



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Conceção, construção e ensaio de um calorímetro
para bancos de ensaio de coletores solares a
temperaturas entre 100° C e 200° C**

João Paulo da Cruz Marchã

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2016



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Conceção, construção e ensaio de um calorímetro
para bancos de ensaio de coletores solares a
temperaturas entre 100º C e 200º C**

João Paulo da Cruz Marchã

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2016

Resumo

Os Fluidos de Transferência Térmica (HTF) usados em colectores solares (óleos sintéticos) tendem a envelhecer e degradar [1]. Esta degradação é impossível de controlar e afecta a capacidade do HTF e tem implicações na medida da performance do dispositivo em que é usado o HFT (colector solar) uma vez que são usados os valores de capacidade térmica iniciais. O ensaio de colectores solares depende de uma medida exacta do produto de HTF e caudal mássico. Estes ensaios por imposição de normas só são possíveis com caudalímetros com exactidão e resistência a temperaturas elevadas pelo que são dispositivos algo dispendiosos. Para medidas de Potência, como as que são feitas no ensaio de colectores solares, a medida directa do produto do calor específico pelo caudal mássico é o que se exige e não necessariamente a medida separada das duas grandezas. A estratégia para medir directamente a o produto é uma técnica calorimétrica que permite medir com exactidão estas grandezas. Soluções deste tipo já foram propostas [2,3]. Neste projecto pretende-se rever e melhorar a solução apresentada em [2] e demonstra a utilidade num circuito de ensaio de colectores solares para temperaturas até 200°C. Foi concebido e ensaiado um prototipo de calorímetro, que se calibrou com água e usou-se a calibração para medir o calor específico de um HFT cujo resultado foi comparado com os valores fornecidos pelo fabricante. Conseguiram-se bons resultados e demonstrou-se que esta técnica pode ser facilmente implementada em circuitos de alta temperatura e para quaisquer tipo de fluidos.

Development and test results of a calorimeter for solar thermal testing

loops with temperatures between 100° C and 200° C

Abstract

Thermal heat transfer fluids (HTF) used in solar collectors (e.g. synthetic oils) are known to age and degrade [1]. This degradation is impossible to control, affecting the fluid heat transfer capacity and thus the ability of measuring the performance of an HTF heating device (e.g. a solar collector) based on known specific heat values. Collector testing is also crucially dependent on an accurate measurement of HTF mass flow rate. Such measurement relies on flow meters suitable for the accuracy, operating temperature and flow range requirements of the testing procedures, often an expensive and demanding component in particular when non-intrusive measurements are to be done in a close circuit. For power measurement purposes, as those performed in solar collector testing procedures, a direct measurement of the product between specific heat and mass flow rather than a separate measurement of both quantities is suitable. A calorimetric technique delivering this direct measurement is thus a suitable strategy to overcome such difficulties with acceptable (and even higher) measurement accuracy. Solutions of this kind have already been proposed [2, 3]. In this paper we revisit and improve the solution presented in [2] and demonstrate its usefulness in a solar collector testing loop, for temperatures up to 200°C. A calorimeter prototype was thoroughly tested and calibrated with water as HTF (enabling accurate independent measurement of specific heat and mass flow rates values). Calorimeter calibration results were then used in the testing with thermal oil whose specific heat values were previously known from manufacturer and independent laboratory measurements. A comparison of C_p measured by the calorimeter with the value given by the HTF manufacturer is used to test the

calorimeter capacities. The agreement achieved was very good. It is noted that the technique can be easily implemented in any high temperature loops, large or small, and for any HTF.

Agradecimentos

No decorrer da presente dissertação contei com a ajuda directa ou indirecta de inúmeras pessoas pelo que agradeço em geral a todos os amigos e familiares estiveram comigo durante este caminho.

Quero agradecer ao meu Orientador e Amigo, Professor Manuel Collares Pereira que sempre me guiou e apoiou especialmente nos momentos em que estava "com tempo record, perdido no meio do oceano".

Quero agradecer ao meus "camaradas" da Cátedra pelo essencial bom ambiente criado no grupo e estarem sempre disponíveis para a ajudar, em particular agradecer ao Tiago a sua ajuda e partilha de experiência sem a qual esta dissertação não teria sido possível.

Quero agradecer à FCT que financiou o projecto que deu origem a esta dissertação.

Por ultimo gostaria de expressar o meu especial agradecimento à Cláudia e aos meus pais que sempre estiveram comigo desde o inicio.

Muito obrigado a todos.

Acrónimos e Nomenclatura

\dot{m} caudal mássico em (kg/min)

$C_p(T)$ calor específico do fluido á temperatura média $T = (T_{in} + T_{out})/2$ em (J/kg.°C)

T_{out} temperatura de saída (°C)

T_{in} temperatura de entrada (°C)

P_{col} potencia dissipada pelo colector solar (W)

P_c potencia dissipada no calorímetro (W)

$T_{out_{cal}}$ temperatura de saída (°C)

$T_{in_{cal}}$ temperatura de entrada (°C)

F factor de calibração do calorímetro

CI câmara interna do calorímetro

CE câmara externa do calorímetro

HTF fluido de transferência térmica

a, b constantes da regressão linear

PID controlador proporcional integral derivativo

$\eta(T)$ rendimento á temperatura média $T = (T_{in} + T_{out})/2$

T_{red} temperatura de reduzida (°C.m²/W)

CPC colector parabólico composto

G irradiação no plano do colector

R^2 coeficiente de determinação

PT100 termoresistencia de platina que a 0°C tem uma resistencia de $100\ \Omega$

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iv
Índice	x
Lista de Figuras	xii
1 Introdução	1
2 Conceito	5
3 Concepção e Descrição do Calorímetro	9
3.1 Estado da Arte	9
3.2 Desenvolvimento do Calorímetro	13
4 Calibração	17
4.1 Metodologia de Ensaio	17
4.2 Desenvolvimento e Implementação do Circuito de Ensaio .	19
4.3 Instrumentação e Controlo	20
4.4 Ensaios	21
4.5 Calibração, Equação do Calorímetro	21
5 Aplicações do Calorímetro	23
5.1 Introdução	23
5.2 Medida do $C_p(T)$ de um Óleo Térmico	24

5.2.1	Configuração do Circuito	24
5.2.2	Ensaio	24
5.2.3	Resultados	25
5.3	Aplicações	27
5.3.1	Aplicação à medida de rendimento de um colector solar com óleo térmico e comparação dos resultados obtidos com a medida de rendimento num circuito a água	27
5.4	Outras Aplicações	27
5.4.1	Ensaio CPC Reelcoop	27
6	Conclusões e trabalho futuro	29
	Lista Publicações	31
	Referências bibliográficas	34
A	Desenhos Técnicos Usados para a Construção do Calorímetro	37
B	Equipamentos e Características dos Circuitos de Ensaio	43
C	Sistema de Aquisição e Controlo	49
D	Development and test results of a calorimetric technique enabling fluid properties independent HFT energy content measurement	63

Lista de Figuras

1.1	Principais aplicações da Energia Solar Térmica em função da temperatura, DHW- Águas quentes sanitárias, HWS - Aquecimento domestico, HW Ind.- Calor de processo, SH - Aquecimento (Ar), SEA -, fonte: comunicação privada Professor Collares Pereira	2
1.2	Tecnologias solares térmicas, fonte: comunicação privada Professor Collares Pereira	2
2.1	Tipos de colectores e temperaturas de funcionamento	6
2.2	rendimento em função da temperatura reduzida	7
3.1	Setup do calorímetro para medir Cp da plataforma KONTAS, fonte:[3]	10
3.2	Esquema uni-filar do setup para o calorímetro da plataforma KONTAS, fonte: [3]	10
3.3	Vista em corte do calorímetro da Nota Técnica [2], reservatório externo, fonte: 2	12
3.4	Vista em corte do calorímetro da Nota Técnica [2], reservatório interno, fonte: [2]	13
3.5	(a)Visão em Corte do Calorímetro, com sentido de circulação do fluido, (b)Câmaras por assemblar do Calorímetro	14
4.1	Circuito de Água	19
4.2	Exemplo de output do programa	20
4.3	Comparação de $\dot{m}CP _{real}$ com $\dot{m}CP _{cal}$ para diferentes temperaturas (45, 65, 85) e caudais aproximados de 1, 2, 3 e 4 Kg/min e com as respectivas barras de erro	21

5.1	Circuito hidráulico do óleo (a)esquema (b)foto	24
5.2	Tabela 1 Valores de C_p obtidos nos vários ensaios	26
5.3	Valores $C_p(T)$ obtidos nos vários ensaios e fornecidos pelo fabricante	26
5.4	a) Colector do tipo CPC b) Eficiência calorimétrica para ensaios a água e óleo	27
B.1	Esquema unifilar do circuito de Água	44
B.2	Bomba de circulação usada no circuito de Água	45
B.3	Caudalímetro usado no circuito de Água	45
B.4	Variador de Frequência usado no circuito de Água	45
B.5	(a)Esquema unifilar do circuito de óleo (b)foto	46
B.6	Bomba de circulação usada no circuito de Óleo	46
B.7	Caudalímetro usado no circuito de Oleo	46
B.8	Variador de Frequência usado no circuito de Óleo	47
B.9	Chiller para arrefecimento de ambos os circuitos	47

Capítulo 1

Introdução

As aplicações da energia solar térmica, a temperaturas acima dos 80°C (acima de 80°C perspectivam-se aplicações de aquecimento e arrefecimento em edifícios, dessalinização, calor de processo industrial - água quente e vapor, refrigeração, etc.) constituem o próximo grande desafio para a Energia Solar, a exigir colectores do tipo concentrador e novas soluções de engenharia, que, uma vez desenvolvidas, terão um enorme interesse comercial para as empresas do sector e para os potenciais utilizadores.

A Figura 1.1 apresenta um resumo das várias aplicações que se perspectivam para diferentes faixas de temperatura. A faixa de temperatura dita intermédia ou média e que se estende dos 80°C aos 200°C, poderá ser coberta por colectores concentradores, estacionários, quasi-estacionários, com seguimento, com ou sem combinação com tubos de vácuo.

As tecnologias referidas na Fig. 1.2, muitas delas ainda em desenvolvi-

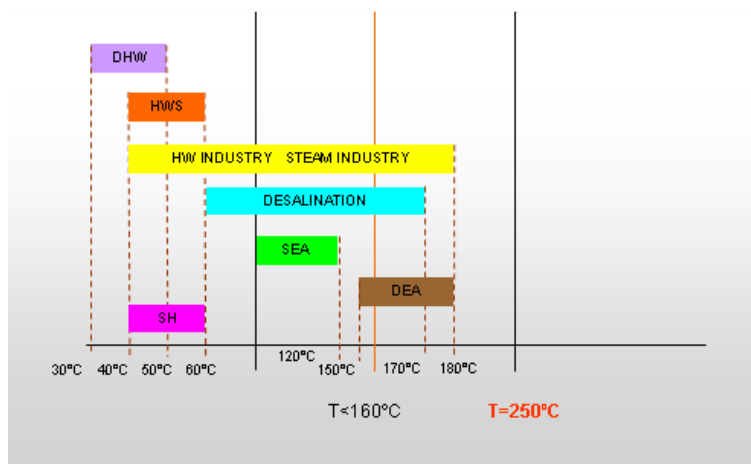


Figura 1.1: Principais aplicações da Energia Solar Térmica em função da temperatura, DHW- Águas quentes sanitárias, HWS - Aquecimento domestico, HW Ind.- Calor de processo, SH - Aquecimento (Ar), SEA -, fonte: comunicação privada Professor Collares Pereira

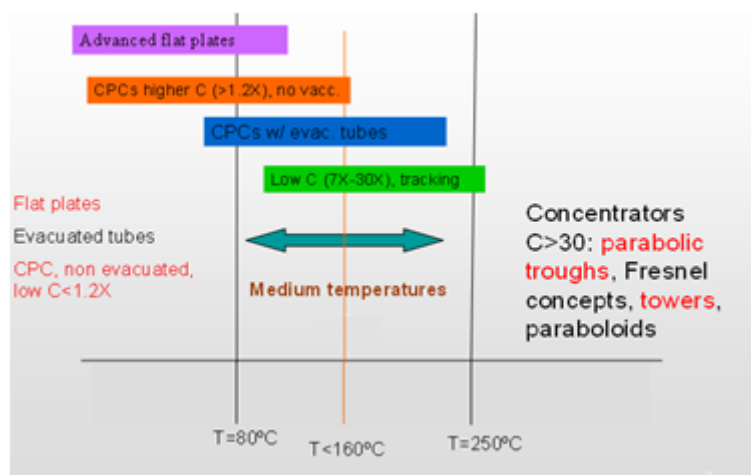


Figura 1.2: Tecnologias solares térmicas, fonte: comunicação privada Professor Collares Pereira

mento, exigem novos bancos de ensaios de rendimento dos colectores. Em contraste com os bancos de ensaios que estão hoje disponíveis para colectores que são ensaiados até aos 80°C em circuitos a água, estes bancos de ensaios exigem circuitos com água sob pressão ou com recurso a fluidos térmicos (óleos térmicos) que tornam estes circuitos mais complexos, em particular no que diz respeito à obtenção de condições de estabilidade para se produzirem os pontos de leitura estabelecidos pelas normas e, sobretudo, no que diz respeito ao conhecimento preciso do valor do caudal de circulação e do calor específico do fluido (normal-

mente função significativa da temperatura) na faixa das temperaturas médias referida. A questão da medida do caudal com precisão suficiente [4] ($\leq 2\%$) é particularmente delicada pelo tipo de aparelhos que estão disponíveis para caudais intermédios (300 a 700 litro/hora) de fluidos que não sejam água. A questão do calor específico do fluido é também complexa, não tanto porque as propriedades não sejam conhecidas (fornecidas pelo fabricante) quando o fluido é introduzido no circuito, mas porque este se vai degradando e o impacte que essa degradação tem sobre o valor do calor específico não é conhecido/controlável! Em [2] este problema foi abordado de forma experimental, com a construção e ensaios de um calorímetro, propondo a medida directa do produto caudal pelo calor específico em vez da medida separada das duas grandezas, com bons resultados. Contudo não foram feitos ensaios em circuitos na faixa das temperaturas intermédias, nem com fluidos térmicos que não a água. A presente dissertação visa a concepção, construção e ensaio de um calorímetro de precisão para circuitos de ensaio de colectores solares até temperaturas da ordem de 200°C , para qualquer tipo de fluido.

Capítulo 2

Conceito

Um colector solar convencional é composto por uma superfície receptora negra e em contacto com esta superfície circula um fluido que irá aquecer e captar a energia solar. Essa superfície geralmente encontra-se dentro de uma caixa com um vidro ou outra superfície transparente que permite a passagem da radiação solar, está também bem isolada termicamente para evitar perdas da energia captada, a este tipo de colectores chama-se usualmente colector plano. Aplicando o mesmo conceito também se usam tubos de vácuo que permitem a passagem da radiação solar e no seu interior têm como superfície um tubo metálico onde circula um fluido que irá aquecer ao captar a energia solar.

Também é possível, mediante ópticas sofisticadas, concentrar a radiação solar num tubo de vácuo ou numa superfície que permita a passagem da radiação solar e que seja bem isolada e no qual circula um também um fluido, na Figura 2.1 estão representados os vários tipos de colector e a respectiva faixa de temperatura de utilização.

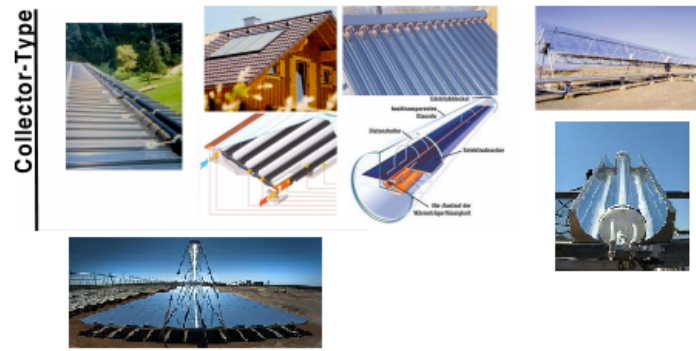


Figura 2.1: Tipos de colectores e temperaturas de funcionamento

O rendimento instantâneo de um colector é definido pela razão entre a energia captada a uma dada temperatura e a energia incidente:

$$\eta(T) = \frac{P_{col}(T)}{AI_{col}} \quad (2.1)$$

Na definição de rendimento surge a necessidade de se medir a potência (energia) captada. Em termos instantâneos escreve-se:

$$P_{col} = \dot{m}Cp(T) \times (T_{out} - T_{in}) \quad (2.2)$$

Na figura 2.2 e a título de exemplo estão representados os rendimentos para os vários tipos de colectores

Com o objectivo de normalizar as medidas do rendimento do colector utiliza-se a temperatura reduzida:

$$T_{red} = \frac{T - T_{amb}}{G} \quad (2.3)$$

No caso do ensaio para calculo de rendimento ser realizado a uma T_{amb} de

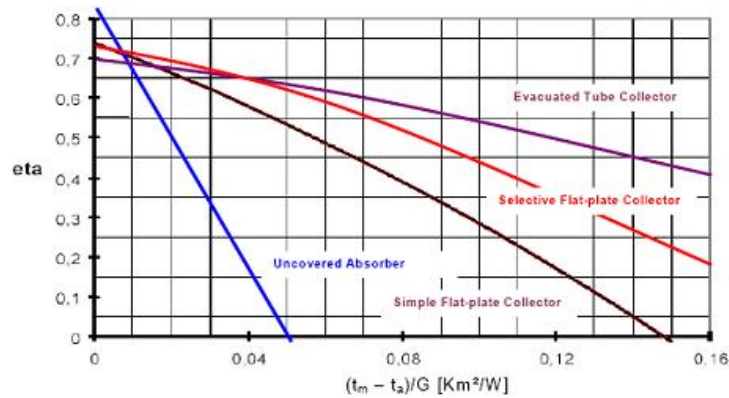


Figura 2.2: rendimento em função da temperatura reduzida

20°C e com uma radiação de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ para uma T_{red} de $0,1(\text{m}^2/\text{W})$ significa que o fluido no interior do colector atingiu 120°C . Para obter a curva de rendimento de um colector são realizados ensaios a diferentes temperaturas médias T_m e em condições estáveis definidas pela norma [4]. Para o calculo de rendimento de colectores planos é relativamente fácil obter, com água, os pontos que caracterizam a respectiva curva de rendimento uma vez que até 100°C não se necessita um circuito hidráulico muito complexo (na prática resulta difícil ensaiar com água acima de 90°C , devido à proximidade aos 100°C no próprio colector, aumento de pressão associado e proximidade à mudança de fase). No entanto para temperaturas superiores a 100°C e ensaios com água, a pressão no circuito hidráulico irá ser mais elevada o que traz problemas de custo e segurança nos circuitos de ensaio de colectores solares para temperaturas intermédias. Por exemplo fazer um ensaio a uma T_m de 180°C , com agua, significa que a pressão a que o circuito de ensaio e os seus componentes têm que suportar será superior a 10bar .

Em (2.1) tem-se que para obter P_{Col} é necessário conhecer o caudal \dot{m} e

calor específico $C_p(T)$ do fluido. \dot{m} é medido através de um caudalímetro e $C_p(T)$ para o caso da água é bem conhecido [5], esta é grande vantagem da água como fluido de ensaio. No entanto para ensaio de rendimento de colectores que atingem T_{red} elevadas é necessário construir circuitos de ensaio mais complexos/dispêndiosos para permitir atingir pressões superiores, a alternativa a isto é usar outros fluidos, por exemplo óleos térmicos, uma vez que assim é possível, por exemplo atingir temperaturas na ordem dos $200^\circ C$ próximo da pressão atmosférica. No caso dos óleos térmicos o problema é o $C_p(T)$ que embora seja fornecido pelo fabricante, como os óleos tendem a degradar-se [1], isso torna difícil a realização destes ensaios com precisão antes de (2.4).

Na presente presente dissertação, propõe-se medir directamente $\dot{m}C_p(T)$ através de um calorímetro, colocado em série no próprio circuito de ensaio, onde se dissipa uma potencia conhecida P e são medidas as temperaturas de entrada e saída no calorímetro, como indicado em 2.4.

$$\dot{m}C_p(T) = \frac{P_c}{(T_{out_{cal}} - T_{in_{cal}})} \quad (2.4)$$

Isto é, com (2.4) poderemos garantir uma medida precisa de $\dot{m} \times C_p(T)$, em quaisquer circunstâncias de fluido e eventual degradação, sem ter que conhecer esta de alguma forma e evitando complexos problemas de calibração que ocorrem em circuitos onde o fluido não seja facilmente descartável (como no caso da água) no âmbito do recurso a métodos de calibração mecânicos (abertura do circuito e recolha cronometrada de amostras).

Capítulo 3

Concepção e Descrição do Calorímetro

3.1 Estado da Arte

As 2 principais abordagens prévias, com soluções calorimétricas, para a problemática da degradação do óleo em circuitos de ensaio foram o calorímetro para medir C_p desenvolvido pelo DLR para o banco de ensaio KONTAS [3] e o calorímetro da Nota Técnica [2].

O banco de ensaio KONTAS é uma plataforma rotativa que permite ensaiar concentradores parabólicos variando o seu azimute. Nesta plataforma é usado o óleo Syltherm 800 da DOW como HTF para o banco de ensaios e para lidar com as questões relacionadas a medida do caudal e do C_p do fluido de ensaio (um óleo térmico com propriedades físicas susceptíveis de se degradarem como o uso e a temperatura de operação de forma não controlável), os autores de [3] desenvolveram um calorímetro.



Figura 3.1: Setup do calorímetro para medir C_p da plataforma KONTAS, fonte: [3]

Este calorímetro funciona em paralelo ao circuito de ensaio onde foi feita uma picagem para derivar parte do óleo do circuito ensaio para o circuito onde está o calorímetro (Figura 3.1). Esta secção à parte do circuito de ensaio tem um caudalímetro em serie com o calorímetro para permitir medir o CP do óleo como se pode ver na Figura 3.0.

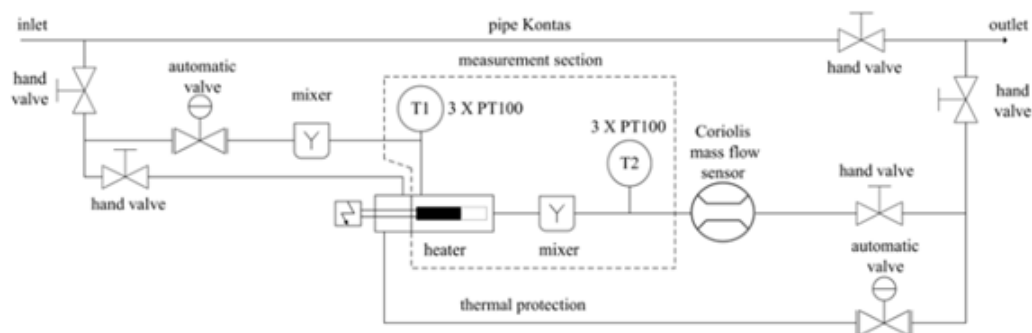


Figura 3.2: Esquema uni-filar do setup para o calorímetro da plataforma KONTAS, fonte: [3]

Com este “setup” o objectivo em termos de temperatura de utilização prevista era a faixa de 100 a 350°C e era proposto fazer medidas pontuais para avaliar a condição do óleo usado no circuito do banco de ensaios. No entanto devido a problemas de perdas e de estabilização a faixa de

temperatura para que acabou por ser calibrado e que ficou disponível para ser usado com precisão suficiente, resultou ser uma faixa reduzida, longe do objectivo inicial. Mais concretamente: em [3] o principio de funcionamento escolhido foi o de se dissipar uma potência num fluido e medir a temperatura de entrada e saída; no entanto, com o aumento da temperatura as perdas térmicas do próprio instrumento variam e implicam uma maior dificuldade na calibração e estabilização . Neste caso apenas se consegue usar o instrumento com precisão numa reduzida faixa de temperaturas (5° C) e com a calibração para 50 ° C ou seja apenas permite a medida do C_p com precisão para temperaturas próximas de 50 ° C. Ao contrario de [3] pretende-se que a faixa de utilização do Calorímetro não seja limitada, apenas com um factor de calibração. As limitações encontradas podem ser resolvidas com uma configuração diferente do calorímetro, nomeadamente criando um ambiente de “perdas constantes” para a zona em que é dissipada a potência no calorímetro e desta forma permitir uma medida directa do produto $\dot{m}C_p$ independentemente da temperatura de ensaio. Esta ideia foi desenvolvida na nota técnica [2]. Aí o calorímetro aparece com um reservatório externo/ envolvendo o calorímetro propriamente dito que permite criar um ambiente externo ao calorímetro que é o da própria temperatura de ensaio (Figura 3.3) com perdas entre o calorímetro e o seu ambiente que assim poderão ser as mesmas, qualquer que seja a temperatura de ensaio, como se pode apreciar nas Figura 3 e 4. A câmara interna constitui o calorímetro onde uma resistência eléctrica aquece o fluido que circula, desde a temperatura da envolvente, até à temperatura de saída resultante da potencia dissipada.

No entanto este calorímetro revelou ter ainda alguns problemas relacio-

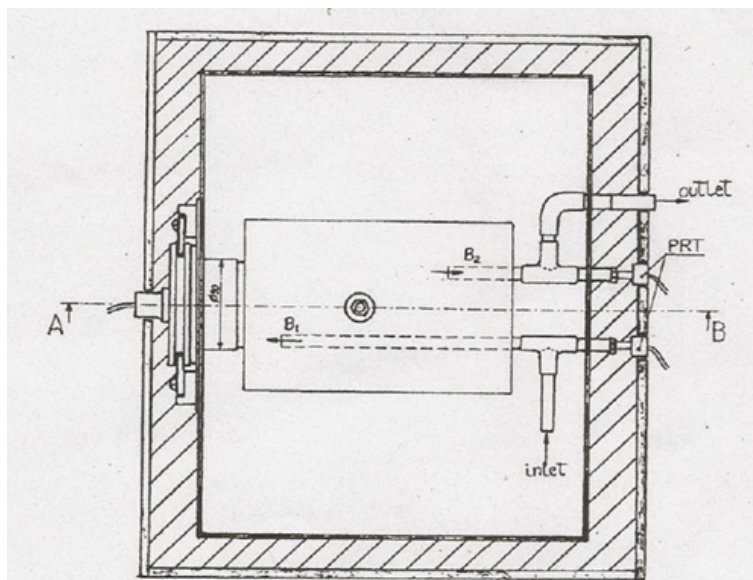


Figura 3.3: Vista em corte do calorímetro da Nota Técnica [2], reservatório externo, fonte: 2

nados com a inércia provocada pelas grandes dimensões do seu grande reservatório envolvente, estabilidade e homogeneização da sua temperatura. Mesmo assim foram realizadas medidas numa faixa muito maior de temperaturas e determinada uma constante do calorímetro. Contudo a configuração e dimensões das duas câmaras e as pontes térmicas com o exterior da unidade e estratificação de temperatura no reservatório envolvente, vieram criar problemas na estabilização de todo o conjunto, antes que uma medida significativa pudesse ser feita. Também acresce que ainda foram detectados alguns problemas na medida da potência dissipada na resistência eléctrica utilizada, que afectaram a precisão do resultado. Mas dado o resultado positivo que, mesmo assim, foi possível obter, apesar deste conjunto de circunstâncias, surgiu a ideia de se proceder à revisão da solução encontrada em [2], por forma a corrigir os problemas detectados e obter um aparelho realmente funcional e útil..

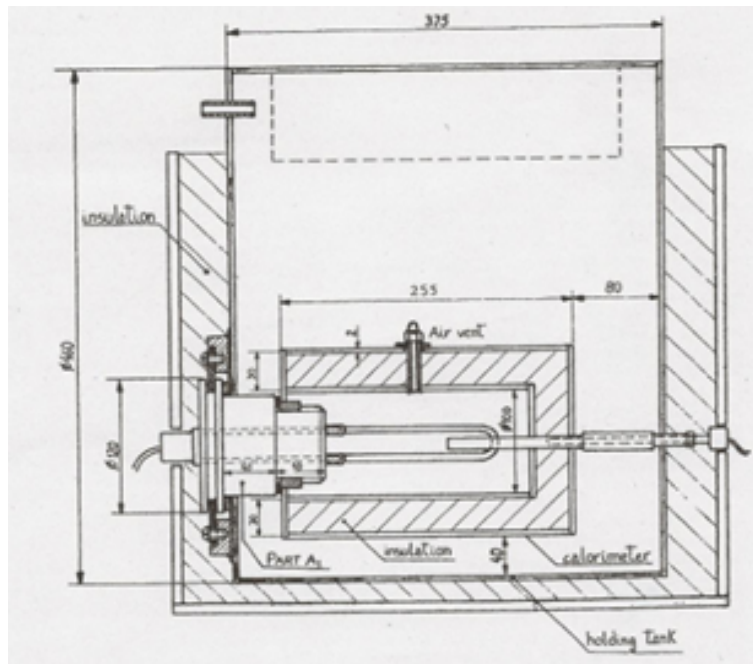


Figura 3.4: Vista em corte do calorímetro da Nota Técnica [2], reservatório interno, fonte: [2]

Este é, na realidade, o objectivo desta tese.

3.2 Desenvolvimento do Calorímetro

Como acaba de se afirmar a solução construtiva adoptada foi inspirada em [2]; o objectivo é o de controlar as perdas e garantir que estas sejam lineares e constantes a qualquer temperatura, possibilitando a obtenção do factor único de calibração. Este virá a ser determinado numa determinada faixa de temperatura onde seja mais fácil de a realizar, nomeadamente com água, um fluido cujas propriedades térmicas são conhecidas e controladas. E, depois, poder aplicar-se o calorímetro em gamas mais elevadas de temperatura e com outros fluidos. Para dissipar a potência no fluido é usada uma resistência eléctrica visto que desta forma será fácil medir a potência dissipada; é também necessário garantir que o fluido está bem misturado para se poder conhecer a sua temperatura com precisão e

não criar variáveis não controladas à transferência de calor. Em resumo e em função do que ficou exposto acima, as principais considerações levadas em conta na concepção e construção do novo calorímetro foram as seguintes:

- reduzir/controlar as perdas térmicas para que o máximo da potência seja dissipada para o fluido
- reduzir a inercia térmica do conjunto para uma utilização prática e flexível
- criar condições para que as perdas sejam realmente independentes da temperatura de ensaio
- criar um dispositivo de fácil montagem e desmontagem para garantir um bom acesso a todas as partes.

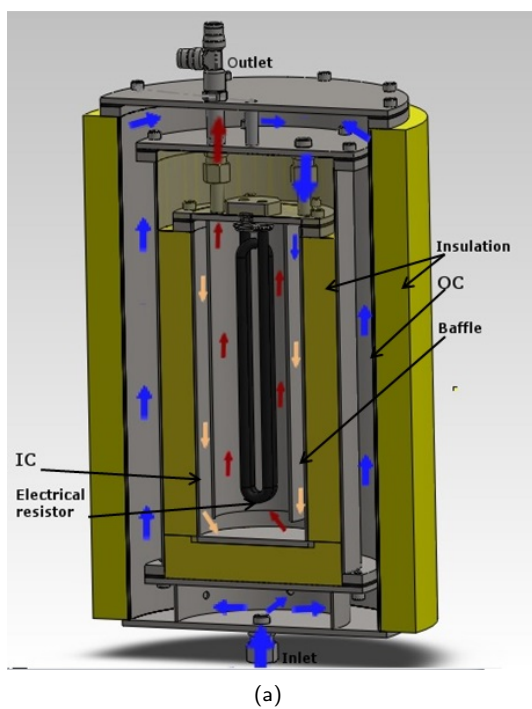


Figura 3.5: (a) Visão em Corte do Calorímetro, com sentido de circulação do fluido, (b) Câmaras por montar do Calorímetro

Começou-se por uma câmara interior (CI) onde são instaladas uma resistência eléctrica, que permite dissipar a potencia P no fluido e 2 sondas PT100 na entrada e saída da CI que permitem medir as respectivas temperaturas de entrada ($T_{in_{cal}}$) e saída ($T_{out_{cal}}$). Para reduzir as perdas isolou-se esta câmara com lã de rocha, no entanto mesmo com lã de rocha estas perdas iriam variar com a temperatura de ensaio, para minimizar este factor, tal como em [2] optamos por incluir uma câmara exterior (CE) que “banha” a CI com o fluido à temperatura de ensaio, sendo assim qualquer que seja a temperatura de ensaio a variação de temperatura entre a CI e CE será imposta pela Potência dissipada e não pela temperatura de ensaio. O fluido circulante é obrigado a fazer um percurso interno complexo por forma a garantir uma boa mistura (temperatura homogénea) e maior “entrega” possível de energia ao fluido (ver Fig. 3.5(a))

Para a construção da CI e CE optou-se por uma construção em câmaras cilíndricas em aço inox (Fig. 3.5(b)), esta opção permite construir câmaras de forma simples e com boa resistência à pressão e corrosão; garante também a possibilidade de se poder montar e desmontar as várias câmaras com facilidade. Os desenhos técnicos usados para a fabricação do calorímetro podem ser consultados no Anexo A

Capítulo 4

Calibração

4.1 Metodologia de Ensaio

Embora o objectivo de utilização do calorímetro seja a utilização com óleos térmicos é possível usar outros fluidos. Para a calibração do calorímetro foi usada água uma vez que se conhece bem $C_p(T)$ a qualquer temperatura (4.2). Para a caracterização do calorímetro será necessário determinar o factor de calibração F (4.1) que representa as perdas do calorímetro. Na realidade os dados obtidos revelaram que o ajuste de mínimos quadrados com mais qualidade ($R^2 \simeq 0.99$) foi da forma de $F = mx + b$ pelo que quando se utilize o termo calibração é a este ajuste que se refere.

$$\dot{m}C_p(T) |_{real} = \dot{m}C_p(T) |_{cal} \times F = \frac{P_c}{(T_{out_{cal}} - T_{in_{cal}})} F \quad (4.1)$$

Como referido em 2 mede-se \dot{m} , P_c , $T_{out_{cal}}$ e $T_{in_{cal}}$; para a água, a partir

da correlação (4.2) pode-se saber com exactidão o seu $C_p(T)$.

$$C_p = 4218,525 - 2,55222T + 5,51766E^{-2}T^2 - 4,9454E^{-4}T^3 + 2,3426E^{-6}T^4 - 3,79E^{-9}T^5 \quad (4.2)$$

Com (4.1) e (4.2) a metodologia adoptada para a determinação do factor de calibração F foi a comparação do caudal medido no caudalímetro $\dot{m}|_{real}$ com o caudal medido no calorímetro $\dot{m}|_{cal}$.

Esta comparação de caudais é feita com o circuito estabilizado e são adquiridos todos os dados ($\dot{m}|_{real}$, P_c , $T_{out_{cal}}$ e $T_{in_{cal}}$) com um tempo de aquisição de 2 segundos sendo depois usadas médias de 5 minutos para a comparação.

A questão da estabilidade é muito importante porque o ensaio de calibração terá que ser realizado num estado estacionário. Por exemplo, ao iniciar a aquisição de dados numa fase em que o calorímetro está a aquecer, parte da potência dissipada irá aquecer a massa do calorímetro em lugar de aquecer o fluido, o que, conseqüentemente, irá provocar uma diminuição do ΔT na CI e uma medida errada e vice-versa numa situação de arrefecimento. Para controlar este aspecto foi colocada uma sonda na entrada da CE do calorímetro para garantir que esta temperatura é o mais constante possível (variações de $\leq 0.1^\circ\text{C}$) e que para cada temperatura de ensaio antes da realização da medida há uma fase de estabilização. Utilizou-se esta metodologia para várias temperaturas e caudais, sendo que o que se considera como a temperatura de ensaio (T) é a temperatura média na CI do calorímetro.

4.2 Desenvolvimento e Implementação do Circuito de Ensaio

Para o ensaio do Calorímetro foi fundamental construir um circuito hidráulico de ensaio para permitir estabilizar a temperatura de entrada e garantir as condições vistas em 4.1. Este circuito hidráulico foi construído e implementado no âmbito desta dissertação nas instalações da Cátedra Energias Renováveis na Herdade da Mitra. Para garantir as condições de ensaio foi importante conseguir dissipar a potência libertada no calorímetro. Inicialmente tinha-se pensado em garantir este arrefecimento circulando água à temperatura ambiente num permutador, no entanto esta opção implicava um elevado gasto de água, pelo que se optou pela inclusão de um "chiller" para arrefecimento de água.

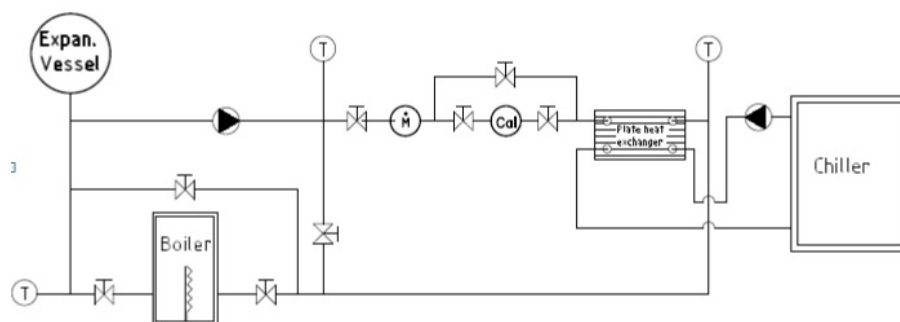


Figura 4.1: Circuito de Água

O circuito de água (Fig. 4.1) é composto por um medidor de caudal eletromagnético calibrado em [6], em série com calorímetro seguido de um permutador que ligado ao chiller permite arrefecer a saída do calorímetro. Uma caldeira em série que com um controlo PID permite fazer o ajuste da temperatura de ensaio. Todos os equipamentos e características do banco de ensaio estão descritos detalhadamente no Anexo B

4.3 Instrumentação e Controlo

Para a aquisição de dados do circuito de ensaio descrito em 4.2 foi utilizado o multímetro (Agilent,34980A) e desenvolvido um programa de aquisição e controlo no software LabView da National Instruments. Com este equipamento conseguiu-se adquirir todas as variáveis necessárias para a determinação do factor de Calibração descritas em 4.1. Permiteu ainda ter um fácil acesso á informação com indicadores e gráficos essenciais para verificar a evolução e controlar a estabilidade do ensaio (Fig. 4.2).

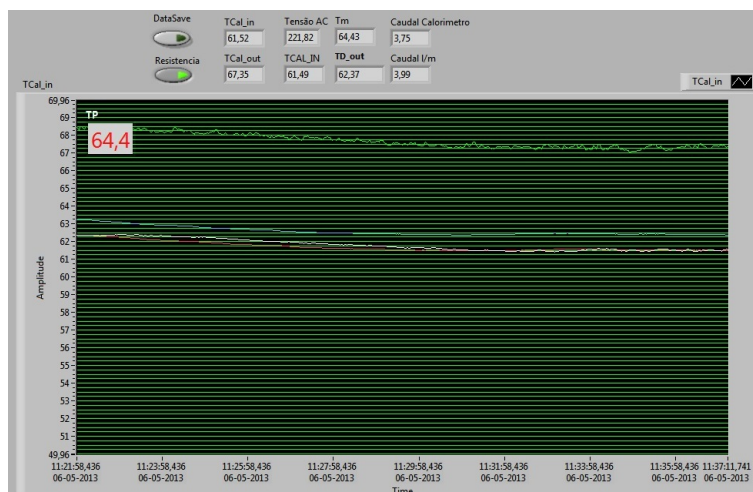


Figura 4.2: Exemplo de output do programa

Para o controlo dos caudais de circulação e do caudal de arrefecimento no permutador do chiller optou-se pela utilização de variadores de frequência associados às bombas de circulação e de arrefecimento (Anexo II) esta configuração permitiu controlar com bastante precisão os caudais de circulação e arrefecimento. O controlo de ambos os variadores foi programado no software anteriormente referido e é do tipo PID, este algoritmo de controlo é muito usado na industria e basicamente controla uma variável de processo através de um actuador. Neste caso as variáveis de processo foram o caudal de circulação e a temperatura de entrada no calorímetro

e os actuadores foram respectivamente os variadores das bombas de circulação e arrefecimento. Toda a programação do sistema de aquisição e controlo esta descrita no Anexo C.

4.4 Ensaios

Aplicou-se a metodologia descrita em 4.1 para os ensaios com água sendo o conjunto de caudais e temperaturas médias de 1, 2, 3, 4 Kg/min e 45, 65, 80°C. A Fig. 4.2 mostra a relação entre o caudal medido pelo calorímetro e o caudal medido pelo caudalímetro que será usada para a sua calibração.

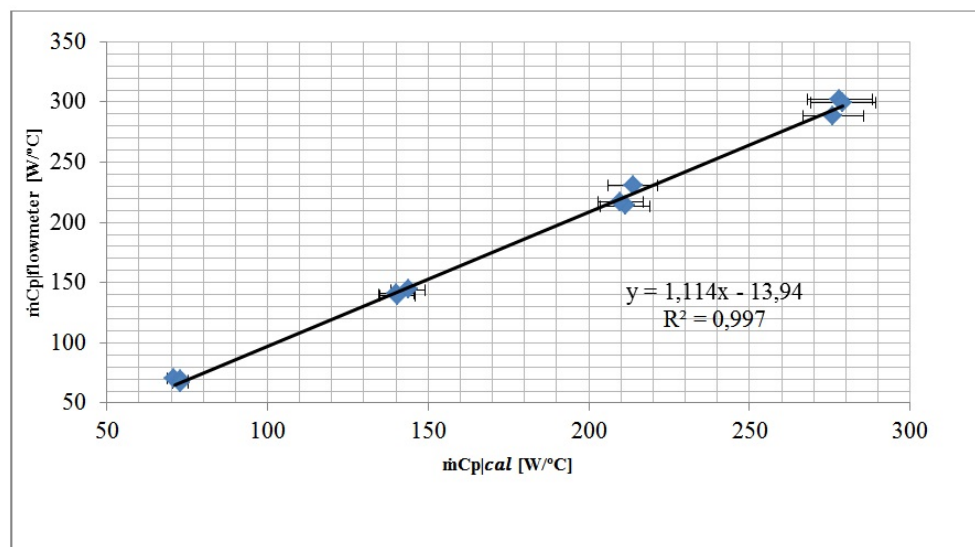


Figura 4.3: Comparação de $\dot{m}CP|_{real}$ com $\dot{m}CP|_{cal}$ para diferentes temperaturas (45, 65, 85) e caudais aproximados de 1, 2, 3 e 4 Kg/min e com as respectivas barras de erro

4.5 Calibração, Equação do Calorímetro

Com os resultados obtidos em 4.4 e ilustrados em Fig.4.3 obteve-se através de uma regressão linear (met. mínimos quadrados), a relação entre o cau-

dal real e o caudal medido pelo calorímetro. Na figura estão representadas as barras de erro horizontais e verticais, sendo que as verticais são valores muito baixos e sem leitura no gráfico.

$$\dot{m}Cp(T) |_{real} = (a + \delta a) \times \dot{m}Cp(T) |_{cal} + (b + \delta b) \quad (4.3)$$

Os valores de a e b para o ensaio foram:

$$a=1.114$$

$$\delta a=0.018$$

$$b=-13.94 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

$$\delta b=3.55 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$$

Os valores δa e δb representam as incertezas da regressão linear tendo em conta as incertezas envolvidas. O valor b não é zero porque a utilização de um valor diferente de zero confere uma qualidade estatística (R^2 0.99) melhor que a utilização de zero (R^2 0.95). O significado físico deste valor $b \neq 0$ não foi investigado, sendo assim um mero artifício matemático.

Capítulo 5

Aplicações do Calorímetro

5.1 Introdução

Em 4 utilizou-se água como fluido de ensaio, por ser um fluido com propriedades térmicas conhecidas e inalteráveis, no entanto há todo o interesse em aplicar esta tecnologia a fluidos diferentes como os óleos térmicos, conforme explicado anteriormente. Assim com o factor de calibração obtido em 4. foi possível verificar o funcionamento do calorímetro com óleo. Para isso construiu-se um circuito de óleo e usou-se um óleo térmico com $C_p(T)$ fornecido pelo fabricante e em suma usou-se o calorímetro para medir o $C_p(T)$ do óleo e compara com os dados do fabricante. Posteriormente o Calorímetro foi usado no âmbito de outra dissertação de mestrado [7] sendo também apresentados os resultados aí obtidos.

5.2 Medida do $C_p(T)$ de um Óleo Térmico

5.2.1 Configuração do Circuito

O circuito de Óleo também foi construído no âmbito da dissertação e é em tudo semelhante ao circuito de água (Fig. 5.1), para este circuito foi usada uma bomba de óleo e foi usado um caudalímetro do tipo de Coriolis, visto que permite uma melhor precisão para fluidos com viscosidade mais elevada. Usou-se o mesmo chiller do circuito de água acoplado a um permutador de água/óleo para controlar a temperatura do óleo. Incluiu-se também uma balsa de contenção de óleo para prevenir possíveis fugas. As características dos equipamentos do próprio circuito estão descritas no anexo II. A nível de instrumentação e controlo foram usados os mesmos métodos e programa de LabView de 4.3.

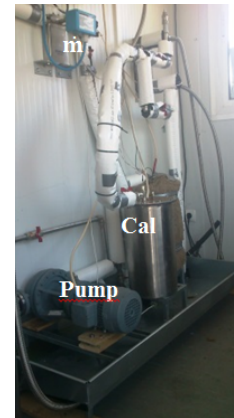
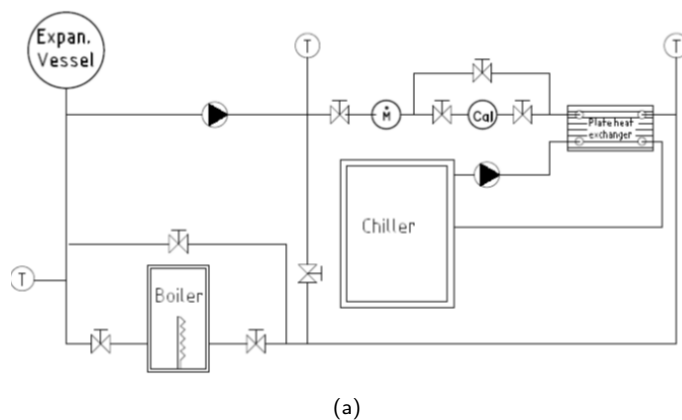


Figura 5.1: Circuito hidráulico do óleo (a)esquema (b)foto

5.2.2 Ensaios

Com o Calorímetro calibrado (4.5) é possível, como previsto, fazer a medida directa de $\dot{m}C_p(T) |_{cal}$ de qualquer HTF num ensaio de colectores

solares. Como aplicação decidiu-se usar o Calorímetro para medir o próprio $Cp(T)$ e comparar os resultados com os valores fornecidos pelo fabricante. O intervalo de temperaturas dos ensaios foi de 45 a 155°C e os caudais variaram entre os 2 e os 6kg/min.

A equação (4.1) foi modificada para:

$$Cp(T) |_{real} = \frac{1}{\dot{m} |_{coriolis}} (\dot{m} Cp(T) |_{cal} \times a + b) \quad (5.1)$$

De acordo com o fabricante $Cp(T)$ varia com T de forma linear tal como (5.1)

$$Cp(T) |_{fabricante} = 3.571T + 1807.6 \quad (5.2)$$

Para os ensaios com Óleo manteve-se a metodologia descrita em 4.1 mas neste caso, e como é objectivo deste projecto, utilizou-se a calibração vista em 4.5 o que permitiu assim usar o Calorímetro para medir o $Cp(T)$ do óleo de transferência térmico .

5.2.3 Resultados

Na Tabela 5.1 estão os resultados de $Cp(T) |_{cal}$ para as várias temperaturas e caudais testados. Como referido anteriormente T é o valor médio das temperaturas $T_{in_{cal}}$ e $T_{out_{cal}}$, tendo em conta que quanto menor é o caudal maior será a diferença entre $T_{in_{cal}}$ e $T_{out_{cal}}$ optou-se por, a partir do 115°C, não descer o caudal a valores abaixo dos 5kg/min.

Na Fig. 5.3 estão os resultados obtidos para o $Cp(T) |_{cal}$ com as respec-

T (°C)	65	85	105	115	125	135	145	155
Cp Cal at ~ 6kg/min [J/kg.°C]	-	-	-	2258	2242	2316	2395	2521
Cp Cal at ~ 5kg/min [J/kg.°C]	2094	2199	2204	2203	2159	2362	2241	2530
Cp Cal at ~ 4kg/min [J/kg.°C]	2137	2194	2179	-	-	-	-	-
Cp Cal at ~ 3kg/min [J/kg.°C]	2151	2166	2234	-	-	-	-	-
Cp Cal at ~ 2kg/min [J/kg.°C]	1910	2013	2020	-	-	-	-	-
Cp Supplier [J/kg.°C]	2038	2108	2174	2214	2256	2290	2322	2364

Figura 5.2: Tabela 1 Valores de Cp obtidos nos vários ensaios

tivas barras de erro, pode-se ver também a recta para as valores de Cp(T) fornecido pelo fabricante. Os resultados obtidos estão próximos dos valores fornecidos pelo fabricante, demonstrando assim o bom funcionamento do calorímetro e o interesse da sua utilização.

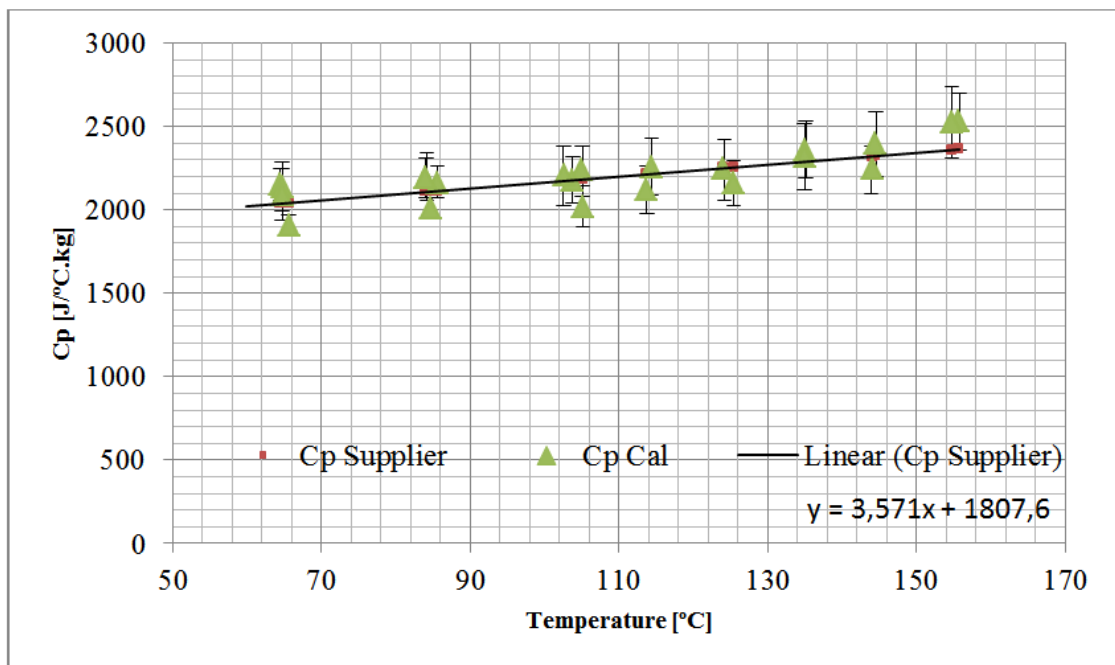


Figura 5.3: Valores Cp(T) obtidos nos vários ensaios e fornecidos pelo fabricante

5.3 Aplicações

5.3.1 Aplicação à medida de rendimento de um colector solar com óleo térmico e comparação dos resultados obtidos com a medida de rendimento num circuito a água

No âmbito da dissertação de mestrado [7] o calorímetro foi usado para medir o rendimento de um colector solar circulando primeiro água e depois óleo térmico para posteriormente comparar os resultados.

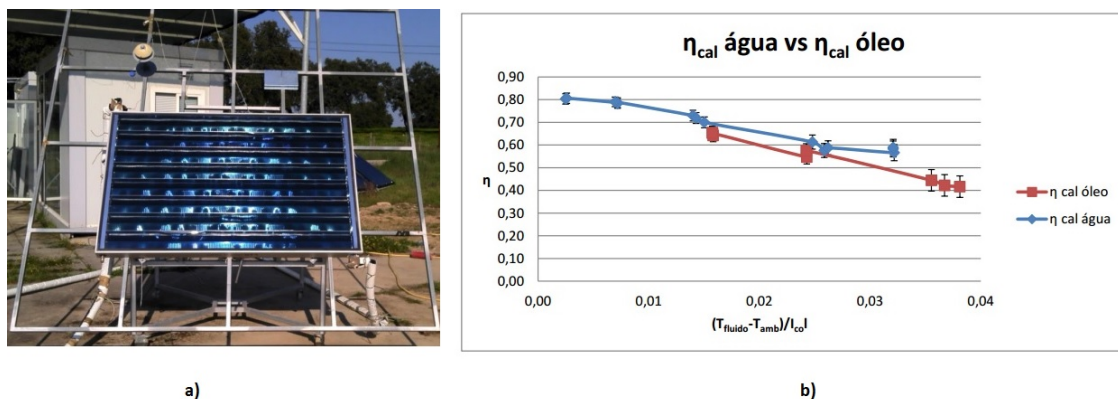


Figura 5.4: a) Colector do tipo CPC b) Eficiência calorimétrica para ensaios a água e óleo

5.4 Outras Aplicações

5.4.1 Ensaio CPC Reelcoop

No âmbito do projecto REELCOOP (REnewable ELelectricity COOPeration) será necessário ensaiar/testar um colector do tipo CPC com temperatura de funcionamento até 200°C e será usado o calorímetro desenvolvido para realizar as medidas de caudal e $C_p(T)$ automaticamente lidando com os problemas de degradação do óleo descritos anteriormente.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

A técnica calorimétrica proposta neste projecto torna possível a realização de ensaio e monitorização com precisão de colectores solares para fluidos de transferência térmica com $C_p(T)$ desconhecido ou que se degradam com o tempo. Como mostram os resultados, a grande vantagem deste dispositivo é conseguir manter a precisão da medida num grande intervalo de temperaturas e caudais. A qualidade do instrumento desenvolvido pode ser apreciada na sua aplicação à determinação do próprio $C_p(T)$ do óleo térmico utilizado. Com a conclusão deste projecto criou-se também um importante novo recurso para trabalhos de investigação na área de ensaio de colectores na Universidade de Évora. Em desenvolvimentos futuros será possível melhorar o Calorímetro no sentido de atingir temperaturas mais elevadas e melhorar a sua exactidão. Pensa-se mesmo fazer a aplicação desta tecnologia/novo instrumento a circuitos de sais fundidos para circulação directa em campos de concentradores funcionando a $570^{\circ}C$ para produção de electricidade por via solar térmica. O instrumento desen-

volvido em diferentes tamanhos e configurações poderá mesmo vir a ser produzido em pequena série para comercialização. Esta possibilidade será explorada junto de empresas fabricantes de instrumentos deste tipo.

Lista Publicações

Este trabalho deu origem à seguinte publicação:

"Development and test results of a calorimetric technique enabling fluid properties independent HFT energy content measurement.- Publicada em Energy Procedia Volume 49, 2014 Pages 2125-2134 Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.

Esta publicação foi seleccionada para apresentação oral na conferencia internacional mais importante a nível mundial na área da Energia Solar de Concentração, SolarPACES 2013 em Las Vegas no tópico "Measurements and Control" ver Anexo D.

Referências bibliográficas

[1] Héctor Barroso, Francisco Sanz, Miguel Hernández, Daniel Pereira, Daniel Rayo, Enrique Serrano. Understanding of the HTF Degradation on Parabolic Trough Power Plant Energy Performance, Marrakech; 2012

[2] M. Collares Pereira, J. Duque, C. Saraiva, A. Rego Teixeira. A calorimeter for solar thermal collector testing, Solar Energy Vol. 27; 1981

[3] Christoph Hilgert, Gregor Bern and Marc Röger. KONTAS - CP – Flow Through Calorimeter For Online Heat Capacity Measurement Of Thermal Oils In CSP Applications, Marrakech; 2012

[4] EN 12975-2006. Thermal solar systems and components – Solar collectors, chapter Part 2: Test Methods European Standard, March 2006.

[5] Eckert, E.R.G., Drake, R.M. Analysis of Heat and Mass Transfer: McGraw Hill Higher Education; 1972

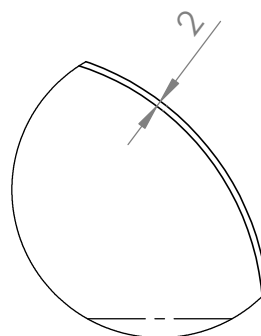
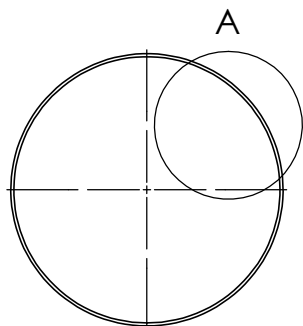
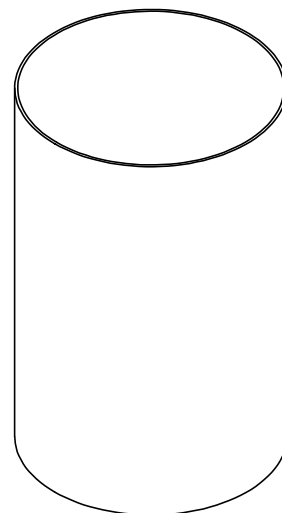
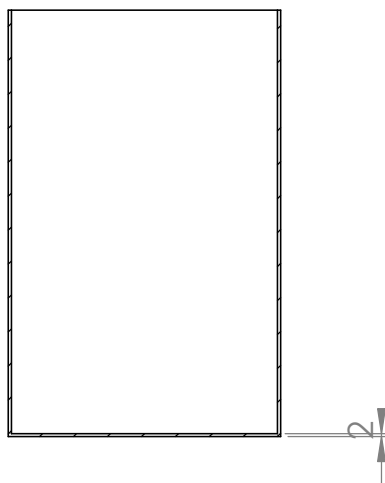
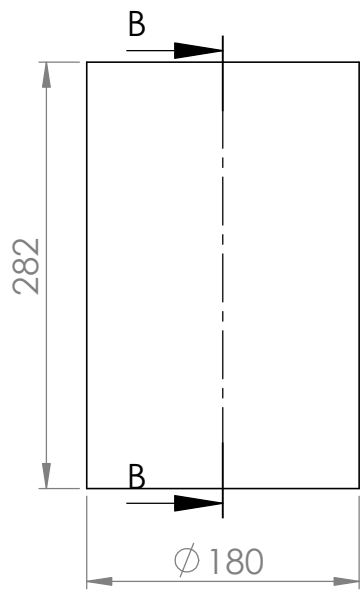
[6] LECS- Laboratório de Ensaios de Colectores Solares, fully accredited testing institution, within LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa , Portugal (www.lneg.pt)

[7] Cavaco, Afonso, Desenvolvimento e operação de um circuito de ensaios de coletores solares térmicos a óleo. Comparação com os resultados obtidos num circuito a água:Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia Solar, Universidade de Évora; 2014

Anexos

Anexo A

Desenhos Técnicos Usados para a Construção do Calorímetro



DETAIL A
SCALE 2 : 5

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

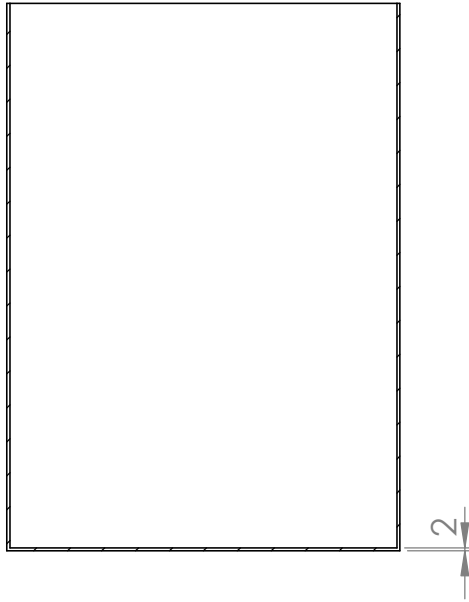
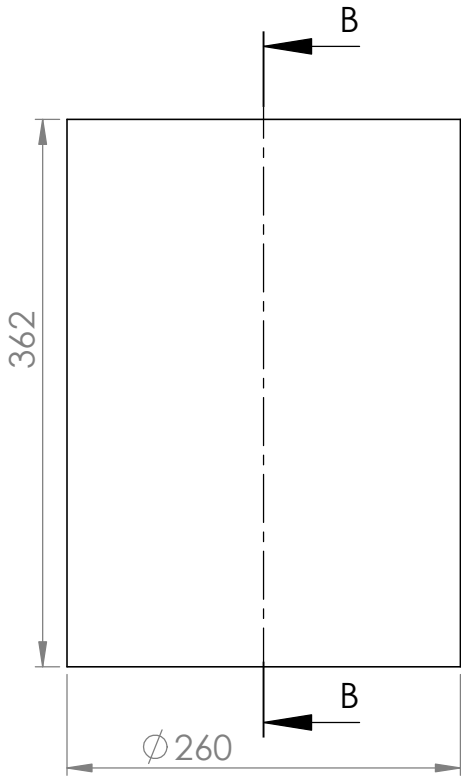
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

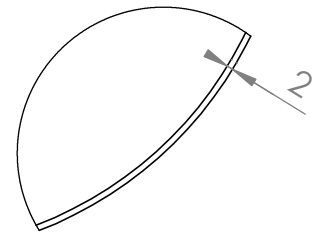
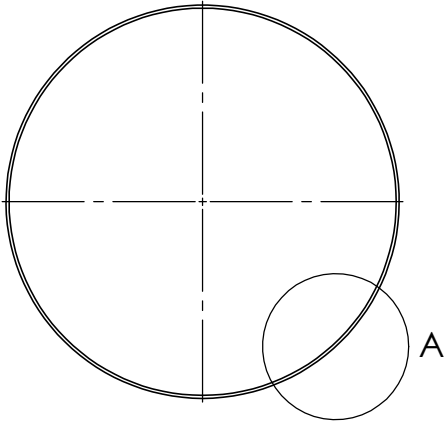
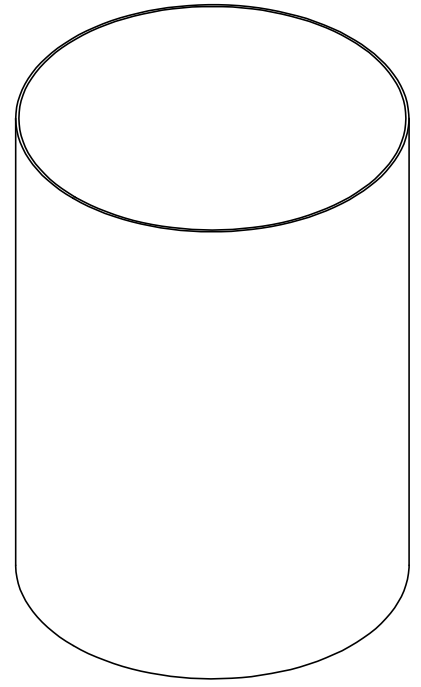
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	João Marchã				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
					304L
				WEIGHT:	

TITLE:	Câmara interna Calorimetro	
DWG NO.	CAM_int	A4
SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1	



SECTION B-B



DETAIL A
SCALE 2 : 5

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	João Marchã				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
					304L
				WEIGHT:	

TITLE:

Câmara do Isolamento do Calorimetro

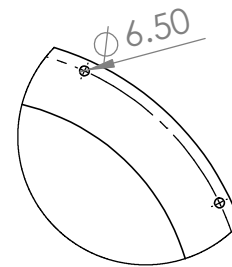
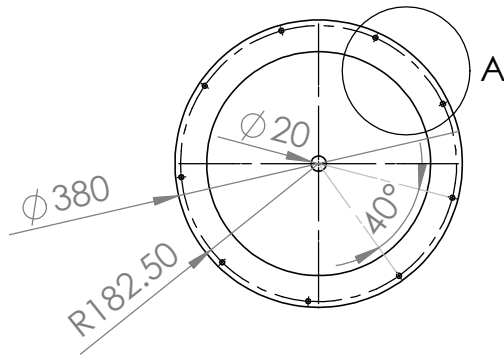
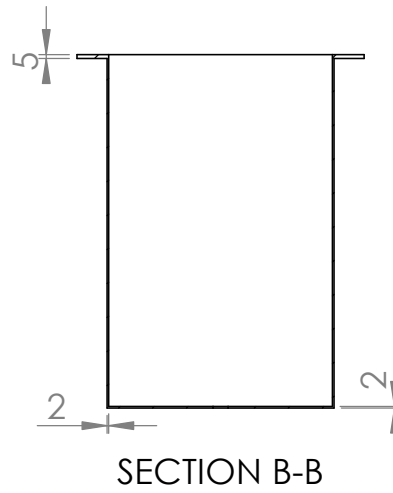
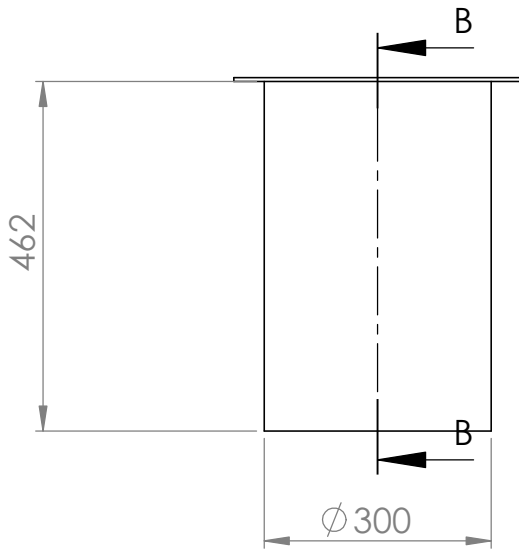
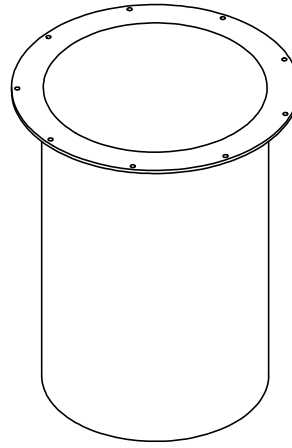
DWG NO.

CAM_isol

A4

SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1



DETAIL A
SCALE 1 : 5

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

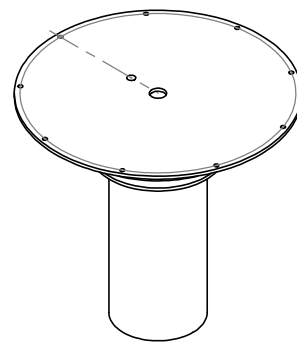
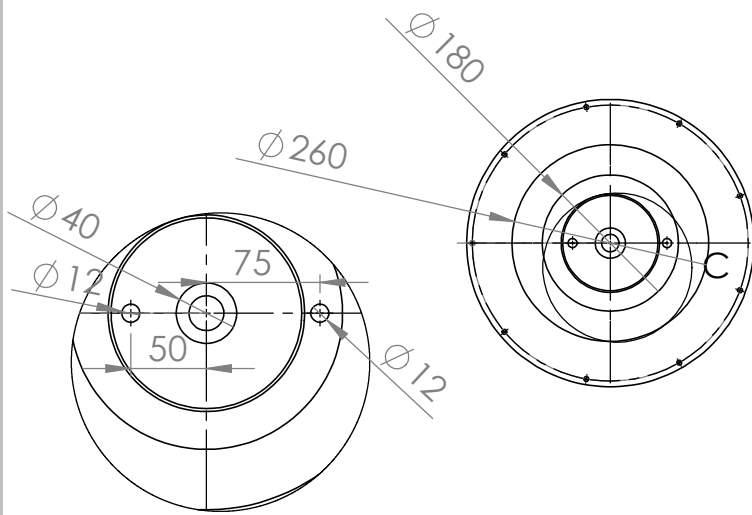
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

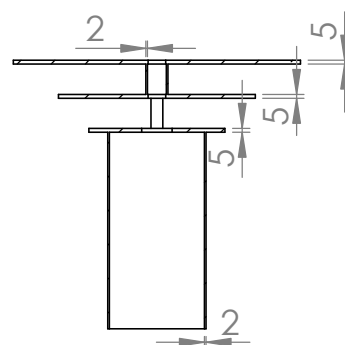
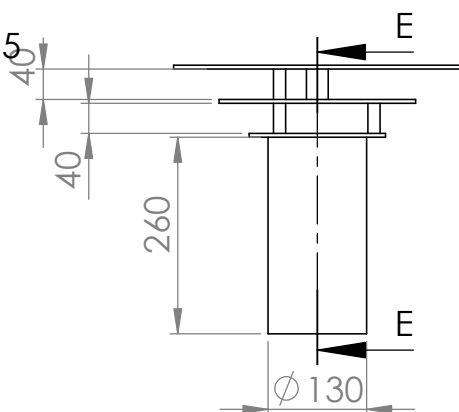
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	João Marchã				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				304L	
				WEIGHT:	

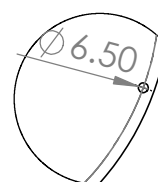
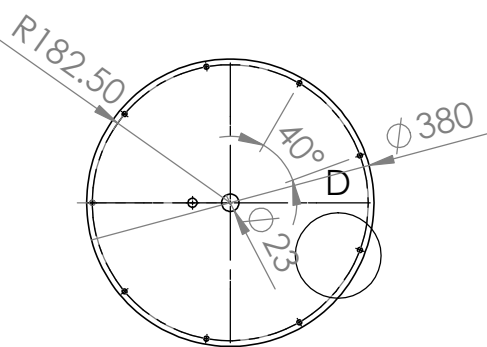
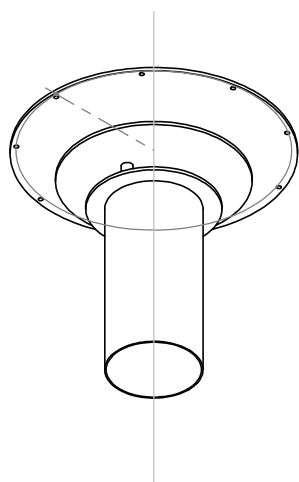
TITLE:	
Câmara Exterior do Calorímetro	
DWG NO.	CAM_ext
A4	
SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1



DETAIL C
SCALE 1 : 5



SECTION E-E



DETAIL D
SCALE 1 : 5

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

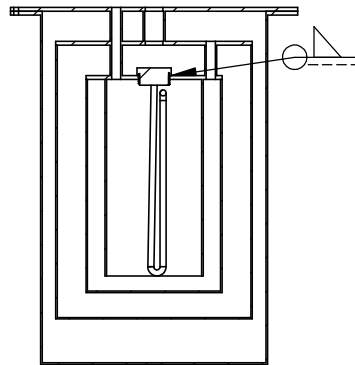
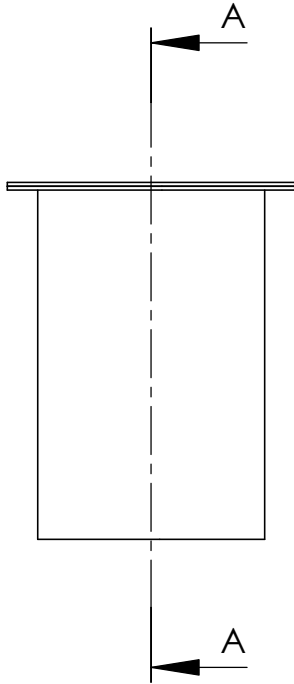
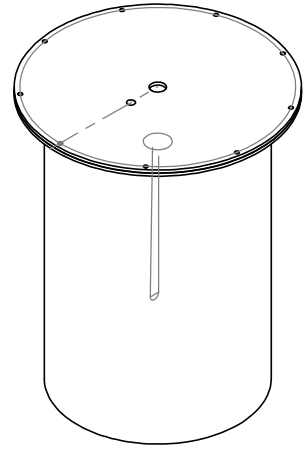
DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

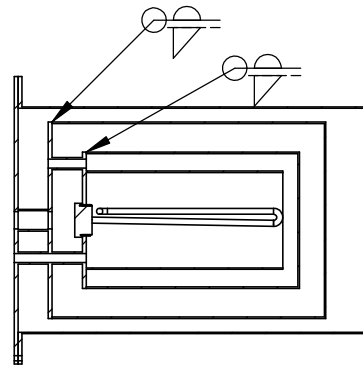
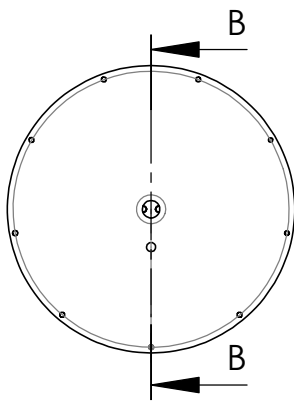
REVISION

NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN	João Marchã				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			304L		
			WEIGHT:		

TITLE:	Núcleo do Calorimeto	
DWG NO.	nucleo	A4
SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1	



SECTION A-A



SECTION B-B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN	João Marchã				
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				304L	
				WEIGHT:	

TITLE:		Desenho de Conjunto	
DWG NO.	Assem1	A4	
SCALE:1:10	SHEET 1 OF 1		

Anexo B

Equipamentos e Características dos Circuitos de Ensaio

No âmbito desta dissertação foram construídos, de raiz, 2 circuitos hidráulicos semelhantes, para o ensaio do calorímetro. Um circuito de ensaio para água e outro para óleo térmico. A construção de ambos foi feita com tubo de Inox 304L de 21 mm de diâmetro e 1mm de espessura, foram usados acessórios mecânicos para a união de tubagem e acessórios. A escolha recaiu na tubagem de aço inoxidável porque é o mais indicado para usar com óleo térmico uma vez que não reage com o mesmo. Optou-se também por construir o circuito de água em aço inoxidável por uma questão de uniformidade e logística. A escolha pelas fixações mecânicas para a construção do circuito deve-se essencialmente a uma questão de flexibilidade e facilidade de construção/alteração, podia ter-se optado, por exemplo, por soldadura mas para estes materiais requeria pessoal/equipamento especializado e foi posta de parte esta opção. Os componentes básicos de

cada circuito são semelhantes sendo eles a bomba de circulação, o caudalimento, as várias sondas de temperatura a caldeira com resistência eléctrica para aquecer o fluido e um permutador para arrefecer o fluido. No caso do arrefecimento apenas existe um chiller que arrefece água e esta água circula num permutador Óleo/Água no caso do circuito de óleo e num permutador Água/Água no caso do circuito de água. Para controlar o caudal de ensaio foi usado um variador de frequência acoplado às respectivas bombas de circulação que permite controlar com precisão a velocidade da bomba e consequentemente o caudal. Para controlar a refrigeração do circuito também foi usado um variador de frequência acoplado à bomba do chiller que permite variar o caudal de água fria que passa nos respectivos permutadores de água e óleo. Para controlar a temperatura através da resistência eléctrica da caldeira é usado um contactor controlado por um PID. Assim consegue-se controlar a temperatura de ensaio. Para prevenir potenciais fugas no circuito de óleo foi desenhada e construída uma balsa de contenção que está debaixo do circuito como prevenção de fugas.

Circuito de Água

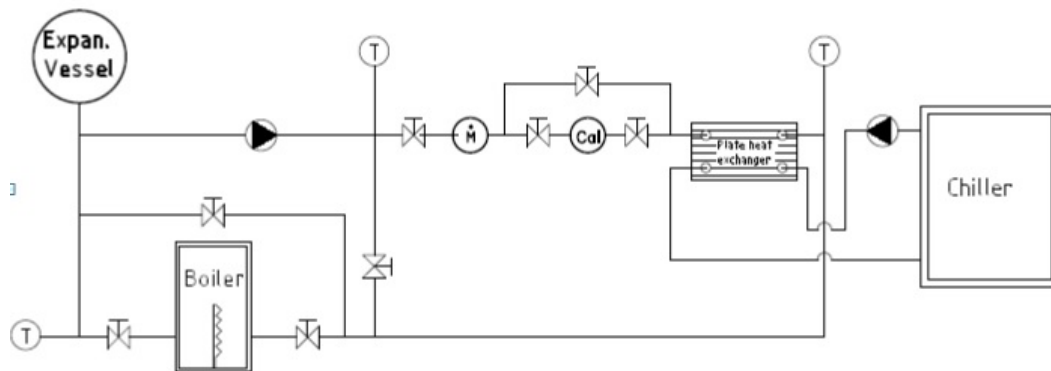


Figura B.1: Esquema unifilar do circuito de Água

Bomba de Água



Figura B.2: Bomba de circulação usada no circuito de Água

Modelo	Wilo / Top S
Temperatura máx operação	85 ° C
Potência	120 W
Caudal máx	5kg/min

Caudalimetro



Figura B.3: Caudalimetro usado no circuito de Água

Modelo	ISOIL / MS501
Temperatura máx operação	150 ° C
Caudal máx	20kg/min

Variador de Frequência



Figura B.4: Variador de Frequência usado no circuito de Água

Modelo	Toshiba / Vf - Nc3
Potência máx	0.5 kW
Frequencia máx	300 hz

Circuito de Óleo

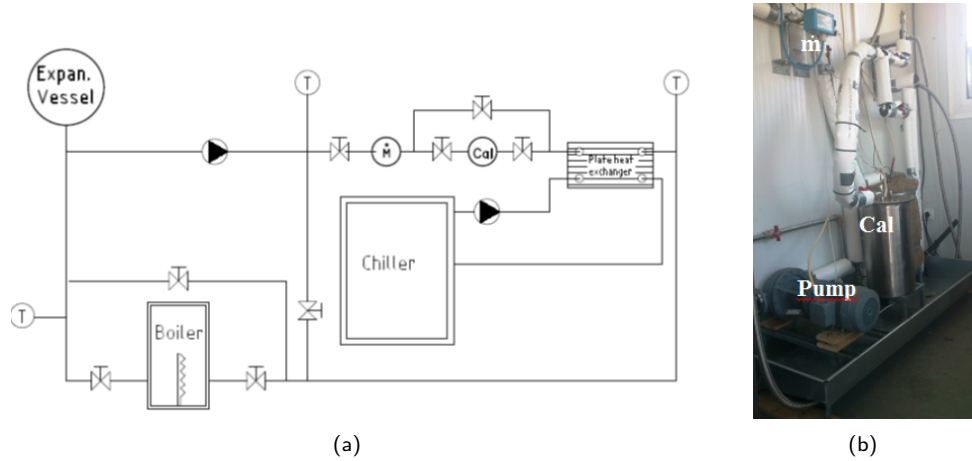


Figura B.5: (a)Esquema unifilar do circuito de óleo (b)foto

Bomba de Óleo



Figura B.6: Bomba de circulação usada no circuito de Óleo

Modelo	Wilo / IPH-O 20/160
Temperatura máx operação	350 ° C
Potência	2.5 kW
Caudal máx	6kg/min

Caudalimetro



Figura B.7: Caudalimetro usado no circuito de Oleo

Modelo	Rheonik / RHM 04
Temperatura máx operação	210 ° C
Caudal máx	10kg/min

Variador de Frequência



Figura B.8: Variador de Frequência usado no circuito de Óleo

Modelo	Toshiba / Vf - Nc3
Potência máx	3.5 kW
Frequencia máx	300 hz

Chiller



Figura B.9: Chiller para arrefecimento de ambos os circuitos

Modelo	EWAQ005ACV3P
Cap Arrefecimento	5.28 kW
Potência nominal	1.94 kW
Caudal máx	5kg/min

Anexo C

Sistema de Aquisição e Controle

O Sistema de aquisição e controle foi desenvolvido de raiz na linguagem de programação LabView da National Instruments. O programa controla o multímetro Agilent 34980 e ainda um micro-controlador (arduino). Com o multímetro é adquirido o valor das resistências das sondas PT100, esta medida é feita a 4 fios para que o comprimento do cabo de cada sonda PT100 não influencie o valor medido. É também lida a tensão e a corrente na resistência eléctrica do calorímetro para calcular a potência na CI do Calorímetro. O micro-controlador faz a interface entre o programa de aquisição e controle e o variador de frequência da bomba do chiller controlando assim a velocidade da bomba do chiller consoante o setpoint de temperatura definido no programa, é um controle do tipo PID implementado no LabView. A programação é feita no LabView é simbólica e o programa começou a ser estruturado com a seguinte função main:

**arduino.vi**

G:\working_directory\Uevora\Dissertação\anexos\Anexo3\Labview\arduino.vi

**AG34980A Close.vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\instr.lib\Agilent 34980a\ag34980A.Ilb\AG34980A Close.vi

**AG34980A Configure 4-Wire Resistance.vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\instr.lib\Agilent 34980a\ag34980A.Ilb\AG34980A Configure 4-Wire Resistance.vi

**AG34980A Configure DC Current.vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\instr.lib\Agilent 34980a\ag34980A.Ilb\AG34980A Configure DC Current.vi

**VISA Configure Serial Port (Instr).vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\vi.lib\Instr_visa.Ilb\VISA Configure Serial Port (Instr).vi

**VISA Configure Serial Port**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\vi.lib\Instr_visa.Ilb\VISA Configure Serial Port

**AG34980A Configure DC Voltage.vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\instr.lib\Agilent 34980a\ag34980A.Ilb\AG34980A Configure DC Voltage.vi

**AG34980A Reset.vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\instr.lib\Agilent 34980a\ag34980A.Ilb\AG34980A Reset.vi

**AG34980A Initialize.vi**

C:\Program Files (x86)\National Instruments\LabVIEW 2011\instr.lib\Agilent 34980a\ag34980A.Ilb\AG34980A Initialize.vi

A função main é composta por varias funções já existentes no pacote do software e mais 3 funções desenvolvidas que são a arduino.vi, multi-metro.vi e tratamento.vi. A função main tem como outputs os valores das grandezas necessárias para o ensaio (temperaturas, potência, caudal) e como input o setpoint para o ensaio e os parâmetros do PID. Tem ainda um gráfico para mostrar a evolução das temperaturas que é essencial para garantir a estabilidade do ensaio. Tem ainda os blocos de gravação de dados gravando separadamente as grandezas lidas directamente do multímetro (resistência, tensão e corrente) e também os dados já tratados (temperatura, potência, caudal). Na função seguinte função, tratamento.vi basicamente são aplicados os factores de calibração a todos os sensores.

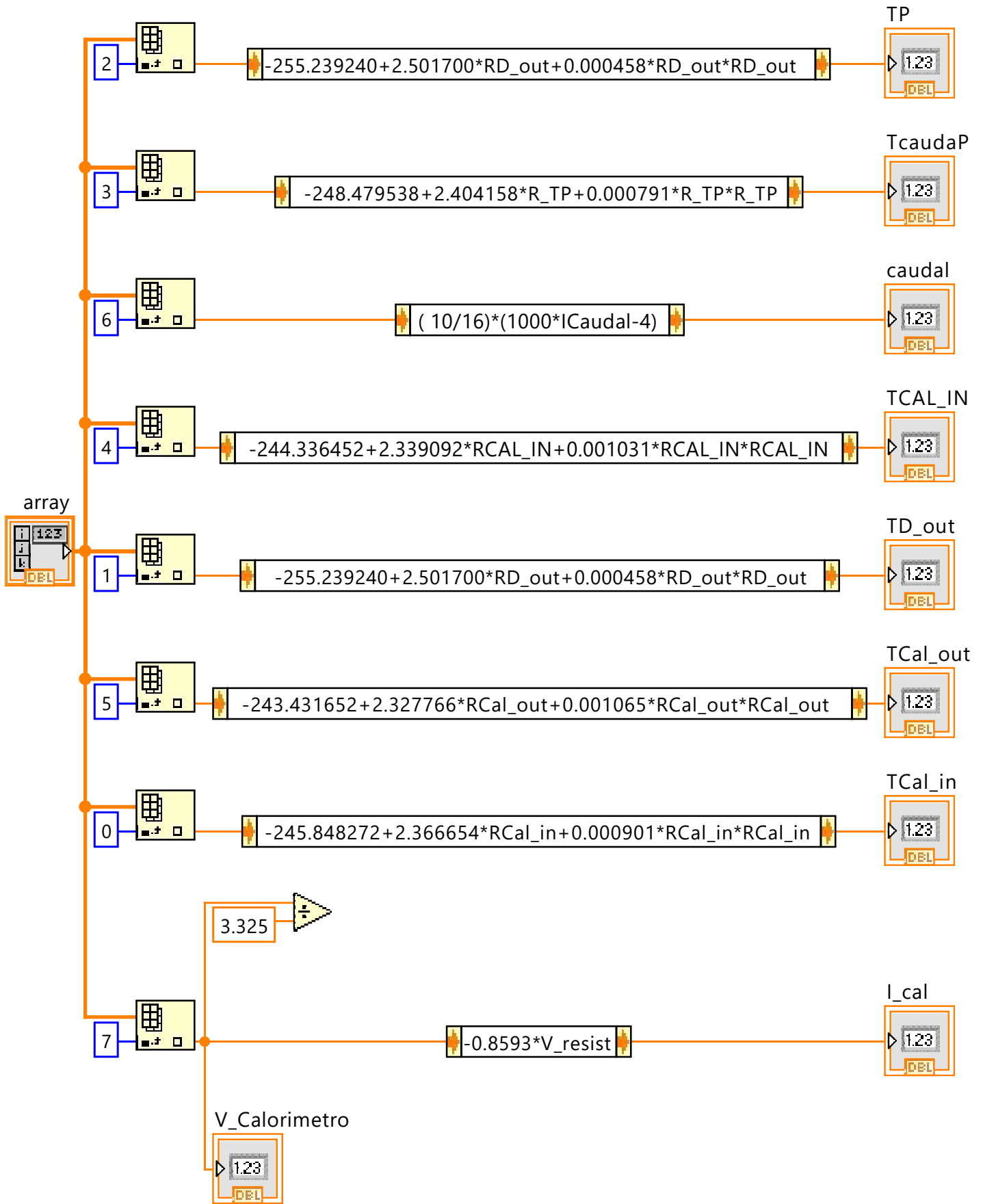


tratamento.vi

G:\working_directory\Uevora\Dissertação\anexos\Anexo3\Labview\tratamento.vi

Last modified on 11/16/2016 at 11:00

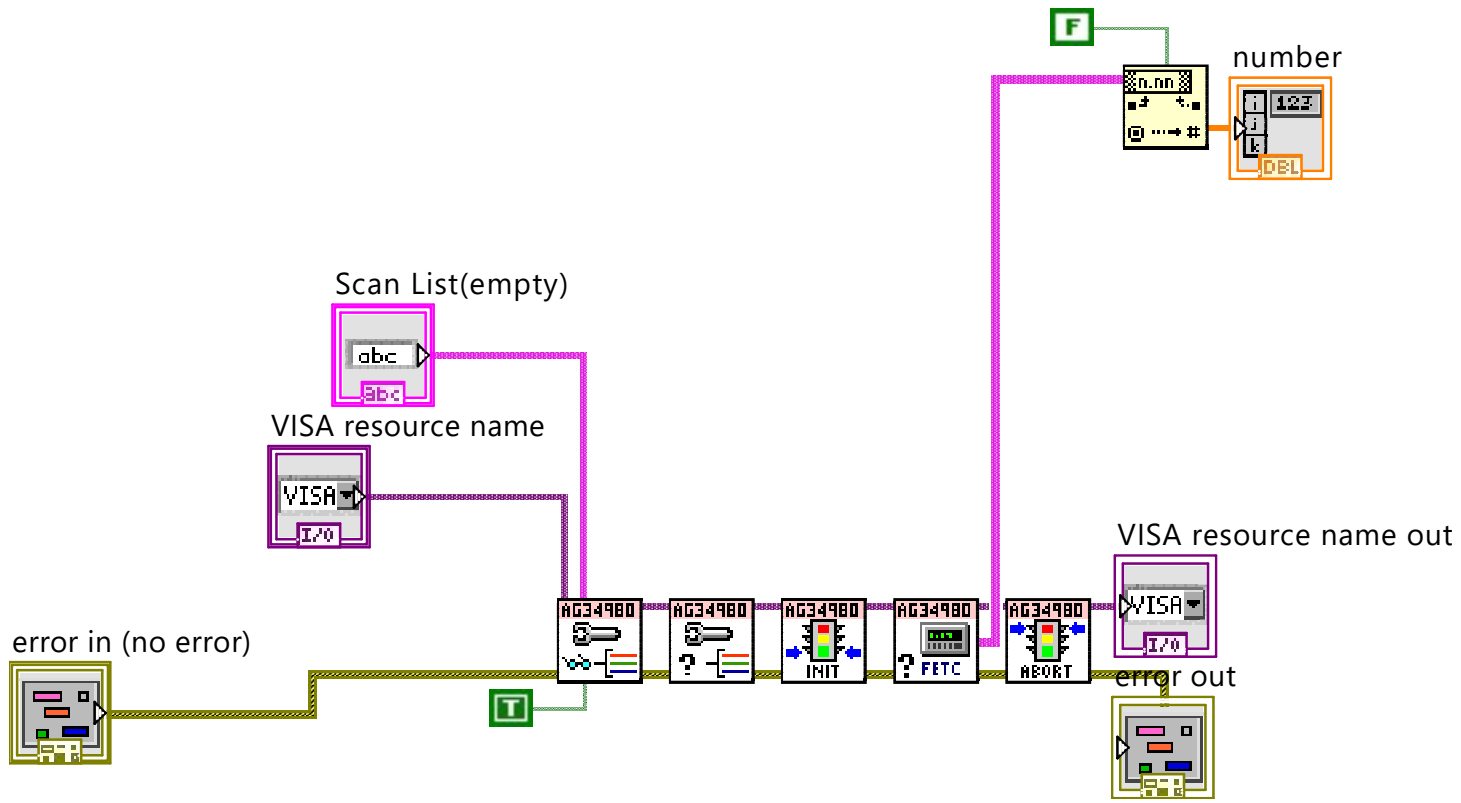
Printed on 11/16/2016 at 11:04



Na função, `multimetro.vi` é estabelecida a comunicação com o multímetro e são lidos os canais correspondentes às sondas que se querem ler. A configuração base do multímetro foi feita na função `main`, foi definido o IP do multímetro e configurados os vários canais. Por exemplo o canal 1001 é um canal de resistência medida a 4 fios e o 1042 é um canal de corrente dc. A função `multimetro.vi` tem com input estes dados de configuração e ainda os canais que se querem ler e o seu output é uma matriz com os valores para cada um dos canais seleccionados. Este output vai para a função `tratamento.vi` onde são aplicados os factores de calibração. Com os factores de calibração já se tem, por exemplo a temperatura à saída do permutador do chiller TP. Esta temperatura é controlada pela velocidade da bomba do chiller e este controlo é feito através do microcontrolador e implementada na função `arduino.vi`.



multimetro.vi
G:\working_directory\Uevora\Disseração\anexos\Anexo3\Labview\multimetro.vi
Last modified on 11/16/2016 at 11:00
Printed on 11/16/2016 at 11:03



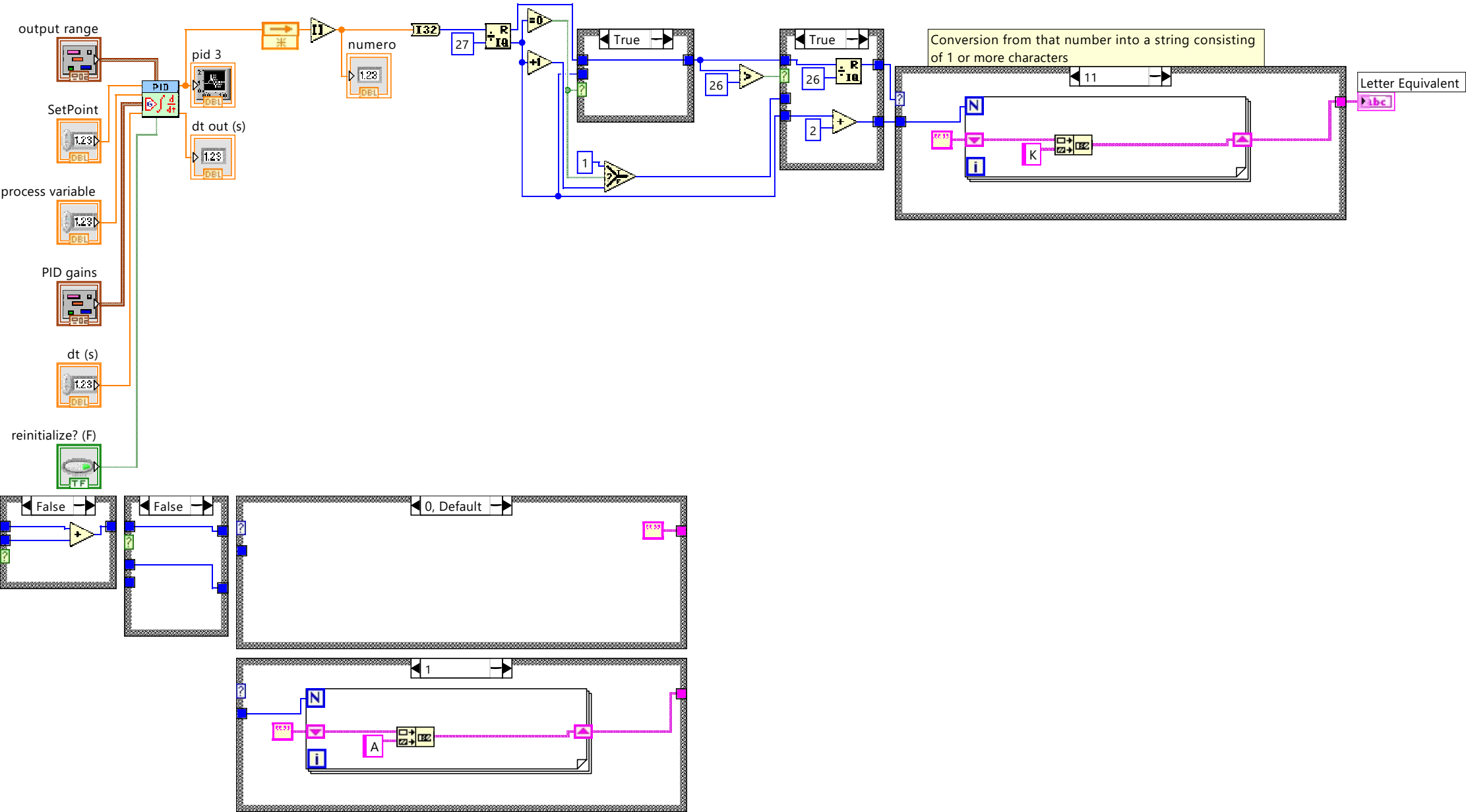


arduino.vi

G:\working_directory\Uevora\Disseração\anexos\Anexo3\Labview\arduino.vi

Last modified on 11/16/2016 at 10:59

Printed on 11/16/2016 at 11:02



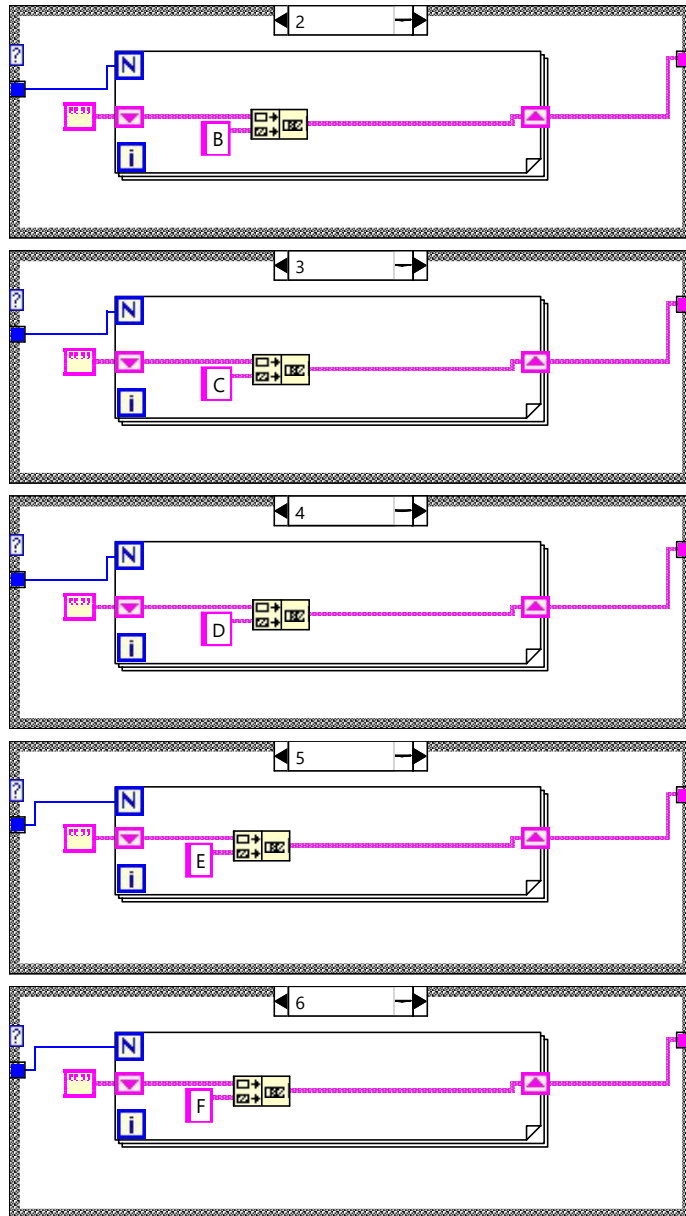


arduino.vi

G:\working_directory\Uevora\Disseração\anexos\Anexo3\Labview\arduino.vi

Last modified on 11/16/2016 at 10:59

Printed on 11/16/2016 at 11:02



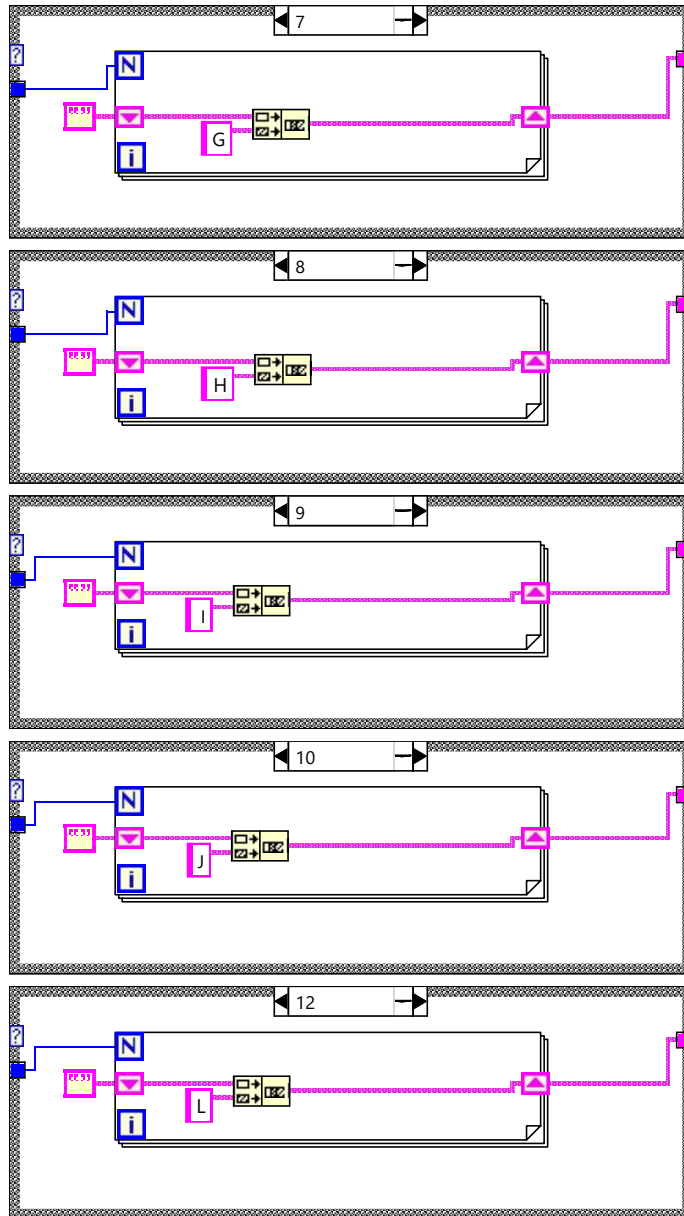


arduino.vi

G:\working_directory\Uevora\Disseração\anexos\Anexo3\Labview\arduino.vi

Last modified on 11/16/2016 at 10:59

Printed on 11/16/2016 at 11:02



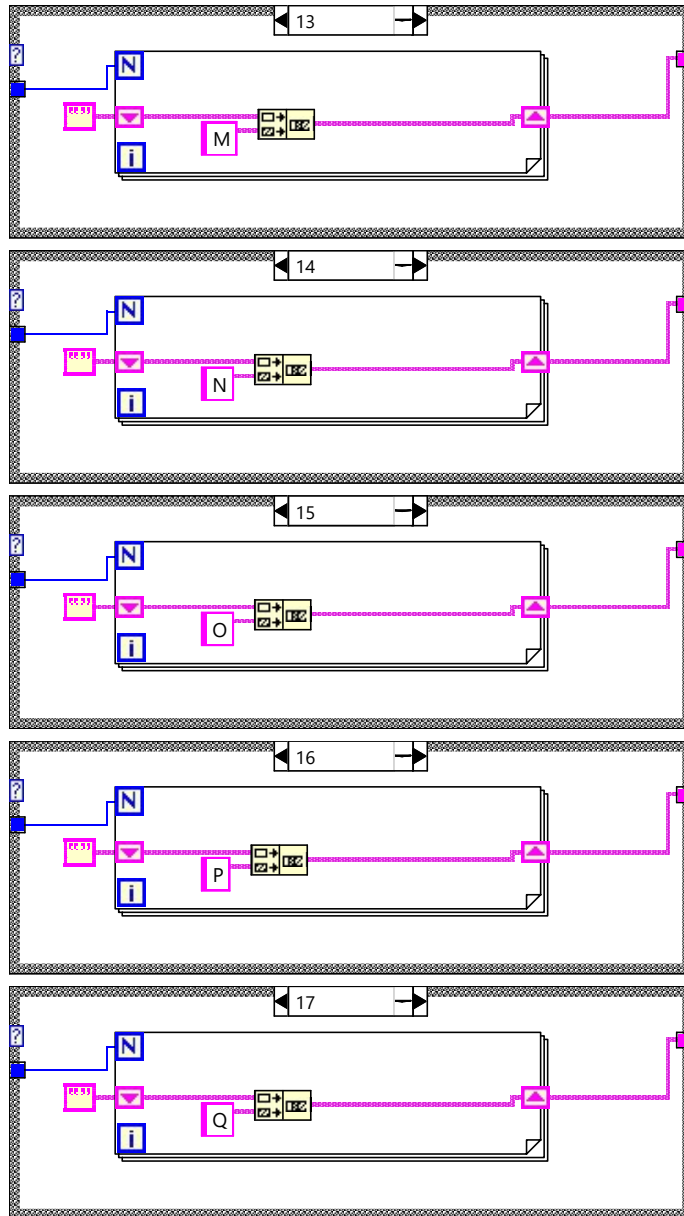


arduino.vi

G:\working_directory\Uevora\Disseração\anexos\Anexo3\Labview\arduino.vi

Last modified on 11/16/2016 at 10:59

Printed on 11/16/2016 at 11:02



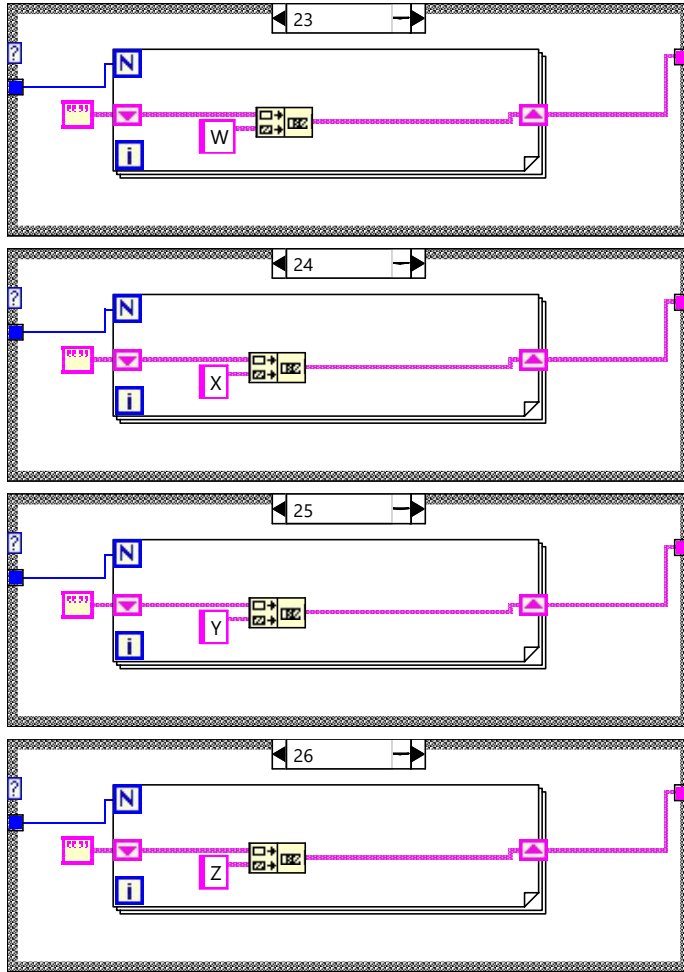


arduino.vi

G:\working_directory\Uevora\Disseração\anexos\Anexo3\Labview\arduino.vi

Last modified on 11/16/2016 at 10:59

Printed on 11/16/2016 at 11:02



Anexo D

Development and test results of a calorimetric technique enabling fluid properties independent HFT energy content measurement



SolarPACES 2013

Development and test results of a calorimetric technique for solar thermal testing loops, enabling mass flow and Cp measurements independent from fluid properties of the HTF used

J. Marchã¹, T. Osório¹, M. Collares Pereira^{1*}, P. Horta¹

University of Évora - BES Chair in Renewable Energies, Casa Cordovil, 2º Andar, Rua Dom Augusto Eduardo Nunes, 7, 7000-651 Évora, Portugal; (+351) 266 759 350, email collarespereira@uevora.pt

Abstract

Thermal heat transfer fluids (HTF) used in solar collectors (e.g. synthetic oils) are known to age and degrade [1]. This degradation is impossible to control, affecting the fluid heat transfer capacity and thus the ability of measuring the performance of an HTF heating device (e.g. a solar collector) based on known specific heat values.

Collector testing is also crucially dependent on an accurate measurement of HTF mass flow rate. Such measurement relies on flow meters suitable for the accuracy, operating temperature and flow range requirements of the testing procedures, often an expensive and demanding component in particular when no-intrusive measurements are to be done in a close circuit.

For power measurement purposes, as those performed in solar collector testing procedures, a direct measurement of the product between specific heat and mass flow rather than a separate measurement of both quantities is suitable. A calorimetric technique delivering this direct measurement is thus a suitable strategy to overcome such difficulties with acceptable (and even higher) measurement accuracy.

Solutions of this kind have already been proposed [2, 3]. In this paper we revisit and improve the solution presented in [2] and demonstrate its usefulness in a solar collector testing loop, for temperatures up to 200°C. A calorimeter prototype was thoroughly tested and calibrated with water as HTF (enabling accurate independent measurement of specific heat and mass flow rates values). Calorimeter calibration results were then used in the testing with thermal oil whose specific heat values were previously known from manufacturer and independent laboratory measurements.

A comparison of Cp measured by the calorimeter with the value given by the HTF manufacturer is used to test the calorimeter capacities. The agreement achieved was very good. It is noted that the technique can be easily implemented in any high temperature loops, large or small.

* Corresponding author. Tel.: +351-266-759-360.
E-mail address: collarespereira@uevora.pt

© 2013 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).

Selection and peer review by the scientific conference committee of SolarPACES 2013 under responsibility of PSE AG.

Final manuscript published as received without editorial corrections.

Keywords: calorimeter, flow rate measurement; specific heat measurement; HTF degradation

1. Introduction

In solar collector testing a crucial measurement is that of the power being delivered by the collector P_{col} at any given moment and operating temperature (established as the average value between inlet and outlet temperatures), as in (1), where \dot{m} is the HTF flow rate through the collector and C_p its specific heat.

$$P_{col} = \dot{m}C_p(T) \times (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

In testing loops using an HTF fluid other than water, the issue of flow rate accuracy is a more delicate one and in particular $C_p(T)$ is hard to know in any accurate fashion. Even when measured values are provided by the oil supplier, thermal oils tend to degrade with time and use and it is not practical (or even impossible) to keep on measuring its evolution with time.

A direct measurement of the product $\dot{m}C_p$ is proposed through the use of a calorimetric technique (Calorimeter) placed in series within the testing loop, where a known amount of power (electric power) is dissipated and inlet and outlet calorimeter temperatures are measured.

First $\dot{m}C_p(T)|_{cal}$ is obtained by finding the ratio $\frac{P_c}{T_{out} - T_{in}}$. The real value of $\dot{m}C_p(T)$ is then found by correcting with the calorimeter calibration factor F , according to (2)

$$\dot{m}C_p(T) = \dot{m}C_p(T)|_{cal} * F = \frac{P_c}{(T_{outcal} - T_{inca})} F \quad (2)$$

I.e. with (2) an accurate measurement of the product mass flow rate*specific heat is provided in any circumstances and type of fluid and eventual fluid thermal properties degradation or change, without having to know any details about that and avoiding complex calibration of fluid properties in loops with fluids that are not easily or cheaply disposed off and without having to resort to flow meter verifications with constant loop breakings and fluid sample retrievals.

The present paper is organized in the following way:

- In 2. a description of the calorimeter is made, highlighting its basic features and the care placed behind guaranteeing that the calibration factor F will be the same at any temperature.
- In 3. the calorimeter is inserted in a water testing loop, where both \dot{m} and $C_p(T)$ can be measured or are known with great accuracy and thus can be used for the determination of F
- In 4. the calorimeter was inserted in an oil loop and used to check the values of $C_p(T)$ given by the oil supplier. Coherent values are shown to result, and even only after a few hours of testing, fluid degradation (and C_p value changes) can be clearly observed, thus attesting to the great convenience of the new device developed and presented. An application to power calculation is also presented.
- In 5. the main features and conclusions are summarized.

Nomenclature

\dot{m}	mass flow rate in (kg/min)
$C_p(T)$	specific heat of the fluid at the average temperature $T = (T_{in} + T_{out})/2$ (J/kg.°C)
T_{out}	outlet temperature (°C)
T_{in}	inlet temperature (°C)
P_{col}	power collected by a solar collector (W)

P_c	dissipated power in calorimeter (W)
T_{outcal}	calorimeter outlet temperature (°C)
T_{inca}	calorimeter inlet temperature (°C)
F	calorimeter calibration factor
ρ	density of water (kg/l)
IC	inner chamber
OC	outer chamber
HTF	heat transfer fluid
PT	parabolic through
a, b	constants of a linear least square fit

2. Calorimeter, concept and description

In [1] the problem of HTF degradation in PT concentrators performance testing and evaluation was raised and in [3] a concept for a calorimeter like technique was developed to overcome these type of difficulties. However this calorimeter is complex and there are other, hopefully simpler, possible designs.

In prior work [2], a calorimeter technique very similar to the one presented in this paper, had already been proposed and developed, precisely to solve this problem. The configuration chosen for the new device described in the present paper is an improvement on that earlier one with the following objectives:

- maximize heat input to the circulating fluid
- minimize and, above all, render as constant as possible the heat loss to the surroundings at any operating temperature

The concept is the following (see Fig.1):

- in a stainless steel cylindrical inner chamber (IC) heat is provided by an electrical resistance immersed in the HTF
- this chamber is inside another stainless steel cylindrical chamber (outer chamber- OC) from which the HTF fluid comes; this outer chamber provides an environment for heat losses which is at the inlet temperature to IC; thus the power which is lost to the fluid, is very much the same at any temperature at which the calorimeter is to be used.

An adequate design (see Fig. 1) ensures that the fluid really fills IC and bathes as much as possible the electrical resistance (note the use of the long cylindrical baffle inside IC and observe the way the fluid comes in and gets out of IC). Nevertheless IC chamber is insulated (2.5cm of rock wool) and so is the OC external well (3cm of rock wool).

The calorimeter is instrumented with inlet and outlet 4-Wire PT100 temperature probes and power is measured through the voltage across the calibrated electrical resistance used. Dissipated power is to be chosen according to the recommended flow rate for solar collector testing ($0.02 \text{ kgs}^{-1}\text{m}^2$ [4]) and HTF temperature differences (usually ranging from 5°C to 15°C). In the case of the device developed and analyzed an electrical resistance of 28.8 Ω was chosen.

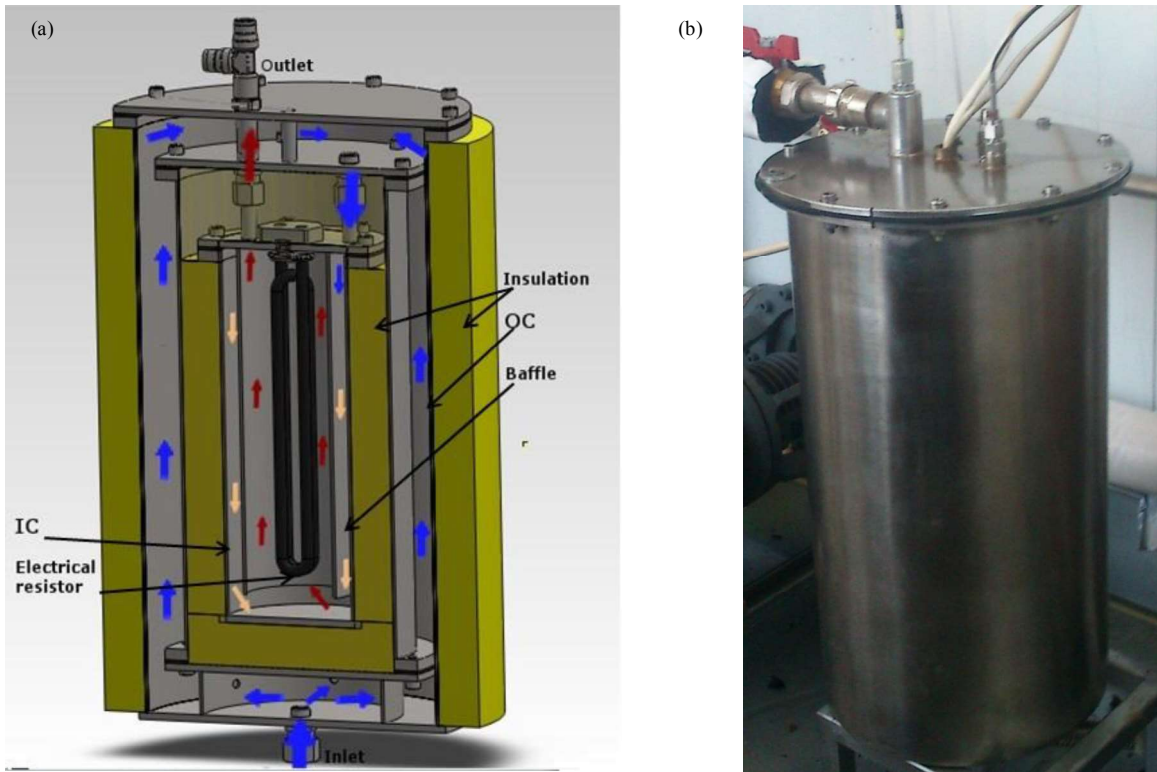


Fig. 1. (a) cross section of the calorimeter; (b) photograph of the calorimeter fully assembled, but without the insulation of the OC in place.

3. Calibration with water – factor F: the calorimeter equation

3.1. Testing circuit

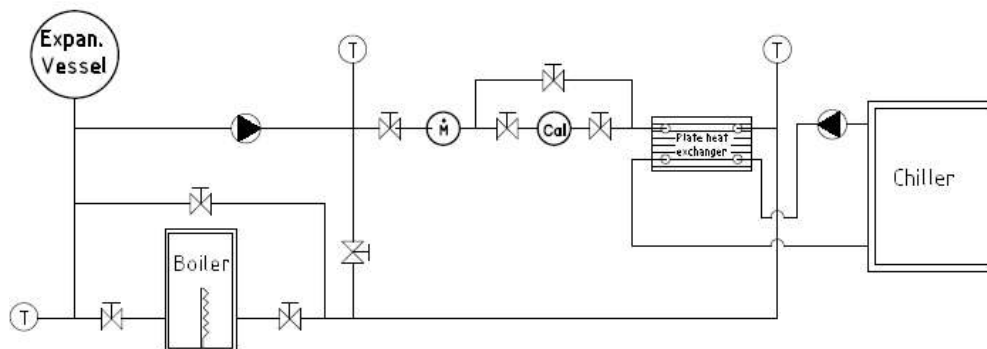


Fig. 2 the testing circuit

In the circuit used, water is circulated as the HTF and heated by an electrical boiler, constituted by an 100 liter tank with a 6kW electrical resistance inside. Inlet temperature to the calorimeter is kept constant (within 0.1°C) with

the help of an heat exchanger and cold water provide by a chiller.

Flow rate is very accurately measured within 0.2% by a electromagnetic flow meter, calibrated at the solar collector testing laboratory [6] and CP is calculated by [5] as function of temperature T as in (4)

$$C_p = 4218,525 - 2,55222T + 5,51766E^{-2}T^2 - 4,9454E^{-4}T^3 + 2,3426E^{-6}T^4 - 3,79E^{-9}T^5 \quad (4)$$

Since in the case of water the flow meter used is a volumetric one and it is also necessary to convert volume flow rate to mass flow rate by considering (5), which gives the density of water ρ as a function of temperature

$$\rho = 1 + 0,0000117T - 0,0000059T^2 + 2,008E^{-8}T^3 - 3,897E^{-11}T^4 \quad (5)$$

Flow rate values and stability are insured by a frequency inverter associated with the circulation pump. Flow rates from 0 to 5 kg/min could thus be achieved and testing made for inlet temperatures from 25 to 85°C.

3.2. Methodology used

For each temperature and for different flow rates, and using (2) one would expect:

$$\dot{m}Cp(T)|_{real} = \dot{m}Cp(T)|_{cal} * F \quad (6)$$

Several pairs of \dot{m} values were obtained with the calorimeter and by measuring independently \dot{m} with the flow meter, for each temperature and for different flow rates.

The values chosen were ~1, 2, 3, 4 Kg/min for the flow rate and ~45, 65, 80°C for the mean temperature in the Inner Chamber (IC).

Results were plotted and a straight line regression (least square fit) was obtained of the form

$$\dot{m}Cp|_{real} = a \times \dot{m}Cp|_{cal} + b \quad (7)$$

Where $\dot{m}Cp|_{cal}$ was measured according to

$$\dot{m}Cp|_{cal} = \frac{P_c}{(T_{outcal} - T_{inca})} \quad (8)$$

And $\dot{m}Cp|_{real}$ from the product of \dot{m} as measured by the flow meter and Cp calculated from (4).

If $b=0$ had been chosen then $a=F$. A careful analysis of all the results leads to the choice of a regression with $b \neq 0$, as the one that minimizes the errors at all temperatures.

Thus (8) will now be addressed as the calibration equation for the calorimeter,

3.3. Results for the calorimeter equation

Results are plotted in Fig. 3.

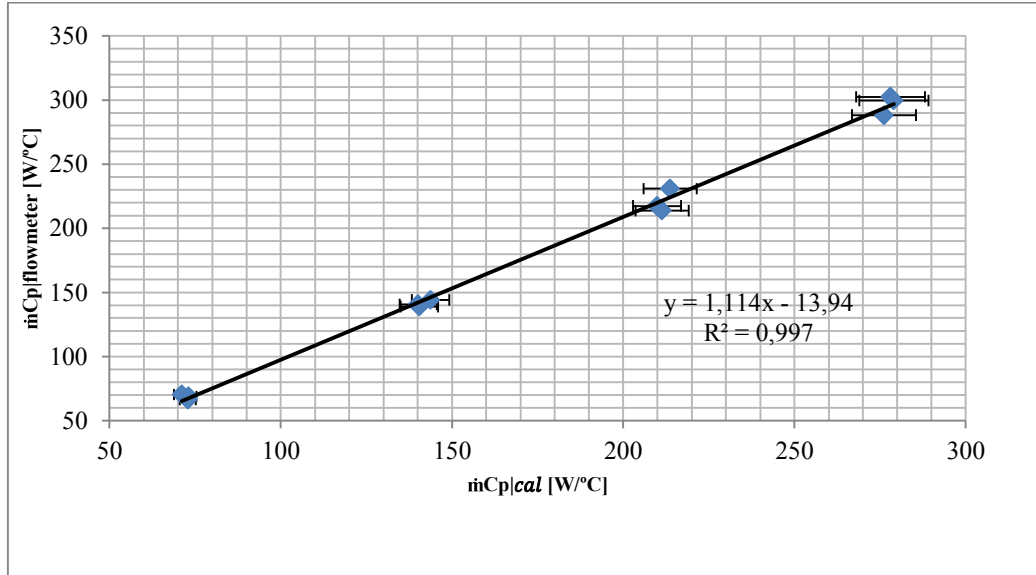


Fig. 3 : flow rate as measured by the flow meter vs flow rate as measured by the calorimeter, for different fluid temperatures (45,65,85), as evidenced by the cluster of points around the approximately chosen flow rate values 1, 2, 3, 4Kg/min

The least square fit to the measurement points produced:

$$\begin{aligned}
 a &= 1.114 & \delta a &= 0.018 \\
 b &= -13.94 \text{ W/}^\circ\text{C} & \delta b &= 3.55
 \end{aligned}$$

Fig. 4 also shows the error bars associated with each measurement of $\dot{m}Cp|_{cal}$; it also shows (although they are barely perceptible) vertical error bars (corresponding to 0.2% of the absolute value resulting from the flow rate measurement)

The uncertainties δa and δb result from the least square fit considering all uncertainties involved.

Note: It can be seen that b is not zero, albeit with a small value. It is the result of a mathematical imposition but perhaps reflecting some thermal characteristic of the calorimeter not discussed here.

The results obtained show that an upper limit for the accuracy is somewhere between 3 and 4%. This accuracy is certainly susceptible of improvement through the measurement of the dissipated power, since there were problems in the measurement of this quantity, not only because current was not directly measured but also because local voltage was far from a pure sinusoidal. Correcting for these conditions will likely yield accuracy at least between 1 to 2%. Further improvements might even be achieved through the use of a DC current source.

4. The calorimeter in the oil loop; application to the measurement of the CP of oil

4.1. The oil loop

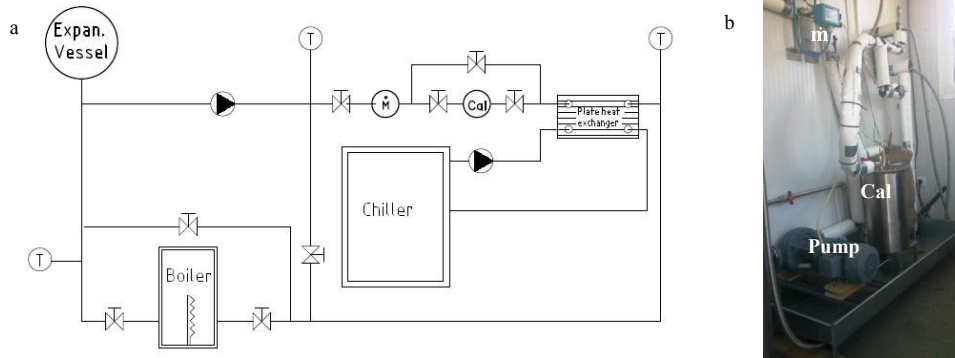


Fig. 4 shows: (a) a scheme of the oil loop, very similar to that of Fig. 2; (b) a photograph of the setup, with the calorimeter inserted and signaled, with OC not yet insulated

The oil loop is conceptually the same as the water loop. The direct flow rate measurement is made with a Coriolis force based flow meter [Rheonik RHM04].

All the other components in the loop are the same as in Fig. 2.

4.2. Application to the determination of the oil Cp at different temperatures

With the calorimeter calibrated (Section 3,) it would now be possible to use it as planned, for the direct measurement of the product $\dot{m}Cp(T)$ of any HTF in a solar collector testing loop.

As an application it was decided to use the calorimeter to measure $Cp(T)$ and compare the results with those provided by the oil supplier.

Measurements were made from 45 to 155°C using the oil loop of Fig. 4, charged with a given fluid (BP Transcal N).

Eq. (2) was modified to yield

$$Cp(T)|_{real} = \frac{1}{\dot{m}|_{coriolis}} (\dot{m}Cp(T)|_{cal} \times a + b) \tag{9}$$

According to the supplier $Cp(T)$ varies with (T) in a linear fashion as in (10)

$$Cp(T)|_{supplier} = 3.571T + 1807.6 \tag{10}$$

4.3. Results

From (11) it can be seen that the Cp of the oil HTF is lower than that of water, which means that the same amount of power being dissipated in the electrical resistance will now yield a higher temperature difference between inlet and outlet to the calorimeter. This fact was taken into consideration.

Since Cp varies with T , the results will have a built in inaccuracy due to the temperature difference across the calorimeter. For the high flow rate value of 5kg/min, this temperature difference is on the order of 7-8°C and on the order of 17-20°C for the lowest flow rate of 2kg/min. All results are listed in Table 1.

The empty cells in Table 1 correspond to the fact that very high flow rates were impossible to obtain at low

temperatures and, for higher temperatures, the low flow rates were not used so that outlet temperatures would not exceed the present setup temperature tolerances.

Table1. Summarizes the results obtained at different temperatures

T (°C)	65	85	105	115	125	135	145	155
Cp Cal at ~ 6kg/min [J/kg.°C]	-	-	-	2258	2242	2316	2395	2521
Cp Cal at ~ 5kg/min [J/kg.°C]	2094	2199	2204	2203	2159	2362	2241	2530
Cp Cal at ~ 4kg/min [J/kg.°C]	2137	2194	2179	-	-	-	-	-
Cp Cal at ~ 3kg/min [J/kg.°C]	2151	2166	2234	-	-	-	-	-
Cp Cal at ~ 2kg/min [J/kg.°C]	1910	2013	2020	-	-	-	-	-
Cp Supplier [J/kg.°C]	2038	2108	2174	2214	2256	2290	2322	2364

Fig. 5 is a plot of the results obtained, as they appear in Table 1, showing error bars associated with each measurement and the information (straight line) given by the supplier

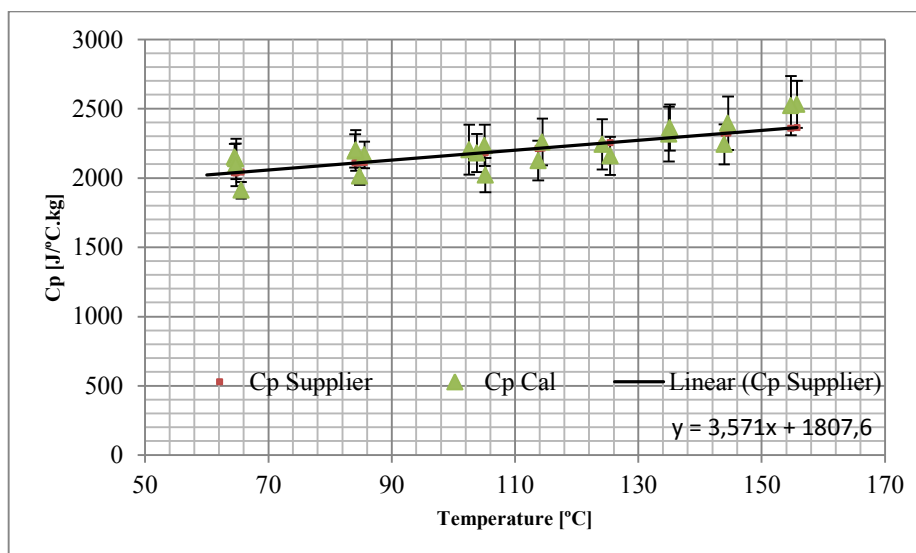


Fig. 5; Cp as function of T; (1) dots with error bars are the results from the calorimeter (2) straight line: Cp given by the supplier

These results shows that the values obtained are in good agreement with those provide by the supplier, even though in the case of the calorimeter, and as was explained, the fluid is not at an exact, fixed temperature as it is assumed in the supplier's curve.

For the highest temperature (155°C) there is perhaps a tendency for a larger deviation of the measured value from that of the supplier's curve, which is in part attributed to the difficulty in achieving thermal stability and tolerances in the experimental setup

Fig. 6 contains two pictures, those of two oil samples: (i) oil which had been used in all the tests referred above and which was labeled as "used oil" and (ii) "new oil" out of the supply barrel.

It can be seen that new and used oil look different, but no change (after several hours of operation) is already really perceptible in terms of $C_p(T)$ as measured by the calorimeter. In future work $C_p(T)$ will be independently monitored for the used oil and the corresponding calorimeter's response will be analyzed as a further test of its accuracy and usefulness.

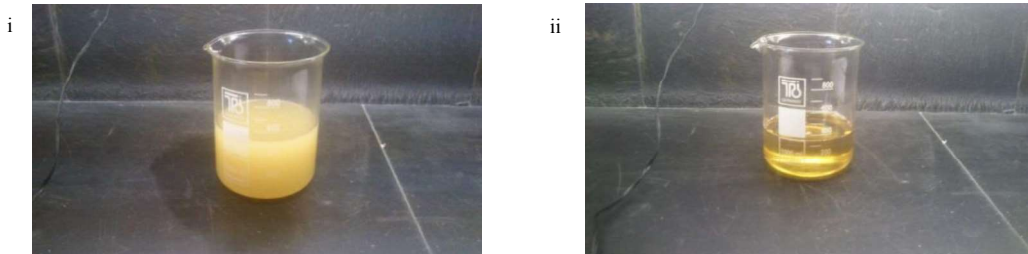


Fig. 6: (i) a sample of “used oil” (ii) a sample of “new oil”

5. Conclusions

A new calorimeter was developed and tested to provide an accurate measurement of the product, $\dot{m}C_p$, i.e flow rate times specific heat together, an essential part of any solar collector efficiency measurement using an HTF other than water.

This device is very simple, cheap and easy to build, and provides a degree of accuracy which is not easily matched by that of the standard method, which requires constant sampling and external control measurement of the C_p of the HTF. It is based on the principle of delivering a known amount of power to the circulating fluid, in a way that the power lost to the environment is a small quantity of the total and, more important, nearly the same at any operating temperature, thereby determining a simple and unique constant calibrating factor.

Besides, all relevant measurements can be made with very common and simple measuring instruments (amp meters and voltmeters!), dispensing with the expensive flow meters and their calibrations used in this investigation.

The calorimeter was fully described and its calibration equation was determined with the help of a low pressure water loop. The calorimeter was then inserted in a thermal oil loop and used to measure the C_p of the circulating oil. The results obtained show a good agreement with the values of $C_p(T)$ provided by the supplier, an indication of the calorimeter's performance.

This calorimetric technique can be easily implemented with any type of HTF fluid, in large or small loops, for simple online performance evaluation or for collector testing and certification.

The development presented in this paper was limited to temperatures below 180°C simply because the oil loop used was of the atmospheric type and some of the components (flow meter, pump, etc) could not take temperatures above 200°C. However the concept (mechanical construction and thermal behavior of the calorimeter) can certainly be applied to higher operating temperatures and it should operate equally well. However thermal properties of the fluid may not enable sufficient heat dissipation from the electrical resistance towards it, therefore forcing the adoption of suitable modifications of the inner chamber and resistance type and size (IC).

In future work, a device developed with the concern of achieving the highest possible accuracy will be developed and even proposed as a product to be made available on the market

Acknowledgements

The work was performed under the grant PTDC/SEN-ENR/121292/2010 attributed by FCT – Fundação Ciência e Tecnologia, Av. D. Carlos I, 124-J, 1249-074, Lisboa Portugal

References

- [1] Héctor Barroso, Francisco Sanz, Miguel Hernández, Daniel Pereira, Daniel Rayo, Enrique Serrano. Understanding of the HTF Degradation on Parabolic Trough Power Plant Energy Performance, Marrakech; 2012
- [2] M. Collares Pereira, J. Duque, C. Saraiva, A. Rego Teixeira. A calorimeter for solar thermal collector testing, Solar Energy Vol. 27; 1981
- [3] Christoph Hilgert, Gregor Bern and Marc Röger. KONTAS - CP – Flow Through Calorimeter For Online Heat Capacity Measurement Of Thermal Oils In CSP Applications, Marrakech; 2012
- [4] EN 12975-2006. Thermal solar systems and components – Solar collectors, chapter Part 2: Test Methods European Standard, March 2006.
- [5] Eckert, E.R.G., Drake, R.M. Analysis of Heat and Mass Transfer: McGraw Hill Higher Education; 1972
- [6] LECS- Laboratório de Ensaios de Colectores Solares, fully accredited testing institution, within LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa , Portugal (www.lneg.pt)