

FÁBIO NIEMEZEWSKI DA ROSA

SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DE BAIXA TEMPERATURA PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA: CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA
TESTE INTERNO DE DESEMPENHO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS DE BAIXA TEMPERATURA PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA: CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA
TESTE INTERNO DE DESEMPENHO**

FÁBIO NIEMEZEWSKI DA ROSA

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. Paulo Otto Beyer
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre
2009**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de concluir um curso da qualidade e prestígio desta universidade.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Smith Schneider* que deu todo o apoio necessário a pesquisa, desenvolvimento e orientações necessárias a montagem da bancada.

Aos meus pais *Gil e Isa*, que sempre incentivaram meus estudos.

De modo especial à minha filha *Camile* e à minha esposa *Semíramis*, que sempre deu todo o apoio necessário a conclusão deste curso.

Este trabalho contou com apoio e financiamento das seguintes entidades:

- Empresa Nossa Ducha Indústria & Comércio Ltda.
- Chamada pública MCT/SEBRAE/FINEP/Ação Transversal 04/2007 - APLs, projeto: Desenvolvimento de ducha “miniboiler” elétrico de instalação direta no banheiro integrado com sistema solar.

“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos”

Albert Einstein

ROSA, F. N. **Sistemas solares térmicos de baixa temperatura para aquecimento de água: construção de uma bancada para teste interno de desempenho.** 2009. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a construção e operação de uma bancada de teste interno de desempenho para sistemas solares térmicos de baixa temperatura para aquecimento de água para uso doméstico e de pequenas instalações comerciais. A concepção da bancada esta baseada na norma ISO9459-1, que define procedimentos de instalação, instrumentação e avaliação de desempenho de sistemas. A bancada esta construída utilizando um coletor solar e um tanque de acumulação comercial, instalados dentro do laboratório conforme as instruções do fabricante. O sistema é operado conforme a norma estabelece para o teste de desempenho. Os resultados destes servem para avaliar e comparar sistemas solares de aquecimento de água. Os testes com a bancada demonstram que a mesma funciona, obtendo resultados para uma avaliação de um sistema instalado de 60% de fator solar no suprimento de água quente.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas solares térmicos de baixa temperatura, ISO9459-1, teste interno de desempenho, Energia solar, Aquecimento de água, Simulador solar, Coletor solar.

ROSA, F. N. **Low Temperature Thermal Solar Water Heating Systems: Building a bench for indoor performance rating.** 2009. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

The present work describes the construction and operation of indoor performance rating bench for domestic and small facilities low temperature thermal solar water heating systems. The conception of this bench is based in the in the ISO9459-1 standard, which defines installation, instrumentation and performance rating proceedings. The bench is build using a commercial solar collector and accumulation tank, installed inside the laboratory according to the manufacturer instructions. The system will run based on the standard benchmark test. The results allow comparing and benchmarking different solar water heating systems. Tests on the bench shows that the same works, obtaining results for an evaluation of an installed system of 60 percent of the solar hot water supply.

KEYWORDS: Low temperature thermal solar systems, ISO9459-1, indoor performance rating, solar energy, water heating, solar simulator, solar collector.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4. DESENVOLVIMENTO DA BANCADA.....	4
4.1 A BANCADA	4
4.2. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.....	6
4.3. O SIMULADOR SOLAR	7
5. OPERAÇÃO E ENSAIOS	10
6. RESULTADOS	11
7. CONCLUSÃO.....	14
8. REFERÊNCIAS	15
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	15
APÊNDICES	16
ANEXOS	21

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é um modelo antigo de uso de energia, mas ainda pouco explorado no Brasil. O modelo de aquecimento de água e ar para diversas aplicações baseado em combustíveis fósseis esta com os dias contados. Previsões (FARIA, 2009) mostram que ainda este século as reservas atuais de combustíveis fósseis podem acabar, e com isto deveremos ter alternativas viáveis para aquecimento, locomoção, entre outras utilizações.

O Brasil figura (COLLE, 2008) na geografia mundial como o país que exhibe a mais robusta oferta energética natural renovável do planeta, sobretudo para as modalidades de energia hidráulica, solar, eólica e biomassa. Segundo o mesmo autor, a incidência de radiação solar média diária (4500 a 5500 Wh/m²) na região sul do Brasil é muito superior a muitos países que utilizam este tipo de energia em larga escala. A alta demanda de energia decorrente de chuveiros elétricos abre a possibilidade de substituição dessa fonte pela energia solar para reduzir o pico de demanda energética, que corresponde a cerca de ¼ da energia produzida por Itaipu.

Segundo Faria (2009), a energia solar térmica é absolutamente a melhor solução para suprir no médio-longo prazo senão toda, grande parte da demanda de calor e frio das edificações. Somente no ano de 2008, foram economizados no Brasil com o aquecimento solar cerca de 655 GWh, energia suficiente para abastecer 376.000 residências brasileiras consumindo cerca de 145 kWh por mês. Os 875.000 domicílios brasileiros que já usam o aquecedor solar representam, entretanto, apenas 1,78% de todos os domicílios do país.

A energia solar é uma fonte renovável de energia e suas aplicações estão sendo estudadas e cada vez mais aprimoradas.

Novas iniciativas governamentais, por exemplo: Lei 5.210/2001 do Senado Federal, Lei 5.184/08 do Rio de Janeiro e Lei 14.459/07 de São Paulo, mostram que num futuro próximo a área de trabalho com aquecimento de água para diversos fins com energia solar irá crescer. Este é um campo de trabalho em ascensão no Brasil. Portanto é necessário cada vez mais explorar e criar sistemas de avaliação e testes de desempenho de aquecimento solar.

Para poder realizar estudos de comportamento e desempenho de sistemas solares, é necessário seguir alguma normatização de teste. Existem normas para testes exclusivos de coletores, como a ABNT NBR 15747-2:2009. Mas no caso deste trabalho, o interesse era construir um sistema completo de aquecimento integrando-o a um novo modelo de chuveiro, baseado em um modelo existente da Nossa Ducha.

O trabalho então tem por objetivo a construção de uma bancada de testes baseada nas normas da ISO9459-1 para avaliação de sistemas de aquecimento solar. Esta bancada tem como finalidade testar o desempenho de sistemas solares de aquecimento de água, bem como realizar a integração de um chuveiro elétrico desenvolvido especialmente para este sistema. Com os resultados, portanto, é possível a sistemas diferentes serem comparados sobre condições idênticas de radiação solar, ambiente e carga.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na pesquisa bibliográfica efetuada, verificou-se que a maior parte das bancadas para avaliação de desempenho de sistemas solares térmicos é do tipo externa, onde a fonte de radiação empregada é a do sol.

Conforme Govaer (1988), coletores solares podem ser testados usando simuladores solares com lâmpadas incandescentes se a radiação for devidamente avaliada. Esta avaliação pode ser realizada para coletores fechados cobertos com vidro, utilizando um sensor de radiação (piranômetro). O piranômetro vai captar a correta radiação efetiva do simulador solar,

mesmo que este seja baseado em lâmpadas incandescentes. Existem muitos estudos com lâmpadas cuja radiação emitida aproxima-se mais da emitida pelo sol (GARG *et al.*, 1985), porém a construção de um simulador solar não foi explorada no presente trabalho.

Dintchev (2007) cita que é importante o desenvolvimento de instalações internas de baixo custo para testes de curto período e avaliação do desempenho térmico e eficiência de aquecedores solares de água domésticos produzidos no mercado local. As instalações devem ser utilizadas pelos fabricantes locais para testar e avaliar os sistemas e os componentes em diferentes estágios da fabricação.

Zilles (1987) cita que os testes com fonte natural em condições experimentais reais apresentam maiores problemas que os testes com fonte artificial, principalmente sob condições climáticas desfavoráveis. Porém, os testes com fonte natural refletem melhor as condições de trabalho dos coletores.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A primeira parte do trabalho foi o estudo e busca das normas já existentes na literatura para bancada de testes de sistemas solares. Foi identificada a norma ISO9459-1, que define procedimentos internos para testes de desempenho em Sistemas Domésticos de Aquecimento Solar de Água. A norma define doméstico como sendo para uso em residências e pequenos prédios comerciais. Também estabelece alguns requerimentos para o teste. A configuração é determinada por regras e a instalação deve ser feita conforme as instruções do fabricante, sendo baseada no diagrama da Figura 3.1.

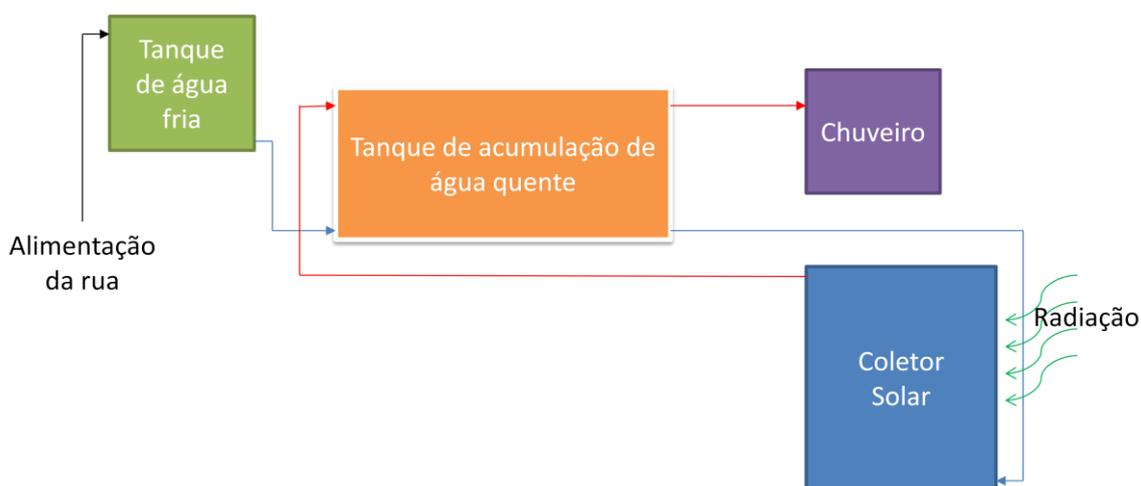


Figura 3.1 – Diagrama simplificado de funcionamento do sistema de aquecimento de água solar com utilização do termosifão

A Figura 3.1 mostra os principais componentes do sistema de aquecimento de água de baixa temperatura, com utilização de termosifão.

De acordo com a norma, o coletor solar é o equipamento designado para absorver energia radiante e transferir a energia térmica absorvida para um fluido passando através do mesmo. O caso em estudo é de um coletor de placa plana, que é o coletor solar onde a superfície absorvedora é essencialmente plana.

O tanque de acumulação de água quente é o recipiente mais o isolamento utilizado para armazenamento da água quente.

O tanque de água fria permite o abastecimento de água a pressão e vazão constante. E o chuveiro indica a saída de água quente do sistema.

O termo termosifão é empregado para designar um sistema que utiliza somente mudanças de massa específica do fluido para realizar a circulação entre o coletor e o tanque de acumulação.

A designação somente solar prevê que o sistema aqueça água sem o auxílio de energia auxiliar, fora alguma energia que seja necessária para movimentar a água ou para alguma espécie de controle.

Esta norma se aplica exclusivamente a sistemas de aquecimento solar específicos para aquecer água potável para ser fornecida para uso doméstico. E os procedimentos de teste são aplicáveis para sistemas com capacidade de armazenamento de 0,6m³ ou menores. O sistema avaliado foi com tanque de 200 litros, portanto dentro das especificações da norma.

A norma não está direcionada para ser usada para testar os componentes individuais do sistema, também não está intencionada a avaliar segurança dos mesmos.

Após o início do teste, a norma prevê que as cargas térmicas sejam calculadas para definir a contribuição global do sistema. A equação 1 calcula a carga térmica diária de água quente Q_L , em kJ, para um determinada temperatura desejada,

$$Q_L = \sum_{j=1}^n c_{pw}(t_{set} - t_{main})m_j \quad (1)$$

onde c_{pw} é o calor específico do fluido utilizado, em kJ/(kgK). As temperaturas t_{set} e t_{main} são em graus celsius, sendo t_{set} a temperatura desejada para o armazenamento da água quente, e t_{main} a temperatura de entrada de água fria. A massa m é a quantidade de água extraída em kg. O somatório prevê que as diversas extrações de água sejam somadas para calcular a quantidade de energia total.

A Equação 2 fornece a contribuição diária líquida Q_S de energia em kJ suprida pelo sistema solar,

$$Q_S = \sum_{j=1}^n c_{pw}(t_{sj} - t_{main})m_j \quad (2)$$

a temperatura t_{sj} é em graus celsius, sendo a temperatura da água que está sendo retirada do tanque de acumulação. As outras variáveis e unidades são as mesmas da Equação 1. A função do somatório é a mesma que na Equação 1.

A Equação 3 estabelece o percentual de contribuição solar SC ,

$$SC = \frac{Q_S}{Q_L} \quad (3)$$

sendo Q_S e Q_L os valores obtidos das equações 1 e 2.

Todas as medidas utilizadas deverão ser a partir dos dados do último dia de teste.

A incerteza de medição dos termopares é de 0,1°C, e a incerteza do manômetro é de 0,2l. Para os valores calculados de carga térmica e de fração solar foi utilizado o método de propagação das incertezas.

Para os testes com simulador solar, a temperatura ambiente deverá estar entre 15 °C e 30°C. E durante qualquer período de teste a temperatura não poderá variar mais do que $\pm 2^\circ\text{C}$.

Para a medição da radiação, a norma estabelece que a mesma seja medida em intervalos de distancias menores que 15 cm. E a radiação total incidente sobre o coletor deverá estar entre $\pm 5\%$ do valor total de 18000 kJ/m².

No teste final, as temperaturas deverão ser gravadas em intervalos de no máximo 4,5 kg de água retirada. E a drenagem deve continuar até que a temperatura de entrada e de saída do tanque de acumulação estejam com diferença menor que 3°C.

A norma estabelece também que planilhas com os dados do teste sejam preenchidas. Um exemplo preenchido com os dados do teste pode ser encontrado nos Apêndices deste trabalho.

4. DESENVOLVIMENTO DA BANCADA

4.1 A BANCADA

A intenção deste trabalho não é de simular um sistema para comparação ao sol real, e sim criar condições de comparar dois sistemas diferentes em condições semelhantes e controladas, com a utilização de um simulador solar com parâmetros conhecidos e medidos.

O projeto da bancada foi norteado pela norma ISO9459-1, que buscou viabilizar os testes de diversos tipos de coletores solares, e seu resultado é mostrado na Figura 4.1.

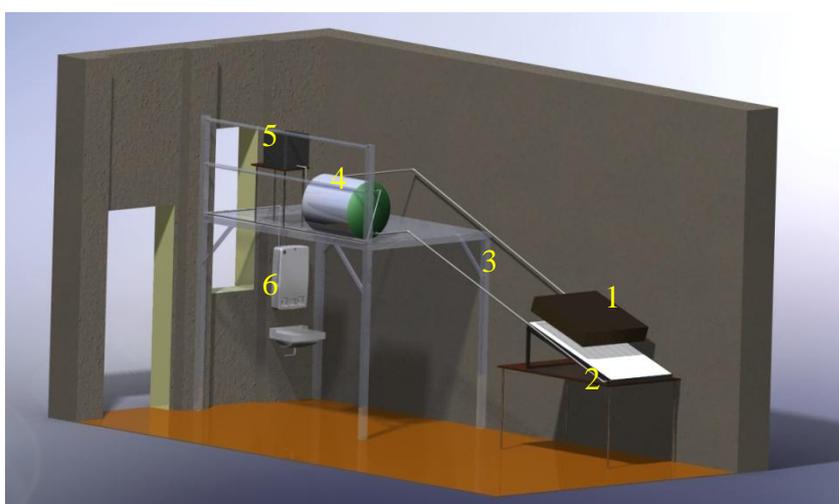


Figura 4.1 – Modelo da bancada de teste de sistemas solares

Na Figura 4.1 podem-se identificar os diversos componentes do sistema. Identificado como 1 esta o simulador solar. O coletor solar (2) juntamente com o encanamento (3), interligados ao tanque (4) e ao reservatório de entrada de água fria (5). Juntamente com a parte solar, esta montada a saída de água com um chuveiro (6) desenvolvido para ser operado com aquecimento solar. O mesmo tem como aquecimento auxiliar uma resistência elétrica.

Para a simulação do sistema será também utilizado um simulador solar que já existe no laboratório. O simulador irá aquecer o painel solar, e teremos diversas medições de temperatura no sistema. Exemplos destas medições são a entrada e saída do coletor, entrada e saída do tanque de acumulação, água no tanque de acumulação, saída do chuveiro, entre outros parâmetros que serão monitorados.

Após a aquisição do tanque e coletor, começaram os estudos para a aquisição das tubulações, registros, suportes, entre outros itens necessários.

A primeira etapa da construção era a definição do posicionamento dentro do laboratório de cada item, principalmente do tanque e coletor. Após este estudo, se iniciou a construção da bancada com o suporte do coletor. Definidas as distancias, os mesmos foram colocados em suas devidas posições, e as distancias necessárias para as tubulações foram medidas e os tipos de conexões especificados.

Os encanamentos foram isolados e os coletores montados conforme instruções do fabricante, em ângulo conforme as instruções do mesmo. O fabricante Jelly Fish estabelece que o

coletor solar deve ser montado a um ângulo mínimo de 10° de inclinação para ocorrer o efeito termosifão, e o fabricante também recomenda que além disto, seja colocado 10° de inclinação a mais que a latitude do local de instalação do coletor solar devido a melhor orientação solar para o coletor.

Para este trabalho, como o simulador solar estará fixo, portanto na melhor orientação para incidência da radiação, o ângulo mínimo deverá de 10 graus, sendo que não existe a necessidade do mesmo estar inclinado conforme a latitude. Devido as características físicas do local de instalação, o ângulo escolhido para o mesmo foi de 20° , que atende aos requisitos do fabricante e da norma. As conexões de entrada e saída de água quente devem ser isoladas por um material isolante.

Toda a tubulação de conexão entre o tanque e o coletor foi instalada com uma inclinação mínima de 2%, de forma a possibilitar um fluxo constante e não dificultar o efeito da circulação de água. Em todas as tubulações onde iria passar água quente foi utilizado tubos de CPVC especiais para esta aplicação. Os registros também foram todos adquiridos para trabalhar com água quente.

Nas figuras seguintes, é possível verificar a montagem da bancada e dos tanques de água fria e de acumulação.



Figura 4.2 – Instalações da bancada

O chuveiro foi construído usando materiais simples de tubulações, como joelhos, adaptadores, entre outros. O mesmo passou por diversas etapas, e três protótipos foram construídos. A Figura 4.3 ilustra o chuveiro construído.

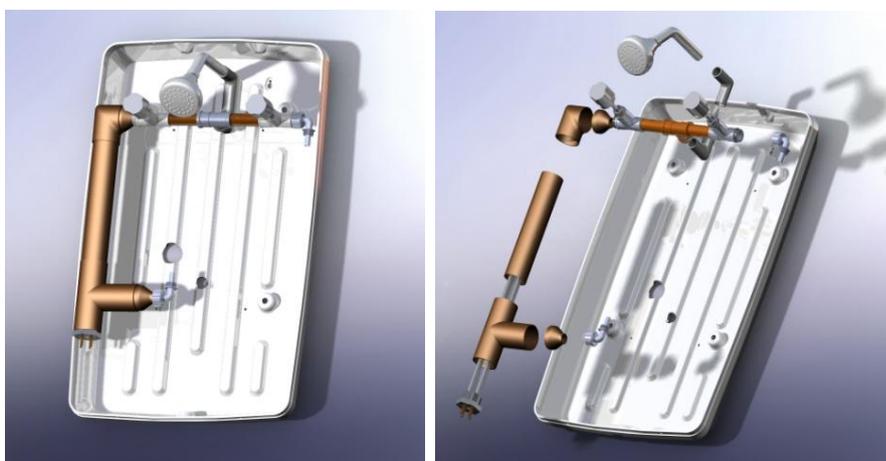


Figura 4.3 – Chuveiro elétrico de passagem

O chuveiro elétrico de passagem construído neste trabalho está demonstrado na Figura 4.3, e este foi o último protótipo construído. O mesmo está baseado em um chuveiro comerci-

al fabricado localmente. A carcaça e a maioria das partes são as mesmas deste modelo que possui tanque de acumulação próprio. O objetivo seria de modificar este modelo retirando a acumulação e transformando o mesmo em um chuveiro para ser usado como aquecimento auxiliar à sistemas solares.

4.2. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

Para conseguir adquirir os dados necessários dos testes considerando as recomendações da norma, além de outros dados auxiliares, foi necessário instrumentar a bancada com sensores de temperatura, vazão e radiação.

O equipamento de aquisição de dados utilizado foi o Agilent 34970A interligado a um computador PC rodando plataforma Windows XP com o software Agilent Benchlink Data Logger 1.4. Neste equipamento, foram conectados os termopares do tipo J e o piranômetro Kipp & Zonen Holland CM11. Estes equipamentos podem ser vistos na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Equipamentos de medição da bancada

Os termopares foram calibrados com um termômetro de mercúrio Incoterm, com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$, que pode ser visto na direita da Figura 4.4. A calibração foi efetuada para a faixa de temperaturas esperada para os ensaios e a incerteza de medição associada foi de $0,1^{\circ}\text{C}$.

O piranômetro Kipp & Zonen Holland CM11 utilizado tem uma constante de $4,75 \times 10^{-6} \text{V}/(\text{Wm}^{-2})$. De acordo com Duffie e Beckman (1980), um piranômetro é um instrumento capaz de medir a radiação total hemisférica incidente sobre um plano horizontal na faixa de $0,3$ a $3 \mu\text{m}$. Os sensores destes instrumentos devem ter uma resposta independente do comprimento de onda dentro do espectro solar. E eles devem ter uma resposta independente do ângulo de incidência da radiação. O piranômetro produz uma tensão através do seu sensor como uma função da radiação incidente. Então é necessário utilizar um equipamento para medir esta tensão.

Ainda de acordo com os mesmos autores, o vidro se torna substancialmente opaco para comprimentos de onda maiores que aproximadamente $3 \mu\text{m}$ e podem ser considerados opacos para radiação de ondas longas.

Na Figura 4.5 é possível visualizar o espectro de lâmpadas incandescentes.

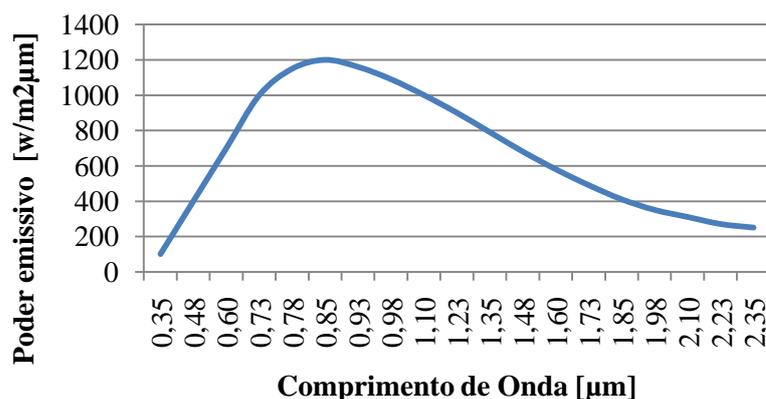


Figura 4.5 – Distribuição espectral de lâmpadas incandescentes (Adaptado de IENTILUCCI, 2000)

Conforme pode ser visto na Figura 4.5, o espectro das lâmpadas incandescentes com filamento de Tungstênio tem a maior parte da sua radiação na faixa de $0,35\mu\text{m}$ a $2,35\mu\text{m}$, abaixo do comprimento de onda onde o vidro se torna opaco ($3\mu\text{m}$).

Para medição da vazão de saída do chuveiro, foi utilizado um rotâmetro Applitech AP-750SS. Este rotâmetro tem como fluido de trabalho a água, para medir vazões de 1,2 a 12,5 l/min na pressão máxima de 2 bar. A resolução deste rotâmetro é 0,2l e que será usada como incerteza do equipamento.

4.3. O SIMULADOR SOLAR

É muito importante salientar que a intenção deste trabalho não é de simular um sistema para comparação com o sol real, e sim criar condições de comparar dois sistemas diferentes em condições semelhantes e controladas, com a utilização de um simulador solar com parâmetros conhecidos. A função deste simulador será apenas a de aquecer a placa coletora utilizando principalmente radiação, de uma forma controlada e igual para todos os testes.

Conforme Govaer (1988) pode-se utilizar um simulador com lâmpadas incandescentes. O simulador utilizado foi construído no LETA (Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos). O simulador foi reformado, onde ganhou uma pintura, proteção nos fios contra choques, e também lâmpadas novas.

Inicialmente foram trocadas as lâmpadas incandescentes comuns por lâmpadas incandescentes refletoras de 100W. Com as 12 lâmpadas de mesmo tipo, se iniciaram os testes para medição da radiação incidente sobre a placa. A figura seguinte mostra o mapeamento utilizado para as medições.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2		L		L		L		L	
3									
4		L		L		L		L	
5									
6		L		L		L		L	
7									

Figura 4.6 - Mapeamento do Simulador Solar

O SS tem 1m^2 de área, e esta área foi dividida em 63 partes conforme mostrado na figura 4.6. As partes em azul (identificadas com L) correspondem aos pontos exatamente abaixo das lâmpadas. Com esta distribuição, cada ponto teve a radiação medida com o piranômetro. Na configuração inicial, o simulador solar apresentou uma radiação superior à especificada pela norma, com um problema grave: as lâmpadas eram de 2 fabricantes diferentes, e cada uma apresentava uma quantidade de radiação muito diferente da outra. Outro fator relevante é que a emissão de radiação muda com o tempo de uso da lâmpada. Na Figura 4.7 é possível verificar a distribuição da radiação para esta configuração.

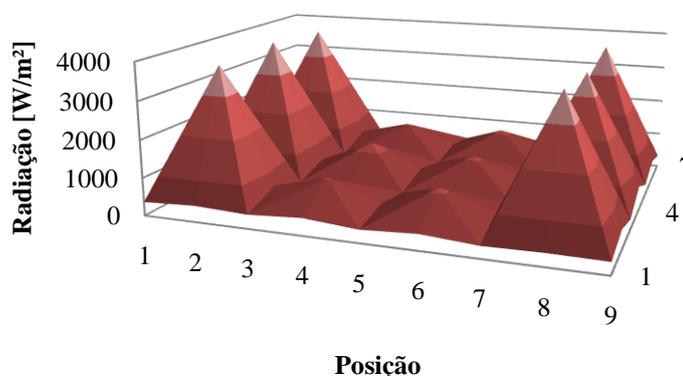


Figura 4.7 - Distribuição da radiação com Lâmpadas Refletoras de 100W

Como verificado na Figura 4.7, a diferença entre os pontos máximos e mínimos é muito grande, e fica muito diferente da especificação da norma. A norma também especifica que a radiação total máxima acumulada ao longo de um dia seja de $18000\text{ kJ/m}^2 \pm 5\%$. A norma estabelece procedimentos diferentes para os casos onde o simulador solar tem potência variável ou potência fixa. Para este último caso, a radiação máxima deverá ser de 556 W/m^2 aplicada durante 9 horas contínuas. Com a configuração do simulador solar apresentada na Figura 4.7, a radiação total acumulada seria de 31039 kJ/m^2 , muito acima do especificado.

Portanto novas configurações e posições do simulador solar foram testadas. Para evitar os picos concentrados de radiação, foram utilizadas lâmpadas incandescentes comuns. A primeira configuração testada foi de com lâmpadas de 200W de 127v. Na Figura 4.8 pode-se ver que a distribuição ficou mais homogênea, mas a potencia ficou muito alta.

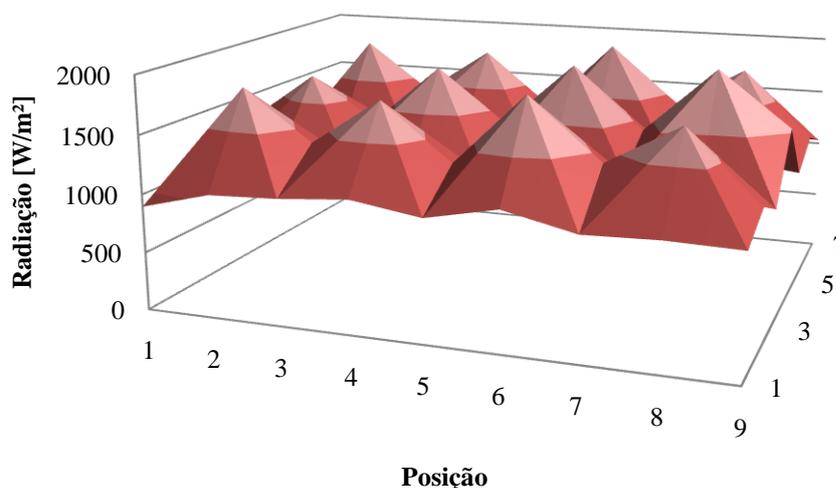


Figura 4.8 - Distribuição da Radiação com Lâmpadas Comuns de 200W

As lâmpadas então foram trocadas por lâmpadas de 100W 127v, e novamente foi mapeada a radiação incidente. A Figura 4.9 mostra esta nova distribuição.

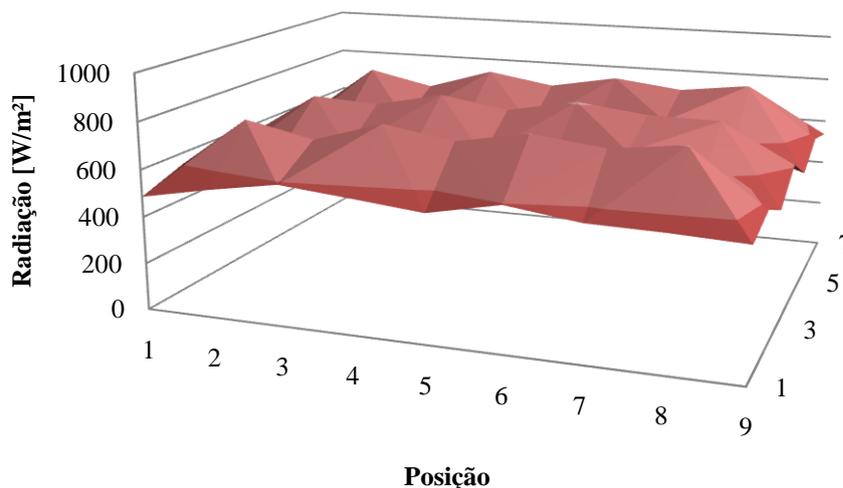


Figura 4.9 - Distribuição da Radiação com Lâmpadas Comuns de 100W

Como é possível verificar na Figura 4.9, a distribuição ficou mais próxima do esperado, mas ainda ultrapassava o máximo estabelecido pela norma. Uma das alternativas agora seria trabalhar com a altura do simulador em relação a placa coletora. Inicialmente o simulador solar foi elevado em 7 cm e novamente os dados foram coletados, a distribuição pode ser vista na Figura 4.10.

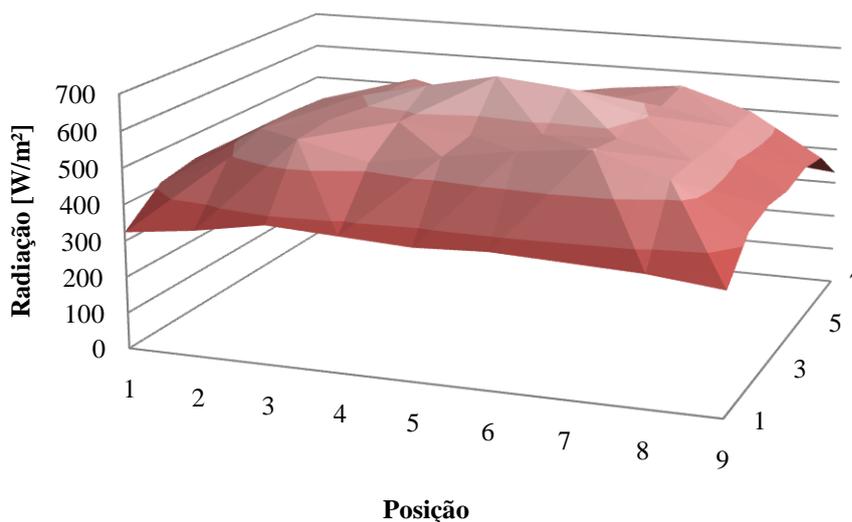


Figura 4.10 - Distribuição da Radiação com Lâmpadas Comuns de 100W e 7cm de elevação

Os valores estavam próximos ao desejado, mas agora estavam abaixo do necessário. E com 3,5 cm a radiação incidente média ficou dentro da faixa esperada, ficando em 554 W/m². A distribuição desta forma, e da maneira com que os testes do sistema foram realizados pode ser vista na Figura 4.11.

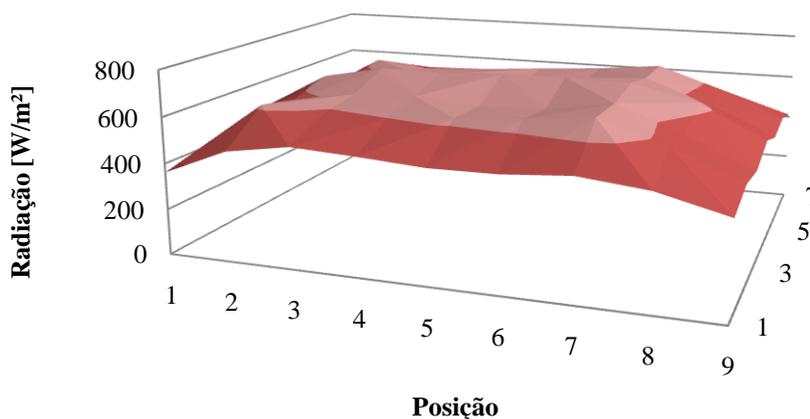


Figura 4.11 - Distribuição da Radiação com Lâmpadas Comuns de 100W e 3,5cm de elevação

Na Figura 4.11 pode-se observar que a radiação incidente ficou mais uniforme ao longo da placa. Também é possível observar que mesmo para lâmpadas novas, de mesmo fabricante e mesma potência, existem diferenças de emissão de radiação.

5. OPERAÇÃO E ENSAIOS

Utilizando o procedimento de teste conforme a norma, o tanque inicialmente deverá ser enchido com água fria na manhã do 1º dia. O sistema deverá ser ligado e deixar operar normalmente. Água deverá ser retirada em horários estabelecidos conforme tabela da norma (Anexo A). As figuras seguintes mostram o segundo dia de teste.

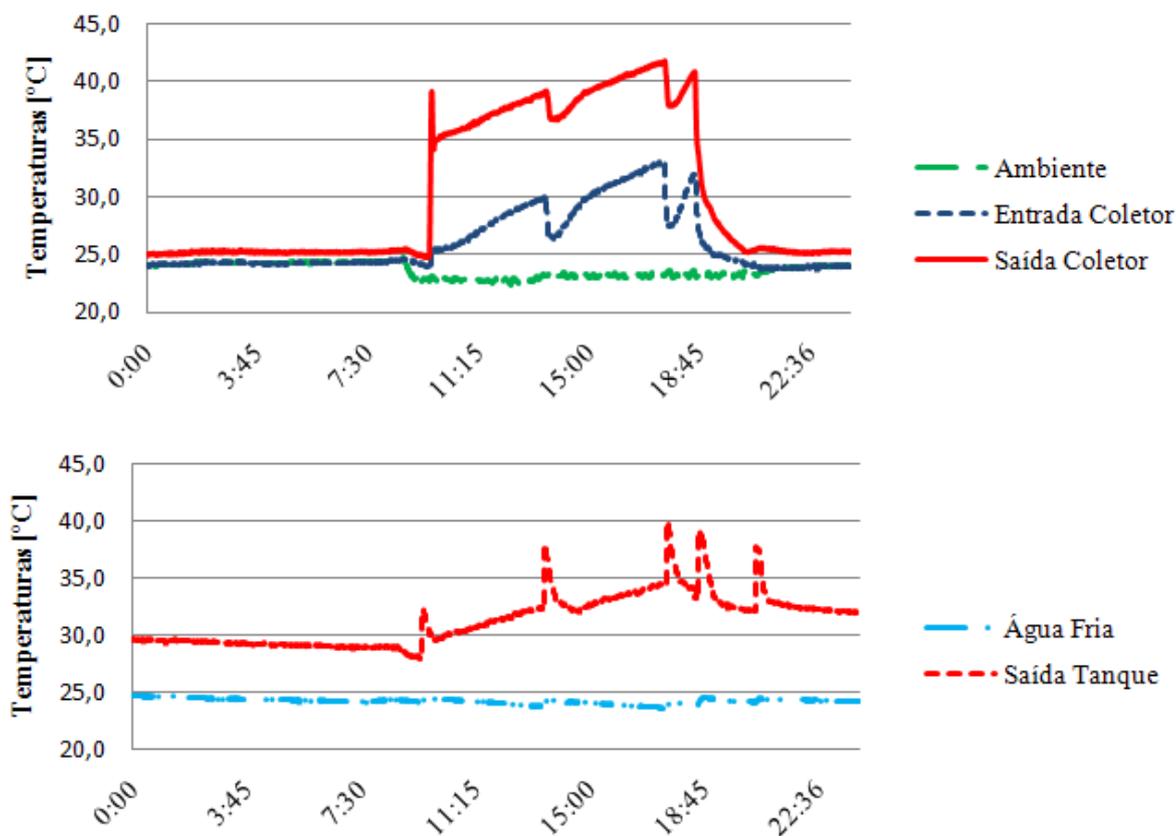


Figura 5.1 – Segundo dia de teste

Conforme pode ser visto na Figura 5.1, é possível verificar o comportamento das temperaturas de entrada e saída do coletor a cada retirada de água (20 litros, 5 vezes ao dia), os picos da saída do tanque, que correspondem a entrada de água fria no mesmo. Esta entrada de água fria ocasiona uma queda na temperatura de entrada no coletor, e conseqüentemente na temperatura de saída. Pode-se perceber também o período de 9 horas em que o simulador solar permaneceu ligado.

No último dia aconteceu o teste de retirada contínua. Este teste é realizado com a drenagem da água quente do tanque, monitorando constantemente as temperaturas de entrada e saída do tanque. O teste termina quando a temperatura de saída do tanque for no máximo 3^oC maior que a da entrada. Com este teste é possível identificar qual a capacidade de fornecimento de água quente do tanque. Uma curva de temperatura X vazão de água deverá ser obtida destes dados.

Durante a operação do sistema, alguns dados puderam ser extraídos para demonstrar o funcionamento de algumas características do sistema. A Figura 5.2 é um exemplo.

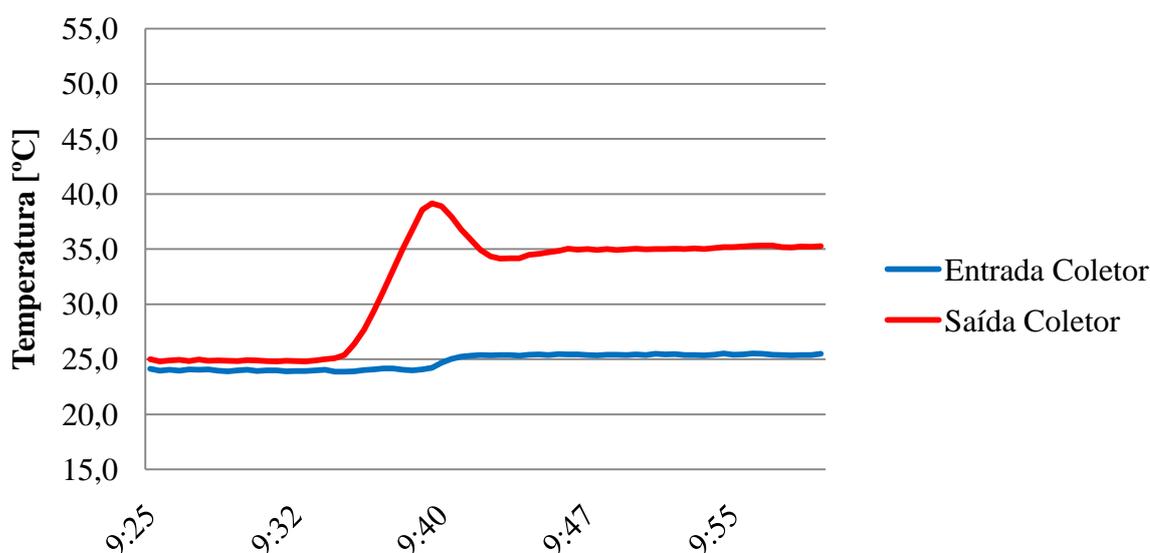


Figura 5.2 - Início do funcionamento do Termosifão

Como pode ser visualizado na Figura 5.2, o termosifão entra em funcionamento, levando a uma queda da temperatura da água de saída do coletor devido a entrada de água fria. Pode-se observar neste gráfico também o comportamento de dois sensores colocados no coletor, um sobre o vidro, e outro internamente sobre a placa coletora.

6. RESULTADOS

Para avaliação do tanque de acumulação, segundo Carvalho e Naron (2000), deve ser obtido o perfil de temperatura de extração. Este perfil caracteriza o comportamento do tanque de armazenamento com relação à mistura da entrada principal de água fria com a água quente dentro do tanque. Um tanque com a estratificação ideal permitiria a retirada de todo seu volume de água na mesma temperatura, independentemente da temperatura de entrada da água fria. A estratificação parcial acontece onde a maioria da água retirada está a aproximadamente a mesma temperatura. A figura 6.1 ilustra este comportamento.

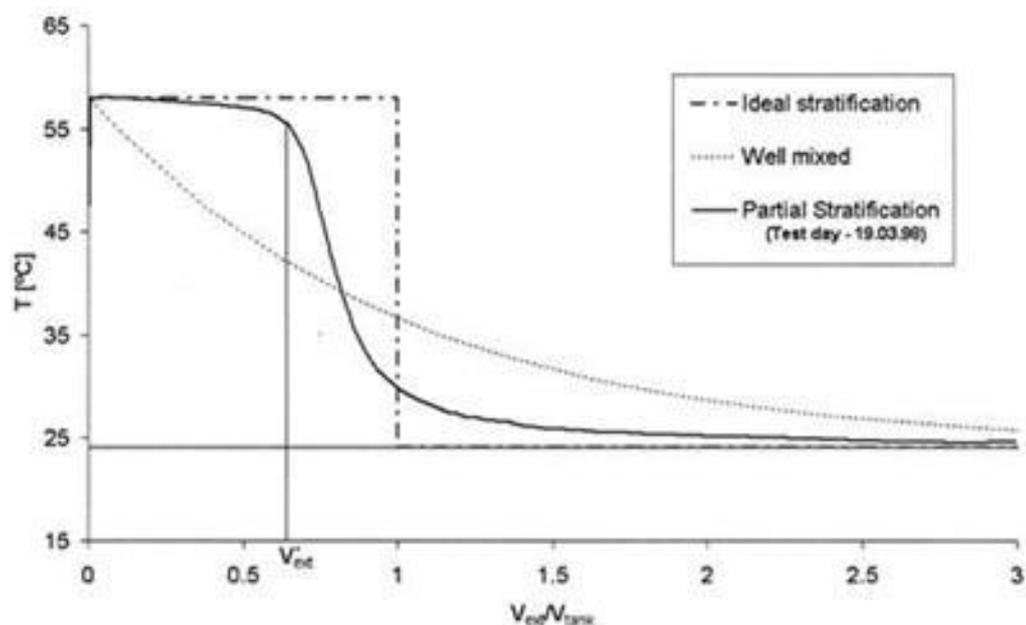


Figura 6.1 - Perfis de Estratificação (Fonte: CARVALHO e NARON, 2000)

Conforme visto na Figura 6.1, são três tipos de estratificação, sendo que a menos desejada para qualquer tanque de acumulação é a que demonstra uma mistura completa da água fria com a água quente.

No último dia de teste, alguns resultados foram obtidos e podem ser vistos nas figuras a seguir.

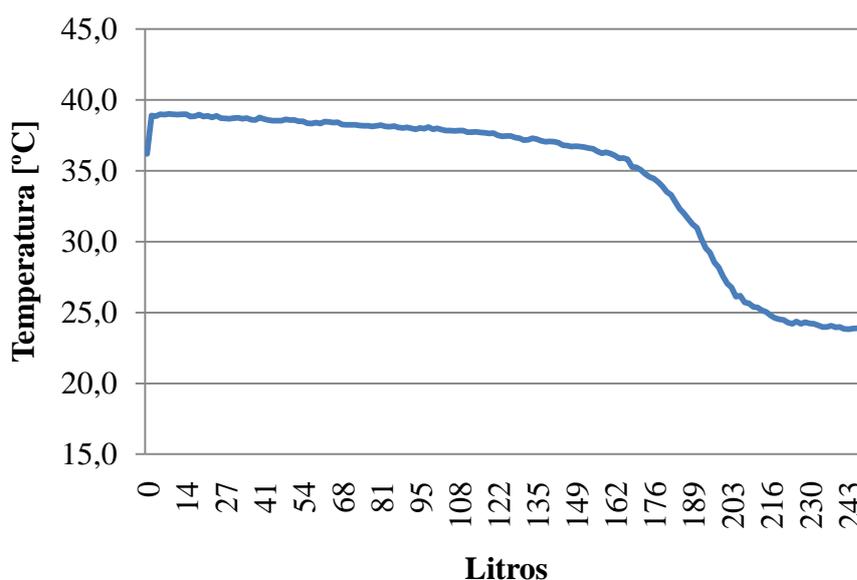


Figura 6.2 – Teste de capacidade térmica do sistema

Conforme pode ser visto na Figura 6.2, e de acordo com Carvalho e Naron (2000), o comportamento do tanque foi de estratificação parcial, sendo o comportamento esperado para este tipo de tanque e sistema. Na Figura 6.3 podemos verificar o comportamento com relação ao tempo.

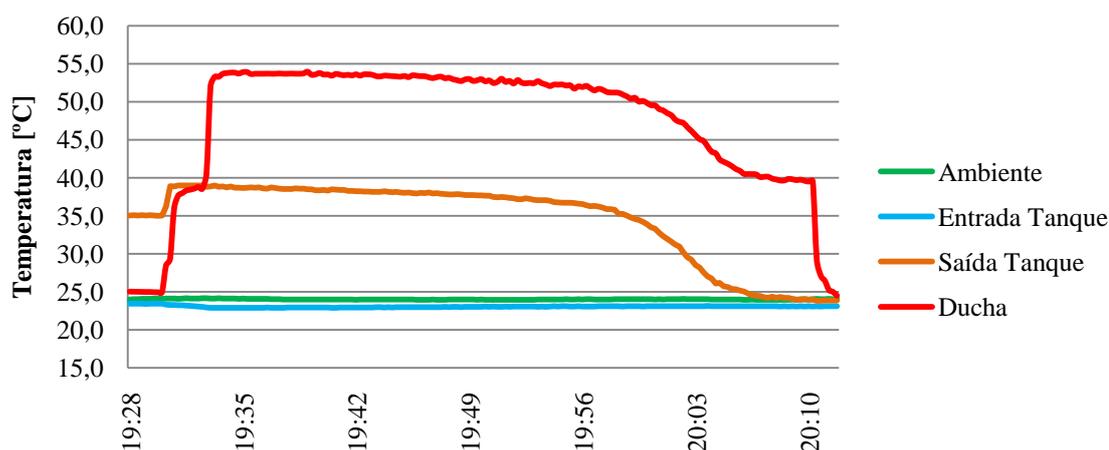


Figura 6.3 - Teste de capacidade térmica do sistema

Na Figura 6.3 pode ser verificado o comportamento da saída de água quente do tanque e a saída do chuveiro com o apoio elétrico ligado, sem misturar com água fria para adequar a temperatura ideal de banho. Os resultados obtidos deste gráfico podem ser visualizados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados Obtidos do Teste de Capacidade Térmica do Sistema

Litros	Temperatura [°C]
97,5±3,3	> 38
64,5±2,2	36 a 38
30,0±1,2	30 a 36
13,5±0,7	26 a 30

Conforme a Tabela 2 foram extraídos 205,5±4,2 litros de água com temperatura acima dos 26°C. Durante o teste a temperatura média da água de entrada foi de 23,1°C ±0,1°C.

Durante toda a drenagem do tanque, a resistência elétrica ficou ligada, aquecendo em média 15,5°C ±0,14°C a água, sendo que a temperatura máxima atingida foi de 53,9 °C ±0,1°C.

Ao final do ultimo dia de teste, as cargas térmicas foram calculadas utilizando as equações 1 e 2. E a fração solar é calculada utilizando a equação 3. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da Aplicação das Equações 1, 2 e 3

Variável	Valor
Q _s	6774 kJ ±77,72 kJ
Q _L	11319 kJ ±127,8 kJ
SC	59,84 % ±0,96 %

Conforme a tabela 3 pode ser verificado que este sistema nas condições do teste poderia suprir perto de 60% da demanda energética de aquecimento de água de uma residência pequena.

Outro dado interessante que pode ser extraído é a perda térmica durante o intervalo em que o simulador solar esta desligado. Para o sistema em estudo a diferença de temperatura média por hora em que o simulador esteve desligado foi de 0,17°C±0,1°C.

7. CONCLUSÃO

Após a montagem da bancada e rodar os primeiros testes, pode-se concluir que a montagem de bancadas internas de testes de desempenho associados a um baixo custo de instalação é possível.

Com os testes, foi possível identificar o comportamento e funcionamento do sistema termosifão em detalhes, e verificar na prática que o sistema proposto e composto pelos equipamentos instalados funciona e é capaz de atender a uma boa parcela da demanda de água quente de uma residência pequena operando sob condições similares de radiação solar.

Como resultado da avaliação dos testes com o sistema proposto, o mesmo chegou a suprir 60% da demanda estabelecida de água quente, utilizando um simulador solar que não reproduz as condições reais do sol. Os testes mostraram que a perda térmica do sistema é baixa, mantendo a água aquecida nos intervalos sem o uso do simulador solar. O sistema baixou em média $0,17^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ por hora. Outro dado relevante foi que o chuveiro construído para operar com o sistema funcionou, elevando em média $15,5^{\circ}\text{C} \pm 0,14^{\circ}\text{C}$ a temperatura da água quente. Utilizando o misturador com água fria, pode-se obter banhos de $38^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ com vazão de $10,5 \text{ l/min} \pm 0,2 \text{ l/min}$ durante mais de 16 minutos.

A norma ISO9459-1 especifica diversos parâmetros que devem ser fixados e registrados ao longo de um teste. Infelizmente devido as características técnicas e físicas do laboratório, algumas destas especificações não foram possíveis atender.

A norma especifica a temperatura de entrada de água como sendo $15 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Este item não foi possível atender devido a característica de alimentação da água fria, que durante os testes ficou em torno de $23,3 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$.

A norma também especifica que a temperatura ambiente deverá estar entre 15°C e 30°C , não podendo ter variações maiores que 2°C ao longo dos testes. A temperatura ambiente ficou em $23,1 \pm 1,4^{\circ}\text{C}$ ao longo dos 4 dias de teste.

Salienta-se na norma o fato de a mesma conter informações contraditórias sobre algumas especificações. No item 6.1.2 da norma, a mesma especifica que a inclinação do coletor deverá ser a especificada pelo fabricante do equipamento. No item 6.3.1.5 a norma especifica que o coletor deverá estar inclinado entre 30° e 60° , salvo se especificado diferente pelo fabricante. No anexo A a norma cita que o coletor deve estar instalado a 45° , salvo se especificado pelo fabricante. Outra especificação é sobre a temperatura ambiente. No item 6.2.2.2 a norma especifica a temperatura ambiente como devendo estar entre 15°C e 30°C , não podendo ter variações maiores que 2°C ao longo dos testes. A norma no Anexo A especifica a temperatura ambiente como devendo estar a $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Como sugestões para trabalhos futuros podemos citar o desenvolvimento de um simulador solar conforme especificado pelas normas ISO, que alcance o mais próximo do espectro real do sol e uma uniformidade maior da distribuição da radiação.

Também como sugestão fica a colocação de diversos sensores para medir as temperaturas dentro do tanque de acumulação, e mostrar a estratificação da temperatura dentro dele. Com isto buscando otimizações de forma e posição que melhorem a estratificação.

Outra sugestão é realizar análises para comprovar o efeito do sifão entre a caixa de água fria e o tanque de acumulação. Ou seja, realizar cálculos e medições para verificar qual o tamanho mínimo e qual a relação do tamanho com as capacidades e alturas dos tanques.

Para apoiar os fabricantes e principalmente os instaladores fornecendo informações que auxiliem o trabalho é muito importante o desenvolvimento de laboratórios com instalações para testes e avaliação do desempenho de sistemas solares para aquecimento de água domésticos produzidos no mercado brasileiro.

8. REFERÊNCIAS

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO9459-1: Solar heating - Domestic water heating systems - Performance rating procedure using indoor test methods**. Geneve, Switzerland, 1993.

GOVAER, D.; **Indoor collector testing with an incandescent simulator**; Muncie, IN, USA: Ball State University, 1988.

COLLE, S. **Situação da energia solar no Brasil**; Santa Catarina: LEPTEN/UFSC, 2008.

CARVALHO, M. J.; NARON, D. J. **Comparison of test methods for evaluation of thermal Performance of preheat and solar-only factory made systems**; Lisbôa, Portugal: INETI, Department of Renewable Energies, 2000.

FARIA, C. C. **Curso de projetos de sistemas de aquecimento solar**; São Paulo: Cidades Solares/ABRAVA, 2009.

IENTILUCCI, E. **Measurement of the Spectral Distribution of Gas Discharge, Fluorescent and Incandescent Sources**, Rochester, NY, USA: Rochester Institute of Technology, 2000.

DINTCHEV, O.D. **Developing of indoor testing facilities for domestic solar water heating systems**, South Africa: Tshwane University of Technology, 2007.

LOBÃO, E. **Projeto de Lei no. 5.210/2001 – Cria o Programa de Incentivos a Energias Renováveis**, Brasil: Senado Federal, 2001.

DANTAS, R. **Lei 5.184/08**, Rio de Janeiro, 2008.

RUSSOMANNO **Lei 14.459/07**, São Paulo, 2007

ZILLES, R. **Comparação experimental de testes de coletores solares planos com simulador e com radiação solar**, Porto Alegre: UFRGS, 1987.

GARG, H.P.; SHUKLA, A.R.; MADHURI; AGNIHOTRI, R.C.; CHAKRAVERTTY, S.; INDRAJIT **Development of a simple low-cost solar simulator for indoor collector testing**, India, 1985.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BECKMAN, W. A.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. **Solar heating design**. New York, USA: Wiley-Interscience Publications, 1977.

BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A; **Solar engineering of thermal processes**; 1980.

JELLY FISH, **Manual do Usuário: Sistema de Aquecimento Solar – Instalação e Manutenção**; São Paulo, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A - FOLHA PADRÃO DE TESTE CONFORME NORMA ISO9459-1

Data do Teste: 17 a 20 de Novembro de 2009

Observadores: Fábio Niemezewski da Rosa

Nome do fabricante: Jelly Fish

Sistema de Aquecimento Solar de Água no.: 01

Detalhes da Construção do Sistema

Dimensões de abertura e área do coletor: 1,58m x 0,98m / 1,54 m²

Dimensões totais e área do coletor: 1,6m x 1,0m x 0,65m / 1,6 m²

Número de coletores no sistema: 01

Dimensões do Tanque incluindo isolamento

Diâmetro: 0,69 m **Altura:** 0,69 m **Espessura do Isolamento:** não fornecido

Capacidade: 200 litros / 0,2 m³

Descrição o sistema de aquecimento solar de água doméstico, incluindo isolamento, válvulas, circulação, encanamentos, controles e pontos de controle: O sistema foi instalado conforme normas do fabricante, com inclinação do painel solar de 20 graus. O encanamento utilizado foi o CPVC, com isolamento térmico em toda a sua extensão. A circulação é feita pelo efeito termosifão. Foram instaladas válvulas nas 4 entradas/saídas do tanque e na entrada/saída do coletor. Foram instalados sensores de temperatura na entrada e saída do coletor, bem como na entrada e saída do tanque de acumulação.

Fluido de transferência de calor usado e suas propriedades

Fluido: água

Calor Específico: 4,18 kJ/kgK

Massa Específica: 997 kg/m³

Descrição dos aparatos de teste, incluindo configurações e instrumentação usada no teste. Para um termosifão, incluir o tamanho do encanamento e elevação do tanque de armazenamento sobre o coletor solar: A instrumentação utilizada foi de sensores termopar, ligados a um módulo de captura de dados Agilent. O coletor foi instalado 1,5 m abaixo do tanque de acumulação, com distância de encanamento total de 5 metros na entrada do coletor e de 4 metros na saída.

Temperatura Ambiente durante os testes: 23,1°C ±1,4°C

Temperatura da água de entrada no sistema, gravada durante cada retirada: Dados gravados em planilha automaticamente a cada 30 segundos

Temperatura da água de saída do tanque, gravada durante cada retirada: Dados gravados em planilha automaticamente a cada 30 segundos

Quantidade de água retirada durante cada teste: 20 litros

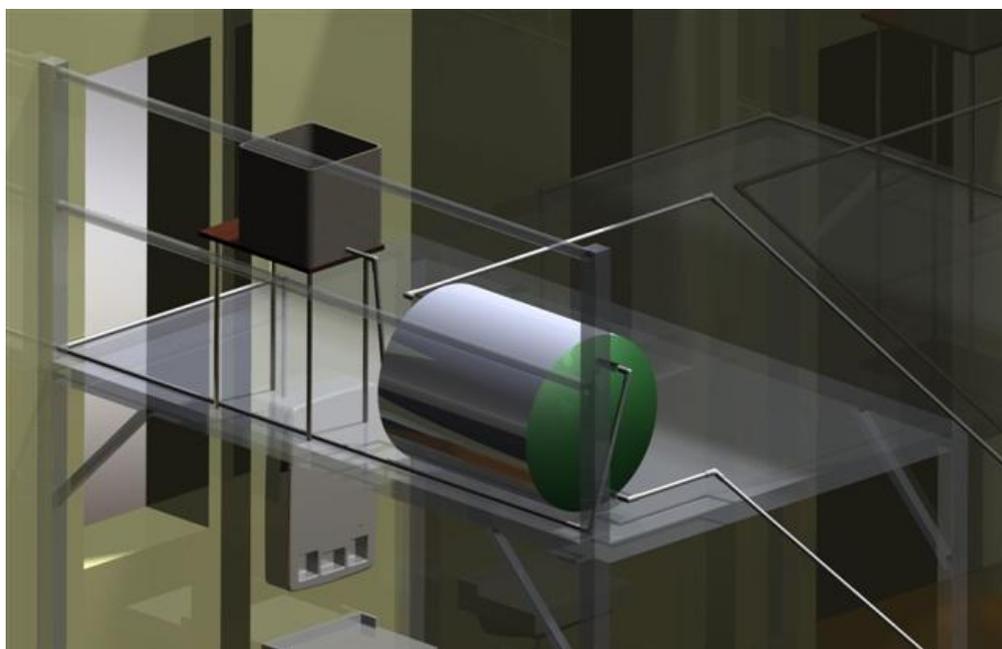
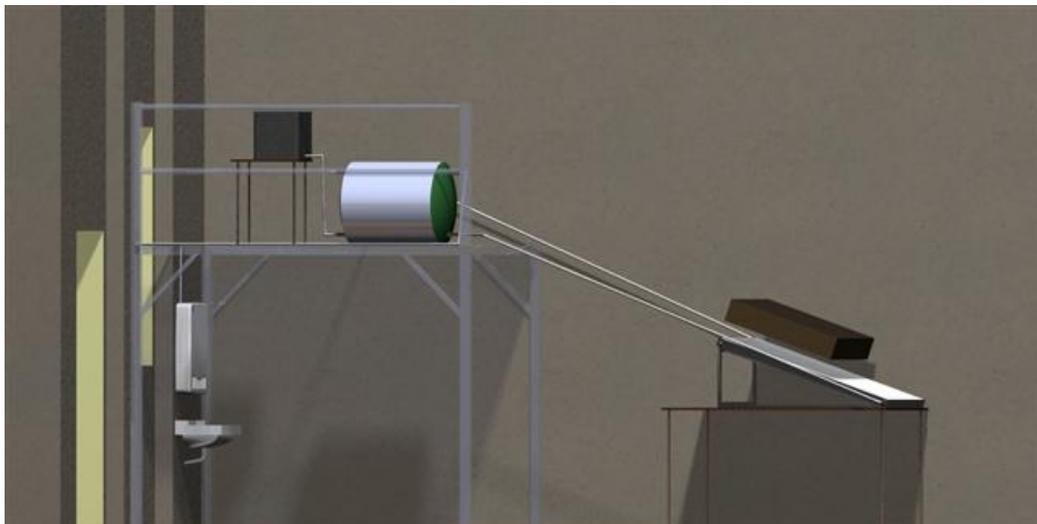
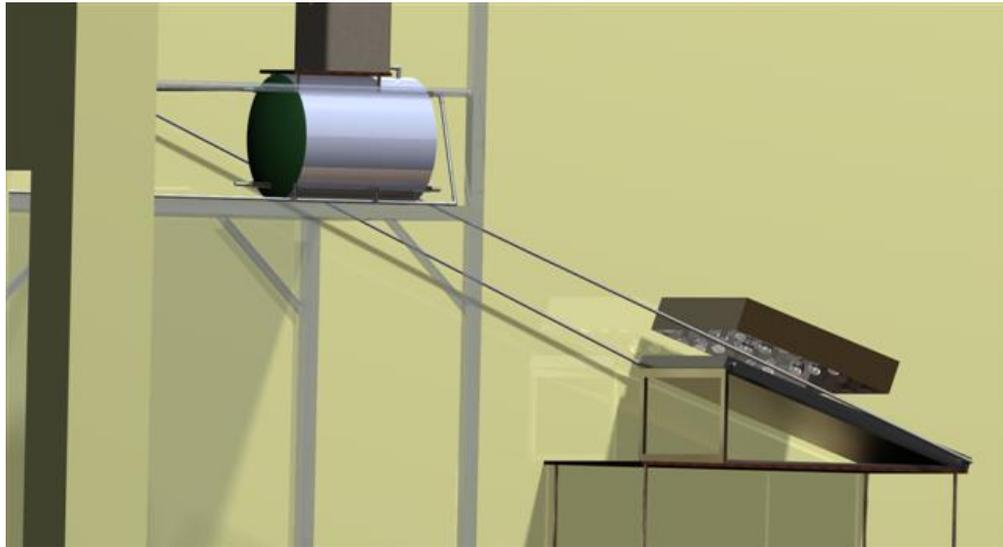
Testes - A contribuição solar deve ser determinada e registrada para o sistema em teste. Para cada retirada de água do sistema durante os testes para determinar a contribuição solar, os seguintes parâmetros devem ser registrados: m_j t_{wj} t_{main}

Numa base diária durante o teste para determinar a contribuição solar, os seguintes parâmetros devem ser registrados: Q_L Q_S SC

Para o teste de desempenho de suprimento de água quente, uma curva da temperatura de saída da água contra a quantidade de água retirada deve ser registrado, com e sem o uso de energia auxiliar se apropriado.

APÊNDICE B – FOTOS DA BANCADA



APENDICE C – PROJETOS DA BANCADA EM SOLID WORKS

APENDICE D – GRÁFICOS DO COMPORTAMENTO DAS TEMPERATURAS

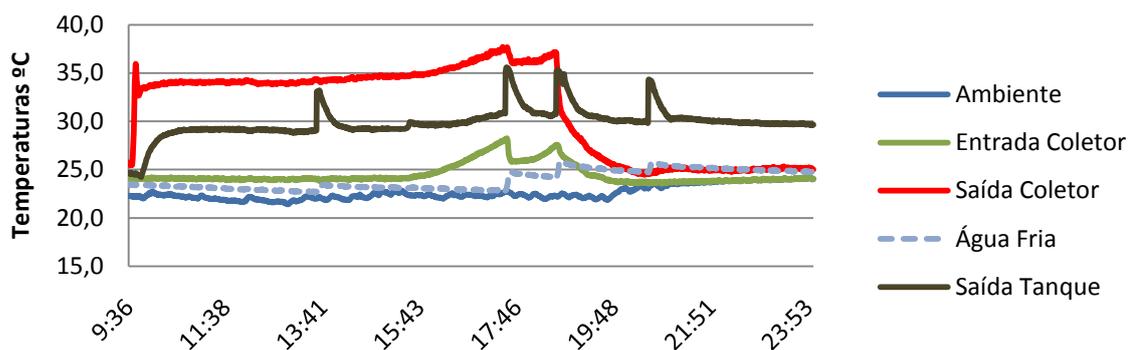


Figura D1 – Dia 01 do Teste – 17/11/2009

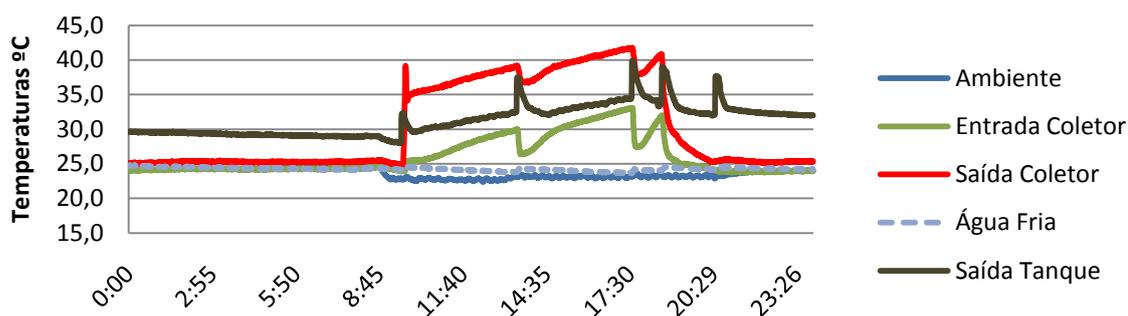


Figura D2 – Dia 02 do Teste – 18/11/2009

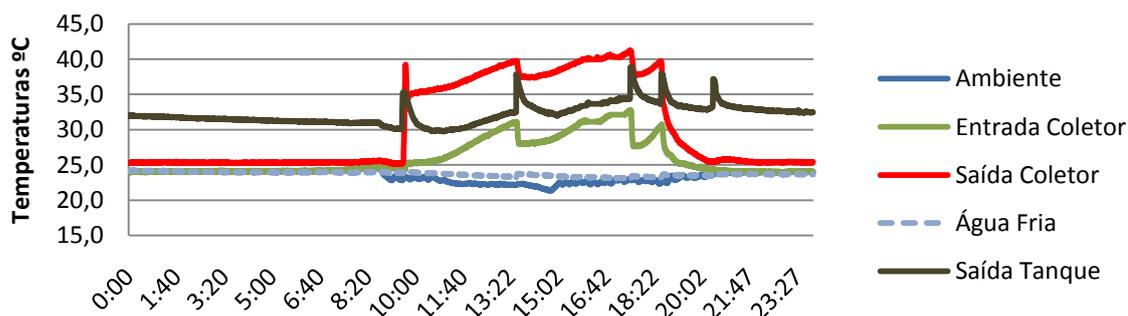


Figura D3 – Dia 03 do Teste – 19/11/2009

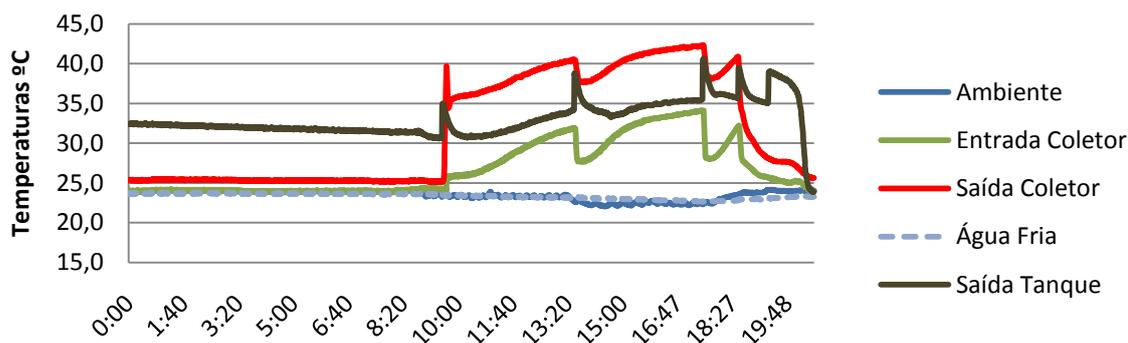


Figura D4 – Dia 04 do Teste – 20/11/2009

APENDICE E – CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Tabela 1 - Calibração dos Termopares

Termopar:	Temperaturas [°C]			
101	26,6	35,7	42,9	50,4
102	26,7	35,7	42,8	50,4
103	26,6	35,7	42,9	50,4
104	26,6	35,7	42,6	50,4
105	26,7	35,7	42,8	50,2
106	26,5	35,7	42,9	50,2
107	26,6	35,7	42,9	50,3
108	26,5	35,6	42,3	50,3
109	26,6	35,7	42,9	50,2
Média dos Termopares	26,6	35,7	42,8	50,3
Mercurio (Referência)	26,7	35,7	42,9	50,4

ANEXOS

ANEXO A – CONDIÇÕES DO TESTE DE DESEMPENHO TÉRMICO

Table A.1 — Conditions for thermal performance test of SDHW systems

Time (h)	Incident radiation		Hour angle, ω (°)	Incident angle, θ (°)	Load, V (litres)	
	Non-solar day [kJ/(m ² ·h)]	Solar day G_{sp} [kJ/(m ² ·h)] G_d [kJ/(m ² ·h)]				
0800-0900	0	694	576	- 60	60	0,2 V
0900-1000	0	1 224	576	- 45	45	
1000-1100	0	1 624	576	- 30	30	
1100-1200	0	1 884	576	- 15	15	
1200-1300	0	1 964	576	0	0	0,2 V
1300-1400	0	1 884	576	15	15	
1400-1500	0	1 624	576	30	30	
1500-1600	0	1 224	576	45	45	
1600-1700	0	694	576	60	60	0,2 V
1700-1800						0,2 V
1800-1900						
1900-2000						0,2 V
Total	0	12 816	5 184			V