



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Controlo automático da Plataforma de Ensaios de Concentradores Solares da Universidade de Évora

Jorge Filipe Faria Pereira

Orientador(es) | João Figueiredo
Tiago Osório

Évora 2020





Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Controlo automático da Plataforma de Ensaios de Concentradores Solares da Universidade de Évora

Jorge Filipe Faria Pereira

Orientador(es) | João Figueiredo

Tiago Osório

Évora 2020



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

- Presidente | António Heitor Reis (Universidade de Évora)
- Vogal | Paulo Canhoto (Universidade de Évora)
- Vogal-orientador | João Figueiredo (Universidade de Évora)

Resumo

A Universidade de Évora construiu em 2014, no Polo da Mitra, a Plataforma de Ensaios de Concentradores Solares (PECS) com o objetivo da realização de ensaios sob as exigências da norma ISO9806. Esta exige o controlo de determinadas variáveis tais como ângulos de incidência solar, caudal mássico e temperatura de entrada no coletor durante a realização dos ensaios.

Nesta tese analisaram-se todos os componentes existentes na plataforma e avaliou-se a adequação dos mesmos para a realização de ensaios cumprindo as exigências da norma. Para tal, desenvolveu-se um novo *software* para aquisição dados, controlo da movimentação da plataforma e das variáveis do circuito hidráulico.

Desenvolveram-se controladores para o caudal mássico e para a temperatura na entrada do coletor, sendo o primeiro construído com base em dados experimentais e o segundo projetado segundo um modelo. Além disso realizaram-se algumas melhorias na plataforma com vista a facilitar a operação da mesma.

Abstract

Automatic control of Solar Concentrators Tests Platform of University of Évora

In 2014, the University of Évora built, at Pólo da Mitra, the Solar Concentrator Testing Platform (PECS) with the objective of conducting tests under the requirements of ISO9806. This requires the control of certain variables such as solar incidence angles, mass flow and inlet temperature in the collector during the tests.

In this thesis all the existing components of the platform were analyzed as well as its suitability to perform the tests following the standard requirements. A new software was developed for data acquisition, platform movement control and management of the hydraulic circuit variables.

Mass flow and inlet temperature controllers were developed, the first was built based on experimental data whereas the second was modelled. In addition, some improvements were made to the platform to facilitate its operation.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Ensaio a Concentradores Solares Térmicos.....	1
1.2	Controlo.....	4
1.2.1	Controlo de Malha Aberta	4
1.2.2	Controlo de Malha Fechada.....	5
2	Descrição da Plataforma de Ensaio de Concentradores Solares.....	6
2.1	Estrutura móvel.....	6
2.1.1	Rotação	7
2.1.2	Inclinação	9
2.2	Circuito Hidráulico.....	10
2.2.1	Tubagem	10
2.2.2	Vaso de expansão	11
2.2.3	Bombas	12
2.2.4	Caldeira	12
2.2.5	Chiller	14
2.2.6	Permutador de Calor.....	14
2.3	Instrumentação e Sensores.....	15
2.3.1	Variadores de Frequência	15
2.3.2	Caudalímetros.....	16
2.3.3	Sondas de temperatura e pressão.....	17
2.3.4	Piranómetro	18
2.3.5	Estação Meteorológica	18
2.3.6	PLC.....	18
2.3.7	Aquisição de sinais	19



3	Melhorias na plataforma	20
3.1	<i>Software</i> de aquisição e gravação de dados	20
3.1.1	Configuração	21
3.1.2	Operação.....	23
3.2	Rotação.....	25
3.3	Inclinação	26
4	Desenvolvimento dos controladores.....	30
4.1	Controlo do Caudal.....	30
4.1.1	Automatização da construção do controlador	46
4.2	Controlo de temperatura	47
4.2.1	Desenvolvimento do Modelo Térmico Simplificado.....	47
4.2.2	Validação do modelo	54
4.2.3	Construção do controlador	58
4.3	Implementação dos controladores	61
5	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	62
5.1	Conclusões.....	62
5.2	Desenvolvimentos Futuros.....	63
6	Referências.....	65
7	Anexos.....	67

Índice de figuras

Figura 1 - Esquema de controlador em malha aberta	4
Figura 2 - Esquema de controlador em malha fechada.....	5
Figura 3 - Esquema de funcionamento do sistema de controlo.....	7
Figura 4 - Apoio móvel com motor	7
Figura 5 - Esquema da capacidade de rotação da plataforma	8
Figura 6 - Roda e encoder	8
Figura 7 - Central Hidráulica	9
Figura 8 - Esquema da composição do tubo.....	10
Figura 9 - Esquema simplificado do circuito hidráulico	11
Figura 10 - Vaso de expansão	11
Figura 11 - Bomba de Óleo	12
Figura 12 - Painel de controlo da caldeira	13
Figura 13 - Chiller e Reservatório.....	14
Figura 14 - Permutador de calor	15
Figura 15 - Variador de Frequência VF-PS1	15
Figura 16 - Caudalímetro OPTIMASS 6000 S80.....	16
Figura 17 - Caudalímetro ProcessMaster FEP311.....	17
Figura 18 - Sonda de Temperatura (direita) e sonda de pressão (esquerda).....	17
Figura 19 - PLC.....	18
Figura 20 - Painel de configuração da aquisição e gravação de dados	23
Figura 21 - Painel de aquisição e gravação de dados completo	24
Figura 22 - Painel de Rotação	26
Figura 23 - Esquema de controlo de inclinação.....	28
Figura 24 - Painel de inclinação	29
Figura 25 - Relação entre caudal e tensão.....	32
Figura 26 - Gráfico da relação entre caudal e tensão para várias temperaturas	32
Figura 27 - Relação entre Tensão e Caudal.....	34
Figura 28 - Diagrama do controlo de caudal.....	34



Figura 29 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal	35
Figura 30 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal	36
Figura 31 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal	38
Figura 32 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com 2 integrações	39
Figura 33 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com 3 integrações	40
Figura 34 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com limite de 5%	42
Figura 35 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal com limite de 0,5%	43
Figura 36 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com limite de 0,025%	44
Figura 37 - Gráfico dos dados registados durante a rotina de calibração do controlador.....	45
Figura 38 - Esquema simples do sistema	54
Figura 39 - Gráfico da temperatura prevista pelo modelo e da temperatura real	55
Figura 40 - Gráfico da temperatura prevista pelo modelo e da temperatura real	56
Figura 41 - Gráficos da temperatura controlada pela caldeira.....	59
Figura 42 - Representação do bypass do permutador de calor.....	59
Figura 43 - Exemplo representativo das variações de temperatura ao longo do circuito	60
Figura 44 - Diagrama de controlo de temperatura proposto	61
Figura 45 - Painel de ativação e configuração dos controladores.....	61
Figura 46 - Diagrama dos Desenvolvimentos Futuros	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Combinações possíveis de potência da caldeira.....	13
Tabela 2 - Relação entre sensores e grandezas medidas	20
Tabela 3 - Tabela de Códigos para medição (Agilent Technologies)	22
Tabela 4 - Dados experimentais da relação entre a tensão e o caudal.....	37
Tabela 5 - Análise de desempenho do controlo de caudal.....	39
Tabela 6 - Análise do desempenho do controlo de caudal com 2 integrações.....	40
Tabela 7 - Análise do desempenho do controlo de caudal com 3 integrações.....	41
Tabela 8 - Análise do desempenho do controlo de caudal com limite de 5%.....	42
Tabela 9 - Análise de desempenho do controlo de caudal com limite de 0,5%.....	43
Tabela 10 - Análise do desempenho do controlo de caudal com limite de 0,025%	44
Tabela 11 - Análise dos dados da rotina de calibração do controlador	45
Tabela 12 - Propriedades do aço carbono SAE 1006	50
Tabela 13 - Propriedades da lã de rocha	50
Tabela 14 - Características do sistema.....	52

1 Introdução

O ensaio de coletores solares térmicos segundo a norma de ensaio ISO9806 exige dadas condições, como caudal e temperatura, que necessitam de ser controladas dentro de certos limites. Para o controlo bem-sucedido é necessário que a teoria de controlo se ajuste à aplicação desejada e é ainda essencial conhecer bem as características dos equipamentos ao dispor assim como as suas limitações.

Nesta dissertação serão abordados os requisitos da norma de ensaio e os princípios da teoria de controlo. De seguida serão apresentados os componentes físicos da plataforma e circuitos hidráulicos, a instrumentação existente assim como os componentes do sistema de aquisição de dados e controlo. Por fim, apresentam-se as soluções desenvolvidas e a sua implementação.

1.1 Ensaio a Concentradores Solares Térmicos

A norma ISO9806:2017 (1) define os procedimentos para o ensaio de coletores solares térmicos relativamente à sua performance, fiabilidade, durabilidade e segurança sob certas condições.

Esta admite a realização de ensaios a coletores solares através de dois métodos distintos, o método estacionário e o método quasi-dinâmico associados respetivamente a um modelo estacionário e um modelo quasi-dinâmico do coletor. Apesar de diferirem as metodologias e condições necessárias ao ensaio, os resultados finais podem ser comparados embora o modelo quasi-dinâmico seja bastante mais completo.

No método estacionário é necessário que todas as variáveis relevantes para a caracterização térmica do coletor se mantenham constantes ao longo de todo o ensaio, sendo elas a radiação incidente no coletor deve ser superior a 700 W/m^2 com uma tolerância de $\pm 50 \text{ W/m}^2$, a variação da temperatura ambiente deve estar compreendida entre $\pm 1,5 \text{ K}$, a variação da temperatura do fluido de transferência térmica à entrada do coletor não deve ser superior a $\pm 0,1 \text{ K}$ e o caudal deve ser $0,02 \text{ kg/s m}^2$ com tolerância de $\pm 1 \%$. O ensaio precisa ainda de se realizar com velocidade do vento entre 2 e 4 m/s, a fração entre radiação difusa e global deve

ser inferior a 30 % assim como o ângulo de incidência da radiação no coletor deve ser inferior a 20° (dependendo do tipo de coletor este valor pode ter de ser inferior).

O método quasi-dinâmico não impõe restrições relativamente à radiação incidente, ângulo de incidência da radiação, fração de radiação difusa e temperatura ambiente. Sendo menos restritivo relativamente à velocidade do vento sendo entre 1 e 4 m/s e à variação da temperatura de entrada sendo ela ± 1 K, no entanto com as mesmas restrições que o ensaio estacionário relativamente ao caudal.

O método de ensaio mais adequado a coletores concentradores é o método quasi-dinâmico, sendo que segundo este modelo a potência útil fornecida por um coletor é descrita pela equação seguinte:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A} = & \eta_{0,b} \cdot K_b \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot K_d \cdot G_d - c_1(T_m - T_a) - c_2(T_m - T_a)^2 - c_3 \cdot u(T_m - T_a) \\ & + c_4 (E_l - \sigma \cdot T_a^4) - c_5 \frac{dT_m}{dt} - c_6 \cdot u \cdot G - c_7 \cdot u (E_l - \sigma \cdot T_a^4) \\ & - c_8(T_m - T_a)^4 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde,

c_1 é o coeficiente de perdas térmica a $(T_m - T_a) = 0$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

c_2 é a dependência na temperatura do coeficiente de perdas térmicas [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$]

c_3 é a dependência na velocidade do vento do coeficiente de perdas térmicas [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]

c_4 é a dependência na temperatura do céu do coeficiente de perdas térmicas

c_5 é a capacidade térmica efetiva [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

c_6 é a dependência na velocidade do vento do rendimento com perdas térmicas nulas [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]

c_7 é a dependência na velocidade do vento na troca radiativa em infravermelho [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]

c_8 corresponde às perdas radiativas [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]

A é a área do coletor [m^2]

\dot{Q} é a potência útil do coletor [W]

$\eta_{0,b}$ é a eficiência máxima do coletor

K_b é o modificador do ângulo de incidência para a radiação direta

K_d é o modificador do ângulo de incidência para a radiação difusa

G_b é a radiação direta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

G_d é a radiação difusa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

u é a velocidade do vento [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

T_m é a temperatura média do coletor [K]

T_a é a temperatura ambiente [K]

No caso dos coletores concentradores devem ser aplicadas algumas regras como:

- para coletores concentradores com cobertura transparente e concentração superior a 3, a dependência da velocidade do vento pode ser ignorada;
- para coletores concentradores evacuados a dependência da velocidade do vento pode ser ignorada seja qual for a concentração;
- para coletores com concentração menor que 20, devem ser identificados $\eta_{0,b}$, K_b , K_d e os coeficientes c_1 , c_2 e c_5 . O parâmetro c_8 deve ser definido como 0;
- para coletores com concentração maior que 20, os parâmetros c_2 , c_3 , c_4 , c_6 , c_7 e K_d devem ser definidos como 0. O parâmetro c_5 deve ser identificado.

No caso de um coletor com tubos de vácuo de baixa concentração a equação dada poderia ser dada por:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \eta_{0,b} \cdot K_b \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot K_d \cdot G_d - c_1(T_m - T_a) - c_2(T_m - T_a)^2 - c_5 \frac{dT_m}{dt} \quad (2)$$

Após a realização dos ensaios necessários a um coletor é feito o tratamento dos dados que são usados numa regressão linear multivariável de forma a obter os parâmetros caracterizadores do coletor.

1.2 Controlo

A maior parte dos sistemas modernos têm neles presente engenharia de controlo, apesar de ser uma tecnologia que passa praticamente despercebida no dia a dia, está presente e é vital na maioria das aplicações usadas.

Para que o projeto de controlo seja bem-sucedido é essencial ter um ponto de vista global sobre os diferentes componentes envolvidos, tais como o sistema a ser controlado, os objetivos a atingir, os sensores disponíveis e a sua localização, os atuadores disponíveis, a tecnologia de comunicações a utilizar, os meios de computação disponíveis, os algoritmos e por fim as perturbações e incertezas existentes.

1.2.1 Controlo de Malha Aberta

O sistema de controlo de malha aberta é um tipo de controlo sem *feedback*, ou seja, o estado do processo não influencia de forma alguma a ação de controlo ou o sinal enviado ao processo.

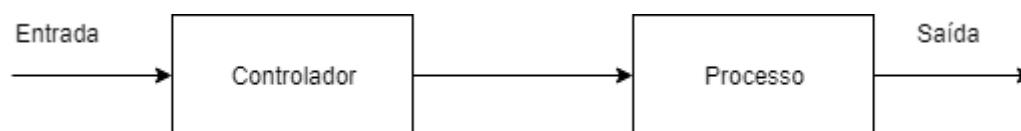


Figura 1 - Esquema de controlador em malha aberta

Este tipo de controlo é normalmente usado em sistemas de controlo de baixo custo onde a resposta do sistema é bastante previsível e as consequências do possível erro entre o desejado e o conseguido sejam aceitáveis. Tem-se como exemplo a iluminação pública que é programada para se ligar e desligar a dadas horas, uma vez que é possível prever com bastante exatidão o nascer e pôr do sol seria desnecessário o custo da instalação de sensores de luminosidade por toda a via pública.

1.2.2 Controlo de Malha Fechada

O sistema de controlo de malha fechada é um tipo de controlo com *feedback*, ou seja, a resposta do controlador depende sempre do estado do sistema e do objetivo pretendido.

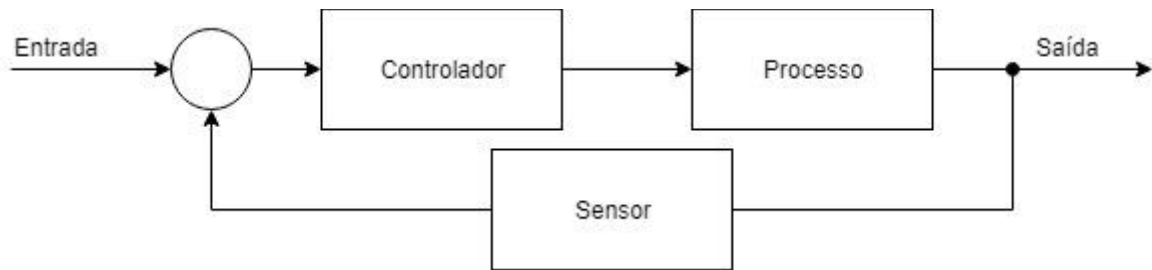


Figura 2 - Esquema de controlador em malha fechada

Este tipo de controlo é normalmente usado em sistemas onde haja múltiplos fatores que possam influenciar a variável que queremos controlar e que dessa forma tornam complexa a previsão da resposta do sistema. Tem-se como exemplo um sistema de ar condicionado, para se conseguir mesmo uma previsão grosseira seria necessário ter em conta o volume do espaço, área de perdas assim como as propriedades dos materiais, humidade do ar, número de pessoas no espaço, temperatura exterior, entre outros fatores. Com um *feedback* é possível o sistema de controlo apenas avaliar a temperatura atual (*feedback*) e comparar com a temperatura desejada (objetivo), com base nisso o controlador terá uma resposta de forma a que a diferença entre os dois seja cada vez menor.

2 Descrição da Plataforma de Ensaio de Concentradores Solares

A plataforma é composta essencialmente por uma estrutura móvel que permite orientar a mesma conforme as necessidades dos ensaios de forma a se obterem os ângulos de incidência desejados e por um circuito hidráulico necessário para o funcionamento e análise de do comportamento térmico dos concentradores solares em ensaio.

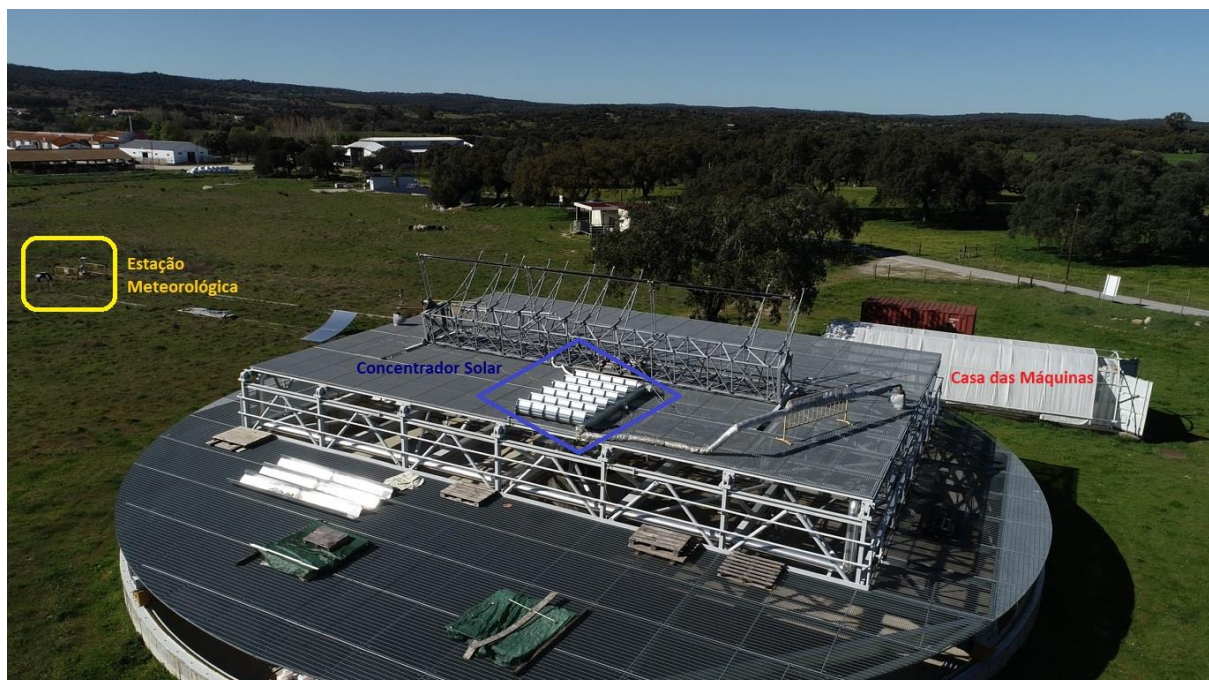


Figura 3 - Vista Geral da Plataforma

2.1 Estrutura móvel

A maioria dos ensaios exigem que o coletor esteja em planos que não o horizontal, pelo que a plataforma foi desenhada com a capacidade para se inclinar até cerca de 40° e de rodar 120° em ambas as direções a partir do Sul. Nomeadamente, durante os ensaios é necessário que em algum momento haja uma incidência normal da radiação solar no plano de abertura do coletor. Por outro lado, também pode ser interessante seguir o movimento do Sol ou manter um ângulo de incidência constante.

Para controlo do posicionamento da plataforma existem vários sensores (inclinómetros, fins de curso e *encoder*) e atuadores em constante comunicação com um PLC (Programmable Logic Controller) S200 (2) que centraliza a informação recolhida pelos sensores e ordena os atuadores.

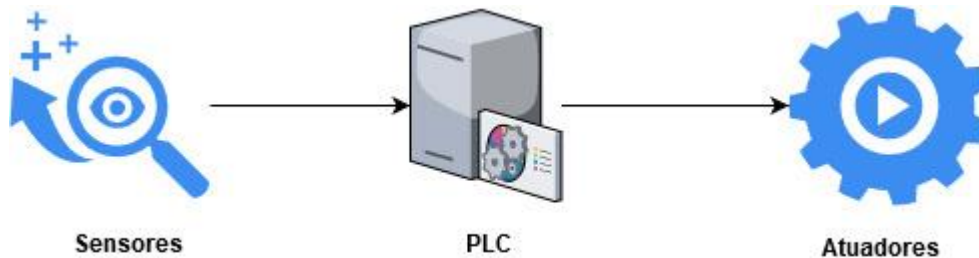


Figura 4 - Esquema de funcionamento do sistema de controlo

2.1.1 Rotação

A plataforma está assente sobre rodas de aço, 2 no círculo interno e 8 no círculo externo sendo que 4 delas têm um motor de 180 W acoplado.



Figura 5 - Apoio móvel com motor

Isto permite a plataforma rodar desde a sua orientação a sul 120° para nascente e 120° para poente totalizando 240° de liberdade, limite imposto por 2 sensores de fim de curso para não causar demasiada torção nos tubos flexíveis do circuito hidráulico.

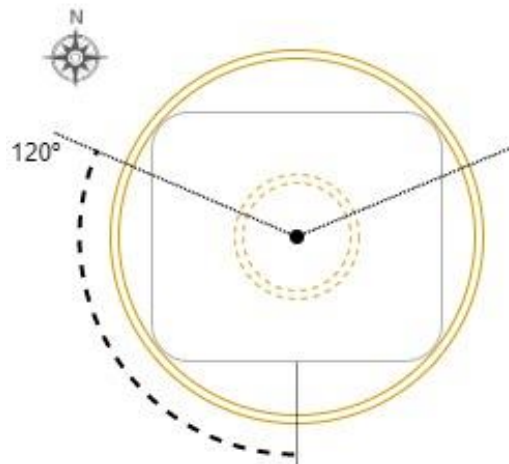


Figura 6 - Esquema da capacidade de rotação da plataforma

A medição da posição angular da plataforma é feita por um *encoder*, 6FX2001-5QS24 (3), acoplado a uma roda, MR562.10A, de 50 cm de perímetro pressionada contra o carril interno que suporta a plataforma.



Figura 7 - Roda e encoder

2.1.2 Inclinação

A inclinação da plataforma é feita através de dois cilindros hidráulicos de duplo efeito, este tipo de cilindros exige que se aplique pressão para que haja movimento tanto para um sentido como para o outro. Este mecanismo garante que a plataforma mantenha a sua posição mesmo que sem pressão no sistema hidráulico, ou seja permite que a plataforma mantenha a sua posição mesmo quando os equipamentos estão desligados. Os cilindros são atuados através de uma central hidráulica que por sua vez está ligada ao PLC.



Figura 8 - Central Hidráulica

A leitura da inclinação da plataforma é feita por dois inclinómetros, ACS-360-1-S101-VE2-PM (4), com capacidade para ler até 360°, com exatidão absoluta de 0.10° e resolução de 0.044°. Estes são lidos pelo PLC através de uma carta SSI.

2.2 Circuito Hidráulico

2.2.1 Tubagem

O circuito hidráulico é composto por tubos de aço carbónico DN80 com cerca de 77,5 mm de diâmetro interno e 5 mm de espessura, isolados termicamente com lã de rocha com 70 mm de espessura e protegida através de uma coquilha metálica, o sistema foi dimensionado para suportar até 40 bar a frio (PN40).

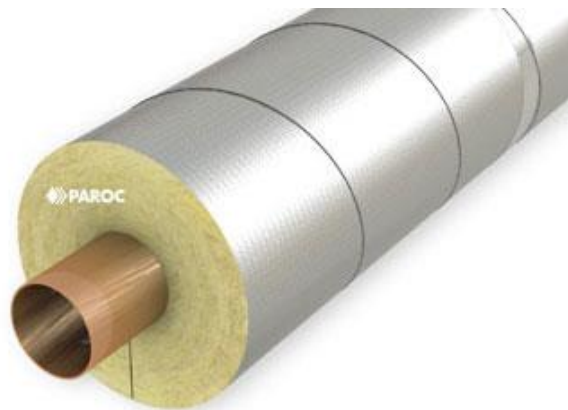


Figura 9 - Esquema da composição do tubo¹

O circuito dispõe de vários purgadores de forma a garantir a remoção de ar do sistema nos pontos onde é previsível que este se acumule, condição essencial para o correto funcionamento de vários sensores como o caudalímetro e sondas de temperatura assim como para a bomba de circulação. Existem várias válvulas de corte e segurança tanto manuais como automatizadas, há também uma electroválvula modular que permite o bypass ao permutador de calor criando assim a possibilidade de controlo de temperatura no sistema.

No circuito principal e como meio de transferência de calor circula pressurizado óleo térmico Syltherm 800 (Anexo 1) capaz de operar até 400 °C (5). No circuito de refrigeração circula água não pressurizada.

¹ Disponível em: <https://www.paroc.co.uk/-/media/images/solutions/hvac/hvac-pipes-drawing3-3265693.ashx?la=en-gb&hash=29F5C9789BE8B36D385135124CEA9C42768A5CB>

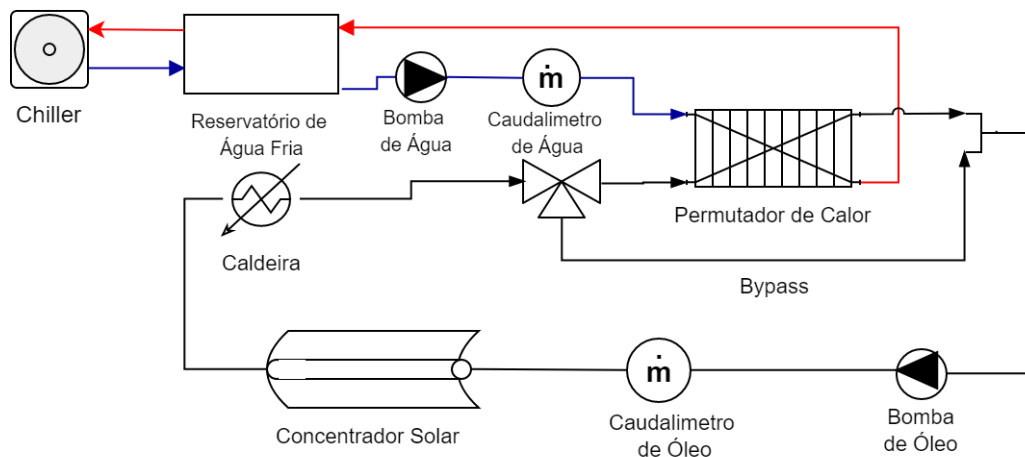


Figura 10 - Esquema simplificado do circuito hidráulico

2.2.2 Vaso de expansão

O vaso de expansão para além de acomodar a expansão do óleo térmico do circuito tem também como objetivo manter o sistema pressurizado de modo a evitar a vaporização do óleo térmico, quanto maior a temperatura maior a pressão necessária para que o óleo não vaporize (Anexo 5). Apesar de o aumento de temperatura provocar o aumento de pressão dentro do vaso de expansão este é também pressurizado através de um gás inerte, neste caso azoto pela ligação a uma bateria de garrafas de azoto líquido comprimido.



Figura 11 - Vaso de expansão

2.2.3 Bombas

Responsável por bombear o circuito de óleo está uma bomba Nikkiso HT24D-B3 (6) com capacidade de até 36 400 kg/h, sendo o mínimo recomendado 12 000 kg/h. Esta bomba tem uma potência nominal de 9,7 kW, altura manométrica máxima de 49m, velocidade nominal de 2850 rpm, índice de proteção IP65 e temperatura máxima do fluido de 400 °C (6).







Figura 12 - Bomba de Óleo


Responsável por bombear o circuito de refrigeração está uma bomba Etabloc GN 032-125 (7) com caudal máximo de 16 600 kg/h, altura manométrica máxima de 20 m, potência nominal de 2,2 kW, velocidade nominal de 2890 rpm, índice de proteção IP 55 e pode operar em ambientes entre -20 °C a 40 °C.

2.2.4 Caldeira

Para a caracterização dos coletores é necessário fazer ensaios em várias temperaturas, por isso a plataforma possui uma caldeira elétrica de 40 kW de potência máxima, composta por 2 grupos de resistências dos quais há a possibilidade de alternar o esquema de ligação entre estrela e triângulo de forma a obter várias potências.

Tabela 1 - Combinações possíveis de potência da caldeira

Total [kW]	Grupo I		Grupo II	
	Ligação	Potência [kW]	Ligação	Potência [kW]
4.5		0.0	Y	4.5
9.0	Y	9.0		0.0
13.3		0.0	Δ	13.3
13.5	Y	9.0	Y	4.5
22.3	Y	9.0	Δ	13.3
26.6	Δ	26.6		0.0
31.1	Δ	26.6	Y	4.5
40.0	Δ	26.6	Δ	13.3

Δ – Triângulo Y – Estrela  - Desligado

A conjugação da potência da caldeira pode ser feita manualmente através do acionamento de interruptores, mas também há a possibilidade desta ser ativada e configurada remotamente.



Figura 13 - Painel de controlo da caldeira

A caldeira possui também um controlador SR91 que atua no controlo de temperatura da mesma.

2.2.5 Chiller

O circuito de frio é alimentado por um *chiller* (8) com capacidade de arrefecimento de até 163 kW de arrefecimento dependendo das condições de trabalho, com uma potência de consumo elétrico de até 73,9 kW, a temperatura de entrada pode variar entre 8 a 40 °C enquanto que a de saída pode variar de 5 a 20 °C.

A água de entrada do *chiller* vem de um reservatório de 3 000 litros onde volta depois de arrefecida pelo *chiller*. Este reservatório é também partilhado pelo permutador de calor de onde a água de entrada deste é retirada da parte inferior do reservatório e a de retorno volta pela parte superior do reservatório.



Figura 14 - Chiller e Reservatório

2.2.6 Permutador de Calor

Para o arrefecimento e transferência de calor entre o circuito principal e o circuito de refrigeração existe um permutador de calor de placas (soldadas) em aço inoxidável concebido para transferência de calor entre óleo térmico e água com glicol. Este permutador tem 56,6 m² de área de transferência térmica e com capacidade para permutar até 155,3 kW de calor.

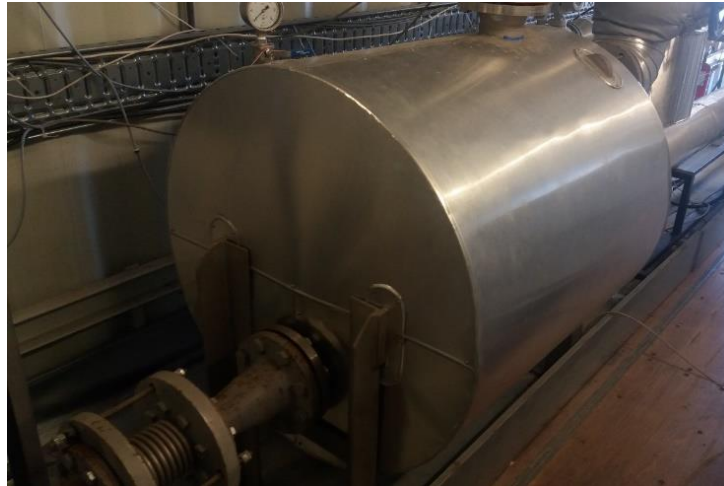


Figura 15 - Permutador de calor

2.3 Instrumentação e Sensores

2.3.1 Variadores de Frequência

Pode-se variar a velocidade de funcionamento das bombas através da frequência de alimentação das mesmas, por este motivo estas são alimentadas por variadores de frequência.

A bomba do sistema principal é alimentada pelo variador de frequência VF-PS1 (9) de 30 kW de potência enquanto que a bomba do circuito de refrigeração é alimentada pelo variador de frequência VF-S15 (10) de 2,2 kW de potência.



Figura 16 - Variador de Frequência VF-PS1

Estes variadores de frequência têm a possibilidade de serem configurados de modo a que a frequência de saída seja proporcional a uma entrada de sinal analógico o que permite controlar a velocidade da bomba remotamente.

2.3.2 Caudalímetros

O circuito principal tem como sensor disponível para a medição do caudal o caudalímetro de Coriolis OPTIMASS 6000 - S80 (11) da KROHNE, com temperaturas de funcionamento de -50 °C até 400 °C com capacidade para ler caudais até 78 000 kg/h, com precisão de +/- 0,1 % para caudais iguais ou superiores a 3900 kg/h, enquanto que para caudais mais baixos a precisão é de +/- 3,9 kg/h.



Figura 17 - Caudalímetro OPTIMASS 6000 S80²

De modo a ser possível adquirir as leituras do caudalímetro é usado com um conversor de sinal MFC 400F (12) que por sua vez comunica através de protocolo HART.

O circuito de frio tem um caudalímetro eletromagnético ProcessMaster FEP311 (13) da ABB, capaz de ler até 60 m³/h, com precisão de +/- 0,4 % até 130 °C de temperatura do fluido desde que a temperatura ambiente esteja compreendida entre -20 e +60 °C. Este caudalímetro tem também a possibilidade de comunicação através de protocolo HART.

² Disponível em https://dam.krohne.com/image/upload/h_500,c_fill,d_im-other:image-not-available.png/im-single-product/optimass-6000.png



Figura 18 - Caudalímetro ProcessMaster FEP311

2.3.3 Sondas de temperatura e pressão

Para a leitura das temperaturas são usadas sondas de temperatura PT 100, estas são constituídas por platina (Pt) da qual a resistência elétrica aumenta à medida que a temperatura aumenta, a resistência a 0 °C é de 100 Ω e daí advém o nome. Com uma gama de temperatura entre os -50 °C e os 450 °C e uma ligação de 4 fios fazem destas sondas bastante precisas mesmo quando ligadas a cabos extensos. Através da resistência lida sabe-se a que temperatura está a sonda.

A plataforma está também equipada com várias sondas de pressão relativa do tipo 261GS da ABB, medem pressão de 0 a 40 bar no circuito de óleo e 0 a 10 bar no circuito de frio, comunicam através de protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer Protocol*).



Figura 19 - Sonda de Temperatura (direita) e sonda de pressão (esquerda)

2.3.4 Piranómetro

A radiação global no plano do coletor é lida através de um piranómetro de termopilha CMP11 (14) com capacidade para medir até 4000 W/m^2 , campo de visão de 180° , temperatura de funcionamento entre os -40 e $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ e lê na gama de espectro entre 285 a 2800 nm. Neste piranómetro uma superfície negra que é aquecida com a exposição à radiação solar, a diferença de temperatura entre esta superfície e a carcaça do aparelho gera uma diferença de tensão de $9,39 \mu\text{V/W/m}^2$.

2.3.5 Estação Meteorológica

A plataforma dispõe de uma estação meteorológica equipada com um anemómetro ultrassónico e um *tracker* solar SOLYS2 que mede a radiação direta, difusa e global no plano horizontal. Estes dados são registados num *datalogger* no qual se pode aceder online e em tempo real.

2.3.6 PLC



Figura 20 - PLC

É no PLC que se centraliza a maior parte da informação, a maior parte das sondas de temperatura com exceção apenas à entrada e saída do coletor, as sondas de pressão, os *encoders* para leitura da rotação e inclinómetros. Os sensores da central hidráulica são aqui lidos assim como é pelo PLC que são enviados os sinais para controlo da mesma, o mesmo acontece para o sistema de rotação.

2.3.7 Aquisição de sinais

Uma vez que a resolução das cartas RTD usadas no PLC são baixas, 0,1 °C, é usado um multímetro Agilent 34980A (15), para a aquisição da temperatura de entrada e saída do coletor, caudal do sistema principal e a radiação do piranómetro centralizando assim a informação necessária a reter nos ensaios para caracterização dos coletores. Este multímetro tem capacidade para ler até 1000 canais por segundo com elevada precisão, é programável e permite a comunicação através de LAN e USB.

3 Melhorias na plataforma

3.1 *Software* de aquisição e gravação de dados

Apesar de a plataforma ter à disposição todos os equipamentos necessários para a realização de ensaios nem todos se encontravam devidamente configurados e encontrava-se em falta um *software* tanto para aquisição e gravação de dados como para o controlo das variáveis exigidas pela norma de ensaios.

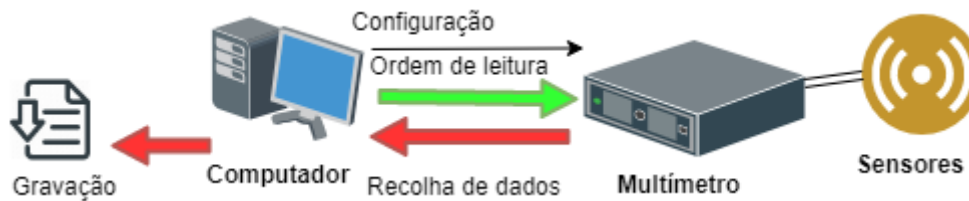
Por norma a leitura dos sensores é feita através de sinais analógicos, por exemplo as sondas de temperatura PT100 variam a resistência elétrica consoante a temperatura do terminal de platina da sonda, conhecendo bem a relação entre estas duas propriedades é possível criar este sensor de temperatura. Analisando os vários sensores percebe-se que todos têm em comum um sinal de saída baseado em grandezas elétricas.

Tabela 2 - Relação entre sensores e grandezas medidas

<i>Sensor</i>	<i>Medição</i>	<i>Tipo de Sinal</i>
<i>Sondas PT100</i>	Temperatura	Resistência
<i>Sondas de Pressão</i>	Pressão	Corrente
<i>Caudalímetro</i>	Caudal	Corrente
<i>Piranómetro</i>	Radiação	Tensão

Deste modo torna-se inevitável o uso de um multímetro para a leitura precisa das sondas sendo necessário a aquisição contínua e conveniente o registo das mesmas no formato digital.

Assim surge a necessidade de criar uma solução que permita a comunicação com o multímetro de forma a configurar os canais de leitura, envio de ordem para leitura, recolha das leituras e gravação das mesmas.



Para suprir esta necessidade foi desenvolvido um *software* em *Python* com o intuito de automatizar este processo e permitir a configuração e operação de uma forma simples e intuitiva.

O desenvolvimento deste *software* permite construir-se uma solução pensada que se adapte perfeitamente às necessidades. É uma solução altamente versátil pois é possível construir-se o *software* exatamente como imaginado, extremamente leve ocupando apenas 29 KB o código principal e 52 KB a parte gráfica do código, consumo de recursos bastante reduzido necessitando inicialmente cerca de 50 MB de memória RAM, compatível com *Windows* e *Linux* e não necessita de qualquer tipo de licença.

3.1.1 Configuração

A configuração dos equipamentos a ler pelo multímetro deve ser feita num ficheiro de texto com o nome “conf.txt” que se situa na mesma pasta que o *software*. A configuração deve ser feita no seguinte formato, [“Nome”, “Tipo de medição”, “Canal de leitura”, “Equação de calibração”, Índice do gráfico onde deve ser representado], sendo que o nome é completamente opcional, o tipo de sonda deve corresponder a um dos tipos da tabela 3, o canal representa o espaço físico onde está feita a ligação no multímetro, a equação de calibração deve ser feita no caso em que se pretende converter diretamente a medição numa outra grandeza caso contrário deve ser deixado vazio e por fim deve ser dado o índice do gráfico onde se pretende representar a leitura caso não se deseje representação gráfica deve ser escolhido o índice 0.

As diferentes configurações para leitura devem ser sempre separadas por uma vírgula, assim como o conjunto de todas as configurações deve estar contido entre parenteses retos.

No tipo de medição deve ser escolhido um dos códigos da seguinte tabela:

Tabela 3 - Tabela de Códigos para medição (16)

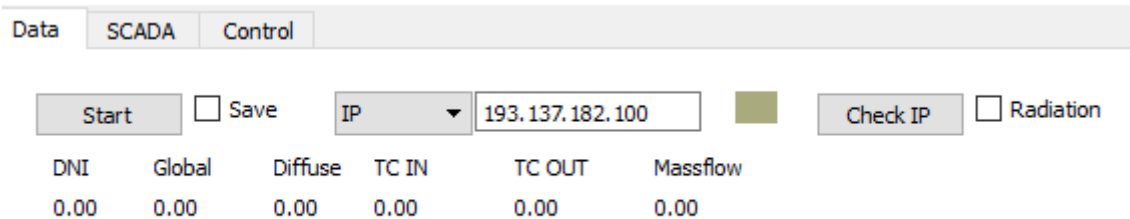
<i>Tipo de medição</i>	<i>Código</i>
<i>Resistência a 2 fios [Ω]</i>	RES
<i>Resistência a 4 fios [Ω]</i>	FRES
<i>Tensão Alternada [V]</i>	VOLT:AC
<i>Tensão Contínua [V]</i>	VOLT:DC
<i>Corrente Alternada [A]</i>	CURR:AC
<i>Corrente Contínua [A]</i>	CURR:DC
<i>Frequência [Hz]</i>	FREQ
<i>Período [ms]</i>	PER
<i>Temperatura de uma termorresistência a 2 fios [$^{\circ}$C]</i>	TEMP RTD,85,
<i>Temperatura de uma termorresistência a 4 fios [$^{\circ}$C]</i>	TEMP FRTD,85,
<i>Temperatura de um termistor a 2 fios [$^{\circ}$C]</i>	TEMP THER, 5000
<i>Temperatura de um termistor a 4 fios [$^{\circ}$C]</i>	TEMP FTHER, 5000
<i>Temperatura de um termopar tipo K [$^{\circ}$C]</i>	TEMP TC,K

Abaixo segue um exemplo de configuração de duas sondas de temperatura e do caudalímetro:

```
[
["T IN","TEMP FRTD,85, ","1002","",1],
["T OUT","TEMP FRTD,85, ","1005","",1],
["MassFlow","CURR:DC","5041","((x*1000)-4)*61200/(20-4)",0]
]
```

3.1.2 Operação

Depois de configurados os canais de leitura, o programa deve ser iniciado, escolhida o tipo de conexão se por IP ou USB e de seguida escrito o endereço do multímetro. Pode-se verificar a ligação ao multímetro pressionando o botão “Check”, se o indicador cinzento passar a verde significa que a conexão foi bem-sucedida caso contrário passará a vermelho. Se for desejado recolher os dados de radiação da estação meteorológica deve ser ativada a opção “Radiation”.



DNI	Global	Diffuse	TC IN	TC OUT	Massflow
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 21 - Painel de configuração da aquisição e gravação de dados

Os canais configurados deverão aparecer logo abaixo, com o nome dado na configuração e com o valor a zero. Depois disso bastará pressionar o botão “Start” e a aquisição de dados iniciará, para gravar os dados deve-se ativar a opção “Save”. Na configuração há a opção para representar graficamente os valores lidos, há 2 possíveis gráficos e no final é possível exportar os mesmos se desejado, tanto em vários formatos de ficheiro de dados como em imagem.

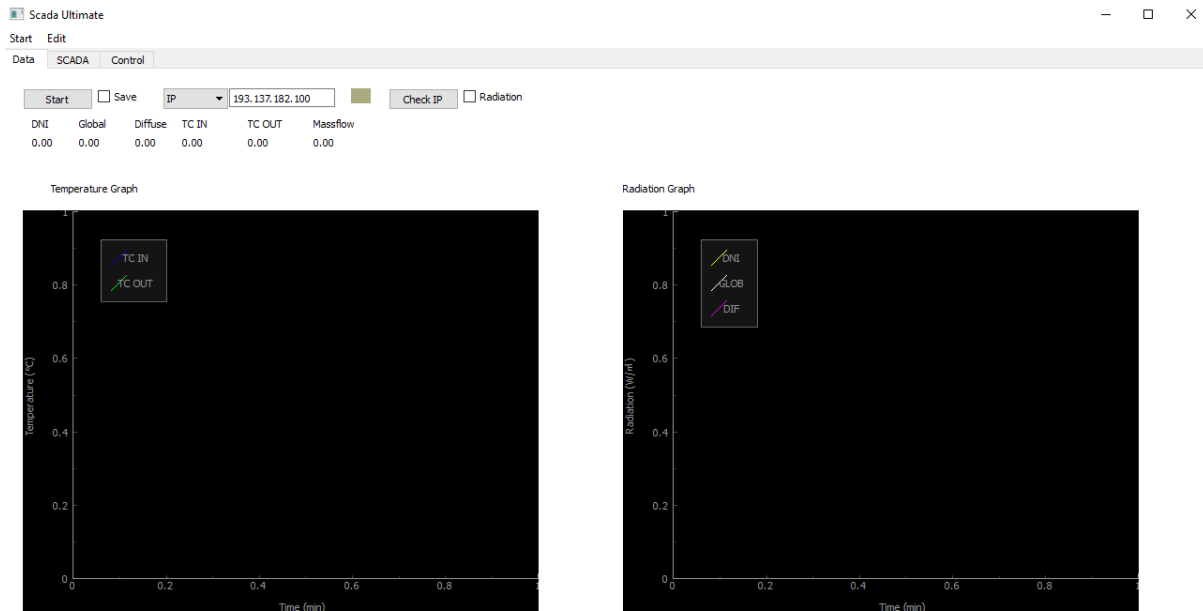


Figura 22 - Painel de aquisição e gravação de dados completo

Na figura 22 o primeiro gráfico tem o índice 1 e o segundo o índice 2.

Os dados serão gravados na subpasta “dados” presente na mesma pasta do *software*, num ficheiro de texto com o nome predefinido de “leitura” e com a presente data, como por exemplo “leitura_2019-07-24”. No ficheiro de gravação a primeira linha irá corresponder ao cabeçalho, onde as diferentes variáveis gravadas serão separadas por vírgula sendo que a última será sempre a hora da gravação como se pode ver no seguinte exemplo.

```
TCIN,TCOUT,Caudal,Hour
23.727, 23.494, 18964.912275000002, 11:36:13
23.741, 23.5, 18955.654245, 11:36:15
23.746, 23.511, 18962.178547500003, 11:36:17
23.759, 23.517, 18968.640502499995, 11:36:19
```

3.2 Rotação

Apesar da existência da ligação física do *encoder* ao PLC este não estava a fazer a sua leitura. A leitura do *encoder* é feita através de uma carta *Synchronous Serial Interface* (SSI).

Numa tentativa de proceder à calibração experimental do *encoder* moveu-se a plataforma entre -90° e 90° , registando o valor obtido pelo *encoder* nos extremos e a 0° . Verificou-se que para a mesma posição o valor variava significativamente, numa tentativa de verificar o bom funcionamento do *encoder* desacoplou-se a roda do *encoder*, marcou-se um ponto no *encoder* e outro fora. Deu-se 10 voltas ao *encoder* que seria o equivalente a cerca de 2 voltas completas à plataforma e voltou-se novamente 10 voltas no sentido contrário, fez-se várias vezes o mesmo processo e verificou-se que a diferença entre o valor inicial e final era bastante menor que a diferença de valores registados com a movimentação de apenas 90° no seu normal funcionamento.

Na suspeita que a causa do erro estivesse essencialmente na falta de atrito entre a roda e o carril da plataforma, lavou-se a roda e besuntou-se a borracha com vaselina com o objectivo de reduzir a rigidez da borracha aumentando assim o atrito. Verificou-se que o erro diminuiu bastante apesar de ainda ser significativamente superior ao verificado com o *encoder* sem roda.

Procedeu-se à calibração experimental do *encoder* posicionando a plataforma em posições conhecidas, esta tem pequenas marcas de 5° em 5° , registando o valor do *encoder* para cada posição e obteve-se os resultados apresentados no anexo 6.

Procedeu-se ao cálculo da média dos valores e concluiu-se que por cada grau o valor do *encoder* variava em $-337,34$ pelo que se programou esta conversão no PLC através da seguinte equação.

$$\text{Posição[Graus]} = \frac{\text{Val. Lido} - \text{Val. Referência}}{-337,34}$$

(3)

Onde o valor de referência foi o valor médio obtido para zero graus (26778488,5).

Uma vez concluída a calibração do sensor de leitura, foram configuradas rampas de arranque e paragem dos motores, assim como o seu sistema de controlo. Adicionou-se ao *software* um pequeno painel para a operação da rotação onde o operador deve inicialmente ligar os variadores e escolher a velocidade nominal de rotação. O operador terá a opção de rotação livre onde basta apenas escolher o sentido se horário ou anti-horário ou a opção de apenas escolher o ângulo pretendido e ordenar a execução do posicionamento.

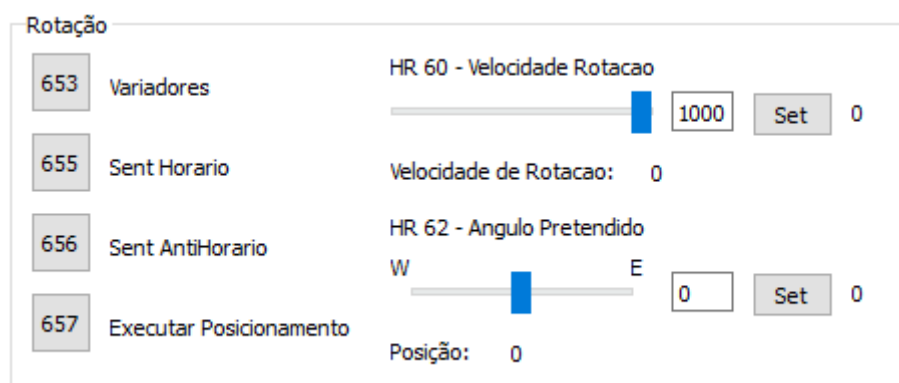


Figura 23 - Painel de Rotação

Dado que é aconselhável uma recalibração do zero após um uso razoável deverá ser adicionada também uma opção para calibrar o valor de referência para o zero.

3.3 Inclinação

Do ponto de vista do operador para o controlo da pressão nos cilindros é dado um valor de entrada de 0 a 1000, onde tipicamente valores superiores a 500 correspondem à subida dos cilindros e quanto maior o valor maior a velocidade de subida, para valores inferiores a 500 os cilindros descem onde quanto menor for o valor maior será a velocidade de descida.

Para inclinar a plataforma o operador necessita de ir mudando a pressão de cada cilindro individualmente, verificar a inclinação de cada um e corrigir as velocidades para que a diferença entre a inclinação dos cilindros nunca ultrapasse o valor de segurança definido, uma vez ultrapassado este valor será ativado um alarme que bloqueará todas as instruções de movimento da plataforma.

Para inclinar a plataforma o operador necessitava de enviar valores para ambos os cilindros que permitissem o movimento no sentido pretendido, observar a inclinação de ambos os cilindros, calcular a diferença da inclinação entre ambos os cilindros, decidir qual o cilindro a corrigir, se pretende aumentar ou diminuir essa velocidade, se essa variação implica um aumento ou diminuição do valor de entrada, decidir qual será o novo valor e envia-lo ao sistema.

Após a nova entrada dada deve ser analisado as inclinações, comparar a diferença entre cilindros com a anterior e com base nisso e na última entrada dada tomar uma nova decisão acerca de uma nova entrada para o sistema se necessário. Este processo é feito em tempo real e constantemente enquanto a plataforma está em movimento, o tempo de resposta máximo para o operador depende de vários fatores como velocidades iniciais e discrepância entre estas velocidades assim como a qualidade das entradas dadas pelo operador ao longo do tempo, no entanto mesmo para velocidades baixas o operador tem tipicamente 5 a 10 segundos para tomar a decisão para uma nova entrada.

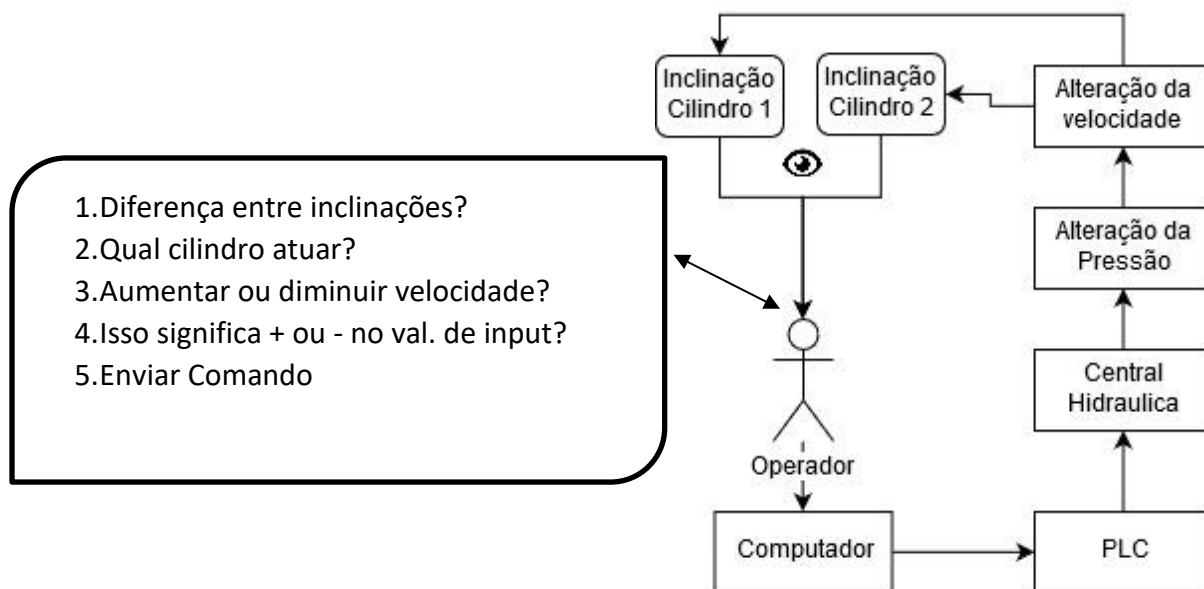


Figura 24 - Esquema de controlo de inclinação

Uma vez que esta é uma tarefa bastante exigente para o operador foram feitas algumas melhorias para facilitar e diminuir o número de processos exigidos ao operador, começou-se por centralizar e organizar a informação relativamente à inclinação no mesmo espaço, passou-se a calcular a diferença entre os cilindros de forma automática, foram colocados valores iniciais tipicamente bons para iniciar a subida como para a descida e foram adicionados “sliders” como opção para regular as velocidades, esta opção limita os valores entre intervalos seguros e eficazes assim como seguem uma lógica mais intuitiva, puxando para a esquerda diminui-se a velocidade e para a direita aumenta-se.

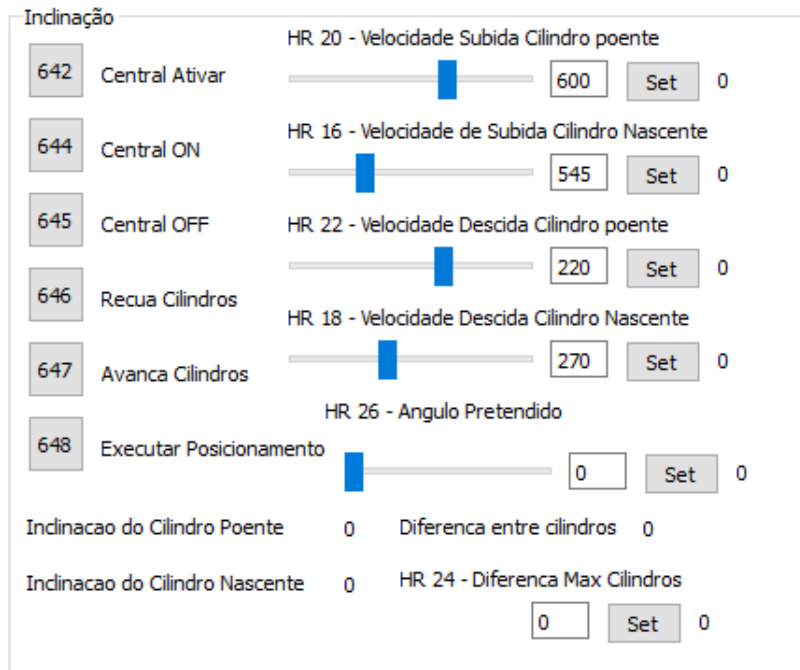


Figura 25 - Painel de inclinação

Estas melhorias permitiram que a tarefa de controlo da inclinação da plataforma por parte do operador fosse feita com muito menos intervenções e com muito menos esforço por cada intervenção. No entanto esta é uma tarefa que devido à sua complexidade e possíveis consequências em caso de falha por parte do operador deve ser o mais automatizada possível, pelo que o objetivo final será criar-se um controlador que o faça todo este processo de forma autónoma, sendo que caberá apenas ao operador dar apenas a informação do ângulo pretendido e a ordem para executar o posicionamento.

4 Desenvolvimento dos controladores

Apesar de neste ponto já ser possível orientar a plataforma no plano desejado, de serem adquiridos e guardadas as variáveis necessárias ainda não é possível as controlar para que cumpram as exigências da norma de ensaios.

4.1 Controlo do Caudal

Para que seja obtido o controlo do caudal desejado o atuador precisa de compensar as variações das perdas de carga do fluído ao longo do circuito hidráulico. As perdas de carga dependem principalmente do circuito hidráulico: geometria dos tubos, válvulas, curvas, etc. Apesar do circuito ser complexo e ter um elevado número destes componentes, estes são constantes e não se alteram ao longo do tempo.

No entanto existem ainda outros fatores essenciais para a perda de carga tais como a viscosidade do fluído, apesar desta propriedade variar bastante com a temperatura no caso do óleo por norma é fornecido pelo produtor uma correlação entre as duas propriedades. Por fim sabe-se também que a perda de carga está dependente do regime de escoamento do fluído, este depende da combinação os fatores anteriores e ainda de outros como rugosidade da conduta ou das flutuações no caudal, mas principalmente do número de Reynolds que depende essencialmente da velocidade do fluído e diâmetro da conduta.

O regime de escoamento não é necessariamente o mesmo ao longo do circuito e seria bastante complexo modelar todo o sistema com o detalhe necessário para que os resultados fossem representativos da realidade.

Uma vez que a plataforma foi desenvolvida com o intuito de realizar ensaios a diferentes concentradores solares, com diferentes dimensões que por sua vez exigem uma gama muito alargada de caudais de ensaio, ao invés de se procurar construir o controlador ideal para configuração atual seria bastante mais interessante construir uma ferramenta que fizesse uma bateria de testes e construísse o controlador baseado nesses testes. Contudo é

necessário perceber quais são as variáveis e perturbações aos quais o controlador precisa de se adaptar e por fim resolver.

Deste modo procedeu-se à extração do modelo de forma experimental, construiu-se um *script* que fizesse variar a tensão fornecida ao variador de controlo da bomba de circulação de óleo térmico de 0 a 3 V em degraus de 0,1 V. A decisão de se ir apenas até 3 V e não até aos 5 V correspondentes à capacidade máxima do variador deve-se ao intuito de evitar que a elevada pressão no coletor o danificasse.

É esperado que o caudal mássico obtido para dada tensão não seja constante para diferentes temperaturas, uma vez que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura (Anexo 4) o que permite caudais volumétricos maiores para temperaturas superiores, enquanto que a densidade diminui com o aumento da temperatura (Anexo 2) diminuindo assim o caudal mássico lido para o mesmo caudal volumétrico.

Inicialmente fez-se um ensaio sem que tenha havido aquecimento prévio, deixou-se o fluído circular durante alguns minutos de forma a criar uma mistura minimamente homogénea e iniciou-se um *script* construído para este propósito, este script faz variar o sinal desde o seu mínimo até ao seu máximo e depois no sentido inverso, em intervalos de 0,1 V que com a duração de 1 minuto cada. Enquanto isso registaram-se também os valores do caudal a cada 2 segundos e no final fez-se a média para cada minuto obtendo os resultados apresentados na tabela apresentada no Anexo 7.

Registou-se uma temperatura média de 33,8 °C neste ensaio, para uma melhor leitura dos dados procedeu-se à representação gráfica destes valores na seguinte figura.

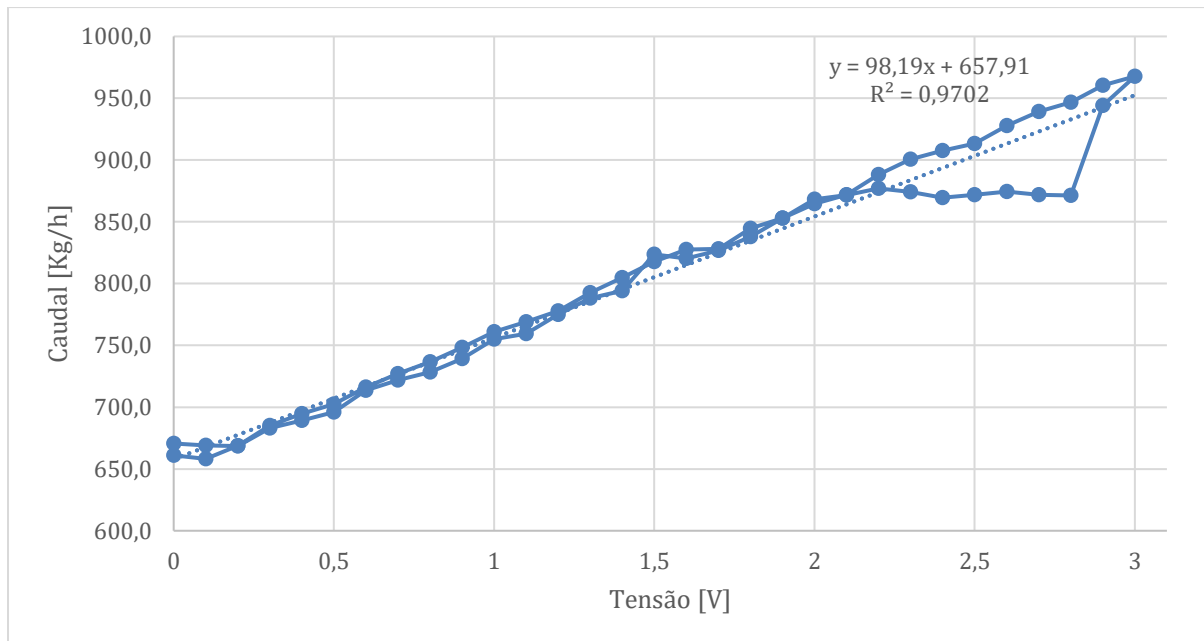


Figura 26 - Relação entre caudal e tensão

Durante a subida notou-se que desde os 2,2 V até aos 2,8 V não houve mudança no caudal obtido, sendo que aos 2,9 V houve um aumento brusco do caudal. Na descida já não se verificou este problema sendo que houve um comportamento bastante estável e linear.

De forma a estudar a influência real que a temperatura do óleo tem sob o sistema, realizou-se exatamente o mesmo ensaio nas mesmas condições para várias temperaturas.

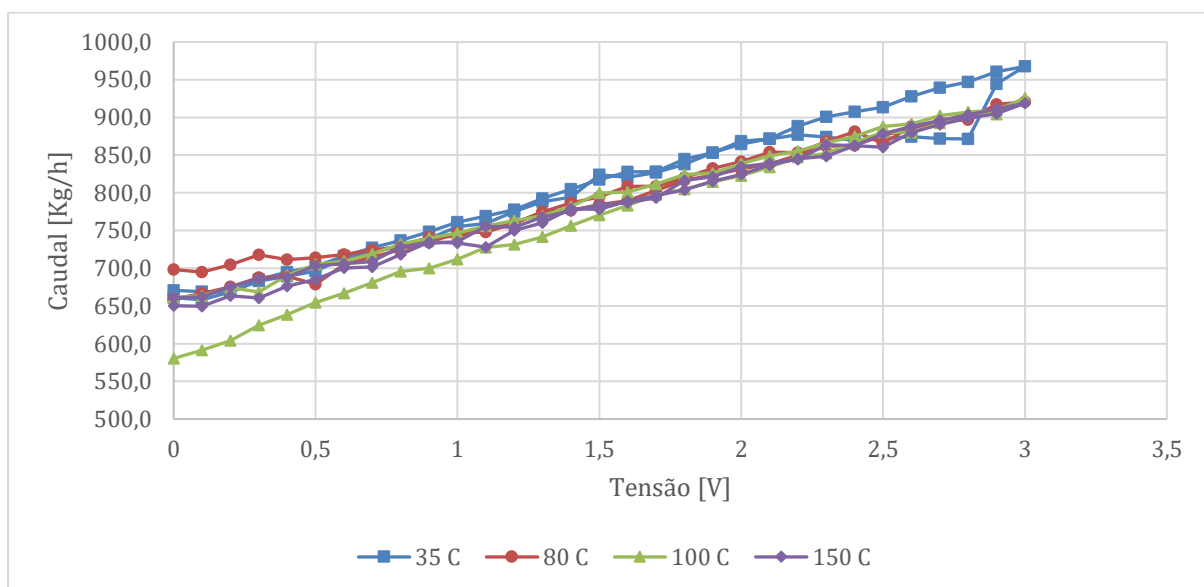


Figura 27 - Gráfico da relação entre caudal e tensão para várias temperaturas

Com o aumento do número de ensaios percebe-se que o comportamento da bomba apesar de bastante linear nem sempre responde da forma esperada, isto é, nem sempre há uma resposta à entrada dada e por vezes para a mesma entrada temos respostas diferentes. No entanto observa-se que o comportamento da variação de caudal para as diferentes temperaturas não é significativamente diferente pelo que se descarta a necessidade de a temperatura do óleo ser uma entrada para o sistema de controlo.

Um modelo representa uma (ou várias) funções entre uma ou várias saídas e uma ou várias entradas, no entanto se houver apenas uma entrada e uma saída, é possível obter facilmente de forma experimental o modelo observando a saída e variando a entrada do sistema. Enquanto que do modelo obtém-se a saída para uma dada entrada a construção de um controlador exige exatamente o oposto, é necessário obter-se a função transferência invertendo o modelo. No presente caso a entrada é a tensão aplicada ao variador e a saída é o caudal lido no caudalímetro.

Deste modo obtém-se a tensão necessária aplicar para obter o caudal pretendido.

$$Tensão = Função Transferência (Caudal)$$

(4)

Uma vez concluído que a temperatura do óleo não era relevante para a construção do controlador usaram-se todos os dados obtidos e observando que a relação é aproximadamente linear, fez-se a respetiva regressão.

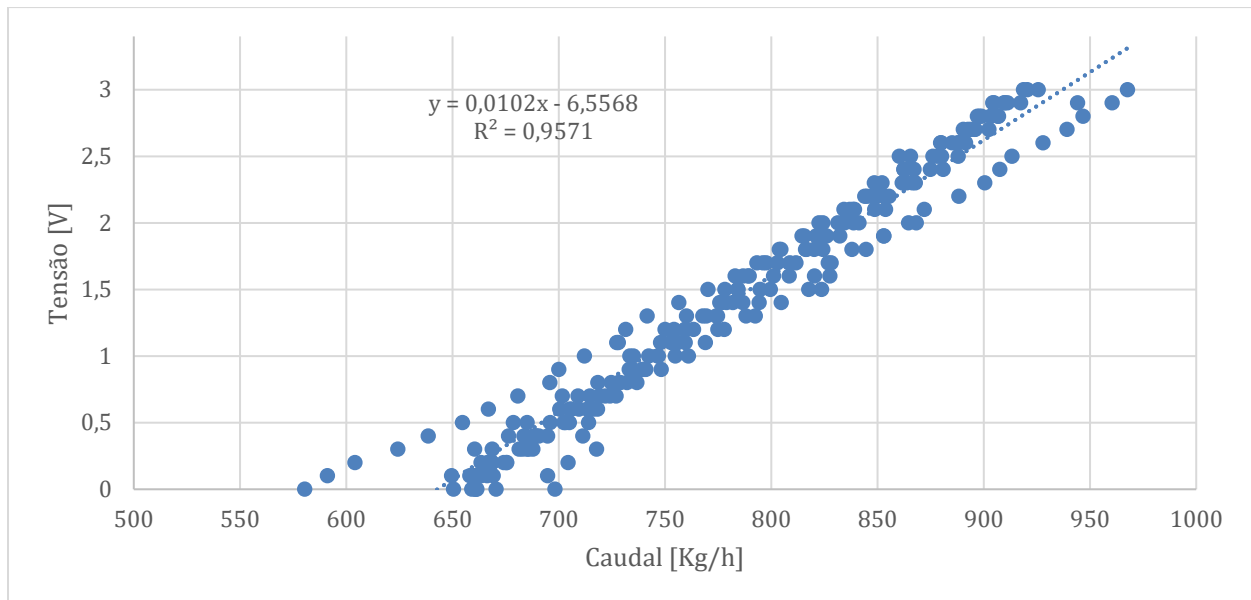


Figura 28 - Relação entre Tensão e Caudal

Da regressão obteve-se a seguinte função transferência:

$$Tensão = 0,0102 (Caudal) - 6,5568$$

(5)

Com isto desenhou-se o controlador conforme o diagrama.

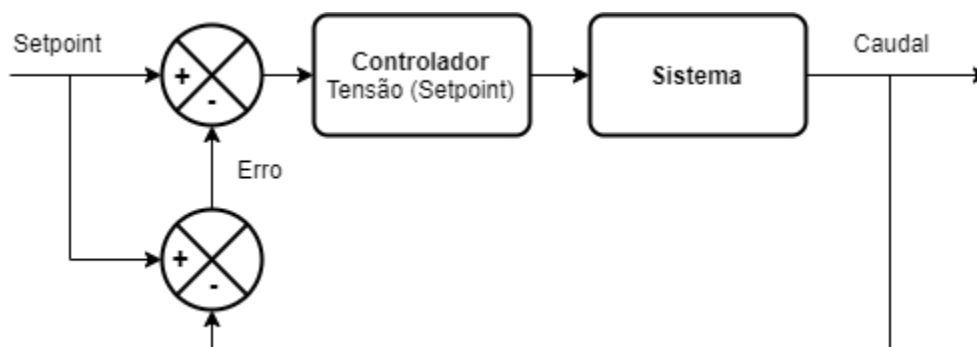


Figura 29 - Diagrama do controlo de caudal

Inicialmente é dado um *setpoint* ao controlador que é traduzido numa dada tensão pela função transferência e essa tensão resulta num caudal que após ser lido pelo sistema é comparado com o *setpoint* inicial e calculada a diferença. Esta diferença é subtraída à entrada anteriormente dada e novamente convertida pela função transferência num novo sinal dado à bomba, este ciclo é constantemente repetido.

Depois de implementado o código em *Python* que executasse o processo anterior procedeu-se ao teste do controlador. Iniciou-se a bomba à velocidade mínima com o controlador desativado que se traduzia num caudal próximo de 650 Kg/h, após alguns minutos ativou-se o controlador com um *setpoint* de 700 Kg/h que após alguns minutos e depois de estabilizar subiu-se o *setpoint* para 800 Kg/h, tal como se pode observar na seguinte figura.

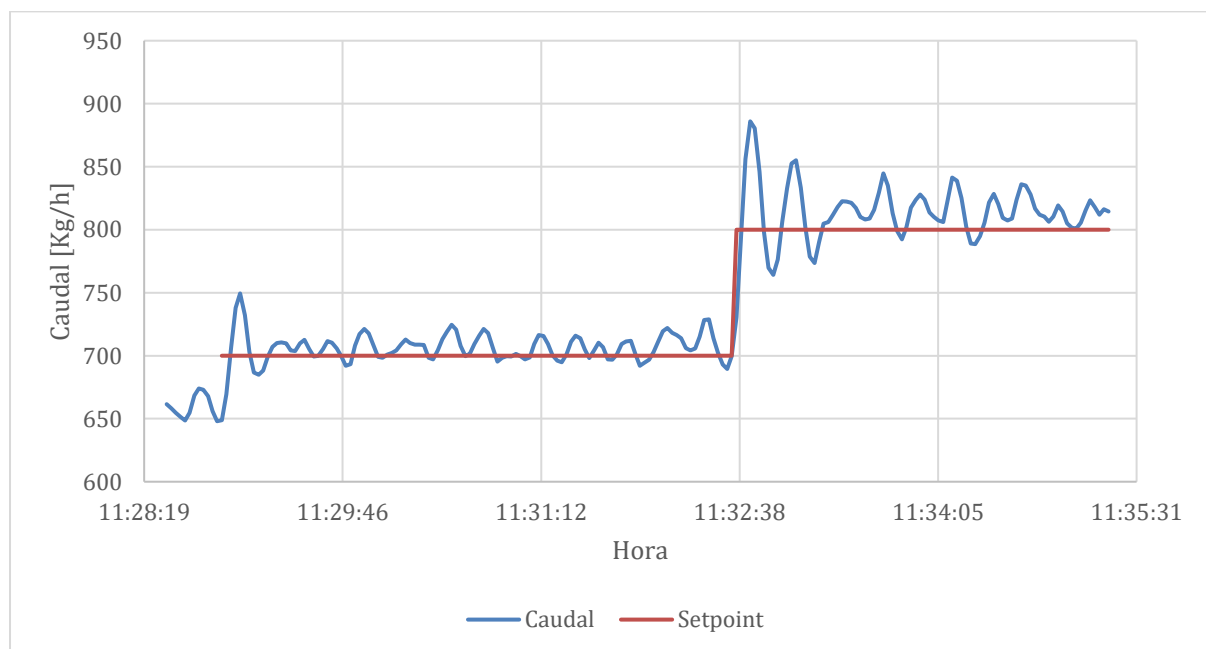


Figura 30 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal

Observa-se que apesar da estabilização relativamente rápida o período de estabilização assim como a sua amplitude aumentaram com a diferença entre o caudal anterior e o novo *setpoint*. É também notado que o caudal em média é um pouco maior que o pretendido em ambos os casos.

Numa tentativa de minimizar os efeitos que a imprecisão do caudalímetro para caudais tão baixos possa ter sob a instabilidade do controlador procedeu-se à integração de três medições do caudal, numa tentativa tanto de diminuir a amplitude do erro medido pelo caudalímetro como de aumentar o tempo de resposta do controlador de forma a haver uma maior estabilização do sistema entre cada atuação.

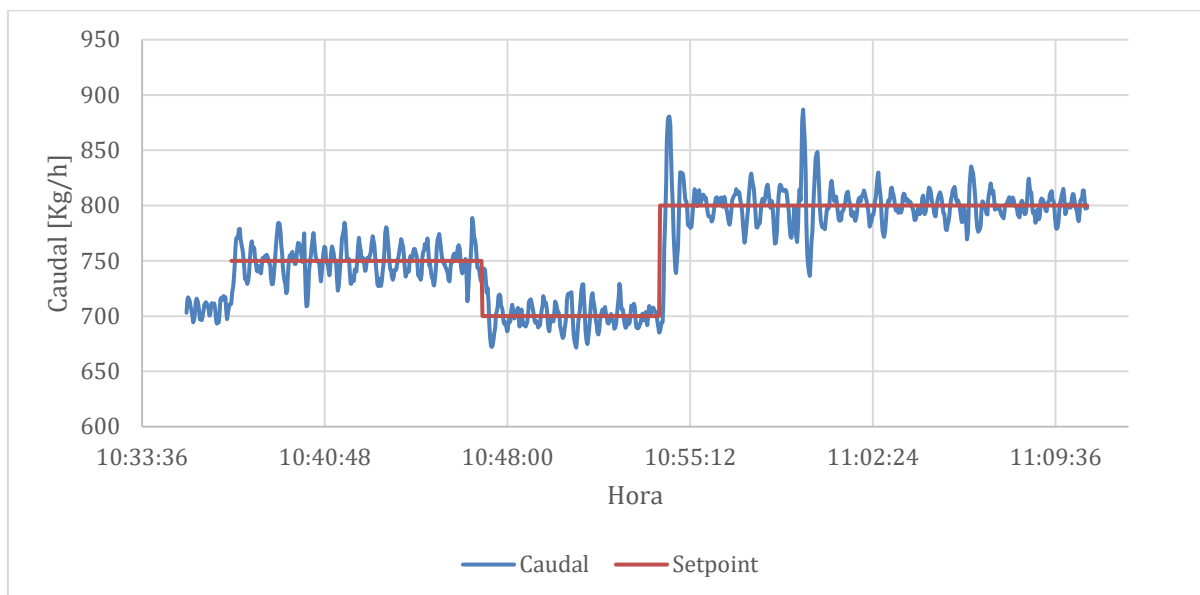


Figura 31 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal

Verificou-se que foi alcançado o objetivo de manter o valor médio do caudal próximo do *setpoint*, no entanto verifica-se também que o caudal continua bastante instável variando quase instantaneamente bastante mais que o intervalo de $\pm 3,6$ Kg/h, a imprecisão dada pelo fabricante para caudais baixos.

Uma vez que o coletor atualmente instalado na plataforma não permite caudais superiores, decidiu-se então mudar a configuração do sistema que permitisse que tanto o atuador como o sensor trabalhassem dentro da sua gama normal de operação, para isso fez-se um *bypass* ao coletor.

Uma vez sabido que o caudal é bastante linear em relação à frequência dada à bomba optou-se por recolher menos dados e fazer a regressão linear com menos pontos.

Tabela 4 - Dados experimentais da relação entre a tensão e o caudal

Tensão [V]	Caudal [KG/h]
0,0	16380
0,5	17039
1,0	18130
1,5	19302
2,0	20484
2,5	21704
3,0	22950
3,5	24083
3,0	23157
2,5	21866
2,0	20665
1,5	19507
1,0	18359
0,5	17219
0,0	16290

Com os dados recolhidos obteve-se a seguinte função transferência:

$$Tensão = 0,0004 (Caudal) - 7,04$$

(6)

Iniciou-se a bomba ao mínimo obtendo cerca de 16 300 kg/h de caudal e passado poucos minutos deu-se o *setpoint* de 17 000 kg/h, após algum tempo deu-se 20 000 kg/h de *setpoint*.

Verificou-se que a resposta do controlador foi bastante rápida, no entanto o sistema fica bastante instável tal como se pode observar na seguinte figura.

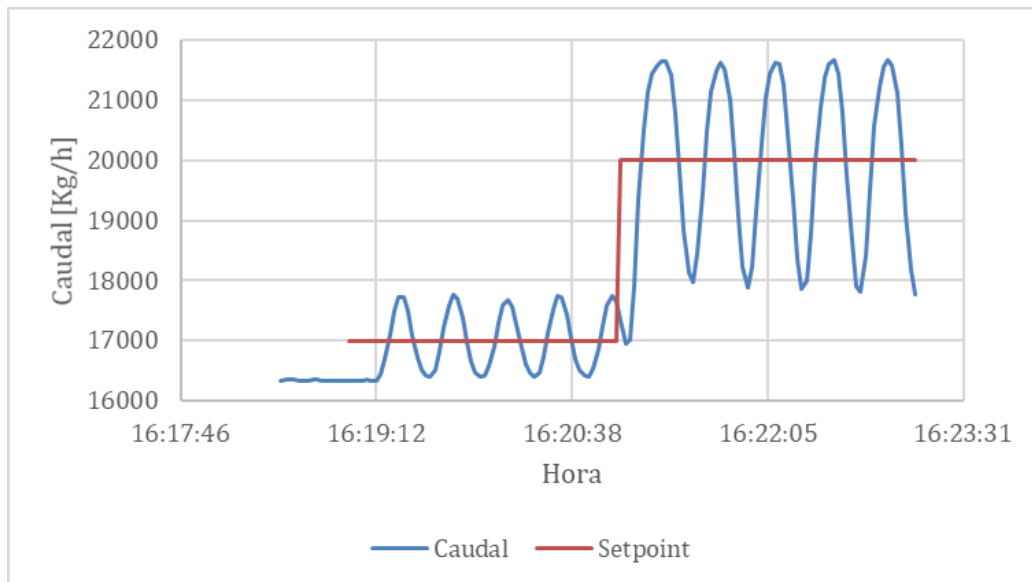


Figura 32 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal

A instabilidade pode-se dever ao facto de o tempo de resposta do sistema ser maior que o período de atuação do controlador, tal como anteriormente procedeu-se à integração das leituras que permite não só obter uma referência mais estável mas também aumentar o período de atuação do controlador.

No intuito de avaliar a qualidade do sistema de controlo decidiu-se usar as últimas 20 medições, considerando que esta seria a máxima estabilidade possível para cada *setpoint*, para calcular o erro entre a mediação e o *setpoint*, uma vez que a norma define um limite percentual decidiu-se calcular também o erro percentual ao invés do absoluto.

$$Erro = \frac{\text{Medição} - \text{Setpoint}}{\text{Setpoint}} * 100\%$$

(7)

A partir da amostra obtida retirou-se o erro máximo, o desvio padrão e a variância.

Deste modo obtiveram-se os seguintes resultados para o desempenho do atuador.

Tabela 5 - Análise de desempenho do controlo de caudal

Setpoint	Erro Máximo [%]	Desvio Padrão [%]	Variância [%]
17000	4,38	1,21	1,46
20000	11,16	2,97	8,81

Com estes dados percebe-se facilmente que este controlador está ainda longe de cumprir o objetivo de 1 % de erro.

Procedeu-se à integração de duas medições para a entrada do controlador e obtiveram-se os resultados apresentados na seguinte figura.

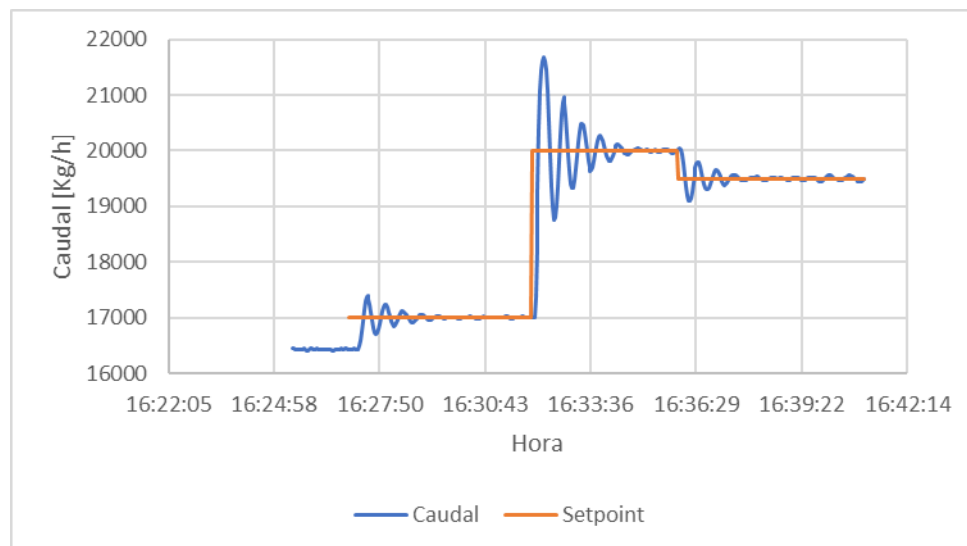


Figura 33 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com 2 integrações

Verificou-se que com a integração de duas leituras o sistema já conseguiu atingir alguma estabilidade, o tempo até atingir essa estabilidade parece ser proporcional à variação no *setpoint* imposto ao controlador. Analisando a amostra das últimas 20 medições para cada *setpoint* pode-se caracterizar a estabilidade com os seguintes parâmetros.

Tabela 6 - Análise do desempenho do controlo de caudal com 2 integrações

Setpoint	Erro Máximo [%]	Desvio Padrão [%]	Variância [%]
17000	0,17	$5,1 E^{-2}$	$2,6 E^{-3}$
20000	0,23	$6,2 E^{-2}$	$3,9 E^{-3}$
19500	0,27	$9,1 E^{-2}$	$8,2 E^{-3}$

Verifica-se que à partida este controlador já consegue cumprir as exigências da norma uma vez que o erro máximo registado foi cerca 0,27 %. Ainda assim decidiu-se verificar se a integração de mais medidas continuaria a refletir numa estabilidade maior no sistema, por isso procedeu-se à integração de 3 medidas para a entrada do controlador e obtiveram-se os seguintes resultados.

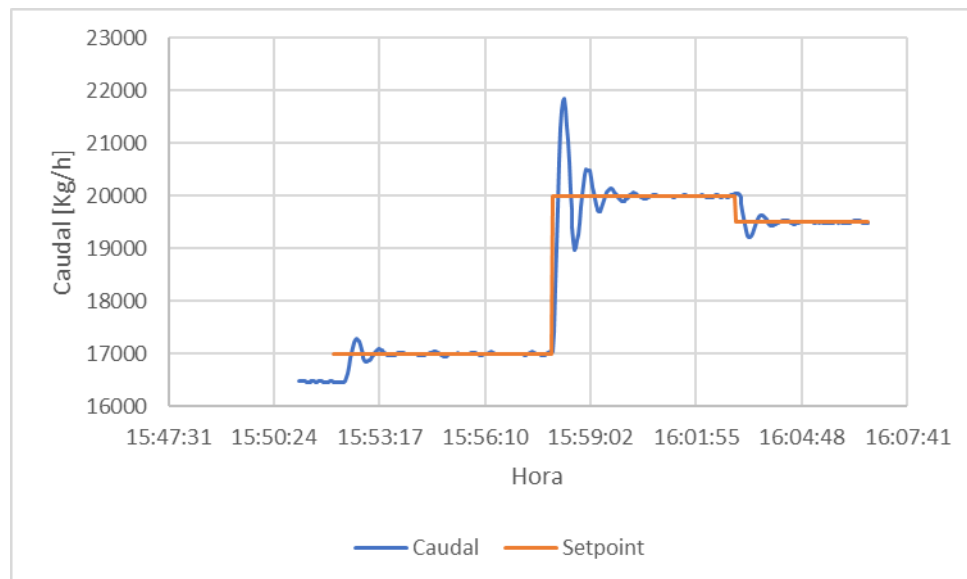


Figura 34 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com 3 integrações

Verificou-se que a integração de três leituras melhorou substancialmente a qualidade do controlo, permitiu atingir uma estabilidade bastante boa principalmente a longo prazo, no entanto nota-se ainda uma amplitude bastante elevada principalmente inicialmente. Procedeu-se à análise dos dados deste ensaio e obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 7 - Análise do desempenho do controlo de caudal com 3 integrações

Setpoint	Erro Máximo [%]	Desvio Padrão [%]	Variância [%]
17000	0,20	6,2 E ⁻²	3,9 E ⁻³
20000	0,18	5,2 E ⁻²	2,7 E ⁻³
19500	0,17	3,7 E ⁻²	1,4 E ⁻³

A estabilidade do sistema melhorou com o aumento da integração das leituras em todos os parâmetros analisados sendo agora cerca de cinco vezes menor que o limite imposto pela norma.

Apesar do objetivo principal ter sido alcançado seria interessante diminuir a instabilidade inicial de forma a diminuir o desgaste da bomba. A instabilidade inicial pode-se dever ao facto de o problema do período de atuação do controlador continuar a ser menor que o tempo de resposta do sistema.

O tempo de resposta do sistema não é um valor fixo, depende de vários fatores sendo um deles a diferença entre o caudal inicial e o caudal pretendido. Por esse motivo modificou-se o controlador de forma a que registe os 3 últimos valores e atue apenas quando a diferença entre o valor mínimo e valor máximo seja menor que uma dada razão.

$$Dif. Máxima = \frac{Val. Máximo - Val. Mínimo}{Val. Mínimo} * 100\%$$

(8)

Inicialmente experimentou-se o controlador considerando como estável o caudal quando a diferença não for inferior a 5 % e depois 0,5 % obtendo-se os seguintes resultados.

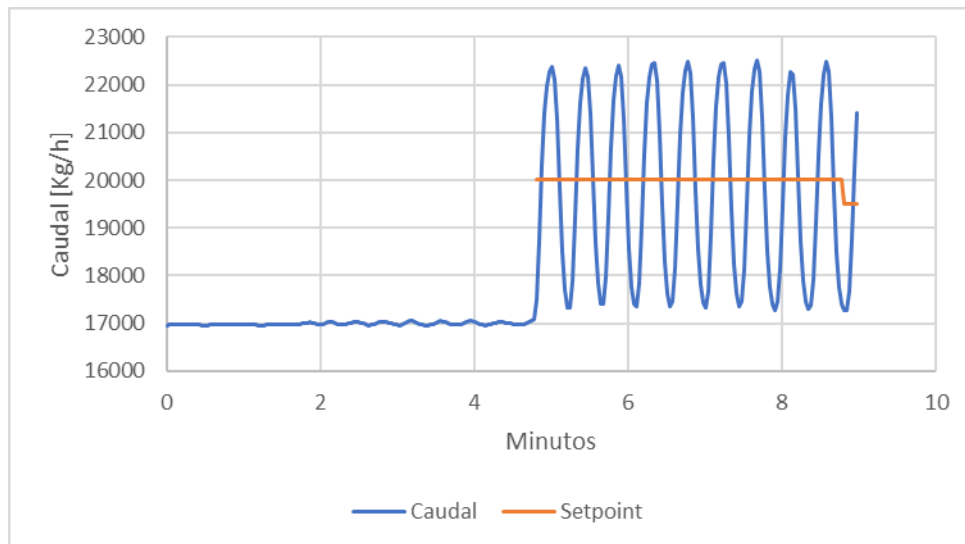


Figura 35 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com limite de 5%

Com o limite de 5 % de variação para atuação o controlador ficar demasiado instável não surtindo o efeito desejado como se pode verificar na representação gráfica e na análise dos dados.

Tabela 8 - Análise do desempenho do controlo de caudal com limite de 5%

Setpoint	Erro Máximo [%]	Desvio Padrão [%]	Variância [%]
20000	13,56	3,90	15,24

Decidiu-se então testar com um limite 10 vezes menor, 0,5 % o que resultou no seguinte.

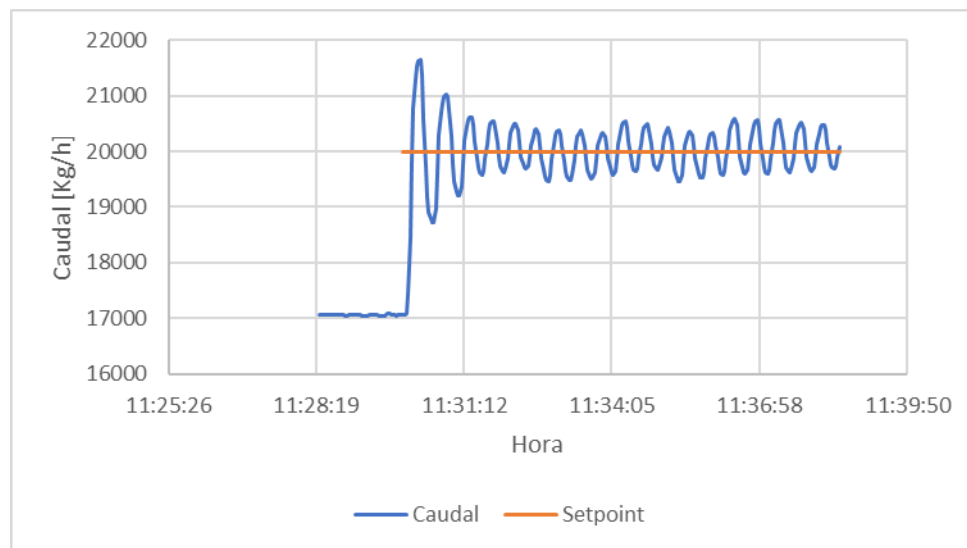


Figura 36 - Gráfico de desempenho do controlo de caudal com limite de 0,5%

Com o limite de 0,5 % de variação para a atuação do controlador verificou-se a existência de uma melhoria comparativamente ao teste anterior assim como uma ligeira melhoria entre o estado inicial e final. A análise dos dados confirma estas conclusões.

Tabela 9 - Análise de desempenho do controlo de caudal com limite de 0,5%

Setpoint	Erro Máximo [%]	Desvio Padrão [%]	Variância [%]
20000	2,41	0,64	0,41

Verificou-se que a 5 % o sistema não revelou qualquer melhoria em relação à tentativa inicial sem qualquer alteração no controlador, no entanto verificou-se uma clara melhoria quando o controlador passa a atuar apenas quando a diferença máxima entre as 3 últimas medições for no máximo 0,5 %.

Decidiu-se então limitar um pouco mais os parâmetros de estabilidade para que o controlador atuasse até 0,025 % e aplicou-se em conjunto a integração das 3 medições como entrada do controlador.

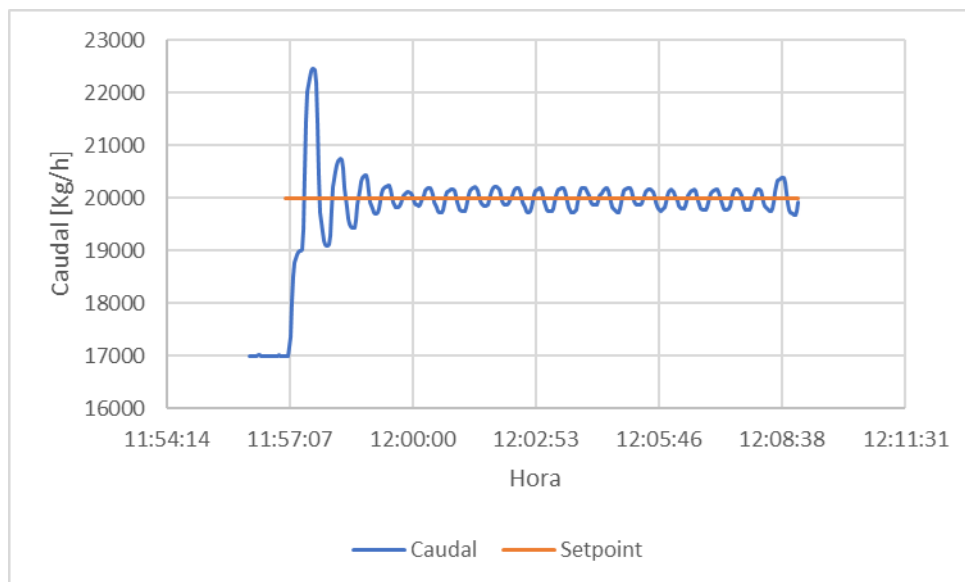


Figura 37 - Gráfico do desempenho do controlo de caudal com limite de 0,025%

Nota-se nesta situação uma clara melhoria em relação às situações com o limite imposto superior no entanto a estabilidade parece ser menor que a opção apenas com a integração das 3 medições.

Tabela 10 - Análise do desempenho do controlo de caudal com limite de 0,025%

Setpoint	Erro Máximo [%]	Desvio Padrão [%]	Variância [%]
20000	1,98	0,53	0,28

A análise dos dados mostra-nos que este controlador não cumpriria os objetivos iniciais. Infelizmente depois deste teste o caudalímetro deixou de funcionar impossibilitando que se realizem mais testes.

Com estes testes pode-se deduzir que se esperarmos que o caudal estabilize ainda mais antes do controlador atuar provavelmente iria-se conseguir maior estabilidade, no entanto possivelmente estamos também perto da estabilidade máxima conseguida pelo sistema.

Seria importante durante a bateria de testes ao sistema perceber o tempo de resposta do sistema assim como a estabilidade máxima conseguida pelo mesmo de forma a que o controlador seja construído tendo em vista as capacidades máximas do sistema. Tendo isto em mente decidiu-se voltar a analisar os dados usados para a construção do controlador mas antes de ser feita a média ao minuto. Uma vez que cada minuto a tensão aumenta 0,5 V pode-se perceber o tempo de resposta do sistema a estabilizar e quanto seria essa estabilização.

Calculou-se a variação de caudal entre cada medição e esboçou-se o seguinte gráfico.

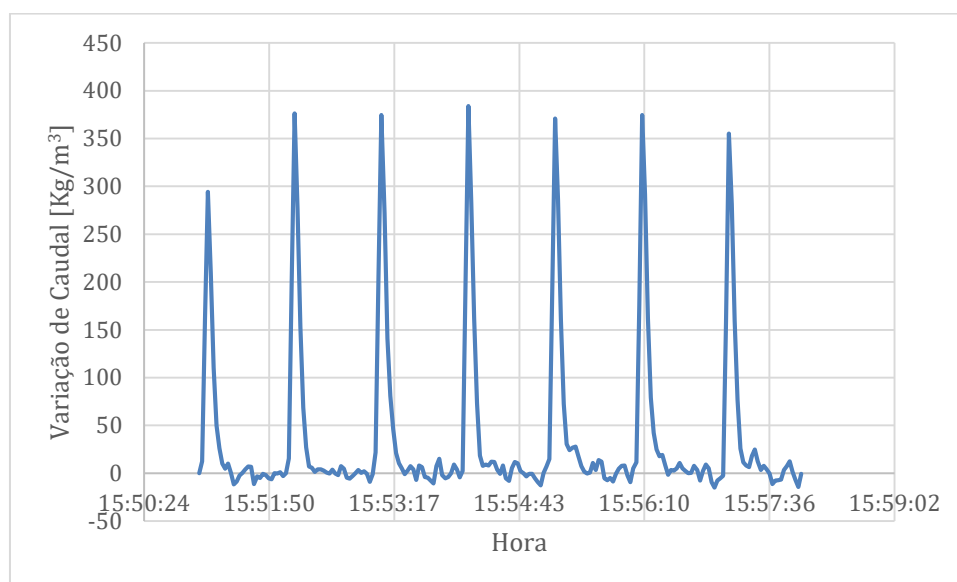


Figura 38 - Gráfico dos dados registados durante a rotina de calibração do controlador

Da análise do gráfico percebe-se que após os picos de variações responsável pelo degrau no sinal dado ao atuador existe um período estabilidade

Tabela 11 - Análise dos dados da rotina de calibração do controlador

	Erro máximo		Desvio Padrão		Variância		τ [s]
	Absoluto [kg/h]	Relativo [%]	Absoluto [kg/h]	Relativo [%]	Absoluto [kg/h]	Relativo [%]	
0,5	10,13	$5,9 \text{ E}^{-2}$	5,89	$3,4 \text{ E}^{-2}$	34,67	0,20	20
1	7,52	$4,1 \text{ E}^{-2}$	3,99	$2,2 \text{ E}^{-2}$	15,91	0,09	20



	<i>Erro máximo</i>		<i>Desvio Padrão</i>		<i>Variância</i>		τ [s]
	<i>Absoluto</i> [kg/h]	<i>Relativo [%]</i>	<i>Absoluto</i> [kg/h]	<i>Relativo [%]</i>	<i>Absoluto</i> [kg/h]	<i>Relativo [%]</i>	
1,5	14,97	7,7 E ⁻²	6,88	3,5 E ⁻²	14,61	0,08	22
2	11,99	5,8 E ⁻²	7,53	3,6 E ⁻²	56,64	0,27	18
2,5	13,67	6,2 E ⁻²	7,55	3,4 E ⁻²	57,03	0,26	30
3	10,87	4,7 E ⁻²	6,84	3,0 E ⁻²	46,78	0,20	24
3,5	24,73	10,2 E ⁻²	10,18	5,5 E ⁻²	103,53	0,43	22

Ao analisar os mesmos dados com maior detalhe às zonas mais estáveis percebe-se que é possível atingir estabilidade pelo menos entre +/- 25 kg/h, que significa cerca de +/-0,1 % do caudal o que corresponde ao limite dado pela fabricante. Ou seja apenas faria sentido programar o controlador para atuar no mínimo até oscilações de 0,1 % entre si, de forma a garantir que uma pequena perturbação no sistema que diminua um pouco a estabilidade do mesmo não comprometa o desempenho do controlador poderá se dar uma margem de segurança, por exemplo 50 %, que neste caso consideraria estável uma situação onde o caudal não diferisse mais de 0,15 %.

4.1.1 Automatização da construção do controlador

Uma vez entendidos os vários detalhes importantes para a boa construção de um controlador para o caudal do circuito hidráulico o objetivo agora seria criar um script que permitisse a qualquer operador refazer o controlador assim que desejado, uma vez que é necessário diferentes controladores para diferentes coletores.

O script deve começar por dar o sinal de velocidade mínima e aumentar gradualmente até chegar ao máximo, entre cada sinal diferente deve haver pelo menos um minuto de dados, deverá ser guardado uma tabela onde conste a hora, o sinal e o caudal.

Após conclusão do processo o script iniciará o tratamento dos dados, começará por avaliar os dados que correspondem a situações estáveis. Para isso deverá ser analisado a variação entre cada medição, o valor absoluto da variação deverá aumentar inicialmente após a resposta do sistema e diminuir gradualmente até estabilizar, portanto o script deverá ter um contador que espera que o sinal da derivada mude duas vezes e registar a hora quando isso acontecer.

Os dados seriam considerados estáveis a partir dessa hora e desses dados retirar-se-ia a média e calcular-se-ia a diferença entre cada valor e a média. Daqui retirar-se-ia o valor máximo de erro para que o controlador atuasse somente quando o erro for menor que esse valor enquanto que das médias para os vários sinais far-se-ia a regressão linear para a construção do controlador.

4.2 Controlo de temperatura

Para o controlo da temperatura do fluído no circuito a plataforma tem a caldeira como fonte de calor e o permutador de calor como sumidouro de calor. Pretende-se controlar a temperatura à entrada do coletor que fica a várias dezenas de metros dos possíveis atuadores, por isso antes de se construir um controlador procurou-se criar um modelo que fosse representativo da diferença de temperatura entre a entrada do coletor e a temperatura na saída dos atuadores. O intuito seria que o objetivo dado ao controlador fosse a saída deste modelo que estaria referenciada à temperatura pretendida na entrada do coletor.

4.2.1 Desenvolvimento do Modelo Térmico Simplificado

Os sistemas térmicos podem ser analisados essencialmente por resistências e capacidades. A transferência térmica dá-se através de condução, convecção e radiação, no entanto uma vez que o efeito das perdas radiativas só se tornam significativos para diferenças de temperatura elevadas podem ser aqui desprezados.

Para a transferência de calor por condução ou convecção sabe-se (17) que

$$q = K\Delta T$$

(9)

Onde,

q é a taxa de fluxo de calor [W]

ΔT é a diferença de temperatura [K]

K é o coeficiente de transferência térmica [W.K⁻¹]

Sendo o coeficiente de transferência térmica para a condução dado por (17):

$$K = \frac{kA}{\Delta x}$$

(10)

Onde,

k é a condutividade térmica [W.m⁻¹.K⁻¹]

A é a área [m²]

Δx é a espessura [m]

ou para o caso da convecção

$$K = HA$$

(11)

Onde,

H é o coeficiente de convecção [W.K⁻¹.m⁻²]

A resistência térmica pode ser dada por

$$R = 1/K$$

(12)

Para os tubos pode-se definir a resistência térmica da seguinte maneira

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k}$$

(13)

Onde,

r_e é o raio externo [m]

r_i é o raio interno [m]

Uma vez que o tubo para além do aço carbónico tem um isolamento em lã de rocha, a resistência térmica entre o fluido e o ambiente pode ser descrita da seguinte forma,

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_e + e_{iso}}{r_e}\right)}{2 * \pi * k_{iso} * L} + \frac{1}{h * 2 * \pi * (r_e + e_{iso}) * L}$$

(14)

A capacidade térmica é definida por

$$C = mc$$

(15)

Onde,

m é a massa [Kg]

c é o calor específico [$J.K^{-1}.Kg^{-1}$]

mas também por

$$C = \delta Q / \delta T$$

(16)

Onde,

δQ é a variação do calor armazenado [J]

δT é a variação da temperatura [K]

Cálculo da capacidade e resistência térmica

Sobre os tubos de aço apenas se sabe que são de aço carbono, pelo que se assumiu ser aço carbono SAE 1006 que apresenta as seguintes características:

Tabela 12 - Propriedades do aço carbono SAE 1006

<i>Aço Carbono SAE 1006</i>		
<i>Densidade</i>	7 872	kg.m ⁻³
<i>Calor Específico</i>	481	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
<i>Condutividade térmica</i>	64,9	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

O diâmetro do tubo foi medido com uma craveira através de um tubo cortado, obtendo-se 0,03875 m para o raio interno e 0,005 m de espessura.

O isolamento é composto por lã de rocha protegida por uma coquilha de alumínio, a lã de rocha tem as seguintes propriedades:

Tabela 13 - Propriedades da lã de rocha

<i>Lã de Rocha</i>		
<i>Densidade</i>	25 a 70	Kg.m ⁻³
<i>Calor Específico</i>	1030	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
<i>Condutividade térmica</i>	0,034	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Para calcular o raio do tubo com o isolamento mediu-se o perímetro do tubo e obteve-se 0,825 m de perímetro e de seguida tirou-se o raio da seguinte forma

$$r = \frac{0,825}{2 \pi} = 0,131 \text{ m}$$

(17)

O cálculo de volume de um cilindro é dado por:



$$V = \pi * r^2 * L$$

(18)

Onde,

r é o raio [m]

L é a altura [m]

Para calcular o volume de um tubo podemos considerar que é o volume de um cilindro com o raio externo menos o volume de um cilindro com o raio interno.

$$V = \pi * (r_e^2 - r_i^2) * L$$

(19)

O comprimento do tubo foi calculado por secções, sempre o mais centrado possível, desta forma obteve-se um comprimento de 62 m.

$$V_{Aço} = \pi * (0,04375^2 - 0,03875^2) * 62$$

$$V_{Aço} = 0,0803 \text{ m}^3$$

(20)

Pode-se obter a massa através de,

$$Massa_{Aço} = Volume_{Aço} * Densidade_{Aço}$$

$$Massa_{Aço} = 0,0803 * 7872$$

$$Massa_{Aço} = 632,12 \text{ kg}$$

(21)

A capacidade térmica do aço obtém-se através de

$$Capacidade_{Aço} = m_{Aço} * c_{Aço}$$

$$Capacidade_{Aço} = 632,12 * 481$$

$$Capacidade_{Aço} = 304\,050 \text{ J/K}$$

(22)

A resistência térmica obtém-se através de

$$Resist\ência_{t\acute{e}rmica} = \frac{\ln\left(\frac{r_e + e_{iso}}{r_e}\right)}{k_{iso} * 2 * \pi * L_{Tubo}} + \frac{1}{h * 2 * \pi * (r_e + e_{iso}) * L_{Tubo}} \quad (23)$$

onde,

e_{iso} é a espessura do isolamento [m]

k_{iso} é a condutividade térmica do isolamento [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

L_{Tubo} é o comprimento do tubo [m]

h é o coeficiente de convecção entre o tubo e o ar [$W.m^{-2}.K^{-1}$]

Tendo em conta os seguintes valores para as variáveis:

Tabela 14 - Características do sistema

Dimensões	[m]	Propriedades	[$W.m^{-1}.K^{-1}$]
r_e	0,0438	k_{iso}	0,034
e_{iso}	0,0700		[$W.m^{-2}.K^{-1}$]
L_{Tubo}	62,0000	h	15

Chega-se ao seguinte valor para a resistência térmica,

$$Resist\ência_{t\acute{e}rmica} = 0,0736 K.W^{-1} \quad (24)$$

O sistema, numa primeira aproximação, pode ser visto como um nodo único de temperatura homogénea que é representada pela seguinte equação de balanço de energia,

$$C \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} + \dot{m} \cdot c_f \cdot (T_{out} - T_{in}) + \frac{(T_m - T_{amb})}{R_t} = 0 \quad (25)$$

Onde,

C é capacidade térmica do sistema [$J.K^{-1}$]

T_m é a temperatura média do sistema [$^{\circ}C$ ou K]

t é o tempo [s]

\dot{m} é o caudal mássico [$kg.s^{-1}$]

c_f é calor específico do fluido [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

T_{in} é a temperatura de entrada do fluido [$^{\circ}C$ ou K]

T_{out} é a temperatura de saída do fluido [$^{\circ}C$ ou K]

T_{amb} é a temperatura ambiente [$^{\circ}C$ ou K]

R_t é resistência térmica entre o sistema e o ambiente [$K.W^{-1}$]

De forma a reduzir o número de incógnitas assumiu-se que a temperatura média do sistema pode ser aproximada pela média entre a temperatura do fluido à entrada e à saída:

$$T_{out} = 2T_m - T_{in} \quad (26)$$

O que resultou na seguinte equação,

$$C \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} + 2\dot{m} \cdot c_f \cdot (T_m - T_{in}) + \frac{(T_m - T_{amb})}{R_t} = 0$$

Resolvendo a equação diferencial de primeira ordem para a incógnita T_m , obtém se a seguinte equação

$$T_m(t) = A \cdot e^{\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right)} + B \quad (27)$$

Sendo que,

$$\tau = \frac{C}{2\dot{m} \cdot c_f + \frac{1}{R_t}} \quad (28)$$

$$A = T_0 - B \quad (29)$$

$$B = \frac{2\dot{m} \cdot c_f \cdot T_{in} + \frac{T_{amb}}{R_t}}{2\dot{m} \cdot c_f + \frac{1}{R_t}}$$

(30)

Onde,

t_0 é o tempo inicial [s]

T_0 é a temperatura inicial do sistema [°C ou K]

Deste modelo obtém-se a temperatura média do sistema, essencial para o cálculo das perdas e influência da capacidade térmica no sistema, no entanto pretende-se obter a temperatura de saída do sistema que representa a temperatura de entrada no coletor. Pelo que para obtê-la necessita-se de efetuar cálculo realizado na equação anterior.

4.2.2 Validação do modelo

Implementou-se o código tanto em *Matlab* como em *Python*, utilizaram-se os dados de um caso real para dar como entrada ao sistema a temperatura à saída da casa das máquinas e compararam-se os resultados do modelo com os resultados reais.

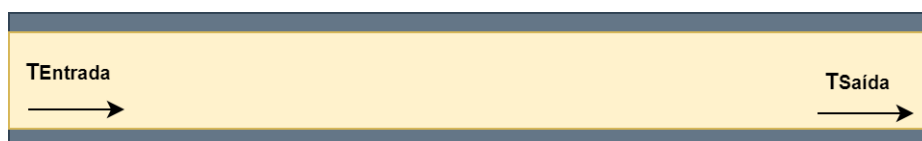


Figura 39 - Esquema simples do sistema

Executou-se o código em *Matlab* com os valores calculados e procedeu-se à elaboração do gráfico obtendo os resultados descritos na seguinte figura.

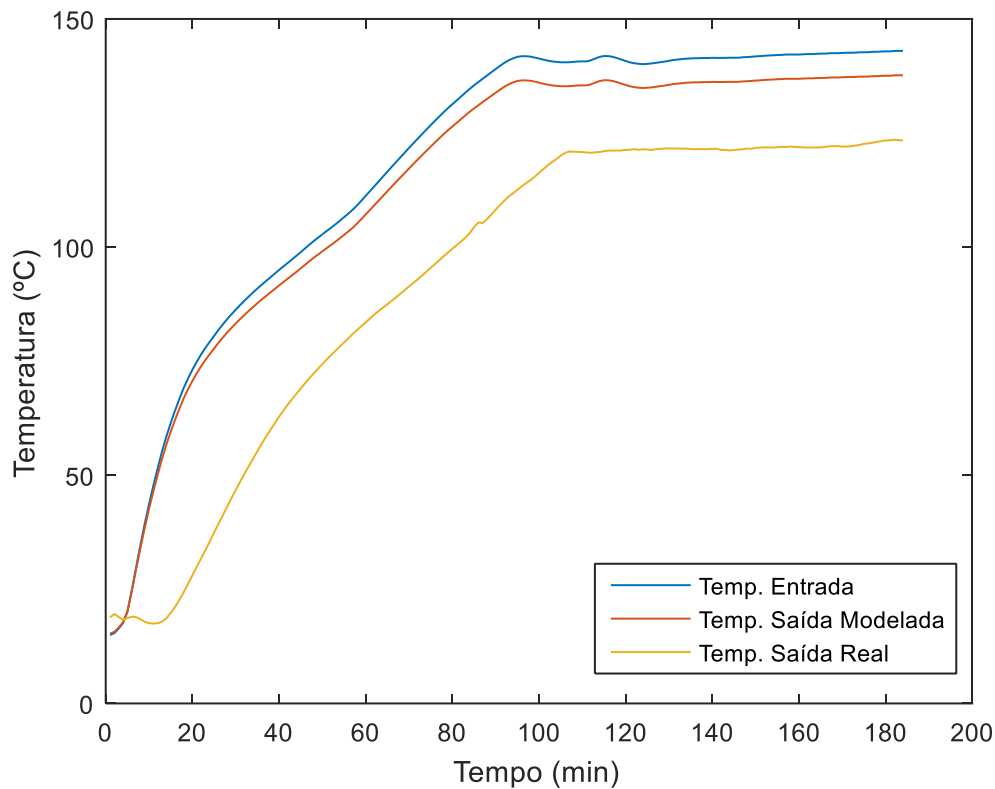


Figura 40 - Gráfico da temperatura prevista pelo modelo e da temperatura real

Percebeu-se que havia uma discrepância razoável entre o previsto pelo modelo e o real, tanto temporal como de diferença de temperaturas. Analisou-se melhor o circuito e percebeu-se que existe cerca de 2 metros de tubo flexível sem isolamento podendo ser essa a causa da discrepância entre as perdas previstas e reais. Introduziu-se então no modelo que o tubo estaria 2 metros sem isolamento e 60 metros com isolamento e obtiveram-se os seguintes resultados.

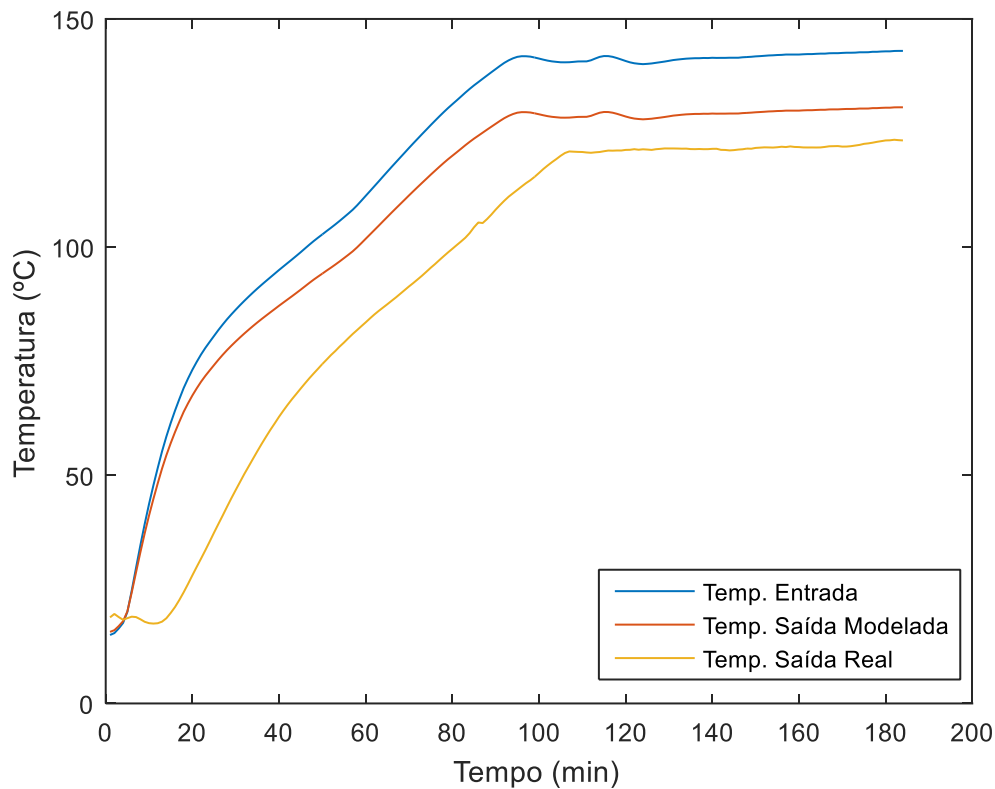


Figura 41 - Gráfico da temperatura prevista pelo modelo e da temperatura real

A diferença de temperatura entre o real e o previsto reduziu bastante o que indica que pequenos detalhes terão grandes consequências na qualidade dos resultados do modelo, com os resultados obtidos percebe-se que as perdas reais eram maiores do que as previstas pelo modelo.

O caudal usado de 600 kg/h numa tubagem de 0,04 m de raio pode causar uma velocidade lenta o suficiente que justifique a discrepância temporal.

$$v_{\text{fluido}} = \frac{\left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)}{S} = \frac{\left(\frac{600}{935}\right)}{0,005} = 128,34 \text{ m/h}$$

(31)

Onde,

\dot{m} é o caudal mássico [Kg.h⁻¹]

ρ é a densidade do óleo a 20 °C [Kg.m⁻³]

S é a secção da tubagem [m^2]

$$t = \frac{d}{v_{\text{fluido}}} = \frac{60}{128,34} = 0,468 \text{ h} = 28 \text{ min}$$

(32)

Pode-se observar que no caso real a temperatura de saída só reage após cerca de 18 minutos, os cálculos mostram que poderia levar até 28 minutos na situação mais lenta, porém com o aumento de temperatura a velocidade vai aumentando. A velocidade do fluido poderá explicar a demora na reação no sistema enquanto que esta não está prevista no modelo. No caso de um coletor de maiores dimensões, com um caudal de ensaio mais elevado, este problema irá com certeza diminuir.

O bom desempenho do modelo está dependente da sua boa construção, mas também de uma boa caracterização do sistema, não havendo precisão no valor do comprimento da tubagem, nas características de todos os materiais bem como nas suas dimensões exatas dificilmente se conseguirá resultados fiáveis por muito bom que esteja construído o modelo.

Assim sendo seria mais fiável obter as características térmicas do sistema através do método experimental.

Uma vez que para a realização dos ensaios espera-se que o sistema esteja em regime estacionário a capacidade térmica do sistema é relevante apenas para perceber quanto tempo é necessário para atingir esse estado.

Já a resistência térmica deste troço do sistema poderá nos dar a razão entre a temperatura de saída na sala das máquinas e a temperatura de entrada no coletor. De uma forma simplista pode-se dizer,

$$\dot{m} \cdot c_f \cdot (T_{Entrada} - T_{Saída}) + \frac{\left(\left(\frac{T_{Entrada} + T_{Saída}}{2} \right) - T_{amb} \right)}{R_t} = 0 \quad (33)$$

$$R_t = \frac{\left(\left(\frac{T_{Entrada} + T_{Saída}}{2} \right) - T_{amb} \right)}{-\dot{m} \cdot c_f \cdot (T_{Entrada} - T_{Saída})} \quad (34)$$

Após analisar a resistência térmica de vários ensaios seria interessante perceber se esta é fixa ou se varia significativamente entre os diferentes ensaios, caso ocorra variação seria interessante estudar se essa variação teria uma correlação com a velocidade do vento.

4.2.3 Construção do controlador

Para a construção do controlador de temperatura do circuito temos como possíveis atuadores a caldeira, uma válvula modelar que controla a razão de fluxo que entre permutador de calor e bypass do mesmo e ainda a bomba de circulação de circuito de frio.

A caldeira tem incorporado um controlador porem verificou-se que a temperatura lida pelo mesmo diferia em relação às leituras das sondas de temperatura do circuito hidráulico, o controlo da temperatura com base neste controlador mostrou não ser suficiente uma vez que a temperatura registada nas restantes sondas ia aumentando ao longo do dia.

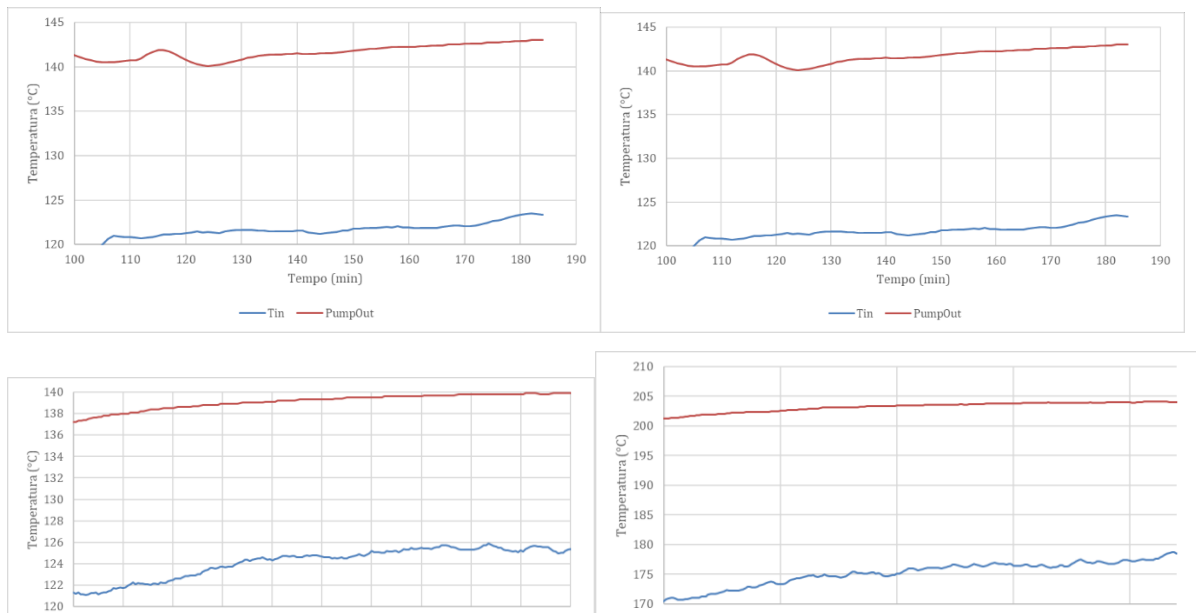


Figura 42 - Gráficos da temperatura controlada pela caldeira

Destes dados para além de se perceber a temperatura de saída da casa das máquinas vai aumentando e isso influencia a temperatura de entrada no coletor percebe-se também que a diferença de temperaturas entre os dois pontos tipicamente tende a diminuir ao longo do tempo, o aumento da temperatura ambiente pode justificar este efeito. Conclui-se então que nas condições atuais o controlador da caldeira não é suficiente para o controlo da temperatura do circuito de ensaios.

Na alimentação do permutador de calor existe uma válvula de 3 vias controlada remotamente que permite controlar a razão entre o óleo térmico que passa pelo permutador de calor e a razão que passa pelo bypass.

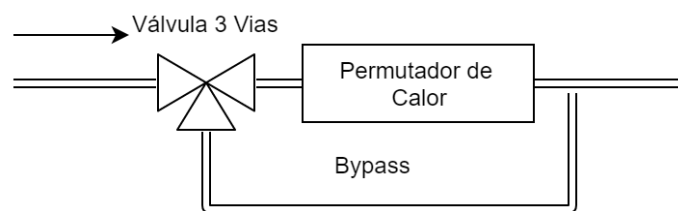


Figura 43 - Representação do bypass do permutador de calor

Nesta configuração é possível usar esta válvula para controlar a quantidade de óleo que passa pelo permutador de calor e que por sua vez é arrefecida. Porém não é fácil prever as consequências exatas na temperatura da mistura do óleo, a razão entre o caudal que passa no permutador de calor e pelo bypass depende essencialmente da razão entre a perda de carga nos dois troços. A perda de carga em cada troço é influenciada pela posição da válvula mas também pela viscosidade do óleo que varia com a temperatura.

Isto influencia também a perda de carga de todo o sistema e por consequente a perda de carga que a bomba de circulação precisa de vencer, ou seja quanto mais se variar esta válvula mais instabilidade se estará a introduzir no controlo do caudal.

Por fim é possível regular o caudal do fluido de arrefecimento do permutador e com isso regular também a capacidade do permutador para retirar calor do sistema com a limitação da água não poder passar os 100 °C já que o circuito de frio é atmosférico.

Propõe-se então que para a construção deste controlador a caldeira atue como limite mínimo para a temperatura, atue apenas quando a temperatura baixar de um determinado valor que deverá ser sempre superior à temperatura de controlo de forma a garantir o controlo da temperatura com a remoção de calor. Que a válvula de 3 vias funcione inicialmente para definir o limite inferior e superior de potência possível de retirar do sistema e por fim se use o caudal do circuito de refrigeração para fazer o ajuste fino.

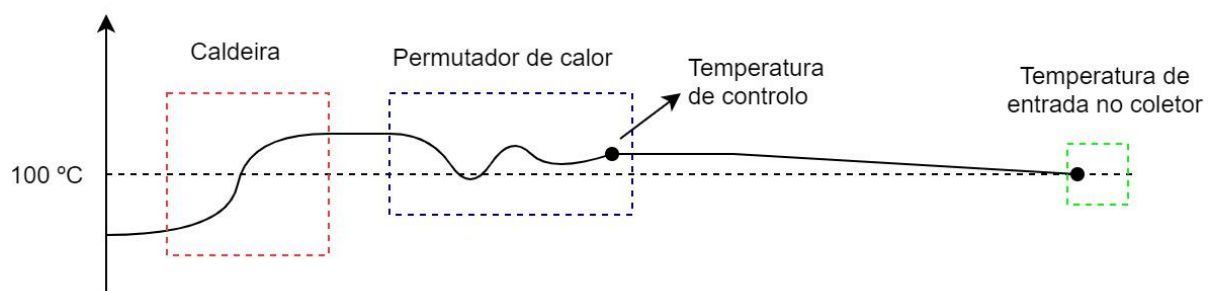


Figura 44 - Exemplo representativo das variações de temperatura ao longo do circuito

Então o que se propõe é usar o modelo para definir o *setpoint* do controlador num ciclo de operação de cerca de 10 minutos onde deverá atualizar o *setpoint* da temperatura de controlo consoante a temperatura ambiente e a média da velocidade do vento desse período enquanto que o controlador deve atuar num período menor que deve corresponder ao tempo de resposta do sistema.

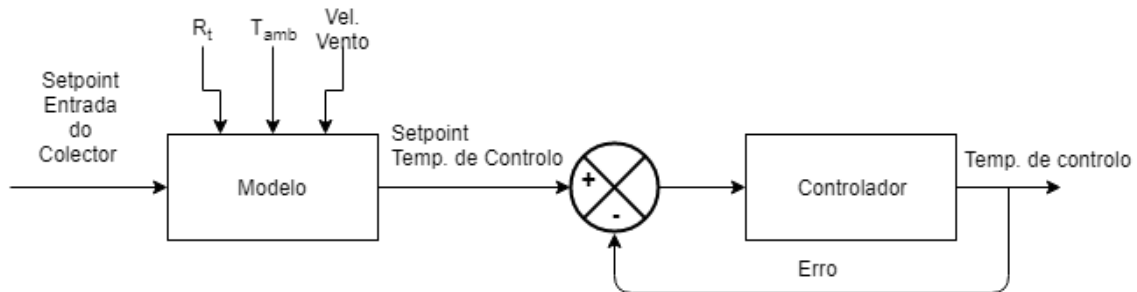


Figura 45 - Diagrama de controlo de temperatura proposto

4.3 Implementação dos controladores

Assim que arquitetado e construído o controlo das variáveis desejadas é necessário integrá-lo o *software* de operação da plataforma de uma forma simples e intuitiva para o operador. Atualmente o *software* já tem incluído um painel para ativação do controlo onde é possível definir o objetivo pretendido, neste painel é dada a informação do valor da última medição da variável a controlar e do erro em relação ao objetivo.

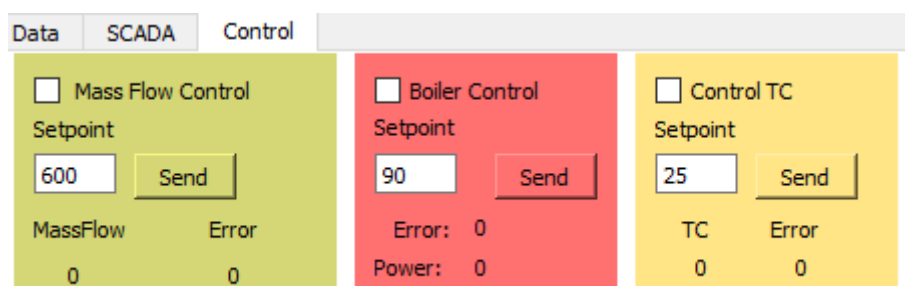


Figura 46 - Painel de ativação e configuração dos controladores

5 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões

A realização desta dissertação implicou a busca de conhecimentos na área de controlo de sistemas que é uma área muito vasta com muito conhecimento teórico e experimental. Dependendo da complexidade da instalação a controlar e dos processos físicos e químicos em presença nem sempre a modelação clássica é viável (dado os tempos de aquisição e processamento dos sinais serem demasiados) pelo que a solução a seguir é baseada na experimentação e interpolação de curvas experimentais (*black-box model*).

Seguindo neste trabalho fundamentalmente metodologias de identificação experimental, foram implementados com êxito o controlo de caudal assim como foi projetado o controlo da temperatura do circuito de ensaio da Plataforma de Ensaio de Concentradores Solares da Universidade de Évora.

Foram feitas outras melhorias na plataforma, como a automatização do processo de rotação consoante uma única entrada dada pelo operador (Azimute), a simplificação do processo de inclinação, a construção de um *software* para aquisição e gravação de dados assim como para a implementação dos projetos de controlo propostos.

5.2 Desenvolvimentos Futuros

Apesar de extenso o trabalho realizado nesta dissertação este foi apenas o início de um projeto maior.

Numa próxima fase, prevê-se o desenvolvimento de um construtor automático para o controlador do caudal com base numa avaliação prévia do sistema através de uma bateria de ensaios experimentais específicos. A partir destes, será estudado o comportamento do sistema e reconhecidas as suas limitações e poderá ser criado um sistema de reconhecimento e alerta para a necessidade de uma nova calibração do controlador assim como para a necessidade da limpeza do filtro de óleo.

O controlo de temperatura deverá ser implementado para que se possam perceber possíveis desafios a resolver no futuro. Para além desses sabe-se que o modelo necessita de ser melhorado e isto pode ser feito com o aferimento da resistência e capacidade térmica do sistema com base em dados experimentais do sistema. Deve ser ainda estudada a influencia do vento das perdas térmicas do sistema e com isto adicionar esta dependência ao modelo.

Na movimentação da plataforma é ainda possível melhorar a fiabilidade da leitura do azimute da mesma através da substituição da roda atual por uma roda dentada. A inclinação da plataforma carece ainda de um sistema que seja totalmente automático permitindo a implementação do seguimento solar com um erro mínimo. Poderá também ser necessária a instalação de um maior número de inclinómetros.

A configuração do software poderá ser ainda mais simplificada através da GUI (*Graphical User Interface*) onde será possível implementar uma configuração mais intuitiva para o operador.

Após a implementação das funcionalidades essenciais para o controlo do sistema, seria ainda interessante simplificar as tarefas para a realização do ensaio. Com apenas uma pré configuração do sistema acerca do coletor e dos ensaios a realizar onde se daria como entrada variáveis como temperatura de entrada do coletor e caudal (ou área de abertura). Com isto o

software posicionaria o coletor na posição correta e daria as instruções necessárias aos controladores.

Se for feito no *software* o registo dos ensaios poderá criar-se uma base de dados onde se definam perfis para diferentes coletores, ou para o mesmo com diferentes características, percebendo assim facilmente quais ensaios já feitos e quais faltam realizar. Nesta lista de ensaios pode ser avaliada de forma automática o cumprimento das condições de ensaio nos requisitos da norma.

Com isto e após a realização de todos os ensaios necessário seria também interessante incluir o processamento de todos os dados e obter a caracterização do coletor, centralizando todos os passos necessários ao ensaio de um coletor desde a preparação e realização de ensaios até processamento dos dados e obtenção dos parâmetros característicos.

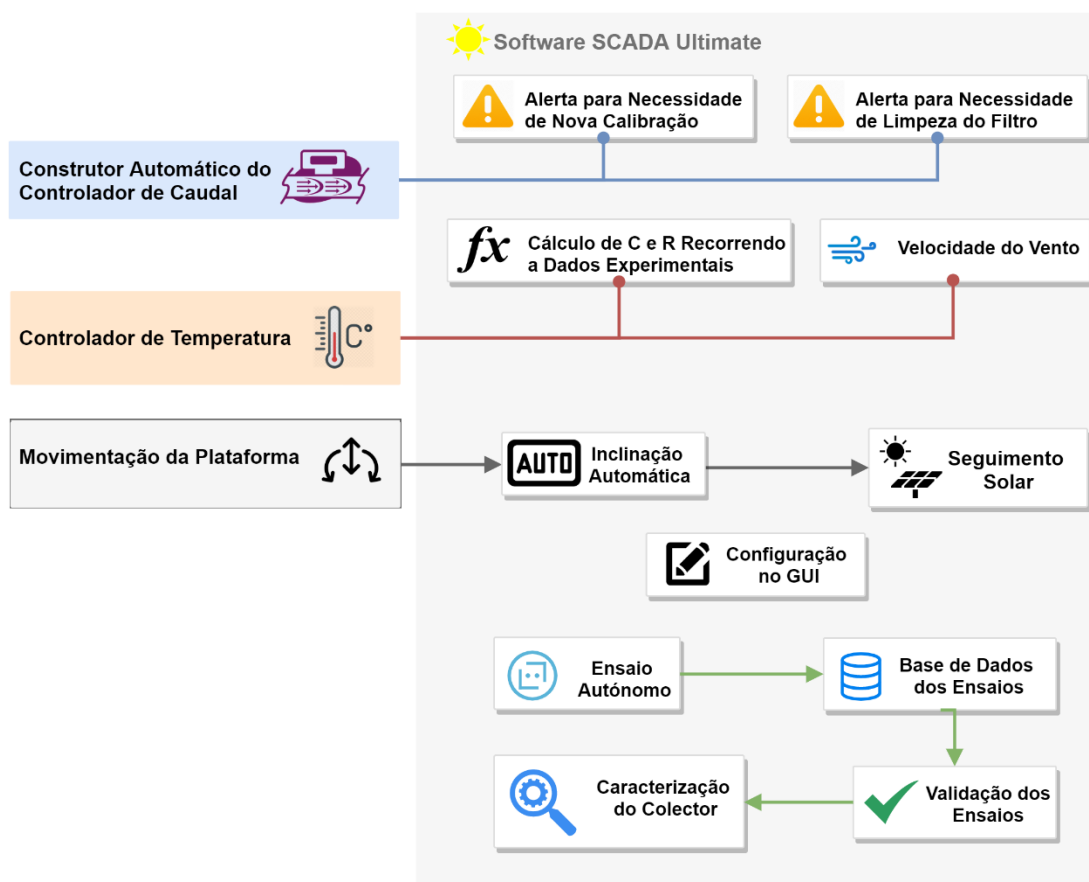


Figura 47 - Diagrama dos Desenvolvimentos Futuros

6 Referências

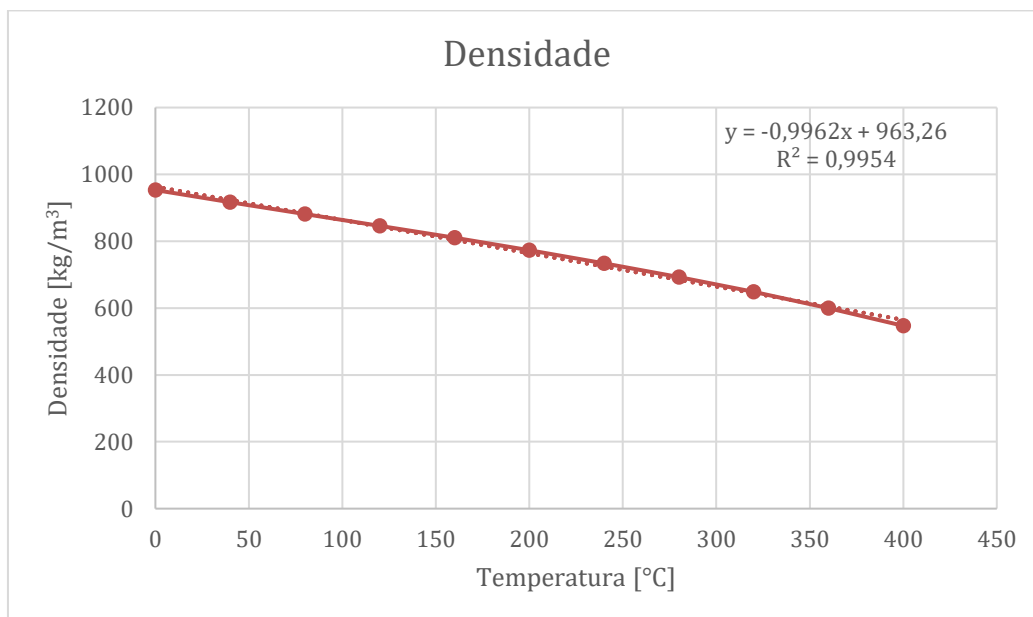
1. **ISO/CEN 9806**. Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods. 2017.
2. **Siemens**. S7-200 Programmable ControllerSystem Manual. [Online] Agosto de 2008. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/582/1109582/att_22063/v1/s7200_system_manual_en-US.pdf.
3. **SIEMENS**. Data sheet for Absolute encoder 6FX2001-5QS24. [Online] 2014. <https://mall.industry.siemens.com/mall/Document/GetDocumentBasedOnCode?code=aHR0cHM6Ly9tYWxsLmluZHVzdHJ5LnNpZW1lbnMuY29tL3NwaWNIL2RvY3VzZXJ2aWNIL2RvY3VzZXJ2aWNIP2NvbmlkPTE0JmRvY3UubWxmYj02RlgyMDAxLTVRUzI0JmRvY3UuaW5pdHR5cGU9TUxGQjZkb2N1LmdlbnVvYXRpb25>.
4. **Posital**. ACS-360-1-S101-VE2-PM. [Online] <https://www.posital.com/pt/produtos/inclinometros/tiltix-product-finder/ACS-360-1-S101-VE2-PM/111244609/detail.php>.
5. **DOW**. TDS SYLTHERM 800 Silicone Heat Transfer Fluid. Novembro de 2001.
6. **NIKKISO**. NON-SEAL PUMP SGM Series High-Temperature Type. Outubro de 2008.
7. **KSB**. Closed-coupled pump Etablob Type Series Booklet. 2018.
8. **CARRIER**. User Manual Carrier 30RB-162-802.
9. **TOSHIBA**. Variable torque inverter TOSVERT VF-PS1.
10. —. Industrial Inverter TOSVERT VF-S15.
11. **KROHNE**. Technical Datasheet OPTIMASS 6000. 2012.
12. —. MFC 400 Handbook. 2015.
13. **ABB**. Data Sheet ProcessMaster FEP300.
14. **Zonen, Kipp &**. CMP11 Spectrally Flat Class A pyranometer. *Web site de Kipp & Zonen*. [Online] 1 de Julho de 2019. <https://www.kippzonen.com/Product/13/CMP11-Pyranometer#.Xa2Rm2bOXIU>.
15. **Agilent Technologies**. User's Guide Agilent 34980A Multifunction Switch/Measure Unit.
16. —. 34980A Programmer's Reference.
17. **Incorpera, et al**. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. Rio de Janeiro : LTC, 2008.
18. **Ogata, K**. *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice-Hall, 1997.

19. **ISO.** *ISO 9806-1 Test methods for solar collectors.* 1994.
20. **FIBROSOM.** Isolamentos, Lã de Rocha. *FIBROSOM.* [Online] 1 de Julho de 2019. <http://www.fibrosom.com/ficheiros/pdfs/laderocha.pdf>.
21. **IES.** ESQUEMA ELÉCTRICO Y PLANO IMPLANTACIÓN CUADRO CONTROL PARA RXPG 40 kW. 2012.
22. **BaumerIVO.** Accessories & Service Measuring wheels.
23. **Pereira, Jorge.** *Realização de ensaios para a caracterização tridimensional do modificador do ângulo de incidência de um coletor solar térmico do tipo CPC.* 2016.
24. **Osório, Tiago.** *Linear solar concentrators: new testing tools and facilities, application to novel CPC-type collectors for industrial process heat.* 2019.
25. —. *Colectores Solares Térmicos sob Condições Transientes. Caracterização óptica e térmica com base no modelo quasi-dinâmico.* 2011.
26. *A Novel Quasi-stationary CPC-type Solar Collector for Intermediate Temperature Range Applications for Process Heat.* **Osório, T., et al.** 2018, SolarPACES Concentrating Solar power and Chemical Energy Technologies.
27. **Substech.** Carbon steel SAE 1006. *Substech.* [Online] 1 de Julho de 2019. http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=carbon_steel_sae_1006.

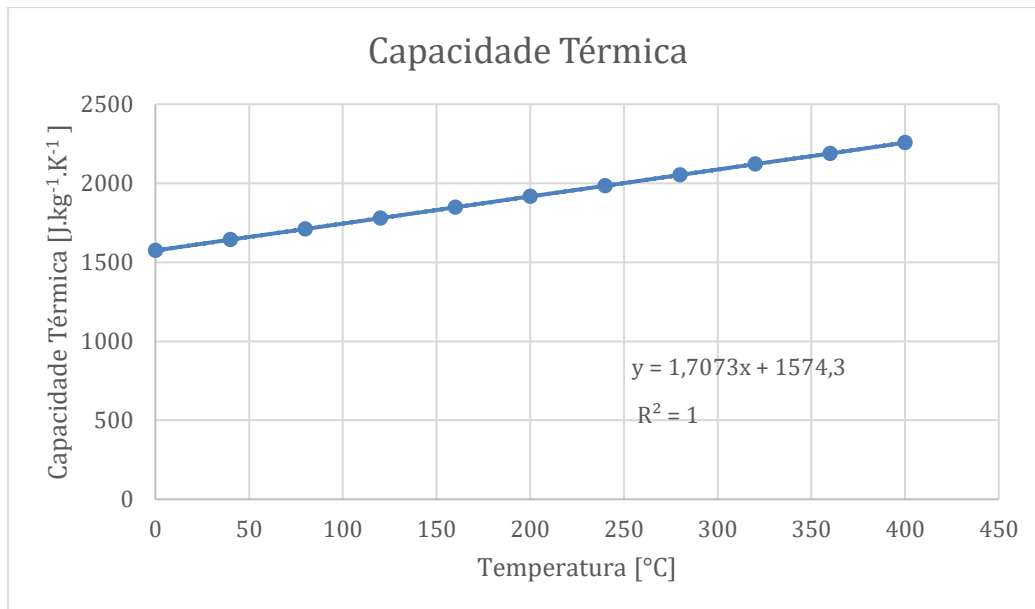
7 Anexos

Temperatura [°C]	Capacidade Térmica [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Densidade [kg/m ³]	Viscosidade e	Pressão de Vapor [Bar]
0	1574	953,16	15,33	0
40	1643	917,07	7,00	0,001
80	1711	881,68	3,86	0,0146
120	1779	846,35	2,36	0,093
160	1847	810,45	1,54	0,350
200	1916	773,33	1,05	0,946
240	1984	734,35	0,74	2,048
280	2052	692,87	0,54	3,802
320	2121	648,24	0,41	6,305
360	2189	599,83	0,31	9,612
400	2257	547	0,25	13,73

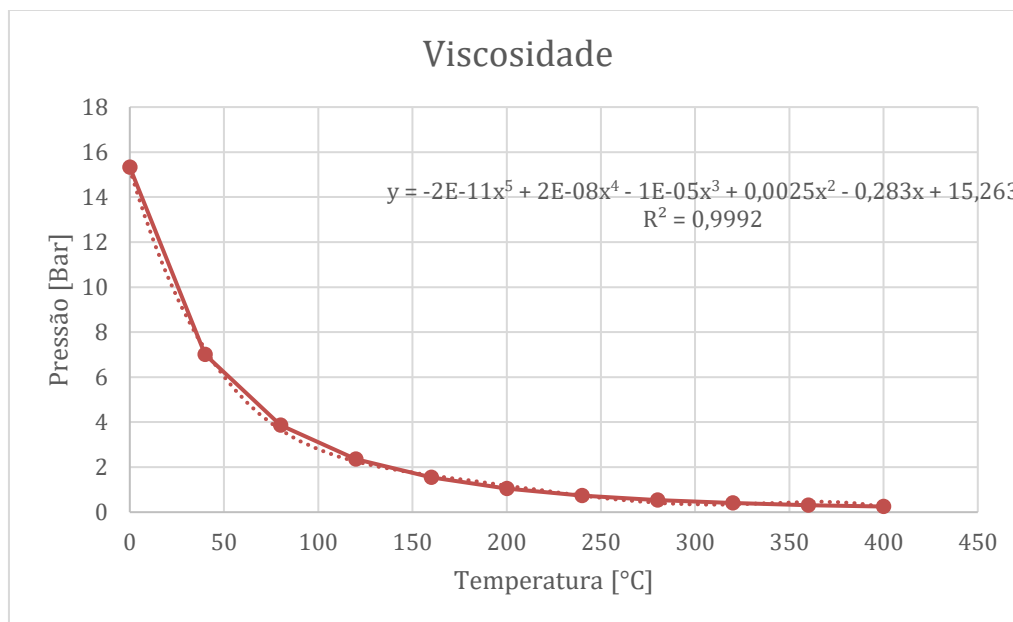
Anexo 1 - Propriedades do Óleo Térmico



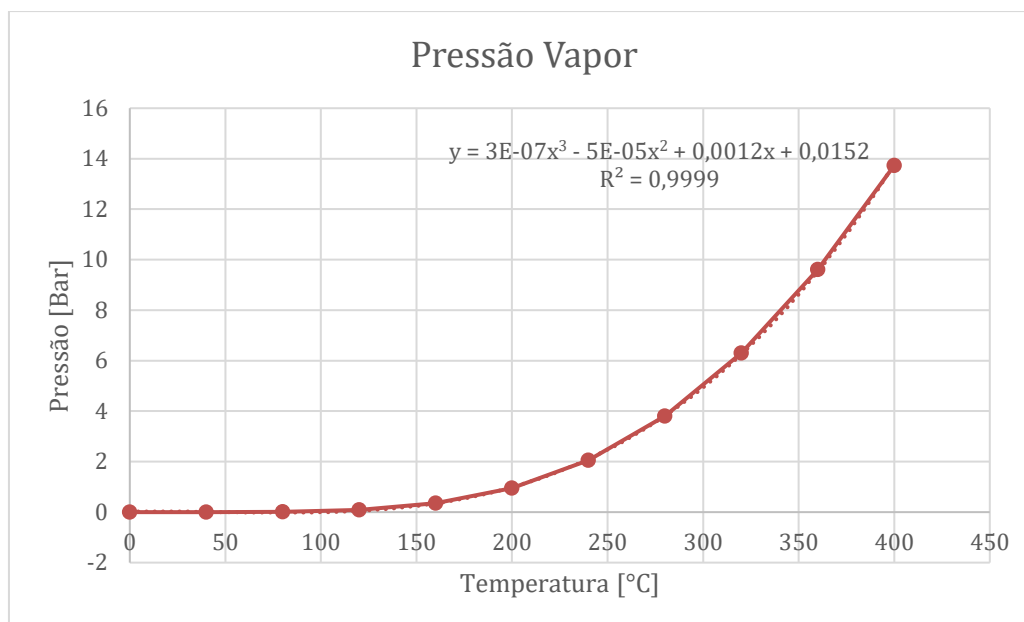
Anexo 2 - Gráfico da relação entre densidade e temperatura do óleo



Anexo 3 - Gráfico da relação entre a capacidade térmica e a temperatura do óleo térmico



Anexo 4- Gráfico da relação entre a viscosidade e a temperatura do óleo térmico



Anexo 5 - Gráfico da relação entre a pressão de vapor e a temperatura do óleo térmico

Graus	Valor do Encoder	Dif dos últimos 5º	Valor/ Graus
0	26778242	0	0
-5	26779932	1690	-338,0
-10	26781584	1652	-330,4
-15	26783276	1692	-338,4
-20	26784980	1704	-340,8
-25	26786632	1652	-330,4
-30	26788292	1660	-332,0
-35	26790006	1714	-342,8
-40	26791680	1674	-334,8
-45	26793376	1696	-339,2
-50	26795068	1692	-338,4
-55	26796748	1680	-336,0
-60	26798432	1684	-336,8
-65	26800120	1688	-337,6
-70	26801782	1662	-332,4
-75	26803464	1682	-336,4
-80	26805140	1676	-335,2
-85	26806820	1680	-336,0
-90	26808528	1708	-341,6



-85	26806838	-1690	-338,0
-80	26805140	-1698	-339,6
-75	26803464	-1676	-335,2
-70	26801770	-1694	-338,8
-65	26800076	-1694	-338,8
-60	26798376	-1700	-340,0
-55	26796704	-1672	-334,4
-50	26794996	-1708	-341,6
-45	26793332	-1664	-332,8
-40	26791620	-1712	-342,4
-35	26789940	-1680	-336,0
-30	26788244	-1696	-339,2
-25	26786532	-1712	-342,4
-20	26784872	-1660	-332,0
-15	26783162	-1710	-342,0
-10	26781480	-1682	-336,4
-5	26779798	-1682	-336,4
0	26778092	-1706	-341,2

Anexo 6 - Tabela de calibração do encoder

TENSÃO [V] CAUDAL [KG/H] TEMPERATURA [C]

0	670,5	33,7
0,1	669,2	33,0
0,2	668,5	32,3
0,3	682,9	31,9
0,4	689,3	31,8
0,5	695,9	31,9
0,6	713,5	31,9
0,7	721,9	31,8
0,8	728,3	31,7
0,9	739,2	31,5
1	754,9	31,4
1,1	759,5	31,5
1,2	774,9	31,6

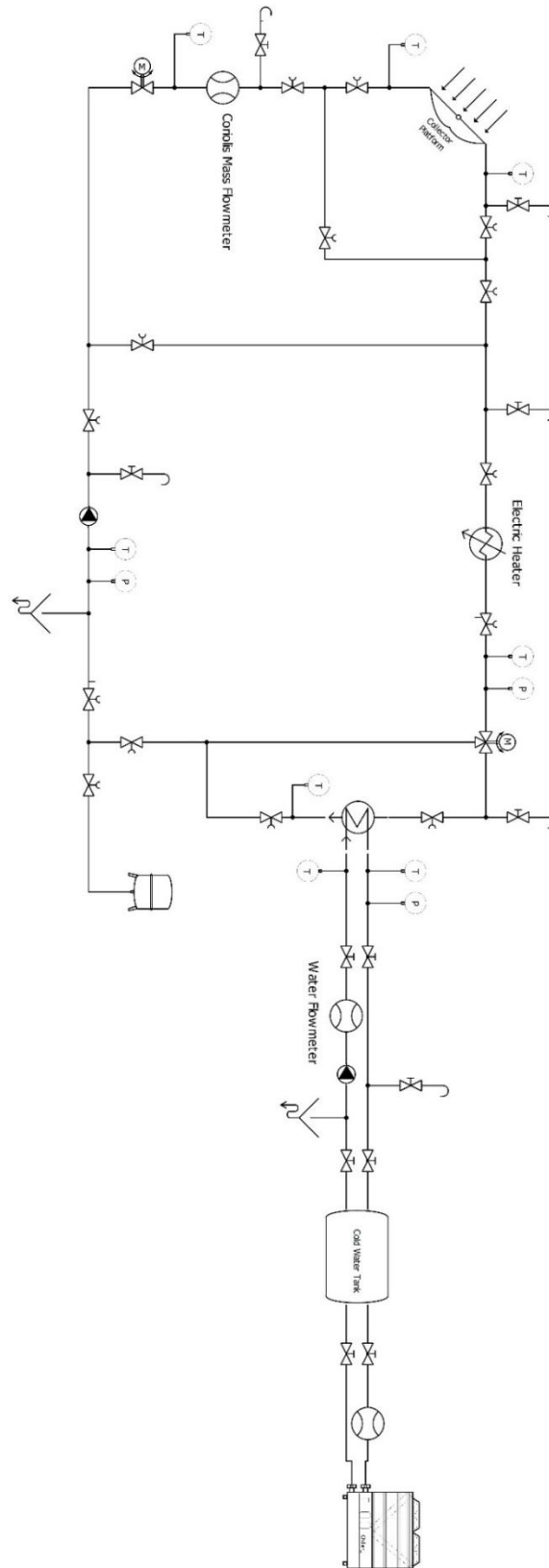


1,3	788,2	31,7
1,4	794,3	31,9
1,5	823,7	32,0
1,6	820,4	32,2
1,7	826,9	32,3
1,8	838,0	32,5
1,9	853,0	32,6
2	868,2	32,7
2,1	871,5	32,9
2,2	877,0	33,0
2,3	874,1	33,1
2,4	869,4	33,2
2,5	871,9	33,3
2,6	874,4	33,4
2,7	871,9	33,5
2,8	871,3	33,6
2,9	944,2	33,7
3	967,7	33,9
2,9	960,5	34,0
2,8	946,8	34,1
2,7	939,3	34,2
2,6	927,9	34,3
2,5	913,3	34,4
2,4	907,6	34,5
2,3	900,5	34,6
2,2	888,2	34,7
2,1	872,0	34,7
2	864,6	34,8
1,9	853,0	34,9
1,8	844,6	35,0
1,7	828,1	35,1
1,6	827,6	35,2
1,5	817,6	35,2
1,4	804,6	35,3



1,3	792,5	35,3
1,2	777,8	35,4
1,1	769,0	35,4
1	761,0	35,4
0,9	748,2	35,5
0,8	736,8	35,5
0,7	727,0	35,5
0,6	716,3	35,5
0,5	702,5	35,6
0,4	694,7	35,6
0,3	685,1	35,6
0,2	668,7	35,7
0,1	658,2	35,7
0	660,9	35,7

Anexo 7 - Tabela de construção do controlador do caudal



Anexo 8 - Esquema do circuito detalhado