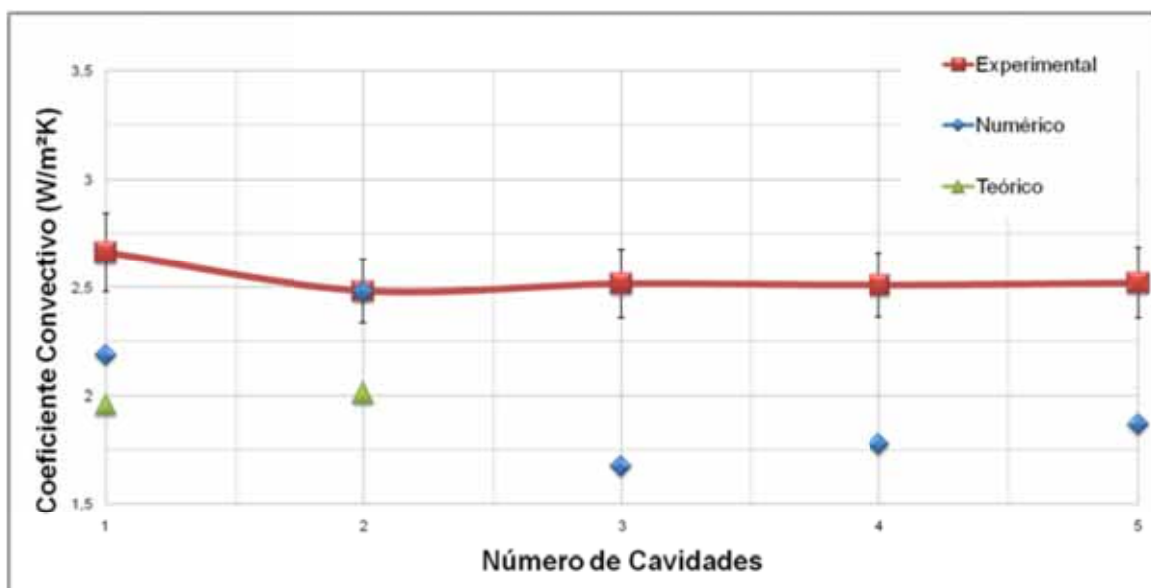


Figura 51: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 30° de inclinação.

4.3- Resultados para 45 graus de inclinação.

A Tabela 4 tem o mesmo enfoque das Tabelas 2 e 3, porém os resultados mostrados são para a inclinação de 45° e nota-se, que os valores experimentais apresentados estão muito próximos dos resultados empíricos e numéricos, quando disponíveis, com desvio menores que 11%.

Tabela 4: Resultados para 45° de inclinação.

Qtd. De Cavidade	1	2	3	4	5
Temperatura Média da placa (°C)	101,04 ± 0,11	101,16 ± 0,11	101,19 ± 0,09	101,19 ± 0,10	101,26 ± 0,09
Temperatura Média do Vidro (°C)	42,06 ± 0,07	35,74 ± 0,02	34,41 ± 0,03	35,94 ± 0,01	35,39 ± 0,01
Temperatura Média do Ambiente (°C)	25,63 ± 0,28	26,78 ± 0,27	26,04 ± 0,25	26,30 ± 0,24	25,85 ± 0,23
Somatório da Média da Potência Dissipada	84,92 ± 5,67	84,97 ± 4,96	87,13 ± 5,24	84,78 ± 4,98	88,31 ± 5,20
H Experimental	2,64 ± 0,18	2,38 ± 0,14	2,39 ± 0,14	2,38 ± 0,14	2,46 ± 0,15
H Empírico	2,574	2,633	-	-	-
Desvio Empírico	2,56%	10,47%	-	-	-
H Numérico	2,457	-	2,516	-	-
Desvio Numérico	6,97%	-	5,07%	-	-

O comportamento do coeficiente de convecção natural médio experimental do protótipo de acordo com o número cavidades para a inclinação de 45° está mostrado na Figura 52. Embora não se observe variações acentuadas nesta Figura, verifica-se uma redução do coeficiente de convecção na condição sem barreiras para a condição de uma barreira (duas cavidades), não apresentando uma variação do mesmo até a condição de três barreiras (quatro cavidades). Para o dispositivo com cinco cavidades, por sua vez, nota-se um leve aumento do coeficiente de convecção natural.

Da mesma maneira que na Tabela 4, a Figura 52 apresentam os valores experimentais com os valores das incertezas verificadas. Resultados numéricos e empíricos disponíveis também são apresentados, sendo possível comparar os resultados obtidos.

Analisando a relação entre o menor coeficiente convectivo registrado no experimento com duas e quatro cavidades em relação à observada no protótipo sem nenhuma barreira, observou-se uma redução de 2,64 para 2,38. Esta redução implica numa variação de 6,1%.

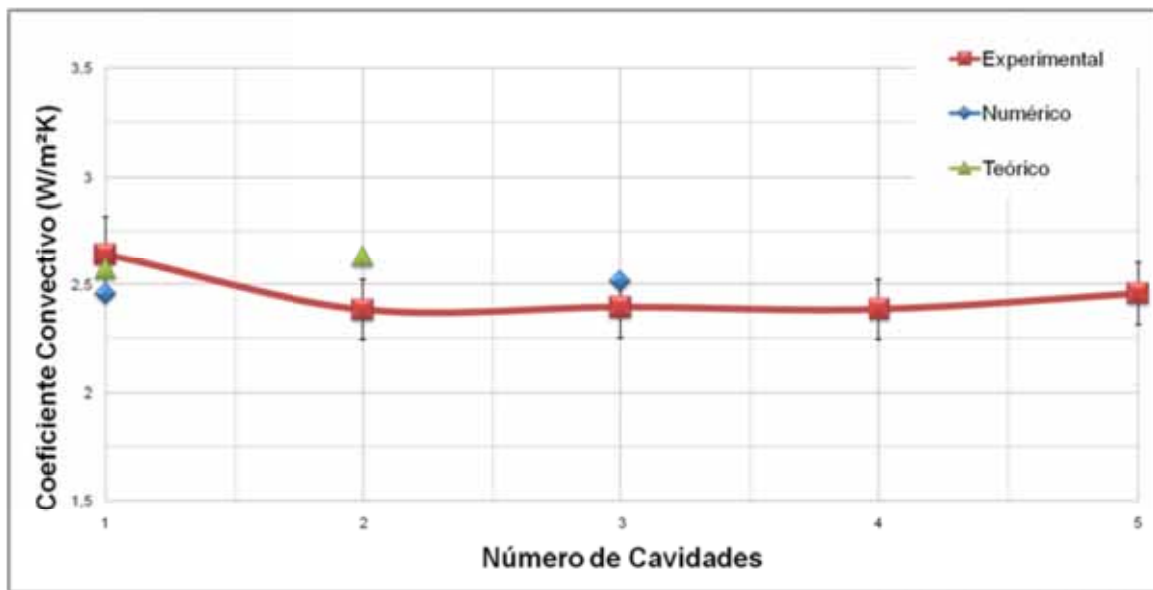


Figura 52: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 45° de inclinação.

4.4- Resultados para 60 graus de inclinação.

A Tabela 5 tem o mesmo enfoque das Tabelas 2 à 4, porém os resultados mostrados são para a inclinação de 60° e nota-se, que os valores experimentais apresentados estão muito próximos dos resultados empíricos e numéricos, quando disponíveis, com desvio menores que 22%.

Tabela 5: Resultados para 60° de inclinação.

Qtd. De Cavidade	1	2	3	4	5
Temperatura Média da placa (°C)	101,00 ± 0,11	101,33 ± 0,10	101,11 ± 0,08	101,36 ± 0,11	101,16 ± 0,10
Temperatura Média do Vidro (°C)	41,51 ± 0,10	35,28 ± 0,02	33,44 ± 0,09	35,84 ± 0,02	34,42 ± 0,16
Temperatura Média do Ambiente (°C)	25,47 ± 0,20	26,37 ± 0,32	25,97 ± 0,20	25,90 ± 0,25	26,10 ± 0,25
Somatório da Média da Potência Dissipada	84,81 ± 4,79	85,79 ± 4,08	87,14 ± 4,69	78,30 ± 4,52	96,10 ± 5,35
H Experimental	2,61 ± 0,15	2,38 ± 0,11	2,36 ± 0,13	2,19 ± 0,13	2,64 ± 0,15
H Empírico	2,046	2,072	-	-	-
Desvio Empírico	21,73%	13,03%	-	-	-
H Numérico	2,625	-	2,522	-	-
Desvio Numérico	0,41%	-	6,65%	-	-

O comportamento do coeficiente de convecção natural médio experimental do protótipo,

de acordo com o número cavidades para a inclinação de 60° , está mostrado na Figura 53. Embora não se observe variações acentuadas nesta Figura, verifica-se uma redução do coeficiente de convecção da condição sem barreira para a condição de uma barreira (duas cavidades), não apresentando uma variação desta para a condição de duas barreiras (três cavidades), apresentando uma redução significativamente desta para a condição de três barreiras (quatro cavidades) e um aumento desta para o dispositivo com quatro barreiras (cinco cavidades).

Da mesma maneira que na Tabela 5, a Figura 53 apresentam os valores experimentais com os valores das incertezas verificadas. Resultados numéricos e empíricos disponíveis também são apresentados, sendo possível comparar os resultados obtidos.

Analisando a relação entre o menor coeficiente de convecção registrado no experimento com quatro cavidades em relação à observada no protótipo sem nenhuma barreira, observou-se uma redução de 2,61 para 2,19. Esta redução implica numa variação de 16,1%.

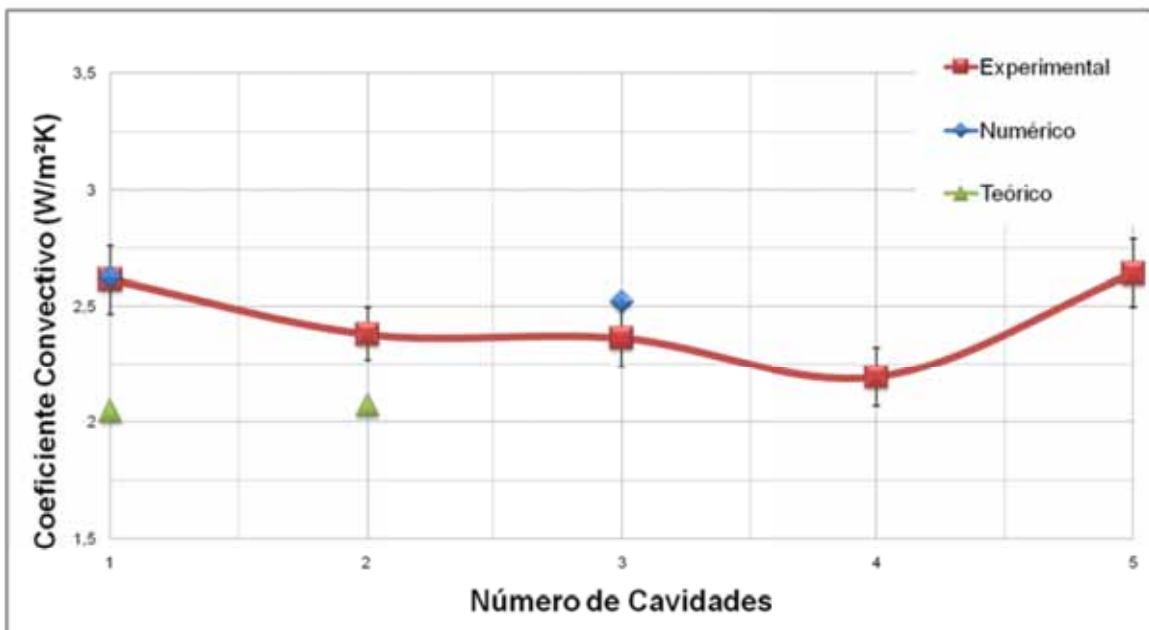


Figura 53: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades para 60° de inclinação.

As Tabelas 2 à 5, pode-se observar variações pouco significativas da temperatura na placa de alumínio. Esta condição permite a validação da hipótese de condição de contorno de temperatura uniforme utilizada para os modelos numéricos e empíricos. A temperatura ambiente, embora medida em todos os testes, foi muito próxima em todos os casos de $T_a=26^\circ C$. A temperatura do vidro, por sua vez, apresenta uma redução mais expressiva ao se incluir uma barreira. A partir desta modificação, a inclusão de um maior número de barreiras

não implicou em alterações significativas.

A Figura 54 mostra a também variação do coeficiente de convecção em função do número de cavidades, mas integrando todas as inclinações. Nestes casos, verifica-se que existe uma tendência em todos os casos do coeficiente de convecção apresentar um valor ótimo diferente, dependendo das inclinações. Para as condições de cavidades verificadas experimentalmente, a condição com quatro cavidades é a melhor para as inclinações de 0° a 60° . Entretanto, como já ressaltado, embora o comportamento do coeficiente de convecção natural tenha sido similar, o ponto ótimo apresenta divergências entre os resultados experimentais e numéricos.

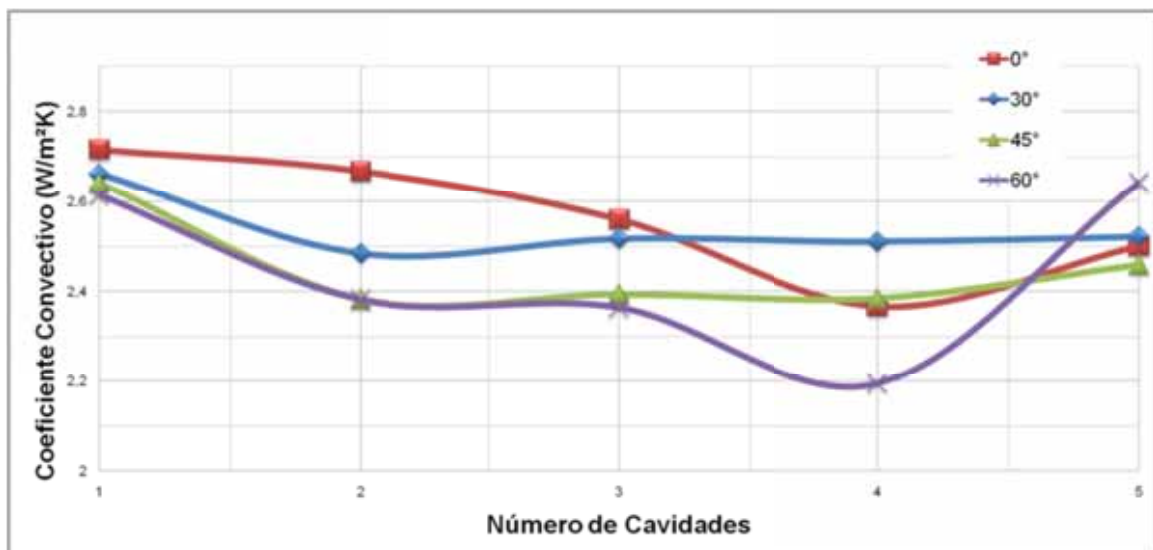


Figura 54: Variação do coeficiente de convecção ao variar o número de cavidades em todas as inclinações.

4.5- Variação da inclinação para um número de cavidades fixas.

A Figura 55 demonstra dados importantes dos resultados experimentais, sendo possível observar o comportamento do coeficiente de convecção com a variação da inclinação, possibilitando a comparação entre as quantidades de cavidades.

No experimento com uma cavidade, nota-se uma ligeira redução do coeficiente de convecção ao aumentar a inclinação da horizontal até o ângulo de 60° .

Nos experimentos com duas e três cavidades, notam-se uma redução ao aumentar a inclinação da horizontal até o ângulo de 45° e mantendo um valor aproximado deste para a inclinação de 60° .

No experimento com quatro cavidades, nota-se um aumento do coeficiente de convecção

ao aumentar a inclinação da horizontal até o ângulo de 30° e uma redução desta inclinação até o ângulo de 60° .

No experimento com cinco cavidades, nota-se que não houve variação do coeficiente de convecção ao aumentar a inclinação da horizontal até o ângulo de 30° , uma ligeira redução deste até o ângulo de 45° e um aumento desta inclinação até o ângulo de 60° .

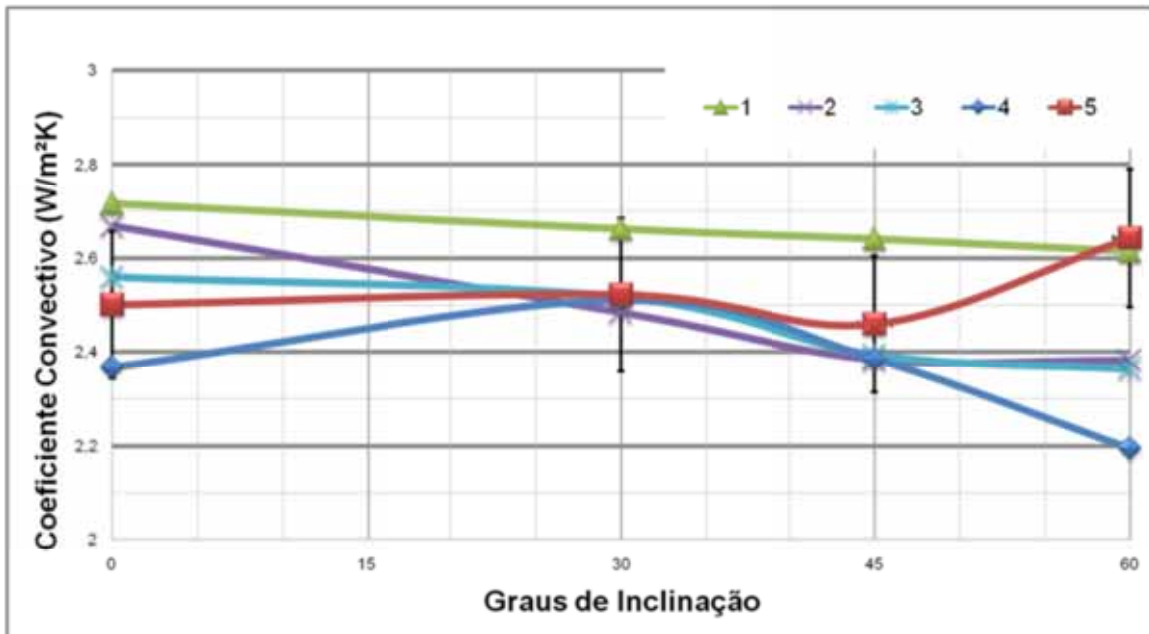


Figura 55: Variação do coeficiente de convecção, para todas cavidades, ao variar a inclinação.

A Figura 56 mostra a variação do coeficiente de convecção natural médio experimental, empírico e numérico ao variar a inclinação do protótipo com uma cavidade. Sendo possível a comparação os resultados, a qual observa-se uma boa aproximação dos mesmos.

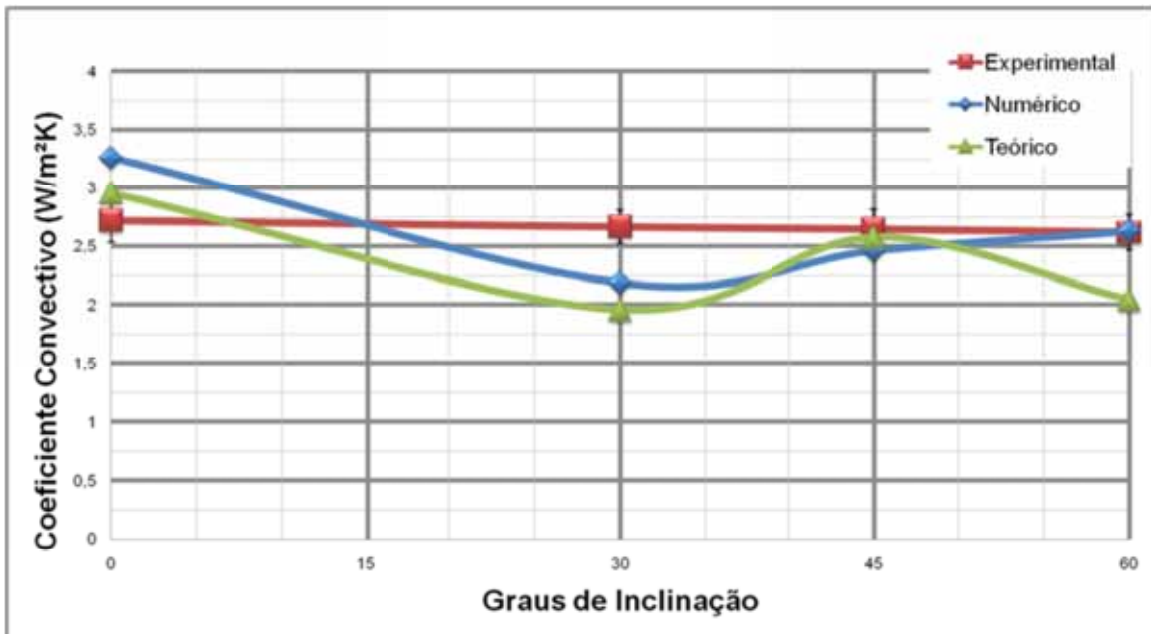


Figura 56: Variação do coeficiente de convecção através da variação da inclinação para uma cavidade.

5 - CONCLUSÃO

No presente trabalho foram apresentados os resultados experimentais num volume de controle com as mesmas características do interior de coletores solares planos para aquecimento de água, analisando e comparando o comportamento térmico ao adicionarmos barreiras no interior das cavidades para diminuir os espaços do confinamento de ar, bloqueando a circulação de ar.

Com os dados físicos dos comportamentos das barreiras de controle, tais como temperatura da placa, temperatura do vidro e potência dissipada nas resistências elétricas, foi possível calcular o coeficiente de convecção interno. Além do resultado experimental, foi calculado o coeficiente de convecção interno usando uma metodologia empírica proposta por Hollands e uma simulação numérica usando o software OpenFOAM®.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- Os resultados experimentais mostraram uma redução do coeficiente de convecção natural interno, comparando os resultados sem barreira (uma cavidade) com os resultados ao adicionar uma barreira (duas cavidades), independente da inclinação do protótipo;
- Os resultados experimentais com duas à quatro barreiras, em todos os testes, não tiveram uma considerada variação do coeficiente de convecção ao compararmos com os resultados de uma barreira, independente da inclinação do protótipo;
- Porém, em cada inclinação, nota-se um número de cavidades ideal, ou seja, apresentando o menor coeficiente de convecção, sendo que o comportamento do mesmo tende a reduzir a partir de uma cavidade e após chegar no seu ponto de mínimo, ou seja, o ponto ideal, tende a aumentar;
- A condição de quatro cavidades (três barreiras) foi a que se mostrou com o menor coeficiente de convecção para as condições e geometrias do protótipo estudado;

- Pode-se concluir que o uso de barreiras foi efetivo para o objetivo do estudo em diminuir o coeficiente de convecção, sendo mais ou menos expressivo dependendo da inclinação;
- Por análise, também, pode se afirmar que a perda de calor será maior quanto menor for a temperatura ambiente, mais expressivo será o uso de barreiras no interior de cavidades com o propósito de diminuir a perda de calor;
- Com o mesmo raciocínio, quanto maior for a temperatura de estagnação da placa de absorção, maior será a perda de calor, e conseqüentemente, mais expressivo será o uso de barreiras no interior de cavidades com o propósito de diminuir a perda de calor;
- Os resultados teóricos e numéricos se mostraram satisfatórios, visto que tiveram uma aproximação dos resultados experimentais, sendo fundamentais para a consolidação da metodologia aplicada.

O projeto se mostrou satisfatório para alcançar o objetivo do estudo, porém, algumas sugestões de melhorias futuras são:

- Aumentar o número de resistências, pois em alguns testes ocorreu a congruência entre as resistências e as barreiras, estando as resistências sobre as barreiras, no meio de uma região onde tem por um lado um baixo fluxo de calor e por outro alto fluxo de calor;
- Aumentar o número de sensores de temperatura da placa para poder melhorar ainda mais o comportamento da mesma;
- Melhorar a metodologia para facilitar os testes e conseqüentemente obter mais dados para análise;
- Melhorar o condicionamento de monitoramento da voltagem aplicada em cada resistência, diminuindo o intervalo de aquisição e o range de controle da voltagem aplicada, através do TRIAC;
- Embora os resultados realizados com o protótipo foram satisfatórios, uma análise do uso de barreiras em coletores solares seria importante para validar este trabalho, analisando a sua eficiência em condições de uso, ou seja, adicionando enfoque deste estudo numa pesquisa aplicada.

REFERÊNCIAS

Abou-Ziyan, H.Z. e Richards R.F., Effect of the gap thickness on a rectangular-cell compound-honeycomb solar collector, *Solar Energy*, v. 60, pp. 271-280, 1997.

Abou-Ziyan, H.Z. e Richards R.F., Effect of the gap thickness on a rectangular-cell compound-honeycomb solar collector, *Solar Energy*, v. 60, pp. 271-280, 1997.

Arulanantham, M. & Kaushika, N.D., Coupled radiative and conductive thermal transfers across transparent honeycomb insulation materials, *Applied Thermal Engineering*, v. 3, pp. 209-217, 1996.

Avanti, P., Arulanantham, M. & Kaushika, N., Solar thermal analysis of transparent-honeycomb-insulated ground collector-storage system, *Applied Thermal Engineering*, v. 16, pp. 863-874, 1996.

Buchberg, H. & Edwards, D., Design considerations for solar collectors with cylindrical glass honeycombs, *Solar Energy*, v. 18, pp. 193-203, 1976.

Cleveland, C. J., A., Costanza, R., Goldemberg, J., Ilic, M. D., Jochem, E., Kaufmann, R., Lovins, A., Munasinghe, M., Pardo, C. S., Peterson, P., Schipper, L., Slade, M. E., S., Worrell, E. & Pachauri, R.K., *History of Solar Energy*, Elsevier Science [Imprint] Elsevier Science & Technology Books, San Diego, , pp. 605-622, 2004.

Dowson, M., Pegg, I., Harrison, D. & Dehouche, Z., Predicted and in situ performance of a solar air collector incorporating a translucent granular aerogel cover, *Energy and Buildings*, v. 49, pp. 173-187, 2012.

Duffie, J.A.; Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 4^o Ed, p 928, 1980.

Ghoneim, A., Performance optimization of solar collector equipped with different arrangements of square-celled honeycomb, *International Journal of Thermal Sciences*, v. 44, pp. 95-105, 2005.

Hollands, K., Honeycomb devices in flat-plate solar collectors, *Solar Energy*, v. 9, pp. 159-164, 1965.

Hollands, K. & Iynkaran, K., Analytical model for the thermal conductance of compound honeycomb transparent insulation, with experimental validation, *Solar Energy*, v. 51, pp. 223-227, 1993.

Hollands, K. G. T., *Honeycomb devices in flat-plate solar collectors*, v.1, 1965.

- Hollands, K. G. T. e Lynjatan, K., Proposal for a compound-honeycomb collector, *Solar Energy*, v. 34, pp. 309-316, 1985.
- Hollands, K. G. T., Marshall, K. N., Wedel, R. K., , *Solar Energy*, v. 21, pp. 231-236, 1978.
- Horta, P., Henriques, J. & Collares-Pereira, M., Impact of different internal convection control strategies in a non-evacuated CPC collector performance, *Solar Energy*, v. 86, pp. 1232-1244, 2012.
- Incropera, F.P. ; Dewitt, D.P., *Fundamentos de Transfêrencia de Calor e de Massa*, LTC Editora, 6° Ed, p 1024, 1998.
- Kaushika, N. & Sharma, P., Transparent honeycomb insulated solar thermal systems for energy conservation, , v. 14, pp. 37-44, 1994.
- Kaushika, N. & Sumathy, K., Solar transparent insulation materials: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 7, pp. 317-351, 2003.
- Kaushika, N. D. e Priya, R. P., Solar transmittance of honeycomb and parallet slat arrays, *Energy Convers*, v. 32, pp. 345-351, 1991.
- Kaushika, N. D. e Reddy, K. S., Thermal design and field experiment of transparent honeycomb insulated integrated-collector-storage solar water heater, *Applied Thermal Engineering*, v. 19, pp. 145-161, 1999.
- Kaushika, N., Padmapriya, R., Arulanantham, M. & Sharma, P., Transparent insulation characteristics of honeycomb and slat arrays, *Energy*, v. 19, pp. 1037-1041, 1994.
- Kessentini, H., Capdevila Paramio, R., Lehmkuhl Barba, O., Castro González, J. & Oliva Llena, A., Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in a flat plate solar collector with TIM and ventilation channel, v. 1, 2012.
- Kuhn, T.E.; Bühler, C.; Platzer, W.J., Evaluation of overheating protection with sun-shading systems, *Solar Energy*, v. 69, pp. 59-74, 2001.
- Kumar, P. & Kaushika, N., Convective effects in air layers bound by cellular honeycomb arrays, *J. Sci. Ind. Res*, v. 64, pp. 602-612, 2005.
- Lior, N., *Thermal Theory and Modeling of Solar Collectors*, MIT Press, 1° Ed, p 182, 1990.
- Marcus, S. L., An Approximate method for calculating the heat flux through a solar collector honeycomb., *Solar Energy*, v. , pp. 127-131, 1983.
- OpenFoam, (2013): OpenFoam, User Guide, 2013, www.openfoam.org
- Platzer, W., Calculation procedure for collectors with a honeycomb cover of rectangular cross section, *Solar Energy*, v. 48, pp. 381-393, 1992.
- Rommel, M. e Wagner, A., Application of transparent insulation materials in improved flat-plate collectors and integrated collector storages., *Solar Energy*, v. 49, pp. 371-380, 1992.
- Simon, Frederick F, Flat plate solar collector performance evaluation with a solar simulator as

a basis for collector selection and performance prediction, *Solar Energy*, v. 18, pp. 451-466, 1976.

Steinfeld, A. & Schubnell, M., Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver, *Solar Energy*, v. 50, pp. 19-25, 1993.

Taylor e John R., *An Introduction to the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, University Science Books, U.S., 2° Ed, p 448, 1997.

Varun, Saini, R. & Singal, S., A review on roughness geometry used in solar air heaters, *Solar Energy*, v. 81, pp. 1340-1350, 2007.

Vestlund, J., Rönnelid, M. & Dalenbäck, J., Thermal performance of gas-filled flat plate solar collectors, *Solar Energy*, v. 83, pp. 896-904, 2009.

Weiss, W., Mauthner, F., International Energy Agency (IEA), *Solar Heat Worldwide*, 2013.

Wong, I., Eames, P. & Perera, R., A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications, *Solar Energy*, v. 81, pp. 1058-1071, 2007.

Anexo A - Programa usado no Arduino para controle de temperatura.

```

int pin = 0;
int tempc = 0,tempf=0;
int samples[8];
int maxi = -100,mini = 100;
int i;
const int analogInPin = A0;
const int analogOutPin = 9;
int AC_LOAD = 3;
int dimming = 20; // Dimming level (0-128) 0 = ON, 128 = OFF
void setup()
{
  pinMode(AC_LOAD, OUTPUT);
  attachInterrupt(0, zero_crosss_int, CHANGE);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(2,OUTPUT);
}
void zero_crosss_int()
{
  // Firing angle calculation :: 60Hz-> 8.33ms (1/2 Cycle)
  // (8333us - 8.33us) / 128 = 65 (Approx)
  int dimtime = (60*dimming);
  delayMicroseconds(dimtime);
  digitalWrite(AC_LOAD, HIGH);
  delayMicroseconds(8.33);
  digitalWrite(AC_LOAD, LOW);
  Serial.print("Dimming=");
  Serial.println(dimming,DEC);
}
void loop()
{

```

```
for(i = 0;i<=7;i++){

    samples[i] = ( 5.0 * analogRead(pin) * 100.0) / 1024.0;
    tempc = tempc + samples[i];
    delay(100);
}
tempc = tempc/8.0;
tempf = (tempc * 9)/ 5 + 32;
if(tempc>23){
    dimming = 15;
    delay(2000);
}
if(tempc<23){
    dimming = 70;
    delay(2000);
}
if(tempc > maxi) {maxi = tempc;}
if(tempc < mini) {mini = tempc;}
Serial.print("Dimming=");
Serial.println(dimming,DEC);
Serial.print(tempc,DEC);
Serial.print(" Celsius, ");
Serial.print(tempf,DEC);
Serial.print(" fahrenheit -> ");
Serial.print(maxi,DEC);
Serial.print(" Max, ");
Serial.print(mini,DEC);
Serial.println(" Min");
tempc = 0;
delay(5000); // delay before loop
}
```

Anexo B - Programa de monitoramento das temperaturas da placa e do vidro.

```
int i;
int pin1 = 0;
long tempc1 = 0;
long samples1[20];
int pin2 = 1;
long tempc2 = 0;
long samples2[20];
int pin3 = 2;
long tempc3 = 0;
long samples3[20];
int pin4 = 3;
long tempc4 = 0;
long samples4[20];
int pin5 = 4;
long tempc5 = 0;
long samples5[20];
int pin6 = 5;
long tempc6 = 0;
long samples6[20];
int pin7 = 6;
long tempc7 = 0;
long samples7[20];
int pin8 = 7;
long tempc8 = 0;
long samples8[20];
int pin9 = 8;
long tempc9 = 0;
long samples9[20];
int pin10 = 9;
long tempc10 = 0;
```

```

long samples10[20];
int pin11 = 10;
long tempc11 = 0;
long samples11[20];
int pin12 = 11;
long tempc12 = 0;
long samples12[20];
int pin13 = 12;
long tempc13 = 0;
long samples13[20];
int pin14 = 13;
long tempc14 = 0;
long samples14[20];
int pin15 = 14;
long tempc15 = 0;
long samples15[20];
int pin16 = 15;
long tempc16 = 0;
long samples16[20];
long mediaplaca=0;
long mediadovidro=0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  // Sensor 01
  for(i = 0;i<=19;i++){
    samples1[i] = ( 5.0 * analogRead(pin1) * 1000.0) / 1024.0;
    tempc1 = tempc1 + samples1[i];
    delay(100);
  }
  tempc1 = tempc1/20.0;
  Serial.print("01, ");
  Serial.print(tempc1,DEC);
  Serial.print(", ");
  mediaplaca = mediaplaca + tempc1;
  tempc1 = 0;
  delay(100);
}

```

```
// Sensor 02
for(i = 0;i<=19;i++){
samples2[i] = ( 5.0 * analogRead(pin2) * 1000.0) / 1024.0;
tempc2 = tempc2 + samples2[i];
delay(100);
}
tempc2 = tempc2/20.0;
Serial.print("02, ");
Serial.print(tempc2,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc2;
tempc2 = 0;
delay(100);
// Sensor 03
for(i = 0;i<=19;i++){
samples3[i] = ( 5.0 * analogRead(pin3) * 1000.0) / 1024.0;
tempc3 = tempc3 + samples3[i];
delay(100);
}
tempc3 = tempc3/20.0;
Serial.print("03, ");
Serial.print(tempc3,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc3;
tempc3 = 0;
delay(100);
// Sensor 04
for(i = 0;i<=19;i++){
samples4[i] = ( 5.0 * analogRead(pin4) * 1000.0) / 1024.0;
tempc4 = tempc4 + samples4[i];
delay(100);
}
tempc4 = tempc4/20.0;
Serial.print("04, ");
Serial.print(tempc4,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc4;
tempc4 = 0;
delay(100);
// Sensor 05
```

```

for(i = 0;i<=19;i++){
samples5[i] = ( 5.0 * analogRead(pin5) * 1000.0) / 1024.0;
tempc5 = tempc5 + samples5[i];
delay(100);
}
tempc5 = tempc5/20.0;
Serial.print("05, ");
Serial.print(tempc5,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc5;
tempc5 = 0;
delay(100);
// Sensor 06
for(i = 0;i<=19;i++){
samples6[i] = ( 5.0 * analogRead(pin6) * 1000.0) / 1024.0;
tempc6 = tempc6 + samples6[i];
delay(100);
}
tempc6 = tempc6/20.0;
Serial.print("06, ");
Serial.print(tempc6,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc6;
tempc6 = 0;
delay(100);
// Sensor 07
for(i = 0;i<=19;i++){
samples7[i] = ( 5.0 * analogRead(pin7) * 1000.0) / 1024.0;
tempc7 = tempc7 + samples7[i];
delay(100);
}
tempc7 = tempc7/20.0;
Serial.print("07, ");
Serial.print(tempc7,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc7;
tempc7 = 0;
delay(100);
// Sensor 08
for(i = 0;i<=19;i++){

```

```

samples8[i] = ( 5.0 * analogRead(pin8) * 1000.0) / 1024.0;
tempc8 = tempc8 + samples8[i];
delay(100);
}
tempc8 = tempc8/20.0;
Serial.print("08, ");
Serial.print(tempc8,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc8;
tempc8 = 0;
delay(100);
// Sensor 09
for(i = 0;i<=19;i++){
samples9[i] = ( 5.0 * analogRead(pin9) * 1000.0) / 1024.0;
tempc9 = tempc9 + samples9[i];
delay(100);
}
tempc9 = tempc9/20.0;
Serial.print("09, ");
Serial.print(tempc9,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc9;
tempc9 = 0;
delay(100);
// Sensor 10
for(i = 0;i<=19;i++){
samples10[i] = ( 5.0 * analogRead(pin10) * 1000.0) / 1024.0;
tempc10 = tempc10 + samples10[i];
delay(100);
}
tempc10 = tempc10/20.0;
Serial.print("10, ");
Serial.print(tempc10,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = mediaplaca + tempc10;
tempc10 = 0;
delay(100);
// Sensor 11
for(i = 0;i<=19;i++){
samples11[i] = ( 5.0 * analogRead(pin11) * 1000.0) / 1024.0;

```

```
tempc11 = tempc11 + samples11[i];
delay(100);
}
tempc11 = tempc11/20.0;
Serial.print("11, ");
Serial.print(tempc11,DEC);
Serial.print(", ");
mediadovidro = mediadovidro + tempc11;
tempc11 = 0;
delay(100);
// Sensor 12
for(i = 0;i<=19;i++){
samples12[i] = ( 5.0 * analogRead(pin12) * 1000.0) / 1024.0;
tempc12 = tempc12 + samples12[i];
delay(100);
}
tempc12 = tempc12/20.0;
Serial.print("12, ");
Serial.print(tempc12,DEC);
Serial.print(", ");
mediadovidro = mediadovidro + tempc12;
tempc12 = 0;
delay(100);
// Sensor 13
for(i = 0;i<=19;i++){
samples13[i] = ( 5.0 * analogRead(pin13) * 1000.0) / 1024.0;
tempc13 = tempc13 + samples13[i];
delay(100);
}
tempc13 = tempc13/20.0;
Serial.print("13, ");
Serial.print(tempc13,DEC);
Serial.print(", ");
mediadovidro = mediadovidro + tempc13;
tempc13 = 0;
delay(100);
// Sensor 14
for(i = 0;i<=19;i++){
samples14[i] = ( 5.0 * analogRead(pin14) * 1000.0) / 1024.0;
tempc14 = tempc14 + samples14[i];
```

```

delay(100);
}
tempc14 = tempc14/20.0;
Serial.print("14, ");
Serial.print(tempc14,DEC);
Serial.print(", ");
mediadovidro = mediadovidro + tempc14;
tempc14 = 0;
delay(100);
// Sensor 15
for(i = 0;i<=19;i++){
samples15[i] = ( 5.0 * analogRead(pin15) * 1000.0) / 1024.0;
tempc15 = tempc15 + samples15[i];
delay(100);
}
tempc15 = tempc15/20.0;
Serial.print("15, ");
Serial.print(tempc15,DEC);
Serial.print(", ");
mediadovidro = mediadovidro + tempc15;
tempc15 = 0;
delay(100);
// Sensor 16
for(i = 0;i<=19;i++){
samples16[i] = ( 5.0 * analogRead(pin16) * 1000.0) / 1024.0;
tempc16 = tempc16 + samples16[i];
delay(100);
}
tempc16 = tempc16/20.0;
Serial.print("16, ");
Serial.print(tempc16,DEC);
Serial.print(", ");
mediadovidro = mediadovidro + tempc16;
tempc16 = 0;
delay(100);
mediaplaca = mediaplaca/10;
Serial.print("MP, ");
Serial.print(mediaplaca,DEC);
Serial.print(", ");
mediaplaca = 0;

```

```
mediadovidro = mediadovidro/6;  
Serial.print("MV, ");  
Serial.print(mediadovidro,DEC);  
Serial.println(" ");  
mediadovidro = 0;  
}
```

Anexo C - Programa usado no Microcontrolador.

```

#include <string.h>
/* O sinal de cruzamento por zero está ligado ao GPIO2, A saída de pulso para o Triac está ligado ao GPIO1
O sensor de temperatura esta ligado ao GPIO0, os Botões estão ligados ao GPIO 4 e GPIO5*/
__CONFIG(WDTDIS & UNPROTECT & MCLREN & BOREN & PWRTEN & INTIO);
int tempref=104;
int count;
int dimmer=80;
int i;
int count;
bit signal;
int tempc;
void read_a2d(void);
void main (void)
// Setup da micro
{
#define _XTAL_FREQ 4000000
OSCCAL=128; // calibração do oscilador interno
INTCON = 0b10010000; // habilita interrupções.
OPTION = 0b10000100;
ADCON0 = 0b10000001;
ANSEL = 0b00010001; // amostragem = fosc/8 canal analógico an0
TRISIO = 0b111101; // configurado gpio1 com saída e demais como entrada
IOC=0;
CMCON=7;
count=0;
ADIE=0;
TMR0=240;// tem que habilitar o timer zero
while(1)
{
if (GPIO4 ==0)
{
__delay_ms(30);

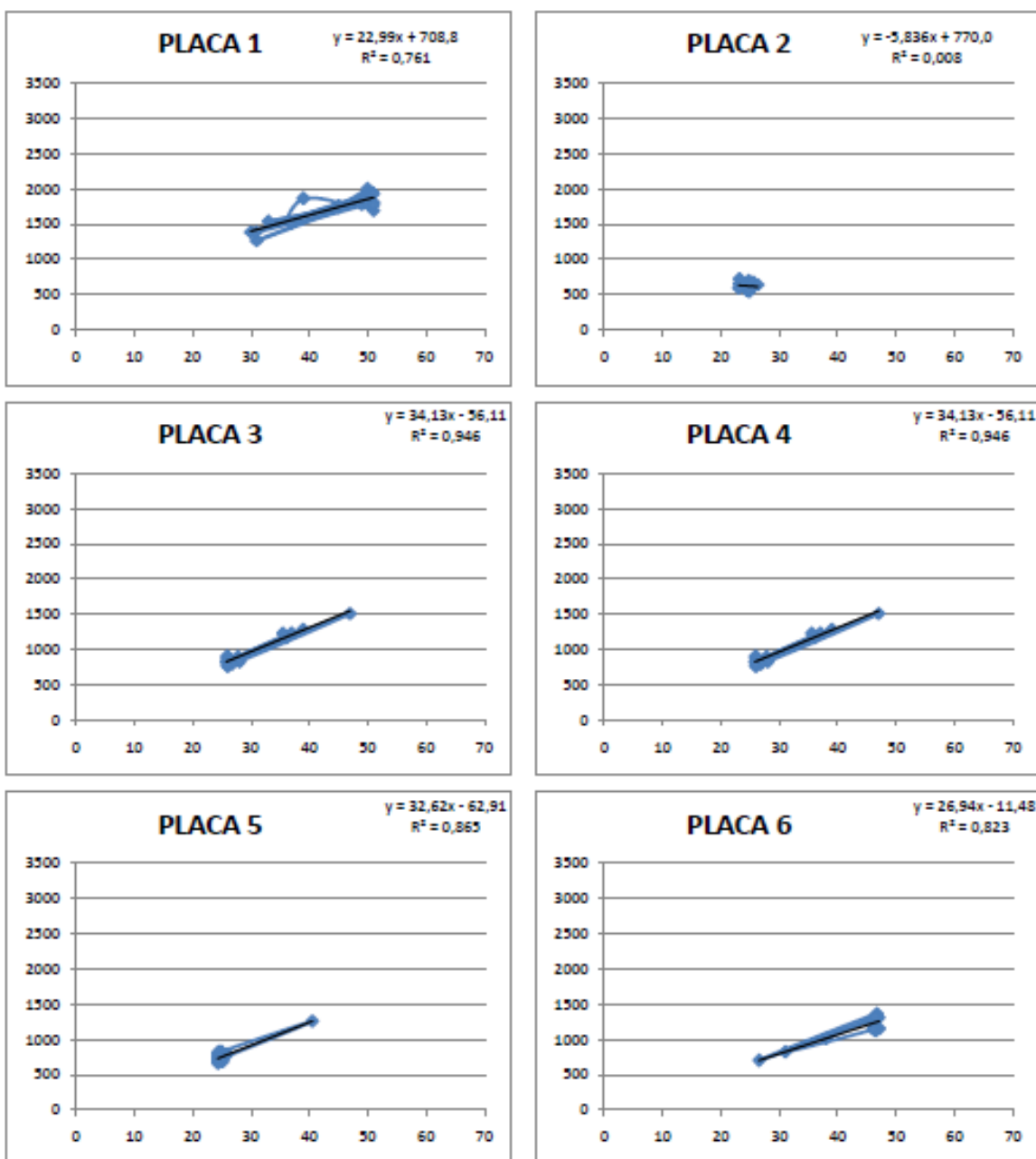
```

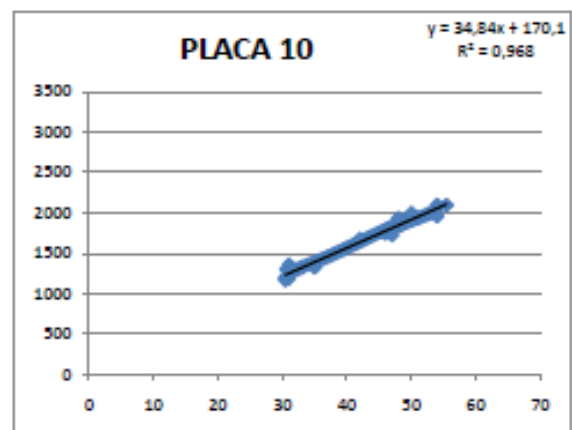
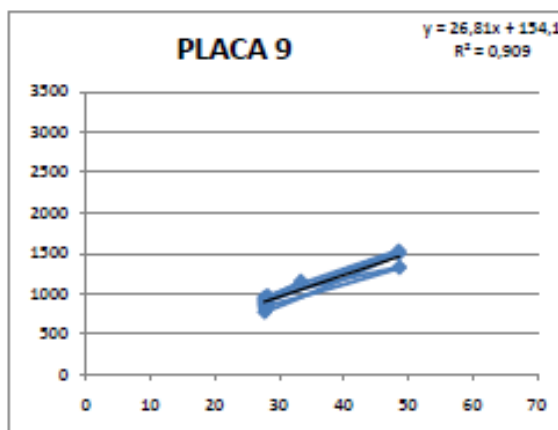
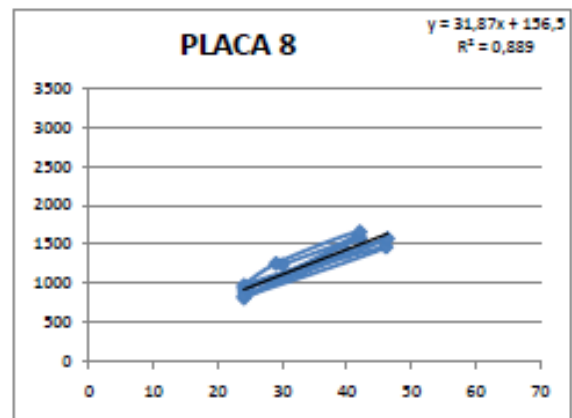
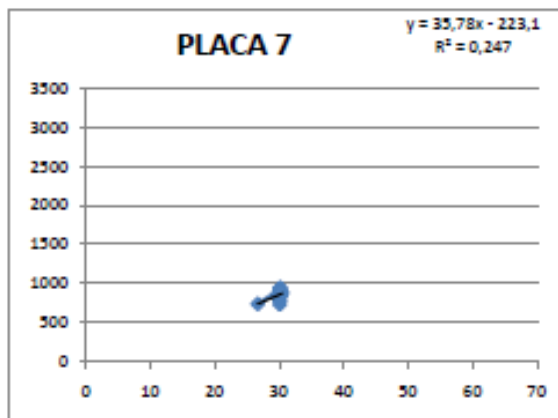
```

        while (GPIO4==0)
        {
            tempref=tempref+2; // valor 2 corresponde a 0,01 v = 1°C
        }
    if (GPIO5 ==0)
    {
        __delay_ms(30);
        while (GPIO4==0)
        {
            tempref=tempref-2;
        }
    if (signal==1)
    {
        if (tempc<tempref)
        {
            if(dimmer>70)
                dimmer=dimmer--;
        }
        if(tempc>tempref)
        {
            if(dimmer<90)
                dimmer=dimmer++;
        }
    }
    signal=0;
}
}
}
}
void read_a2d(void)
{
    GODONE=1; // initiate conversion on the selected channel
    signal=1;
    while(GODONE)
    {}
    tempc=ADRESL;
    count=0;
}
static void interrupt
isr(void) // Here be interrupt function - the name is
        // unimportant.
{

```

```
if (INTF==1)
//tratamento do pulso para o triac
{
    for(i=0;i<dimmer;i++)
        __delay_us(65);
        GPIO1=1;
        __delay_us(130);
        GPIO1=0;
        count++;
        INTF=0;
    }
if (count==120)
read_a2d();          // toggle bit 0 of Port B, to show we're alive exor*/
}
```

Anexo D - Gráficos da curva de calibração.



Anexo E - Programa de monitoração da voltagem e temperatura ambiente.

```
int i;
int pin1 = 0;
long tempc1 = 0;
int samples1[20];
int dig1 = 2;
int pin2 = 1;
long tempc2 = 0;
int samples2[20];
int dig2 = 3;
int pin3 = 2;
long tempc3 = 0;
int samples3[20];
int dig3 = 4;
int pin4 = 3;
long tempc4 = 0;
int samples4[20];
int dig4 = 5;
int pin5 = 4;
long tempc5 = 0;
int samples5[20];
int dig5 = 6;
int pin6 = 5;
long tempc6 = 0;
int samples6[20];
int dig6 = 7;
int pin7 = 6;
long tempc7 = 0;
int samples7[20];
int dig7 = 8;
int pin8 = 7;
```

```
long tempc8 = 0;
int samples8[20];
int dig8 = 9;
int pin9 = 8;
long tempc9 = 0;
int samples9[20];
int dig9 = 10;
int pin10 = 9;
long tempc10 = 0;
int samples10[20];
int dig10 = 11;
int pin11 = 10;
long tempc11 = 0;
int samples11[20];
int dig11 = 22;
int pin12 = 11;
long tempc12 = 0;
int samples12[20];
int dig12 = 24;
const int buttonPin = 12;
const int ledPin = 13;
int buttonState = 0;
// Sensor de Temperatura
int pinTamb = 12;
int Tamb = 0;
int samplesTamb[20];
int maxiTamb = -100,miniTamb = 100;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(dig1, OUTPUT);
  pinMode(dig2, OUTPUT);
  pinMode(dig3, OUTPUT);
  pinMode(dig4, OUTPUT);
  pinMode(dig5, OUTPUT);
  pinMode(dig6, OUTPUT);
  pinMode(dig7, OUTPUT);
  pinMode(dig8, OUTPUT);
  pinMode(dig9, OUTPUT);
  pinMode(dig10, OUTPUT);
```

```

pinMode(dig11, OUTPUT);
pinMode(dig12, OUTPUT);
pinMode(ledPin, OUTPUT);
pinMode(buttonPin, INPUT);
}
void loop()
{
buttonState = digitalRead(buttonPin);
if (buttonState == HIGH) {
digitalWrite(ledPin, HIGH);
Serial.print("ligado, ");
Serial.print("1, ");
}
else {
digitalWrite(ledPin, LOW);
Serial.print("desligado, ");
Serial.print("0, ");
}
// Sensor da Temperatura Ambiente
for(i = 0;i<=19;i++){
samplesTamb[i] = ( 5.0 * analogRead(pinTamb) * 1000.0) / 1024.0;
Tamb = Tamb + samplesTamb[i];
delay(100);
}
Tamb = Tamb/20.0;
Serial.print("Tamb, ");
Serial.print(Tamb,DEC);
Serial.print(", ");
delay(100);
// Voltagem 01
digitalWrite(dig1, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples1[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin1)) / 1024.0;
tempc1 = tempc1 + samples1[i];
delay(100);
}
tempc1 = tempc1/20.0;
Serial.print("01, ");
Serial.print(tempc1,DEC);

```

```
Serial.print(" ");
tempc1 = 0;

delay(100);
digitalWrite(dig1, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 02
digitalWrite(dig2, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples2[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin2)) / 1024.0;
tempc2 = tempc2 + samples2[i];
delay(100);
}
tempc2 = tempc2/20.0;
Serial.print("02, ");
Serial.print(tempc2,DEC);
Serial.print(" ");
tempc2 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig2, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 03
digitalWrite(dig3, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples3[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin3)) / 1024.0;
tempc3 = tempc3 + samples3[i];
delay(100);
}
tempc3 = tempc3/20.0;
Serial.print("03, ");
Serial.print(tempc3,DEC);
Serial.print(" ");
tempc3 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig3, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 04
digitalWrite(dig4, HIGH);
```

```

delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples4[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin4)) / 1024.0;
tempc4 = tempc4 + samples4[i];
delay(100);
}
tempc4 = tempc4/20.0;
Serial.print("04, ");
Serial.print(tempc4,DEC);
Serial.print(", ");
tempc4 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig4, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 05
digitalWrite(dig5, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples5[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin5)) / 1024.0;
tempc5 = tempc5 + samples5[i];
delay(100);
}
tempc5 = tempc5/20.0;
Serial.print("05, ");
Serial.print(tempc5,DEC);
Serial.print(", ");
tempc5 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig5, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 06
digitalWrite(dig6, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples6[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin6)) / 1024.0;
tempc6 = tempc6 + samples6[i];
delay(100);
}
tempc6 = tempc6/20.0;
Serial.print("06, ");

```

```

Serial.print(tempc6,DEC);
Serial.print(" ");
tempc6 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig6, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 11
digitalWrite(dig11, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples11[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin11)) / 1024.0;
tempc11 = tempc11 + samples11[i];
delay(100);
}
tempc11 = tempc11/20.0;
Serial.print("07, ");
Serial.print(tempc11,DEC);
Serial.print(" ");
tempc11 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig11, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 08
digitalWrite(dig8, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples8[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin8)) / 1024.0;
tempc8 = tempc8 + samples8[i];
delay(100);
}
tempc8 = tempc8/20.0;
Serial.print("08, ");
Serial.print(tempc8,DEC);
Serial.print(" ");
tempc8 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig8, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 09
digitalWrite(dig9, HIGH);

```

```
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples9[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin9)) / 1024.0;
tempc9 = tempc9 + samples9[i];
delay(100);
}
tempc9 = tempc9/20.0;
Serial.print("09, ");
Serial.print(tempc9,DEC);
Serial.print(", ");
tempc9 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig9, LOW);
delay(1000);
// Voltagem 10
digitalWrite(dig10, HIGH);
delay(2000);
for(i = 0;i<=19;i++){
samples10[i] = ( 5000.0 * analogRead(pin10)) / 1024.0;
tempc10 = tempc10 + samples10[i];
delay(100);
}
tempc10 = tempc10/20.0;
Serial.print("10, ");
Serial.print(tempc10,DEC);
Serial.println(", ");
tempc10 = 0;
delay(100);
digitalWrite(dig10, LOW);
delay(1000);
}
```

Anexo F - Valores das resistências

Nº	Resistência (Ohms)	Erro (Ohms)
1	138,9	0,05
2	138,9	0,05
3	138,4	0,05
4	141,9	0,05
5	138,8	0,05
6	139	0,05
7	140	0,05
8	138,9	0,05
9	139	0,05
10	138,5	0,05

Anexo G - Programa realizado no MatLab - Cálculo do Balanço Energético.

```

%Programa para o cálculo do Balanço Energético.
clc %Deixar a tela em branco.
clear all % Apaga todas as variáveis.
close all %Apaga todas as janelas.
%=====Dados de entrada=====
Ncav=1; %Número de cavidades.
teta=30; %Angulo de inclinação.
%Fator de conversão de cada resistência, para 100°C.
fp(1,1)=0.0255;
fp(2,1)=0.0394;
fp(3,1)=0.0312;
fp(4,1)=0.0497;
fp(5,1)=0.0333;
fp(6,1)=0.0376;
fp(7,1)=0.0355;
fp(8,1)=0.0272;
fp(9,1)=0.0316;
fp(10,1)=0.0255;
%=====Dados do projeto=====
%Valor das resistências. (Ohms)
resistencia(1,1)=138.9;
resistencia(2,1)=138.9;
resistencia(3,1)=138.4;
resistencia(4,1)=141.9;
resistencia(5,1)=138.8;
resistencia(6,1)=139.0;
resistencia(7,1)=140.0;
resistencia(8,1)=138.9;
resistencia(9,1)=139.0;
resistencia(10,1)=138.5;

```

```

Atot=1.05*0.52; %Área da superfície total. (metros²)
A=Atot/10; %Área atuante em cada resistência. (metros²)
%=====
% Leitura dos dados salvos em Excel, em cada experimento.
% Deve-se verificar o mesmo nome salvo do arquivo.
data01=xlsread('temperaturas.xlsx');
data02=xlsread('voltagem_tempamb.xlsx');
%=====Criando vetores de dados=====
%Temperatura da Placa.
temp01=data01(:,2)/10;
temp02=data01(:,4)/10;
temp03=data01(:,6)/10;
temp04=data01(:,8)/10;
temp05=data01(:,10)/10;
temp06=data01(:,12)/10;
temp07=data01(:,14)/10;
temp08=data01(:,16)/10;
temp09=data01(:,18)/10;
temp10=data01(:,20)/10;
%Temperatura do Vidro.
temp11=data01(:,22)/10;
temp12=data01(:,24)/10;
temp13=data01(:,26)/10;
temp14=data01(:,28)/100;
temp15=data01(:,30)/10;
temp16=data01(:,32)/10;
%Voltagem.
volt01=data02(:,5);
volt02=data02(:,7);
volt03=data02(:,9);
volt04=data02(:,11);
volt05=data02(:,13);
volt06=data02(:,15);
volt07=data02(:,17);
volt08=data02(:,19);
volt09=data02(:,21);
volt10=data02(:,23);
%=====Médias=====
%Temperaturas na placa.
dados(1,1)=mean(temp01);

```

```

dados(2,1)=mean(temp02);
dados(3,1)=mean(temp03);
dados(4,1)=mean(temp04);
dados(5,1)=mean(temp05);
dados(6,1)=mean(temp06);
dados(7,1)=mean(temp07);
dados(8,1)=mean(temp08);
dados(9,1)=mean(temp09);
dados(10,1)=mean(temp10);
%Temperatura do Vidro.
dados(11,1)=mean(temp11);
dados(12,1)=mean(temp12);
dados(13,1)=mean(temp13);
dados(14,1)=mean(temp14);
dados(15,1)=mean(temp15);
dados(16,1)=mean(temp16);
%Voltagem.
dados(17,1)=mean(volt01);
dados(18,1)=mean(volt02);
dados(19,1)=mean(volt03);
dados(20,1)=mean(volt04);
dados(21,1)=mean(volt05);
dados(22,1)=mean(volt06);
dados(23,1)=mean(volt07);
dados(24,1)=mean(volt08);
dados(25,1)=mean(volt09);
dados(26,1)=mean(volt10);
%=====Desvio Padrão=====
%Temperaturas na placa.
dados(1,2)=std(temp01);
dados(2,2)=std(temp02);
dados(3,2)=std(temp03);
dados(4,2)=std(temp04);
dados(5,2)=std(temp05);
dados(6,2)=std(temp06);
dados(7,2)=std(temp07);
dados(8,2)=std(temp08);
dados(9,2)=std(temp09);
dados(10,2)=std(temp10);
%Temperatura do Vidro.

```

```

dados(11,2)=std(temp11);
dados(12,2)=std(temp12);
dados(13,2)=std(temp13);
dados(14,2)=std(temp14);
dados(15,2)=std(temp15);
dados(16,2)=std(temp16);
%Voltagem.
dados(17,2)=std(volt01);
dados(18,2)=std(volt02);
dados(19,2)=std(volt03);
dados(20,2)=std(volt04);
dados(21,2)=std(volt05);
dados(22,2)=std(volt06);
dados(23,2)=std(volt07);
dados(24,2)=std(volt08);
dados(25,2)=std(volt09);
dados(26,2)=std(volt10);
%=====
zl=0.25/length(data01);
tlim=norminv(1-zl);
for i=1:1:26
%Desvio máximo aceitável das temperaturas da placa.
dados(i,3)=tlim*dados(i,2);
end
%=====Método de Chavvenet=====
%Excluindo os dados que estão acima da média+desvio máximo.
%Temperatura da Placa.
temp01i=temp01(find(temp01<dados(1,1)+dados(1,3)));
temp02i=temp02(find(temp02<dados(2,1)+dados(2,3)));
temp03i=temp03(find(temp03<dados(3,1)+dados(3,3)));
temp04i=temp04(find(temp04<dados(4,1)+dados(4,3)));
temp05i=temp05(find(temp05<dados(5,1)+dados(5,3)));
temp06i=temp06(find(temp06<dados(6,1)+dados(6,3)));
temp07i=temp07(find(temp07<dados(7,1)+dados(7,3)));
temp08i=temp08(find(temp08<dados(8,1)+dados(8,3)));
temp09i=temp09(find(temp09<dados(9,1)+dados(9,3)));
temp10i=temp10(find(temp10<dados(10,1)+dados(10,3)));
%Temperatura do vidro.
temp11i=temp11(find(temp11<dados(11,1)+dados(11,3)));
temp12i=temp12(find(temp12<dados(12,1)+dados(12,3)));

```

```

temp13i=temp13(find(temp13<dados(13,1)+dados(13,3)));
temp14i=temp14(find(temp14<dados(14,1)+dados(14,3)));
temp15i=temp15(find(temp15<dados(15,1)+dados(15,3)));
temp16i=temp16(find(temp16<dados(16,1)+dados(16,3)));
%Voltagem.
volt01i=volt01(find(volt01<dados(17,1)+dados(17,3)));
volt02i=volt02(find(volt02<dados(18,1)+dados(18,3)));
volt03i=volt03(find(volt03<dados(19,1)+dados(19,3)));
volt04i=volt04(find(volt04<dados(20,1)+dados(20,3)));
volt05i=volt05(find(volt05<dados(21,1)+dados(21,3)));
volt06i=volt06(find(volt06<dados(22,1)+dados(22,3)));
volt07i=volt07(find(volt07<dados(23,1)+dados(23,3)));
volt08i=volt08(find(volt08<dados(24,1)+dados(24,3)));
volt09i=volt09(find(volt09<dados(25,1)+dados(25,3)));
volt10i=volt10(find(volt10<dados(26,1)+dados(26,3)));
%Excluindo os dados que estão abaixo da média - desvio máximo.
%Temperatura da Placa.
temp01f=temp01i(find(temp01i>dados(1,1)-dados(1,3)));
temp02f=temp02i(find(temp02i>dados(2,1)-dados(2,3)));
temp03f=temp03i(find(temp03i>dados(3,1)-dados(3,3)));
temp04f=temp04i(find(temp04i>dados(4,1)-dados(4,3)));
temp05f=temp05i(find(temp05i>dados(5,1)-dados(5,3)));
temp06f=temp06i(find(temp06i>dados(6,1)-dados(6,3)));
temp07f=temp07i(find(temp07i>dados(7,1)-dados(7,3)));
temp08f=temp08i(find(temp08i>dados(8,1)-dados(8,3)));
temp09f=temp09i(find(temp09i>dados(9,1)-dados(9,3)));
temp10f=temp10i(find(temp10i>dados(10,1)-dados(10,3)));
%Temperatura do Vidro.
temp11f=temp11i(find(temp11i>dados(11,1)-dados(11,3)));
temp12f=temp12i(find(temp12i>dados(12,1)-dados(12,3)));
temp13f=temp13i(find(temp13i>dados(13,1)-dados(13,3)));
temp14f=temp14i(find(temp14i>dados(14,1)-dados(14,3)));
temp15f=temp15i(find(temp15i>dados(15,1)-dados(15,3)));
temp16f=temp16i(find(temp16i>dados(16,1)-dados(16,3)));
%Voltagem.
volt01f=volt01i(find(volt01i>dados(17,1)-dados(17,3)));
volt02f=volt02i(find(volt02i>dados(18,1)-dados(18,3)));
volt03f=volt03i(find(volt03i>dados(19,1)-dados(19,3)));
volt04f=volt04i(find(volt04i>dados(20,1)-dados(20,3)));
volt05f=volt05i(find(volt05i>dados(21,1)-dados(21,3)));

```

```

volt06f=volt06i(find(volt06i>dados(22,1)-dados(22,3)));
volt07f=volt07i(find(volt07i>dados(23,1)-dados(23,3)));
volt08f=volt08i(find(volt08i>dados(24,1)-dados(24,3)));
volt09f=volt09i(find(volt09i>dados(25,1)-dados(25,3)));
volt10f=volt10i(find(volt10i>dados(26,1)-dados(26,3)));
%=====
%Média após excluir os pontos.
%Temperatura da placa.
dados(1,4)=mean(temp01f);
dados(2,4)=mean(temp02f);
dados(3,4)=mean(temp03f);
dados(4,4)=mean(temp04f);
dados(5,4)=mean(temp05f);
dados(6,4)=mean(temp06f);
dados(7,4)=mean(temp07f);
dados(8,4)=mean(temp08f);
dados(9,4)=mean(temp09f);
dados(10,4)=mean(temp10f);
%Temperatura do Vidro.
dados(11,4)=mean(temp11f);
dados(12,4)=mean(temp12f);
dados(13,4)=mean(temp13f);
dados(14,4)=mean(temp14f);
dados(15,4)=mean(temp15f);
dados(16,4)=mean(temp16f);
%Voltagem.
dados(17,4)=mean(volt01f);
dados(18,4)=mean(volt02f);
dados(19,4)=mean(volt03f);
dados(20,4)=mean(volt04f);
dados(21,4)=mean(volt05f);
dados(22,4)=mean(volt06f);
dados(23,4)=mean(volt07f);
dados(24,4)=mean(volt08f);
dados(25,4)=mean(volt09f);
dados(26,4)=mean(volt10f);
%=====
%Desvio padrão após excluir os pontos.
%Temperatura da Placa.
dados(1,5)=std(temp01f);

```

```

dados(2,5)=std(temp02f);
dados(3,5)=std(temp03f);
dados(4,5)=std(temp04f);
dados(5,5)=std(temp05f);
dados(6,5)=std(temp06f);
dados(7,5)=std(temp07f);
dados(8,5)=std(temp08f);
dados(9,5)=std(temp09f);
dados(10,5)=std(temp10f);
%Temperatura do Vidro.
dados(11,5)=std(temp11f);
dados(12,5)=std(temp12f);
dados(13,5)=std(temp13f);
dados(14,5)=std(temp14f);
dados(15,5)=std(temp15f);
dados(16,5)=std(temp16f);
%Voltagem.
dados(17,5)=std(volt01f);
dados(18,5)=std(volt02f);
dados(19,5)=std(volt03f);
dados(20,5)=std(volt04f);
dados(21,5)=std(volt05f);
dados(22,5)=std(volt06f);
dados(23,5)=std(volt07f);
dados(24,5)=std(volt08f);
dados(25,5)=std(volt09f);
dados(26,5)=std(volt10f);
%=====
%Números de pontos após excluir os pontos.
%Temperatura da Placa.
dados(1,6)=length(temp01f);
dados(2,6)=length(temp02f);
dados(3,6)=length(temp03f);
dados(4,6)=length(temp04f);
dados(5,6)=length(temp05f);
dados(6,6)=length(temp06f);
dados(7,6)=length(temp07f);
dados(8,6)=length(temp08f);
dados(9,6)=length(temp09f);
dados(10,6)=length(temp10f);

```

```

%Temperatura do vidro.
dados(11,6)=length(temp11f);
dados(12,6)=length(temp12f);
dados(13,6)=length(temp13f);
dados(14,6)=length(temp14f);
dados(15,6)=length(temp15f);
dados(16,6)=length(temp16f);
%Voltagem.
dados(17,6)=length(volt01f);
dados(18,6)=length(volt02f);
dados(19,6)=length(volt03f);
dados(20,6)=length(volt04f);
dados(21,6)=length(volt05f);
dados(22,6)=length(volt06f);
dados(23,6)=length(volt07f);
dados(24,6)=length(volt08f);
dados(25,6)=length(volt09f);
dados(26,6)=length(volt10f);
%Calculando a média global dos 6 sensores fixados no vidro
for i=1:1:26
%Cálculo do t
dados(i,7)=tinv(0.995,dados(i,6)-1);
%Cálculo do erro
dados(i,8)=(dados(i,7)*dados(i,5))/(dados(i,6)^0.5);
end
%Média.
Tv=(dados(11,4)+dados(12,4)+dados(13,4)+dados(14,4)+dados(15,4)...
+dados(16,4))/6;
dTv=(sqrt(dados(11,8)^2+dados(12,8)^2+dados(13,8)^2+dados(14,8)...
^2+dados(15,8)^2+dados(16,8)^2))/6;
%=====Calculo coeficiente convectivo=====
%Calculando a média e o erro sistemático do coeficiente convectivo.
for i=1:1:10
j=16+i;
V=dados(j,4)*fp(i,1); % Voltagem multiplicada pelo fator de conversão.
dV=dados(j,8)*fp(i,1); % Incerteza da voltagem.
R=resistencia(i,1); % Resistência.
dR=0.05; % Incerteza da Resistência.
A=A; % Área.
dA=sqrt((0.52*0.0005)^2+(1.05*0.0005)^2)/10; % Incerteza da Área.

```

```

Tn=dados(i,4); % Temperatura da Placa.
dTn=dados(i,8); % Incerteza da Temperatura da Placa.
Tv=Tv; % Temperatura do Vidro.
dTv=dTv; % Incerteza da Temperatura do Vidro.
%-----Média-----
h(i,1)=((V^2)/R)*(1/(A*(Tn-Tv)));
%-----Cálculo dos desvios-----
desvV=((2*V)/(A*R*(Tn-Tv)))*dV;
desvR=(-V^2/(A*R^2*(Tn - Tv)))*dR;
desvA=(-V^2/(A^2*R*(Tn - Tv)))*dA;
desvTn=(-V^2/(A*R*(Tn - Tv)^2))*dTn;
desvTv=(V^2/(A*R*(Tn - Tv)^2))*dTv;
%-----Cálculo da incerteza-----
h(i,2)=sqrt(desvV^2+desvR^2+desvA^2+desvTn^2+desvTv^2);
end
%-----Calculo da média e do erro em toda a placa-----
h(11,1)=(h(1,1)+h(2,1)+h(3,1)+h(4,1)+h(5,1)+h(6,1)+h(7,1)+h(8,1)+h(9,1)...
+h(10,1))/10;
h(11,2)=sqrt((h(1,2))^2+(h(2,2))^2+(h(3,2))^2+(h(4,2))^2+(h(5,2))^2...
^2+(h(6,2))^2+(h(7,2))^2+(h(8,2))^2+(h(9,2))^2+(h(10,2))^2)/10;
%==Método numérico de Duffie Beckman e Incropera==
W=1/Ncav;
L=0.04;
g=9.81;
%% Propriedades termofísicas do ar a pressão atmosférica (Tabela A.4 do
livro Fundamentos de Transferência de Calor e Massa:
Incropera/DeWitt/Bergman/Lavine, 2008, Editora LTC) %%
T_ar=[100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800 850 900
950 1000 1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2000 2100 2200 2300
2400 2500 3000]; % Temperatura [K] %
rho_ar=[3.5562 2.3364 1.7458 1.3947 1.1614 0.9950 0.8711 0.7740 0.6964
0.6329 0.5804 0.5356 0.4975 0.4643 0.4354 0.4097 0.3868 0.3666 0.3482
0.3166 0.2902 0.2679 0.2488 0.2322 0.2177 0.2049 0.1935 0.1833 0.1741
0.1658 0.1582 0.1513 0.1448 0.1389 0.1135]; % Densidade [kg/m^3] %
cp_ar=[1.032 1.012 1.007 1.006 1.007 1.009 1.014 1.021 1.030 1.040 1.051
1.063 1.075 1.087 1.099 1.110 1.121 1.131 1.141 1.159 1.175 1.189 1.207
1.230 1.248 1.267 1.286 1.307 1.337 1.372 1.417 1.478 1.558 1.665 2.726]; %
Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K] %
mi_ar=[71.1*10^(-7) 103.4*10^(-7) 132.5*10^(-7) 159.6*10^(-7) 184.6*10^(-7)
208.2*10^(-7) 230.1*10^(-7) 250.7*10^(-7) 270.1*10^(-7) 288.4*10^(-7)

```

```

305.8*10^(-7) 322.5*10^(-7) 338.8*10^(-7) 354.6*10^(-7) 369.8*10^(-7)
384.3*10^(-7) 398.1*10^(-7) 411.3*10^(-7) 424.4*10^(-7) 449.0*10^(-7)
473.0*10^(-7) 496.0*10^(-7) 530*10^(-7) 557*10^(-7) 584*10^(-7) 611*10^(-7)
637*10^(-7) 663*10^(-7) 689*10^(-7) 715*10^(-7) 740*10^(-7) 766*10^(-7)
792*10^(-7) 818*10^(-7) 955*10^(-7)]; % Viscosidade dinâmica [N.s/m^2] %
ni_ar=[2.00*10^(-6) 4.426*10^(-6) 7.590*10^(-6) 11.44*10^(-6) 15.89*10^(-6)
20.92*10^(-6) 26.41*10^(-6) 32.39*10^(-6) 38.79*10^(-6) 45.57*10^(-6)
52.69*10^(-6) 60.21*10^(-6) 68.10*10^(-6) 76.37*10^(-6) 84.93*10^(-6)
93.80*10^(-6) 102.9*10^(-6) 112.2*10^(-6) 121.9*10^(-6) 141.8*10^(-6)
162.9*10^(-6) 185.1*10^(-6) 213*10^(-6) 240*10^(-6) 268*10^(-6) 298*10^(-6)
329*10^(-6) 362*10^(-6) 396*10^(-6) 431*10^(-6) 468*10^(-6) 506*10^(-6)
547*10^(-6) 589*10^(-6) 841*10^(-6)]; % Viscosidade cinemática [m^2/s] %
k_ar=[9.34*10^(-3) 13.8*10^(-3) 18.1*10^(-3) 22.3*10^(-3) 26.3*10^(-3)
30.0*10^(-3) 33.8*10^(-3) 37.3*10^(-3) 40.7*10^(-3) 43.9*10^(-3) 46.9*10^(-
3) 49.7*10^(-3) 52.4*10^(-3) 54.9*10^(-3) 57.3*10^(-3) 59.6*10^(-3)
62.0*10^(-3) 64.3*10^(-3) 66.7*10^(-3) 71.5*10^(-3) 76.3*10^(-3) 82*10^(-3)
91*10^(-3) 100*10^(-3) 106*10^(-3) 113*10^(-3) 120*10^(-3) 128*10^(-3)
137*10^(-3) 147*10^(-3) 160*10^(-3) 175*10^(-3) 196*10^(-3) 222*10^(-3)
486*10^(-3)]; % Condutividade térmica [W/m.K] %
alfa_ar=[2.54*10^(-6) 5.84*10^(-6) 10.3*10^(-6) 15.9*10^(-6) 22.5*10^(-6)
29.9*10^(-6) 38.3*10^(-6) 47.2*10^(-6) 56.7*10^(-6) 66.7*10^(-6) 76.9*10^(-
6) 87.3*10^(-6) 98.0*10^(-6) 109*10^(-6) 120*10^(-6) 131*10^(-6) 143*10^(-
6) 155*10^(-6) 168*10^(-6) 195*10^(-6) 224*10^(-6) 238*10^(-6) 303*10^(-6)
350*10^(-6) 390*10^(-6) 435*10^(-6) 482*10^(-6) 534*10^(-6) 589*10^(-6)
646*10^(-6) 714*10^(-6) 783*10^(-6) 869*10^(-6) 960*10^(-6) 1570*10^(-6)];
% Difusividade térmica [m^2/s] %
Pr_ar=[0.786 0.758 0.737 0.720 0.707 0.700 0.690 0.686 0.684 0.683 0.685
0.690 0.695 0.702 0.709 0.716 0.720 0.723 0.726 0.728 0.728 0.719 0.703
0.685 0.688 0.685 0.683 0.677 0.672 0.667 0.655 0.647 0.630 0.613 0.536]; %
Numero de Prandtl [adimensional] %
%Temperatura média da placa e do vidro.
Tm=((mean(dados(1:10,4)))+Tv)*0.5;
%Calculo das propriedades termodinâmicas do ar.
Pr=interp1(T_ar,Pr_ar,Tm,'cubic');
K=interp1(T_ar,k_ar,Tm,'cubic');
ni=interp1(T_ar,ni_ar,Tm,'cubic');

B=1/(Tm+273); % Coeficiente de Expansão Volumétrica
Ra=(g*B*Pr*(dados(1,4)-dados(11,4))*L^3)/(ni^2); % Número de Rayleigh
%Parametrização.

```

```
x1=(1-((1708*(sin(1.8*teta))^1.6)/(Ra*cos(teta))));
x2=(1-((1708)/(Ra*cos(teta))));
x3=(((Ra*cos(teta))/(5830))^(1/3))-1);

Nu=1;
if x2>0
    Nu=1+1.44*x1*x2;
    if x3>0
        Nu=Nu+x3;
    end
end

h(12,1)=(Nu*K)/(L); % Coeficiente Convectivo Teórico
```