



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Desenvolvimento de controlo eletrónico para
sistema de recuperação de energia térmica de
veículos automóveis***

Eliseu Salvador Aires Ribeiro

Leiria, *Março* de 2017



Projeto

Mestrado em Engenharia Automóvel

***Desenvolvimento de controlo eletrónico para
sistema de recuperação de energia térmica de
veículos automóveis***

Eliseu Salvador Aires Ribeiro

Projeto realizado sob a orientação do Doutor João Francisco Romeiro da Fonseca Pereira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação dos Doutores Hélder Manuel Ferreira Santos e Carlos Daniel Henriques Ferreira, Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Março* de 2017

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor João Fonseca Pereira, ao Professor Doutor Hélder Santos e Professor Doutor Carlos Ferreira por todo o apoio dado e disponibilidade.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais que tanto esforço e paciência dedicaram-me para chegar onde cheguei e concluir este mestrado.

Agradeço ao meu grande amigo João Narciso, pois sempre estive ao meu lado durante todo o curso e realização deste projeto, sempre disponível para ajudar e incentivar a trabalhar.

Agradeço também aos técnicos de laboratório e outras pessoas que de alguma forma estiveram envolvidas neste projeto, direta ou indiretamente.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Com a necessidade de aumentar a eficiência energética dos veículos automóveis e o ponto de estagnação que se tem vindo a atingir, os fabricantes automóveis necessitam de se virar para novas tecnologias. Com uma quantidade considerável de energia a ser libertada na forma de calor, há uma oportunidade de aumentar o rendimento dos veículos automóveis através da aplicação de sistemas de ciclo de Rankine. Este sistema necessita de um controlo eletrónico de modo a garantir operação segura e eficiente para as diferentes condições de operação do veículo, requerendo a implementação de um sistema embebido.

No presente trabalho, projetou-se e desenvolveu-se o sistema de controlo para uma montagem experimental dedicada ao estudo de sistemas de ciclo de Rankine. Foram selecionados os sensores e atuadores necessários. Foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso que continham cada um dos módulos. Com vista a efetuar um controlo simples e eficaz, foi desenvolvido um algoritmo que trata os dados dos sensores e controla o caudal de fluido de trabalho (água), de forma que a temperatura à saída do evaporador seja a desejada. Desenvolveu-se também uma aplicação em ambiente *Windows* para a aquisição e controlo dos parâmetros do controlador.

Foram realizados testes com vista à validação do sistema e à verificação do seu correto funcionamento. Estes testes demonstraram a capacidade do sistema em controlar a temperatura pretendida para o fluido de trabalho à saída do evaporador.

Palavras-chave: *Recuperação de energia térmica; ciclo de Rankine, sistema embebido; fluido de trabalho.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

As the car manufacturers struggle with the need to increase energetic efficiency and the stagnation point that have been reaching, there is a need for new technologies. There is a huge amount of energy being released as heat, which is an opportunity to increase automotive vehicle's efficiency with application of a Rankine cycle system. This system requires an electronic control which guarantees a secure operation and efficient for different vehicle operating points, requiring the implementation of an embedded system.

The control system was designed and developed to integrate an experimental setup set to Rankine cycle system study. The sensors and actuators were selected and a printed circuit board was developed for each module. Bearing in mind a simple yet effective control, an algorithm that gets the data from the sensors and controls the working fluid flow (water) was developed, this way the desired fluid temperature can be achieved. Also a *Windows* software was developed to acquire and control system parameters.

To validate the system and its good behaviour, tests were made. These tests proved the system's capability to control working fluid's temperature on evaporator outlet.

Keywords: *Waste heat recovery; Rankine cycle, Embedded system, Working fluid*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1.1 - Perdas e aproveitamento da energia do combustível num MCI. (Pinheiro, 2015).....	2
Figura 2.1 - Representação esquemática do ciclo de Rankine.	6
Figura 2.2 - Diagrama T-s simplificado do ciclo de Rankine, (Pinheiro, 2015).	7
Figura 2.3 - Sistema BMW "Turbosteamer", adaptado de (Horst <i>et al.</i> 2013).	9
Figura 2.4 - Estrutura de controlo BMW Turbosteamer, adaptado de (Horst <i>et al.</i> 2013)..	10
Figura 2.5 - Diagrama de blocos de controlo de temperatura, adaptado de Endo <i>et al.</i> (2007).	12
Figura 2.6 - Diagrama de blocos de controlo de pressão, adaptado de Endo <i>et al.</i> (2007).	12
Figura 2.7 - Mapa de velocidade do expansor, adaptado de Endo <i>et al.</i> (2007).	13
Figura 2.8 - Esquemático do Ciclo de Rankine patenteado pela Nissan, adaptado de (Nagai <i>et al.</i> 2014).....	14
Figura 3.1 - Localização dos sensores no sistema.	18
Figura 3.2 - Representação da montagem dos termopares no sistema de escape.....	19
Figura 3.3 - Variação da sensibilidade do termopar com a temperatura, adaptado de (Duff & Towey, 2010).....	20
Figura 3.4 - Esquemático de um caudalímetro eletromagnético, adaptado de (USBR, 2015)	22
Figura 3.5 - Diagrama funcional do sensor de massa de ar, adaptado de (Bosch, 2015)....	24
Figura 3.6 - Comparação entre sonda de banda estreita e larga, adaptado de (Basics, 2010)	26
Figura 3.7 - Representação esquemática de célula de <i>Wideband</i> , (Clemson, 2015).....	27
Figura 3.8 - Gráfico com pico de corrente e corrente média.	28
Figura 4.1 - Diagrama de blocos de controlo com módulos a adicionar e respetivos sensores e atuadores, a laranja módulos com adição de <i>hardware</i>	35
Figura 4.2 - Circuito elétrico de condicionamento e aquisição dos termopares do tipo K, com utilização de multiplexador e MAX31855K.....	37
Figura 4.3 - Esquemático e equação de divisor de tensão utilizado no sinal de tensão do sensor MAF.	38
Figura 4.4 - Evolução da temperatura do <i>Smart Power Switch</i> BTS500 com o tempo para os diferentes testes efetuados - DC e PWM.	41

Figura 4.5 - Gráficos da tensão de controlo e resposta (V) do circuito integrado BTS500 a uma frequência de 490 Hz. Superior - resposta em regime normal; Inferior - resposta após atingir 98 °C.....	42
Figura 4.6 - Gráfico de resposta (V) do circuito integrado BTS500 a uma frequência de 122 Hz.	43
Figura 4.7 - Evolução da temperatura do circuito integrado BTS441R com o tempo para os diferentes testes efetuados - DC e PWM.....	44
Figura 4.8 - Comparação da resposta do BTS441R consoante a frequência (2 ms/Div. - 122 Hz; 500us/Div. - 490 Hz).	45
Figura 4.9 - Gráfico de caudal da bomba em função do <i>duty-cycle</i> aplicado.	46
Figura 4.10 - Adaptação de impedâncias das entradas analógicas: a) Circuito do amplificador operacional e b) exemplo de um <i>buffer</i>	49
Figura 4.11 - Conexões do circuito elétrico do <i>transceiver</i> CAN.....	49
Figura 4.12 - Circuito elétrico da placa de atuadores.....	50
Figura 4.13 - Placa de circuito impresso dos sensores elaborada no <i>software</i> EAGLE	52
Figura 4.14 - Placa de circuito impresso dos atuadores elaborada no <i>software</i> EAGLE....	53
Figura 4.15 - Placas de circuito impresso finalizadas: a)placa de sensores e b) placa de atuadores.....	54
Figura 5.1 - Fluxograma do algoritmo de controlo.	59
Figura 5.2 - Fluxograma da interrupção gerada pelo sensor do caudal mássico de fluido de trabalho.....	60
Figura 5.3 - Fluxograma da interrupção gerada pela mensagem CAN.	60
Figura 5.4 - Janela principal da aplicação desenvolvida, <i>Rankine Cycle Controller</i>	64
Figura 5.5 - Menu de comunicação com as opções para seleccionar a porta e o <i>baud rate</i> . 65	
Figura 5.6 - Submenus incluídos no menu “Calibrar”: a) Calibrar PID e b) Tabela de entalpia.	65
Figura 6.1 - Montagem experimental do ciclo de Rankine e o veículo utilizado.	68
Figura 6.2 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 1.	70
Figura 6.3 - Potência térmica disponível no escape e no fluido de trabalho - Teste 1.....	71
Figura 6.4 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 2a.	72
Figura 6.5 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 2b.	74
Figura 6.6 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 3.	75
Figura 6.7 - Erro relativo da temperatura para o teste 3.....	76
Figura 6.8 - Temperatura dos gases de escape antes e depois do evaporador - Teste 3.....	77

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Comparação entre placas de desenvolvimento (RS-Components, 2016).....	32
Tabela 4.2 - Pinos utilizados para comunicação com os CI, sensores e <i>Smart Power Switches</i> no <i>chipKIT</i> MAX32.....	47
Tabela 4.3 - Limitações de dimensão na prototipagem de PCB's	51
Tabela 5.1 - Constituição de um exemplo de <i>string</i> enviada pelo microcontrolador via porta série.....	61
Tabela 5.2 - Identificadores de comandos enviados pelo interface gráfico via porta série.	62
Tabela 6.1 - Valores médios de temperatura e potência no teste 1.	69
Tabela 6.2 - Valores médios de temperatura e potência no teste 2a.....	72
Tabela 6.3 - Valores médios de temperatura e potência no teste 2b.	73
Tabela 6.4 - Valores médios de temperatura e potência no teste 3.	75

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de símbolos

- λ - Coeficiente de excesso de ar da mistura [-]
- c_{pg} - Calor específico dos gases de escape [J/kg.K]
- $c_{p_{wf}}$ - Calor específico do fluido de trabalho [J/kg.K]
- $h_{wf,in}$ - Entalpia do fluido de trabalho na entrada do evaporador [J/kg]
- $h_{wf,out}$ - Entalpia do fluido de trabalho na saída do evaporador [J/kg]
- \dot{m}_a - Caudal mássico de ar admitido pelo motor de combustão interna [g/s]
- \dot{m}_g - Caudal mássico dos gases de escape [g/s]
- \dot{m}_{wf} - Caudal mássico de fluido de trabalho [g/s]
- P_{wf} - Pressão do fluido de trabalho na saída do evaporador [mbar]
- \dot{Q}_g - Potência térmica dos gases de escape [W]
- \dot{Q}_{wf} - Potência térmica do fluido de trabalho [W]
- $T_{g,in}$ - Temperatura de entrada dos gases de escape no evaporador [°C]
- $T_{g,out}$ - Temperatura de saída dos gases de escape do evaporador [°C]
- $T_{g,m}$ - Temperatura média dos gases de escape no evaporador [°C]
- $T_{wf,in}$ - Temperatura de entrada do fluido de trabalho no evaporador [°C]
- $T_{wf,out}$ - Temperatura de saída do fluido de trabalho do evaporador [°C]

Abreviaturas

- ADC - *Analog-to-digital converter* (conversor analógico - digital)
- AFR - *Air fuel ratio* (razão ar/combustível)
- ARM - *Advanced Risc Machine*
- BMW - *Bayerische Motoren Werke AG*
- CAN - *Controller area network*
- CI - Circuito integrado
- CS - *Chip select* (ativação do circuito integrado)
- DC - Direct current (Corrente contínua)
- ECU - *Engine control unit* (unidade de controlo de motor)

EEPROM - Electrically-erasable programmable read-only memory (memória apenas de leitura programável e apagável eletronicamente)

MAF - Mass air flow (caudal mássico de ar)

MCI - Motor de combustão interna

MPIDE - Ambiente de desenvolvimento integrado multiplataforma (Multi-platform integrated development environment)

N - Velocidade de rotação do motor

NTC - Negative temperature coefficient (coeficiente negativo de temperatura)

OBD-II - On-board diagnostics II (porta de diagnóstico automóvel)

PCB - Printed circuit board (placa de circuito impresso)

PTC - Positive temperature coefficient (coeficiente positivo de temperatura)

PWM - Pulse width modulation (modulação por largura de pulso)

RAM - Random-access memory (memória de acesso aleatório)

ROM - Read-only memory (memória apenas de leitura)

RPM - Rotações por minuto

SMD - Surface-mount device (dispositivo montado na superfície)

SPI - Serial peripheral interface (interface série para periféricos)

SPS - Smart power switch (interruptor de potência inteligente)

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
ÍNDICE	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto e Motivação	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização do trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Aproveitamento da energia térmica dos gases de escape	5
2.2. Estudos antecedentes	7
2.2.1. Turbosteamer - BMW	8
2.2.2. Honda	11
2.2.3. Nissan	13
2.2.4. Estudo realizado por investigadores	14
3. CARACTERIZAÇÃO DA MONTAGEM EXPERIMENTAL	17
3.1. Introdução	17
3.2. Sensores	19
3.2.1. Sensores de temperatura	19

3.2.2.	Sensor de pressão após o evaporador	21
3.2.3.	Caudal mássico do fluido de trabalho	21
3.2.4.	Caudal mássico de ar admitido pelo MCI	23
3.2.5.	Sensor de oxigénio - sonda lambda	24
3.3.	Atuadores	27
3.3.1.	Bomba	27
3.3.2.	Eletroválvulas	29
4.	PROJETO DO CIRCUITO DE CONTROLO	31
4.1.	Sistema Embebido	31
4.2.	Condicionamento de sinal	33
4.2.1.	Leitura de Termopares	36
4.2.2.	Módulo ADC	37
4.2.3.	Módulos adicionais	38
4.3.	Saídas de potência	39
4.3.1.	Teste do circuito de controlo da bomba do fluido de trabalho	40
4.4.	Construção da placa de circuito impresso	46
4.4.1.	Dimensionamento do circuito elétrico	48
4.4.2.	Projeto da placa de circuito impresso	51
5.	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> DE CONTROLO E INTERFACE DE COMUNICAÇÃO	55
5.1.	Monitorização do sistema	55
5.2.	Ambiente de programação	57
5.3.	Algoritmo de controlo embebido	57
5.4.	Interface gráfico desenvolvido para aquisição e controlo	63
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
6.1.	Caracterização dos testes realizados	67
7.	CONCLUSÃO	79
	BIBLIOGRAFIA	81

1. Introdução

1.1. Contexto e Motivação

Ao longo das últimas décadas o motor de combustão interna (MCI) foi alvo de um aumento de eficiência muito significativo. O ciclo *Otto*, por exemplo, passou de métodos de alimentação de combustível totalmente mecânicos para um controlo que não se imaginaria possível nos primórdios da injeção mecânica. Com o atual controlo eletrónico e injeção direta com turbocompressor, a evolução do MCI tem vindo a atingir os seus limites, embora que com uma eficiência aceitável, comparativamente à última década. Desta forma é necessária a introdução de novas tecnologias para o aumento da eficiência global dos sistemas de propulsão que utilizam MCI. Atualmente com os preços dos combustíveis elevados, a incerteza relativamente às reservas de petróleo e as regulamentações ambientais cada vez mais apertadas, é necessário continuar a evoluir o MCI, no sentido de maximizar o seu desempenho.

Atualmente a eficiência do MCI é de cerca de 25 %, embora que motores construídos apenas com o propósito de serem eficientes e económicos permitem ter valores mais elevados, sendo que os MCI Diesel poderão apresentar eficiência acima dos 30 %. Na Figura 1.1 pode-se observar de que forma a energia presente no combustível é utilizada no motor de combustão interna.

A maior perda ocorre sob a forma de calor para o sistema de escape, cerca de 40 % e para o circuito de refrigeração, cerca de 30 %. Há também 5 % de perda por fricção gerada pelo ciclo alternativo, contudo atualmente este valor está bastante otimizado e face aos 70 % totais não é relevante. Assim, a melhor forma de aproveitar mais energia do combustível e aumentar a eficiência do MCI é utilizar o calor desperdiçado através dos gases de escape. O calor desperdiçado no circuito de refrigeração também pode ser recuperado mas tem uma menor temperatura e como tal, a eficiência de conversão de energia térmica (calor) em energia mecânica (turbina) será inferior.

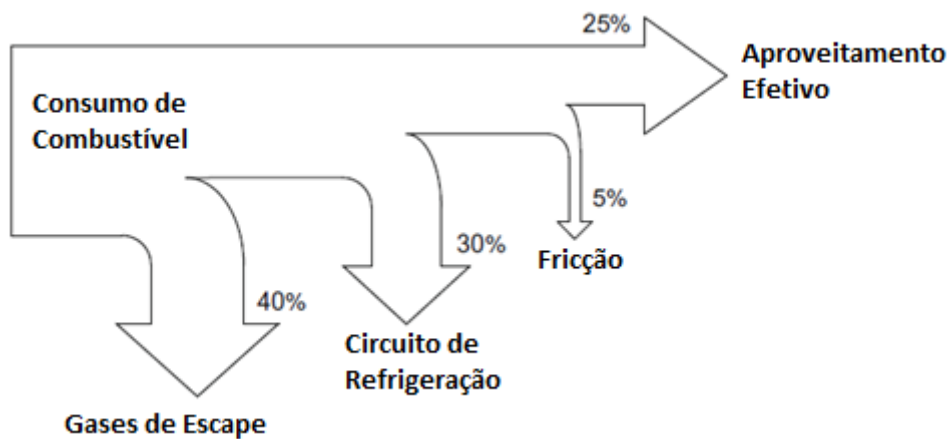


Figura 1.1 - Perdas e aproveitamento da energia do combustível num MCI. (Pinheiro, 2015)

Neste contexto, a recuperação da energia térmica contida nos gases de escape é a que apresenta maior potencial de aproveitamento, quer pela sua quantidade (cerca de 40 %), quer pela sua qualidade (elevada temperatura).

O turbocompressor, através da turbina aproveita uma pequena parte da energia disponível nos gases de escape que é utilizada no compressor permitindo assim o aumento da potência e eficiência do veículo. Todavia existem outras tecnologias que se destacam e podem ser utilizadas em conjunto, para além do aqui estudado ciclo de Rankine. De entre estes, o mais utilizado é o *turbo-compound*, aplicado em veículos pesados e máquinas industriais. Este sistema funciona através de uma turbina de potência, que pode ser aplicada em série com um turbo-compressor, produzindo binário que é diretamente aplicado à cambota através de um acoplamento hidráulico, ou através da utilização de um gerador que permite o armazenamento da energia elétrica no sistema de baterias do veículo. Outro sistema é o gerador termoelétrico, consistindo na aplicação de um sistema que contém um elevado número de elementos termoelétricos que produzem uma pequena tensão, a partir de um diferencial de temperatura, no entanto a potência produzida é bastante baixa, situando-se abaixo de 1 kW. (Pinheiro, 2015)

1.2. Objetivos

O presente trabalho contribui para o desenvolvimento de sistemas de ciclo de Rankine. O IPEL, conjuntamente com a empresa *BorgWarner* tem vindo a investigar diversos aspetos de uma aplicação real e atualmente dispõe de uma montagem experimental completa, à exceção do expensor. O sistema dispõe de um controlo efetuado em ambiente *LabView*, que foi desenvolvido para os estudos experimentais efetuados. Todavia, a implementação desta forma de controlo do sistema em veículos não é prática devido à necessidade de um computador. Assim, é necessário desenvolver um sistema de controlo embestado que permita o controlo do ciclo de forma independente, sem interferir com os outros módulos do veículo. O propósito do presente trabalho centra-se no desenvolvimento de um sistema de controlo embestado adequado à aplicação em estudo.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. Neste primeiro capítulo é efetuada a introdução ao tema do trabalho e são apresentados os objetivos principais.

O segundo capítulo consiste numa revisão bibliográfica, apresentando o princípio de funcionamento do ciclo de Rankine e os estudos antecedentes que tratam de sistemas de controlo desenvolvidos por empresas e investigadores.

No terceiro capítulo é caracterizada a montagem experimental e os seus componentes, é dado particular enfoque aos componentes necessários ao controlo do sistema, tais como sensores e atuadores.

O quarto capítulo apresenta o projeto do circuito de controlo, apresentando e discutindo as escolhas efetuadas ao nível do condicionamento do sinal e atuação eletrónica. São também apresentadas as placas de circuito impresso desenvolvidas para o controlo do sistema.

O quinto capítulo é dedicado ao desenvolvimento do algoritmo de controlo. É também efetuada uma breve descrição da aplicação desenvolvida para auxílio ao tratamento de dados, teste e afinação do sistema.

O sexto capítulo consiste na análise e discussão dos resultados. Sendo apresentados os resultados de diversos testes com vista à validação do sistema.

Por fim, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalho futuro.

2. Revisão Bibliográfica

Embora não tenha sido ainda aplicado em veículos ligeiros de passageiros, existem diversas empresas que atualmente estão a investir bastante no desenvolvimento de sistemas de ciclo de Rankine. Como se pode verificar neste capítulo, empresas como a Nissan, BMW ou Honda efetuaram estudos com rendimentos e potências que justifiquem a aplicação. Este capítulo centra-se na revisão de métodos utilizados para o controlo do sistema e instrumentação necessária.

2.1. Aproveitamento da energia térmica dos gases de escape

Num motor de combustão interna (MCI), a maior parte da energia proveniente do combustível é desperdiçada sob a forma de calor através do sistema de escape. Com o aproveitamento desta energia, pode-se aumentar a eficiência do motor, atingindo assim mais facilmente as metas de emissões e consumos.

O ciclo de Rankine consiste num circuito fechado em que um fluido de trabalho é aquecido por uma fonte de calor externa e arrefecido ciclicamente. Este processo é utilizado por exemplo na produção de energia elétrica, com a combustão de combustíveis fósseis.

No caso do veículo automóvel, temos como fontes de energia térmica o sistema de escape e de refrigeração do veículo. Para aplicação do sistema de ciclo de Rankine é mais vantajosa a recuperação da energia térmica contida nos gases de escape que têm uma temperatura relativamente elevada, o que garante um maior potencial de aproveitamento de energia térmica. Embora o sistema de refrigeração também tenha uma perda considerável de potência térmica, a sua temperatura (cerca de 90 °C) não permite utilizar a água como fluido de trabalho num ciclo de Rankine, teria de ser selecionado um fluido com uma temperatura de ebulição mais baixa para garantirmos a sua evaporação.

Na Figura 2.1 pode-se observar um esquema simples do ciclo de Rankine, que inclui os seus componentes base. A bomba é usada para bombear e regular o caudal de fluido de trabalho. No evaporador o fluido passa do estado líquido (2) ao estado de vapor sobreaquecido (3). No expansor, processo de 3 para 4, o fluido expande permitindo a conversão de parte da energia térmica recuperada no evaporador em energia mecânica. O expansor normalmente está acoplado a um gerador, mas pode ser acoplado aos órgãos de transmissão do veículo de forma a aplicar diretamente a potência gerada nas rodas. O expansor representado é uma turbina mas pode ser um expansor volumétrico ou de êmbolos. De seguida o fluido de trabalho segue para o condensador, regressando ao estado líquido.

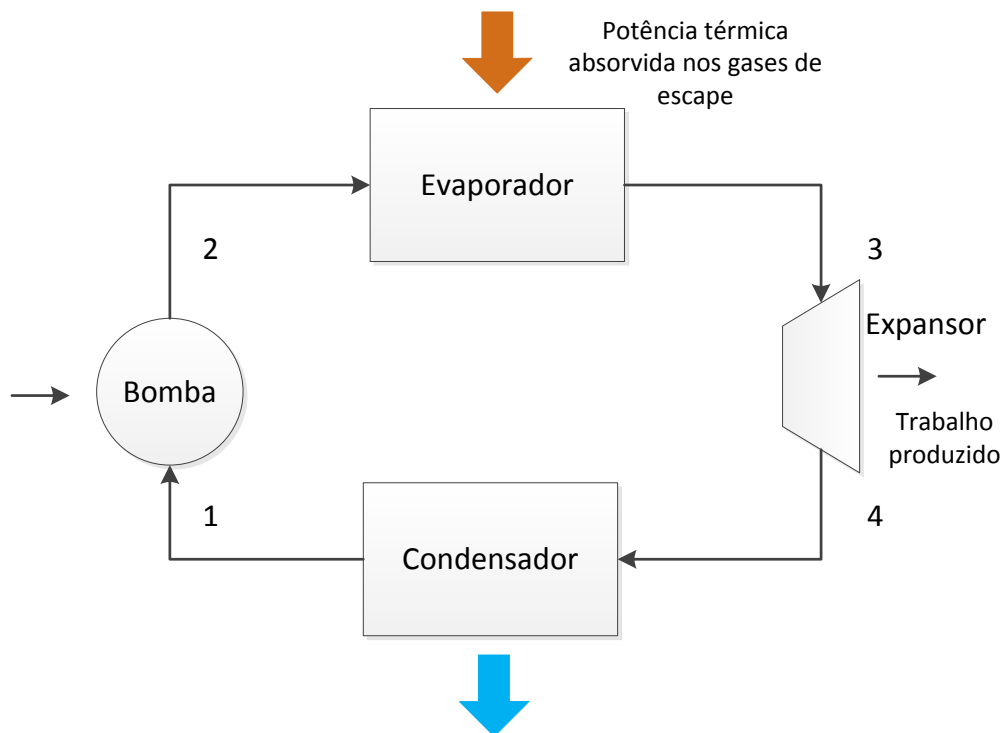


Figura 2.1 - Representação esquemática do ciclo de Rankine.

Na Figura 2.2 podemos observar um diagrama temperatura - entropia (T-s) do ciclo de Rankine. Como se pode verificar de 1-2 a temperatura do fluido aumenta ligeiramente, pois há uma compressão deste ao ser bombeado. Na zona de 2-3 tem-se um aumento de temperatura seguido de evaporação, enquanto ocorre a transferência de energia dos gases

de escape para o fluido de trabalho. Na mudança para o estado de vapor, temos a temperatura constante e a entropia a aumentar; aquando do estado de vapor total, o fluido começa a ser superaquecido. De 3-4 temos o fluido a passar no expensor de forma a produzir energia sob a forma de trabalho. Na fase final, 4-1 o fluido é condensado de forma a poder ser bombeado novamente e efetuar um novo ciclo.

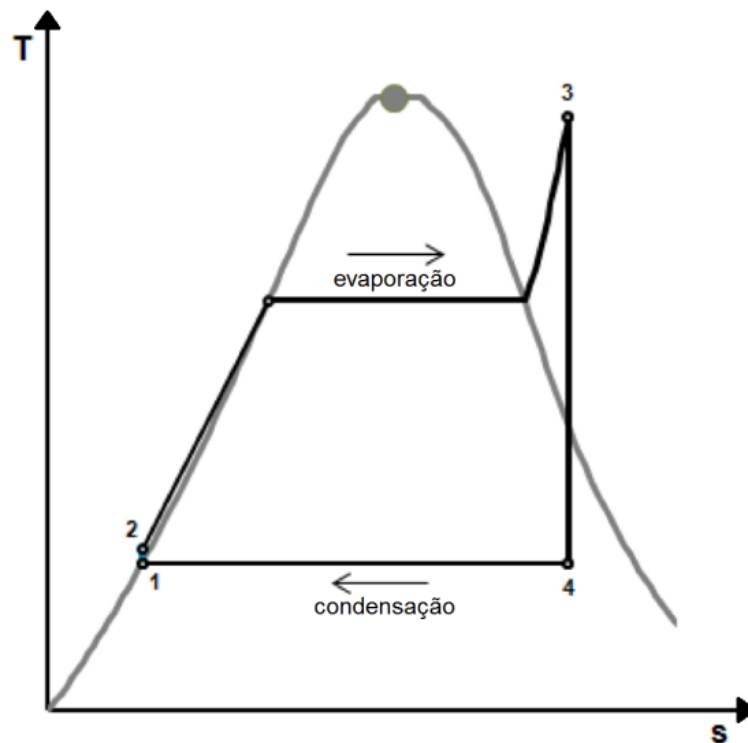


Figura 2.2 - Diagrama T-s simplificado do ciclo de Rankine, (Pinheiro, 2015).

2.2. Estudos antecedentes

Embora as montagens dos ciclos não sejam iguais em todos os sistemas, o controlo é bastante similar. É necessário o controlo do caudal mássico de fluido para regular a temperatura do mesmo e garantir o valor necessário de temperatura para ocorrer um aproveitamento eficiente do ciclo.

2.2.1. Turbosteamer - BMW

O sistema denominado de *Turbosteamer*, desenvolvido pela BMW (Horst *et al.* 2013) é composto por um ciclo de Rankine simples em que a turbina é o expansor utilizado, produzindo energia elétrica através de um gerador. O fluido de trabalho recebe calor através de um permutador instalado no sistema de escape do veículo, que contém uma válvula de desvio utilizada para controlar o caudal mássico de gases de escape a atravessar o permutador e para minimizar a contra pressão no escape. A turbina utiliza bocais *DeLaval*, os quais permitem variar a velocidade de entrada do fluido de trabalho na turbina.

Na Figura 2.3 pode-se observar um esquema com os componentes do sistema *Turbosteamer* e as respetivas variáveis que são utilizadas. Para controlar a bomba e a turbina, os autores Horst *et al.* (2013) utilizam como ponto de operação a potência térmica recuperada pelo permutador nos gases de escape. A potência térmica é calculada através do caudal mássico de gases de escape e da temperatura antes do permutador de calor (evaporador) e da temperatura à saída do evaporador. A medição destas temperaturas serve para, através de uma tabela de valores (*look-up table*, na literatura Inglesa) obter a entalpia dos gases de escape que será usada no cálculo. O controlo da bomba é efetuado de modo a assegurar um caudal mássico de fluido de trabalho no circuito, que garanta uma temperatura e pressão adequadas ao bom funcionamento da turbina. O fluido de trabalho utilizado é água. Caso o vapor não seja sobreaquecido até uma temperatura adequada, na expansão podem surgir gotas misturadas e estas podem danificar a turbina. É por esta razão que se deve garantir um controlo adequado do caudal mássico de fluido de trabalho no circuito.

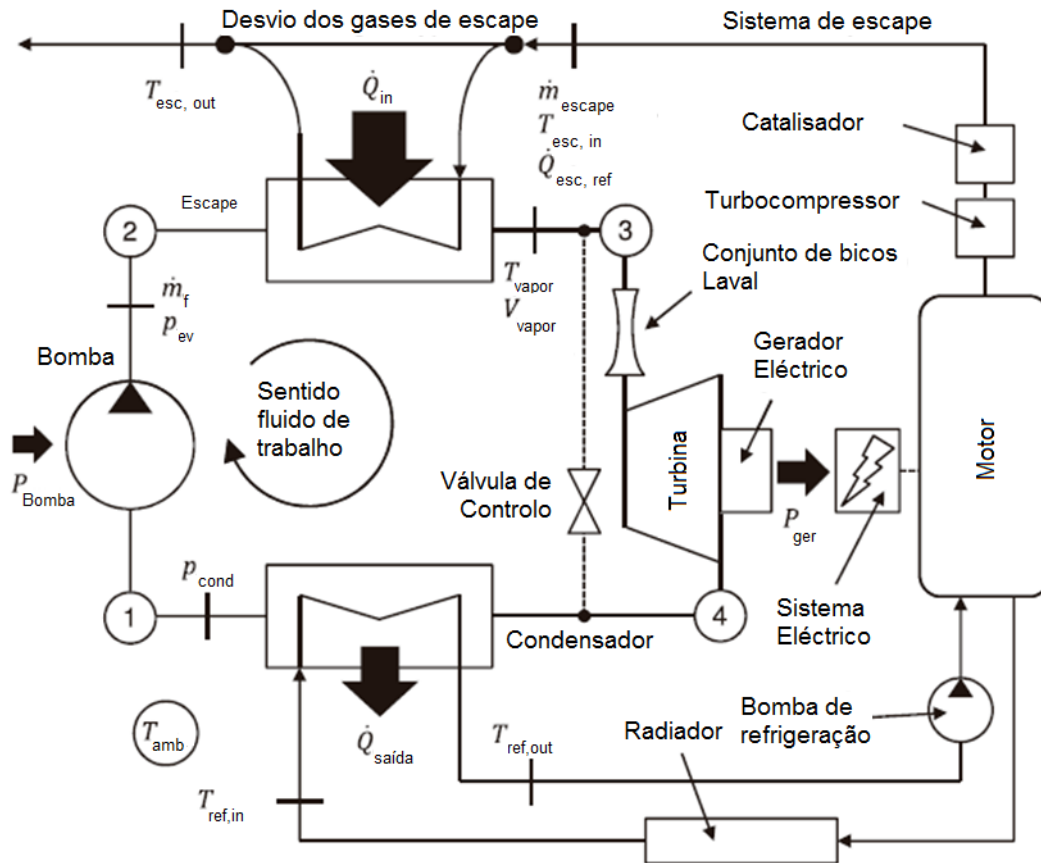


Figura 2.3 - Sistema BMW "Turbo-steamer", adaptado de (Horst *et al.* 2013).

A Figura 2.4 apresenta uma representação esquemática da estrutura de controlo utilizada por Horst *et al.* (2013). Relativamente ao fluido de trabalho são medidos: o caudal mássico (\dot{m}_f) e a pressão (p_{evap}), antes do evaporador, após o evaporador é medida a temperatura do vapor (T_{vapor}). O uso da válvula de controlo após o evaporador é devido ao controlo necessário a efetuar nos bocais *DeLaval* na turbina, sendo também usado um sensor de pressão após o condensador, com o objetivo de verificar se o fluido fica à pressão desejada – atmosférica.

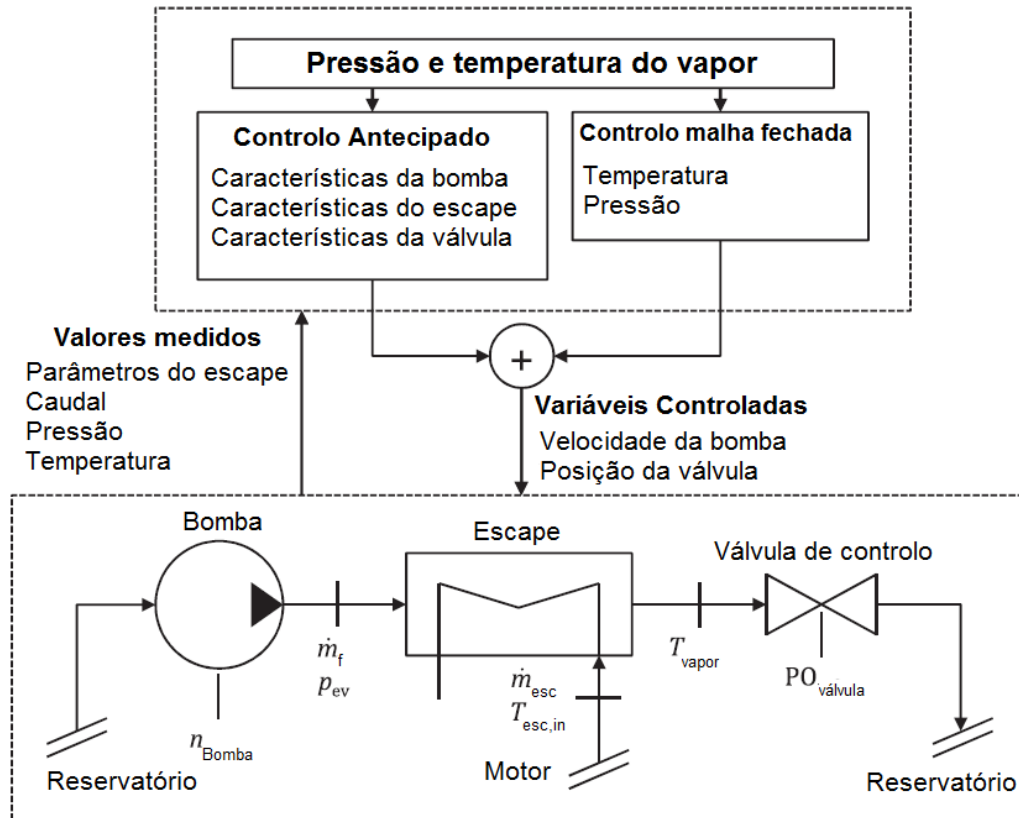


Figura 2.4 - Estrutura de controlo BMW Turbosteamer, adaptado de (Horst *et al.* 2013).

Os valores de pressão e temperatura a atingir à entrada do expansor são 7 bar e 300 °C, respetivamente. Para medição de temperatura, Horst *et al.* (2013) utilizam termopares do tipo K e para a medição do caudal mássico um caudalímetro de Coríolis. No caso da pressão é usado um sensor piezoresistivo com uma montagem apropriada a um eficaz sistema de arrefecimento.

De modo a reduzir os erros de medição, os autores Horst *et al.* (2013) optaram por colocar 5 termopares no escape, pois há erro devido à não-uniformidade da temperatura e velocidade do fluido. Assumiram também uma diferença de temperatura entre 15 a 30 K, devida à emissividade do tubo de escape. Também no fluido de trabalho ocorrem erros em que a temperatura baixa bruscamente devido à formação de gotas e estas colidirem com o sensor de temperatura. Serve também como um avisador da qualidade do vapor e seu sobreaquecimento.

Para ter um controlo antecipado do funcionamento da bomba e da turbina, são usados mapas tridimensionais que demonstram o funcionamento característico destes equipamentos consoante os dados de entrada.

2.2.2. Honda

O trabalho realizado por Endo *et al.* (2007), investigadores da Honda, mostra que para aumentar a eficiência do sistema de ciclo de Rankine é necessário controlar a temperatura e pressão na entrada do expensor para valores ótimos (400 - 500 °C e 80 - 100 bar). A temperatura do vapor é controlada através da regulação do caudal mássico de fluido trabalho. O fluido de trabalho utilizado por Endo *et al.* (2007), que sai do evaporador a 500 °C, garantindo o sobreaquecimento adequado do vapor foi água. A pressão utilizada é no máximo 100 bar, que é bastante mais elevada que o sistema *Turbosteamer* que atingia apenas 7 bar.

A unidade de controlo eletrónico (ECU - Electronic control unit, na literatura Inglesa) do motor controla também o sistema do ciclo de Rankine, desta forma não é necessário envio de dados relativos aos gases de escape visto que tudo está incorporado no mesmo módulo. No caso da energia dos gases de escape, a unidade utiliza a velocidade de rotação do motor, quantidade de combustível injetado e temperatura dos gases de escape. Desta forma permite prever a evolução da temperatura através da energia proveniente dos gases de escape.

Na Figura 2.5 pode-se observar o diagrama de controlo, implementado por Endo *et al.* (2007). Com o valor da temperatura dos gases de escape, o módulo de controlo irá calcular um valor aproximado para o caudal mássico de água. A ECU já tem calculado o valor do caudal de gases de escape, devido a utilizar os sensores necessários para o comando do motor. Este valor será comparado com a diferença de temperatura de saída do evaporador e da temperatura objetivo. Desta forma, o módulo de controlo eletrónico irá analisar corretamente a necessidade de corrigir o fornecimento de caudal de água e calcular a velocidade/potência da bomba. Esta velocidade tanto pode ser verificada em tabelas ou calculada através de formulações matemáticas. Ainda como forma de evitar a pressão

excessiva da bomba, o valor da pressão após a bomba é utilizado no cálculo da velocidade desta.

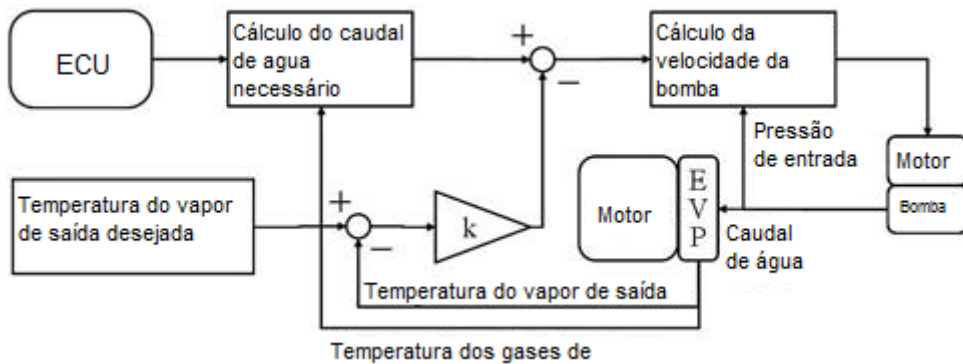


Figura 2.5 - Diagrama de blocos de controlo de temperatura, adaptado de Endo *et al.* (2007).

Como foi referido anteriormente, o controlo antecipado usando os dados dos gases de escape é utilizado pois apenas com o controlo das variáveis do ciclo não é possível estabilizar o sistema. Desta forma é permitido saber a quantidade de energia que será transferida para o fluido de trabalho e ajustar os cálculos previamente.

Como se verifica no diagrama da Figura 2.6 o controlo da pressão do sistema está diretamente relacionado com a velocidade de rotação do expansor, contrariamente à temperatura que é ajustada controlando a velocidade de rotação da bomba. Para calcular a velocidade de rotação do expansor, o módulo de controlo usa a temperatura e a pressão do vapor à entrada do expansor. A pressão é comparada com o valor desejado, que está dependente da quantidade de água e temperatura da mesma. Sabendo a velocidade de rotação do gerador a que o expansor está acoplado, o módulo controla o binário a que o expansor fica sujeito, para desta forma gerar mais potencia e reduzir a velocidade. O funcionamento é semelhante ao de um alternador de um veículo.

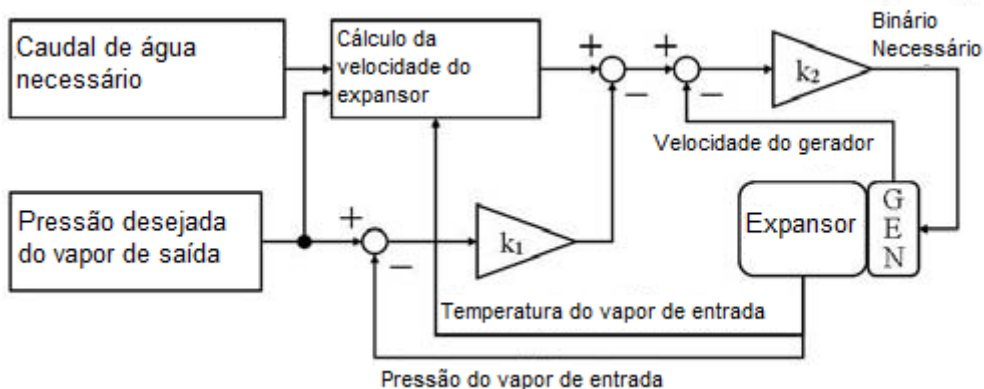


Figura 2.6 - Diagrama de blocos de controlo de pressão, adaptado de Endo *et al.* (2007).

A Figura 2.7 apresenta o mapa de velocidade de rotação do expansor, em função das variáveis: temperatura, pressão e caudal de água. Assim com o caudal de água que está a ser bombeado, é possível fazer o controlo da temperatura e da pressão de forma a se obter a máxima eficiência no expansor utilizado (13 %).

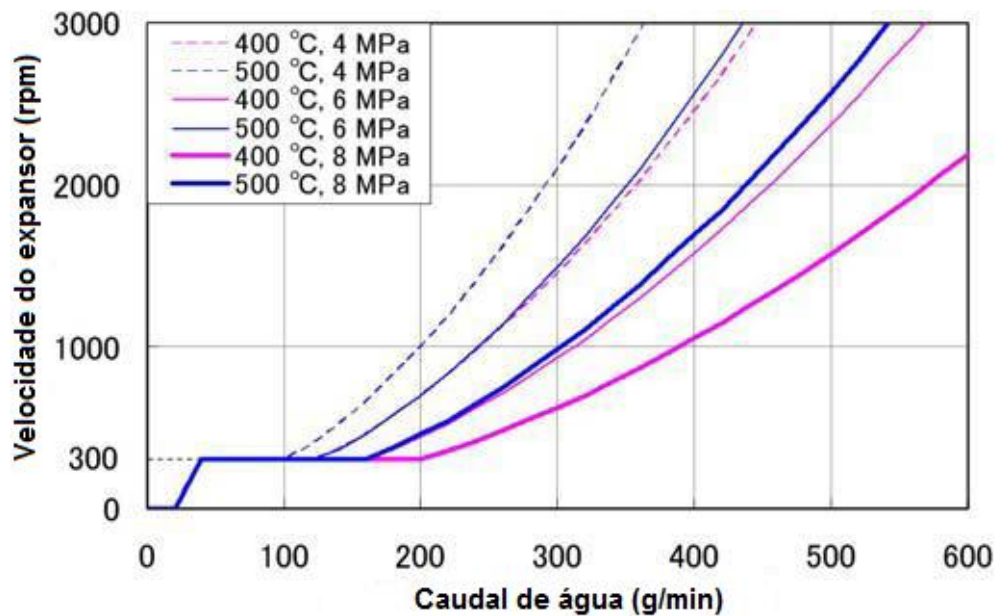


Figura 2.7 - Mapa de velocidade do expansor, adaptado de Endo *et al.* (2007).

2.2.3. Nissan

Os investigadores Nagai *et al.* (2014), da Nissan tiveram aprovada uma patente em que descrevem os constituintes de um ciclo de Rankine cuja bomba e o expansor constituem a mesma peça de forma a fazer um sistema mais compacto. A bomba/expansor estão conectados à cambota através de uma correia e são ativados por uma embraiagem eletromagnética. Contrariamente aos sistemas de ciclo de Rankine convencionais, este não entrega a potência desenvolvida a um gerador, esta é entregue à cambota do motor por via de uma correia.

Na Figura 2.8 pode-se ver os constituintes do sistema. Tal como o sistema de controlo efetuado pela Honda e referido em 2.2.2, a unidade de controlo do motor também controla o ciclo de Rankine, cuja troca de energia é efetuada num evaporador (número 36) aquecido

pelo fluido do circuito de refrigeração automóvel. O fluido de trabalho é precisamente o do ar condicionado, sendo partilhado pelo ciclo Orgânico de Rankine conjuntamente com o condensador (38). As válvulas eletromagnéticas 69 e 61 servem para distribuir o fluido uniformemente pelos dois ciclos. Quando o sistema de ar condicionado está desligado, a válvula 69 encontra se fechada.

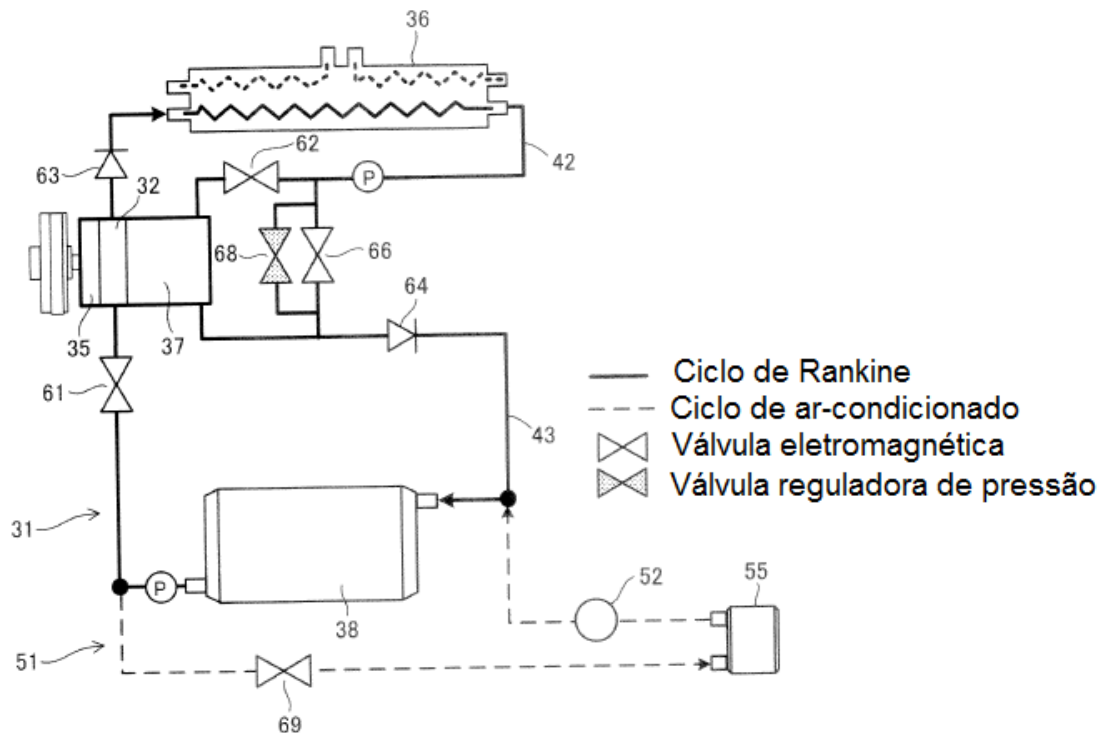


Figura 2.8 - Esquemático do Ciclo de Rankine patenteado pela Nissan, adaptado de (Nagai *et al.* 2014).

2.2.4. Estudo realizado por investigadores

Um grupo de investigadores franceses têm vindo a estudar o controlo e supervisão do ciclo de Rankine, com modelação computacional conforme vários estudos. O sistema visa a aplicação num veículo pesado, tendo sido montado numa célula de teste e consiste num ciclo de Rankine tradicional, similar ao apresentado na Figura 2.1. A nível de controlo, o sistema foi construído de forma a ter de operar quatro atuadores. No escape tem uma válvula de desvio para regular o caudal de gases de escape a entrar no evaporador, sendo que a bomba controla o caudal mássico de fluido de trabalho no circuito, permitindo controlar a temperatura do fluido de trabalho à entrada do expansor. No expansor também existe uma válvula similar, que controla a quantidade de fluido que entra. A válvula de

desvio do expensor é um atuador importante pois ajuda a evitar os danos causados por gotas de fluido na turbina. Assim caso o fluido não esteja no estado de vapor sobreaquecido, será redirecionado antes de entrar no expensor. A turbina é também controlada de forma a manter o ponto de funcionamento adequado às condições do fluido, o que dará maior eficiência ao sistema. O mesmo sucede com a bomba, que terá de ser controlada para regular o caudal mássico de fluido de trabalho que entra no evaporador.

As variáveis medidas são: temperatura e pressão em quatro pontos distintos, ou seja, entre cada um dos elementos constituintes. O caudal mássico dos gases de escape é calculado através do caudal mássico de ar e λ que é fornecido através da unidade de controlo do motor. No circuito do sistema de Rankine é também medido o caudal mássico de fluido de trabalho, (Tona *et al.* 2012)

O principal objetivo do controlo do ciclo de Rankine é garantir o sobreaquecimento do vapor prevenir a formação de gotas que provoquem danos na turbina. Contudo quanto mais reduzido for o sobreaquecimento, maior rendimento irá ter o ciclo. Desta forma o sistema necessitará de manter a temperatura o mais próxima possível da solicitada. A melhor forma de garantir este requisito é através de um controlo antecipado, prever a evolução da temperatura através da energia dos gases de escape, tal como os métodos anteriormente descritos. Relativamente ao erro cometido, apenas com controlo PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) o erro entre a temperatura a atingir e a temperatura máxima de desvio é de 6,5 K. Com o controlo antecipado, é possível reduzir esta diferença para 1,9 K. Assim aumenta a eficiência do ciclo mantendo as margens de segurança quanto ao sobreaquecimento, (Peralez *et al.* 2013).

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

3. Caracterização da montagem experimental

No presente capítulo serão apresentados os sensores e atuadores utilizados na montagem experimental já efetuada em projetos anteriores. Apenas serão descritos os elementos que irão ser utilizados para o controlo do ciclo a desenvolver, de forma a que consigamos controlar a temperatura do fluido de trabalho. A montagem dispõe de outros sensores que têm como finalidade a investigação experimental de evaporadores, contudo não serão utilizados. (Pinheiro, 2015)

3.1. Introdução

Na Figura 3.1 pode-se verificar o esquema do ciclo e a localização dos respetivos sensores e atuadores. Os sensores são: WB - sonda lambda, T_g - Termopar para leitura da temperatura dos gases de escape, \dot{m}_{wf} - sensor de caudal mássico de fluido de trabalho, T_{wf} - Termopar para leitura do fluido de trabalho, P_{wf} - sensor de pressão do fluido de trabalho.

Após a bomba, existe um sensor que permite medir o caudal de fluido de trabalho e um outro que mede a temperatura. Depois do evaporador colocou-se um sensor de pressão e outro de temperatura tipo K. Para monitorizar o caudal dos gases de escape é usado um sensor lambda e um sensor de caudal mássico do ar admitido (MAF - mass air flow sensor, na literatura Inglesa), que não estão representados na figura devido a fazerem parte dos sensores do motor.

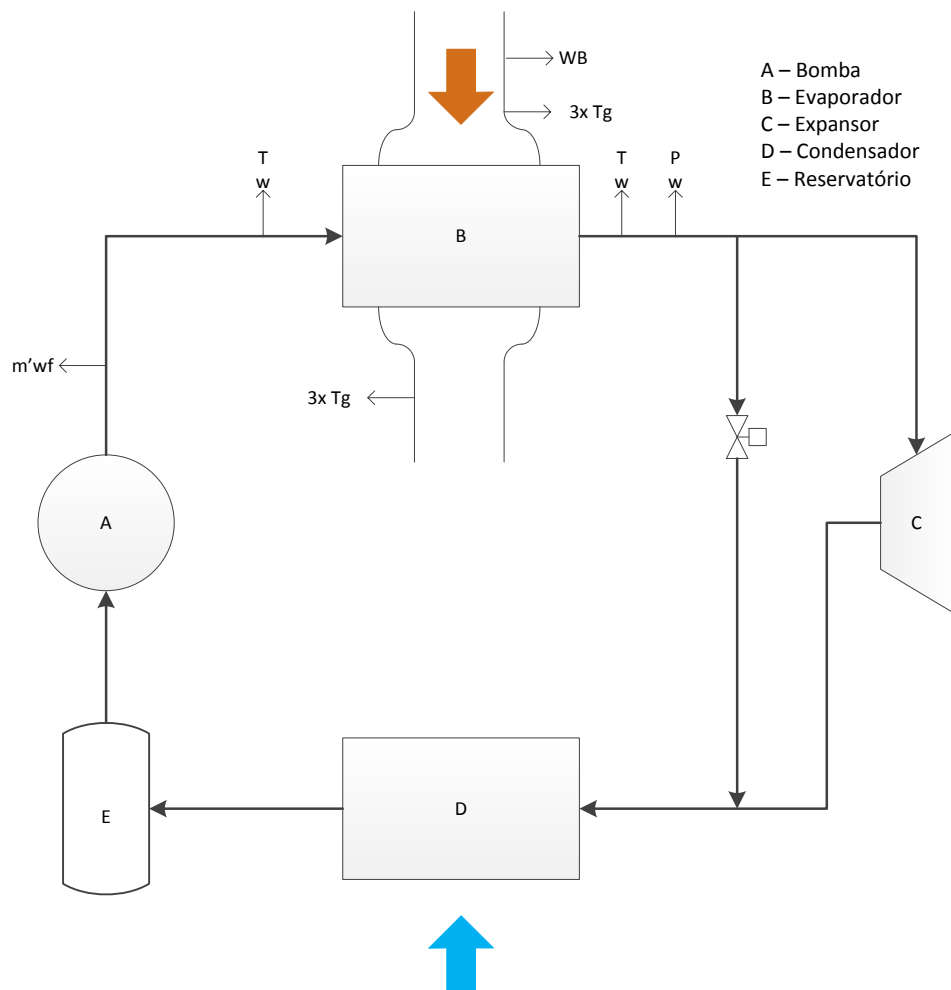


Figura 3.1 - Localização dos sensores no sistema.

Existem também três sensores de temperatura dos gases de escape antes do evaporador e três depois, necessários para o cálculo da potência térmica dos gases de escape. Na Figura 3.2 pode-se observar um esquema da montagem dos mesmos. Os três sensores são montados de forma equidistante, ou seja, 120° entre cada um. O uso de três sensores justifica-se com a necessidade de adquirir a temperatura em vários pontos do escape, tal como sugerido por Horst *et al.* (2013). Assim, obtém-se a temperatura média e dessa forma uma aproximação mais exata da temperatura real dos gases de escape sendo que quaisquer leituras com desvios muito elevados poderão ser desprezadas.

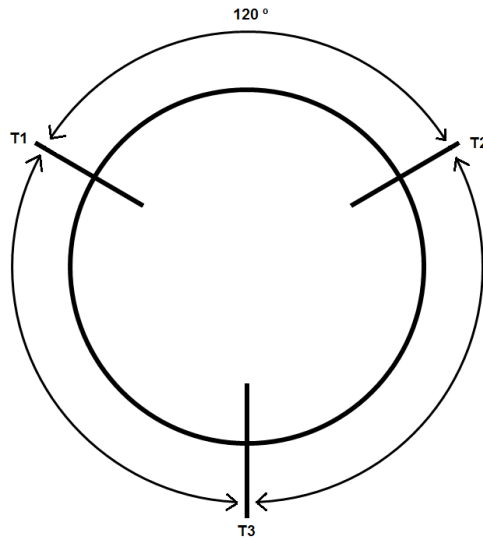


Figura 3.2 - Representação da montagem dos termopares no sistema de escape.

3.2. Sensores

A presente secção apresenta as características dos sensores utilizados.

3.2.1. Sensores de temperatura

Todos os sensores de temperatura utilizados na montagem experimental são iguais, quer seja no circuito de escape ou no circuito do fluido de trabalho. Dado que os gases de escape atingem temperaturas consideráveis, podendo superar os 900 °C, não é possível a utilização dos tradicionais sensores usados em automóveis, PTC (Positive Temperature Coefficient, na literatura inglesa) e NTC (Negative Temperature Coefficient, na literatura inglesa). Embora existam alguns sensores de platina (PT100) que consigam atingir estas temperaturas, não se justifica o uso. Desta forma, a escolha recaiu sobre os termopares para toda a instalação sendo que desta forma a programação é equivalente para todos, e não se necessita de estar a ajustar individualmente para cada ponto de leitura.

Na Figura 3.3 podemos ver uma comparação da variação da sensibilidade com a temperatura dos termopares tipo T, J e K. Como é possível verificar, o termopar do tipo K

não é linear ao longo de toda a sua gama, contudo na gama dos 0 aos 1000 °C, a sua sensibilidade pode-se aproximar a 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Os termopares utilizados são de tipo K, que têm uma gama de utilização entre os -200 e os 1250 °C.

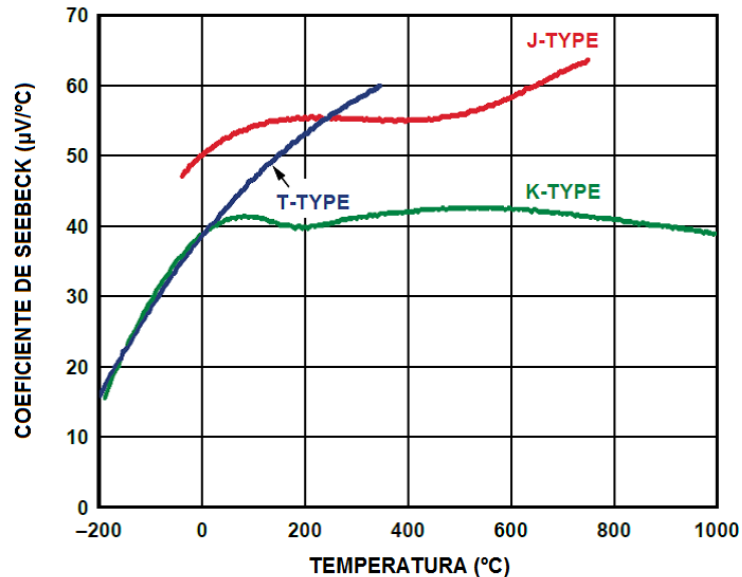


Figura 3.3 - Variação da sensibilidade do termopar com a temperatura, adaptado de (Duff & Towey, 2010).

Pode-se também optar por duas abordagens diferentes: ler os dados em tabela; ou utilizar funções que aproximem a curva do sensor. Ambas as abordagens utilizarão mais recursos do microcontrolador que a abordagem normal, em que se considera a saída constante. Para se ter os dados em tabela, será necessário guardá-los numa memória externa e consultar os valores para cada termopar. Desta forma o tempo de cálculo para a leitura de todos os termopares será bastante mais elevado que no caso da aproximação. Contudo pode ser necessário utilizar este método no sensor do fluido de trabalho, pois este deve ter uma gama de trabalho bastante estreita e assim é necessário saber se o erro induzido não prejudicará o sistema. No caso da aproximação a uma função polinomial, obtém-se uma aproximação bastante boa. Todavia apesar disso, pode ser necessário a utilização de várias funções consoante o valor de saída e dado serem funções complexas não trará muita vantagem em termos de tempo de cálculo, (Duff & Towey, 2010).

É ainda necessário o condicionamento de sinal de forma a converter o sinal do termopar em valores de tensão mais elevados ou diretamente para formato digital.

3.2.2. Sensor de pressão após o evaporador

Para medir a pressão do fluido de trabalho à saída do evaporador é utilizado o sensor *RS Pro 461-250*, comercializado pela *RS Components*. O sensor tem uma gama de medida entre 1 e 9 bar com a saída linear de 4 a 20 mA, respetivamente. Este sensor tem uma gama de trabalho entre -20 °C e 125 °C.

O uso deste tipo de sensores tem como vantagem o facto de a corrente ser mais imune a ruídos que a tensão e também de os cabos poderem ser mais compridos dado que a queda de tensão neste não afetará o sinal. Desta forma, o sensor pode estar bastante longe do centro de comando e pode também haver diferenças de potencial nos cabos, pois desde que esta não seja demasiado elevada este, terá a corrente e o sinal de saída correto.

3.2.3. Caudal mássico do fluido de trabalho

O caudal de fluido de trabalho é medido através de um sensor eletromagnético pelo qual passa a água, ou seja, o fluido de trabalho. O aparelho é da marca ISOMAG e é composto por duas peças - o sensor em si e um conversor (ISOMAG ML4-F1) que condiciona o sinal e trata das comunicações com o computador, onde se pode ler o valor do caudal e alterar parâmetros quando necessário, (Isoil, 2011).

Apenas é possível a medição do caudal de fluidos condutores ou ionizados, pois o princípio de funcionamento baseia-se na separação dos aniões e catiões. Um eletroímã é ativado pelo circuito controlador e devido ao campo magnético gerado, os iões serão separados consoante a sua carga elétrica. Com a separação dos catiões numa lateral do tubo e os aniões na outra, irá haver uma geração de tensão elétrica através de eléctrodos instalados na superfície do tubo.

A Figura 3.4 mostra um esquemático deste tipo de sensor. Como se pode verificar, os eletroímãs são instalados na vertical e os eléctrodos na horizontal. A razão de isto suceder é eliminar os erros que poderiam ocorrer devido a bolhas de ar caso os eléctrodos sejam

instalados na vertical. A estrutura envolvente é toda feita em material não condutor e não magnético para não causar curto-circuito nos elétrodos nem influenciar o campo gerado, porém isto não iliba os elétrodos de serem contaminados por químicos que estejam dissolvidos no fluido. Contudo alguns aparelhos já vêm preparados para proceder à limpeza dos elétrodos automaticamente.

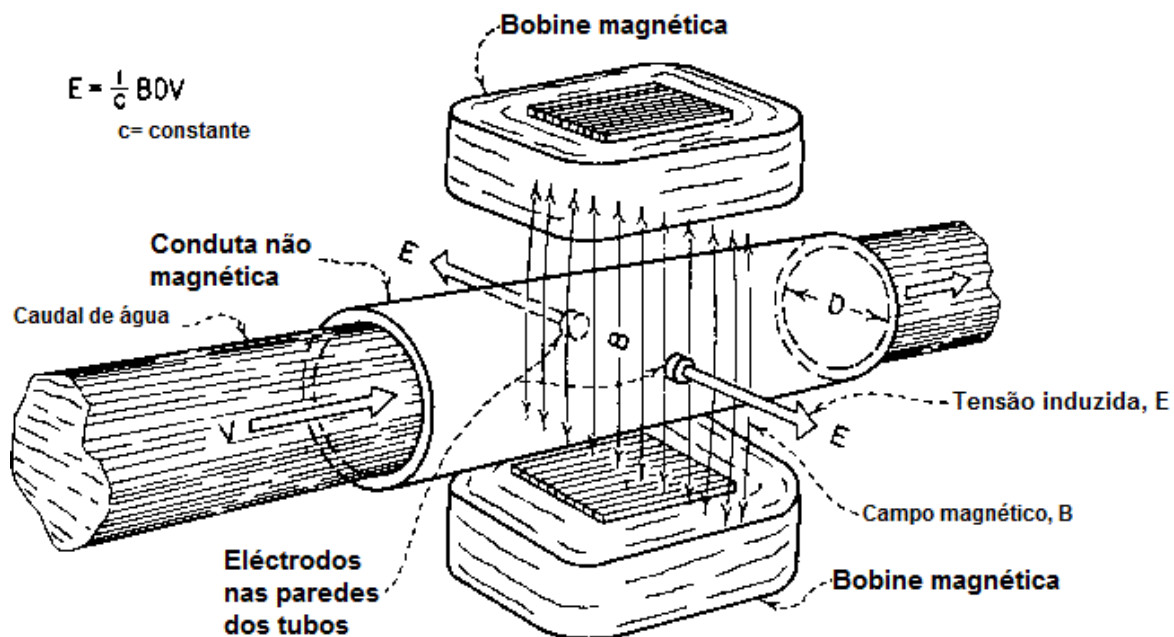


Figura 3.4 - Esquemático de um caudalímetro eletromagnético, adaptado de (USBR, 2015)

O sensor adquirido tem um sinal de saída em frequência. Esta aumenta consoante o valor do caudal, sendo que o valor pode ser definido pelo utilizador através do *software* de calibração. Optou-se por não alterar a calibração atual, pois desta forma consegue-se obter o valor do caudal no microcontrolador e no sistema de aquisição de dados previamente instalado. Este sinal pode ser configurado de várias formas, caso seja necessária a medição do fluxo em ambas as direções ou aumentar a gama de medição numa direção. Dado que no ciclo de Rankine o fluxo trabalha sempre na mesma direção, tem-se uma medição unidirecional em que se obtém 20 pulsos por segundo (20 Hz) por grama de água. A frequência máxima a que trabalha o sensor são 1250 Hz, pelo que segundo a configuração atual são 62,5 g/s.

3.2.4. Caudal mássico de ar admitido pelo MCI

Para se ter um controlo de injeção por forma a injetar a quantidade certa de combustível sem ter de se utilizar um controlo malha fechada, temos de saber a quantidade de ar admitida pelo motor. Pode ser utilizado um sensor de posição da borboleta (TPS - Throttle Position Switch, na literatura Inglesa), um sensor de pressão absoluta no coletor de admissão (MAP - Manifold Air Pressure, na literatura Inglesa), um sensor de caudal volúmico de ar (AFM - Air Flow Meter, na literatura Inglesa) ou o já mencionado, MAF.

O sensor MAF é uma solução mais recente e que é visto como uma evolução do sensor AFM, dado que ambos transmitem diretamente à unidade de controlo de motor um caudal de ar. Isto é oposto aos sensores TPS e MAP, que correspondem a métodos indiretos de medição de caudal, em que se tem de efetuar cálculos ou configurar a unidade para cada valor dos mesmos. O sensor MAF permite medir diretamente o caudal mássico de ar admitido, sendo por isso um método mais preciso.

Os primeiros veículos de injeção eletrónica utilizavam sensores de caudal volúmico de ar, estes consistiam numa comporta que se movia consoante o arrasto do ar que era admitido pelo motor e que se traduzia numa relação com o caudal volúmico. Estes sensores tinham desgaste, induziam uma restrição do caudal do ar, a sua instalação necessitava de um espaço maior do que os outros tipos e dada a comporta ser, por vezes, influenciada pela gravidade, tinham uma maneira precisa para serem instalados. Atualmente estes sensores estão obsoletos devido à sua baixa fiabilidade e custo.

O sensor MAF utiliza um elemento de fio de ar quente ou filme de ar quente que têm ambos o mesmo princípio de funcionamento. Uma resistência é aquecida a uma temperatura constante e mais elevada que a temperatura ambiente e esta irá dissipar energia para o ar que passa pelo medidor de massa de ar. Com o aumento do caudal mássico, mais calor é dissipado, o que resultará numa necessidade de aumentar a corrente necessária para aquecer o elemento. Desta forma através do circuito integrado, tem-se uma saída não linear de tensão através do caudal mássico. A temperatura do ar admitido não é relevante pois o circuito faz correções através de outras resistências incorporadas e quanto maior a temperatura, menor dissipação de calor vai acontecer levando à medição de uma quantidade menor de massa - o que se verifica na realidade.

Na Figura 3.5 pode-se observar um diagrama funcional do sensor e as resistências para medição de temperatura identificadas pela letra ϑ . O elemento R_h , é o filme quente cujo aquecimento é controlado pelo circuito à direita do mesmo. O circuito à esquerda tem uma saída em tensão correspondente à queda de temperatura do filme quente e permite assim o cálculo do caudal mássico de ar que está a passar. Alguns sensores têm também a resistência denominada ϑ_u para informar a unidade de controlo a temperatura do ar. (Bosch, 2015)

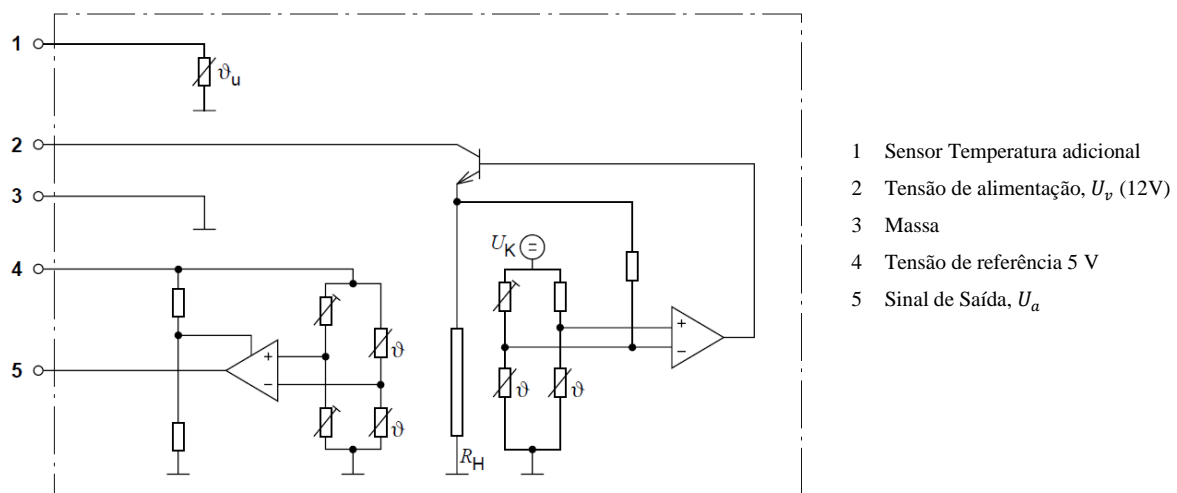


Figura 3.5 - Diagrama funcional do sensor de massa de ar, adaptado de (Bosch, 2015)

O sensor que se encontra aplicado no automóvel é um Bosch 0 280 218 019, do tipo HFM-5. Este sensor tem uma gama de medição entre 0-480 kg/h com a tensão de saída entre 0 e 5 V. A tensão de alimentação é a tensão da bateria do automóvel, necessitando de uma tensão de referência de 5 V, (Bosch, 2015).

3.2.5. Sensor de oxigénio - sonda lambda

Para se conseguir calcular o caudal mássico de gases de escape são necessárias duas informações distintas: caudal mássico de ar admitido e a razão da mistura ar/combustível. Com o sensor MAF, obtém-se o caudal mássico de ar admitido, ficando apenas a faltar os dados acerca da razão da mistura ar/combustível, que são obtidos através de um sensor de oxigénio ou sonda lambda, instalado no sistema de escape.

Existem dois tipos principais de sensor lambda, banda estreita (NB - Narrow Band, na literatura Inglesa) e banda larga (WB - Wideband, na literatura Inglesa). O tipo mais utilizado nos veículos automóveis é o sensor NB, que é utilizado em automóveis com catalisador devido a ser necessário efetuar uma mistura ligeiramente rica e no ciclo seguinte, ligeiramente pobre. Esta alternância é necessária visto que o catalisador precisa de mistura rica para as reações de redução e de mistura pobre para as reações de oxidação. Já no caso do sensor WB, apenas se utiliza em automóveis que se precisa de um controlo mais preciso da mistura de combustível e principalmente em motores de injeção direta que operam com misturas pobres.

Na Figura 3.6, pode-se observar a tensão de saída de ambos os sensores em função da mistura de ar-combustível. O sensor lambda NB é um sensor não linear, em que no limite admite apenas dois estados, 1 V correspondendo a mistura rica e 0 V correspondendo a mistura pobre. Não é possível obter um valor intermédio. Com um sensor lambda WB, é possível ler com precisão qualquer valor de razão ar/combustível da mistura (AFR - Air Fuel Ratio, na literatura Inglesa), geralmente na gama $10 < AFR < \infty$, $AFR = \infty$ corresponde à admissão apenas de ar. A desvantagem do sensor WB é que necessita de um controlador, que em malha fechada irá controlar a tensão da célula de *Nernst* para que esta tenha uma tensão de saída igual a 0,45 V, tensão correspondente a AFR estequiométrico. Para que isso aconteça é necessário introduzir uma corrente, negativa ou positiva, dependendo do estado da mistura, sendo ela rica ou pobre. Assim o oxigénio será equivalente e irá determinar a razão de ar/combustível através de tabelas de valores ou de cálculos

Saída do sensor de oxigênio - Banda larga e estreita

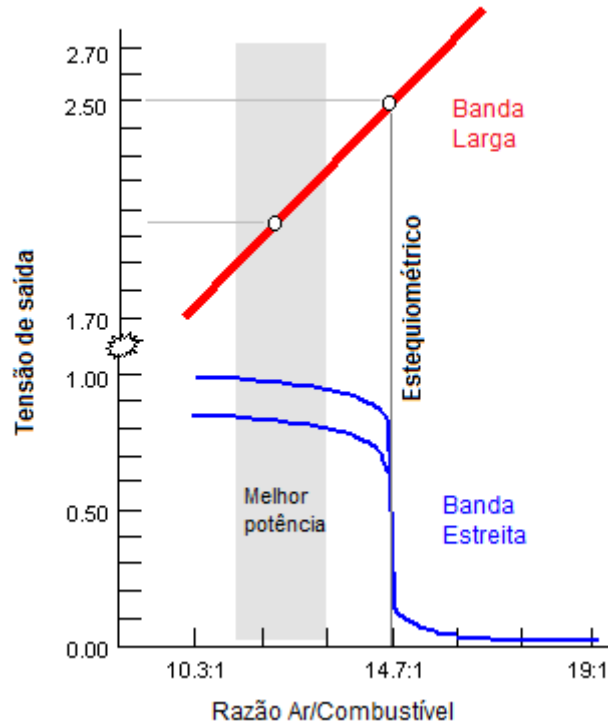


Figura 3.6 - Comparação entre sonda de banda estreita e larga, adaptado de (Basics, 2010)

Na Figura 3.7 é possível observar um esquema de um sensor WB. A tensão gerada depende da diferença de concentração de oxigênio entre a câmara com o ar de referência e a câmara onde entram os gases de escape. Quando esta tensão é igual a 0,45 V significa que a mistura está estequiométrica. Como apresentado do lado esquerdo da Figura 3.7, se a mistura estiver pobre - $\lambda > 1$ ($AFR > 14,7$) - há excesso de oxigênio e desta forma é necessário introduzir uma corrente (I_p) para que seja removido oxigênio, de modo a que a tensão fique novamente 0,45 V. O contrário ocorre quando a mistura é rica ($\lambda < 1$), em que é necessário ter uma corrente no sentido oposto para fornecer oxigênio. Sabendo a correspondência entre os valores de corrente e o lambda, o controlador enviará para a unidade de controle um valor analógico ou digital do valor de lambda.

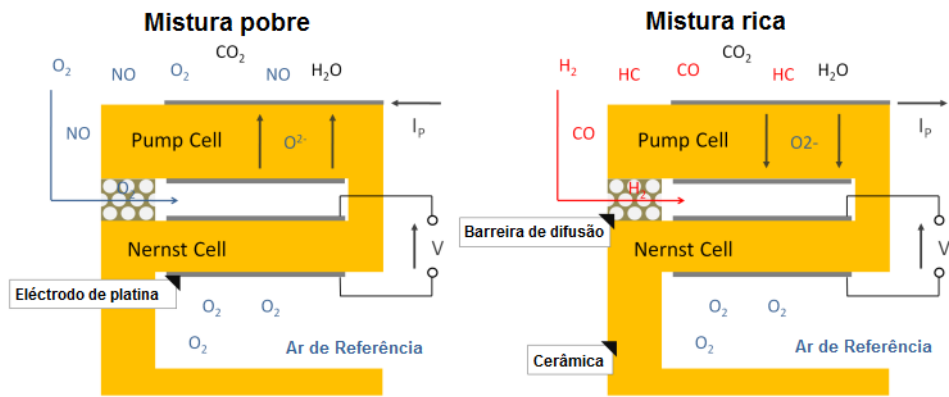


Figura 3.7 - Representação esquemática de célula de *Wideband*, (Clemson, 2015)

O controlador WB atualmente utilizado na montagem experimental é o *Motec PLM*, que tem duas saídas analógicas e duas saídas digitais, CAN e RS232. Para efeitos de comunicação com o microcontrolador é mais rápido e fácil utilizar o CAN e este pode ser posteriormente utilizado para outros sensores/comunicações.

3.3. Atuadores

De forma a se conseguir alterar o ponto de funcionamento do sistema é necessária a utilização de atuadores. Serão utilizados dois atuadores, uma bomba elétrica para o fluido de trabalho e uma electroválvula para efetuar o *bypass* do expensor. Caso o sistema fosse dotado de um expensor em que tivesse funcionamento eletrónico, poderia ser também atuado pelo sistema. O exemplo mais claro seria uma espécie de alternador automóvel, em que se controlaria o campo magnético para produzir mais tensão elétrica ou controlar a velocidade de rotação.

3.3.1. Bomba

Para controlar a temperatura à saída do evaporador é necessário ajustar o caudal de fluido de trabalho. Desta forma a melhor maneira de implementar o sistema é utilizar uma bomba elétrica com um funcionamento por modulação de largura de pulso (PWM - Pulse Width Modulation, na literatura Inglesa).

O ciclo utilizado tem uma bomba que havia sido selecionada previamente, Flojet R3811, (Pinheiro, 2015). É uma bomba de diafragma com um motor de ímanes permanentes, selado. A alimentação é em corrente contínua, sendo o valor de tensão 12 V. Desta forma está perfeitamente adequada para trabalhar com uma bateria de um automóvel, pois segundo o fabricante, estas bombas foram desenhadas considerando a utilização num circuito de refrigeração automóvel.

O fabricante refere que o funcionamento da bomba necessita de uma corrente 8 A, contudo foi efetuada a medição da corrente de pico e constante sem o sistema estar a trabalhar para se obter o valor mínimo e máximo da mesma. Para tal, utilizou-se um osciloscópio portátil *Fluke 124* e uma pinça amperimétrica com um valor de saída de 100 mV/A, demonstrando-se os resultados que se podem ver na Figura 3.8. Ao ligar a bomba obtém-se um pico de corrente de 28 A, que após estabilizado, passa a ter um valor médio de aproximadamente 5,5 A. Para controlar a bomba, é possível utilizar um relé, mas para um funcionamento em PWM o ideal será um MOSFET de potência que o permita.

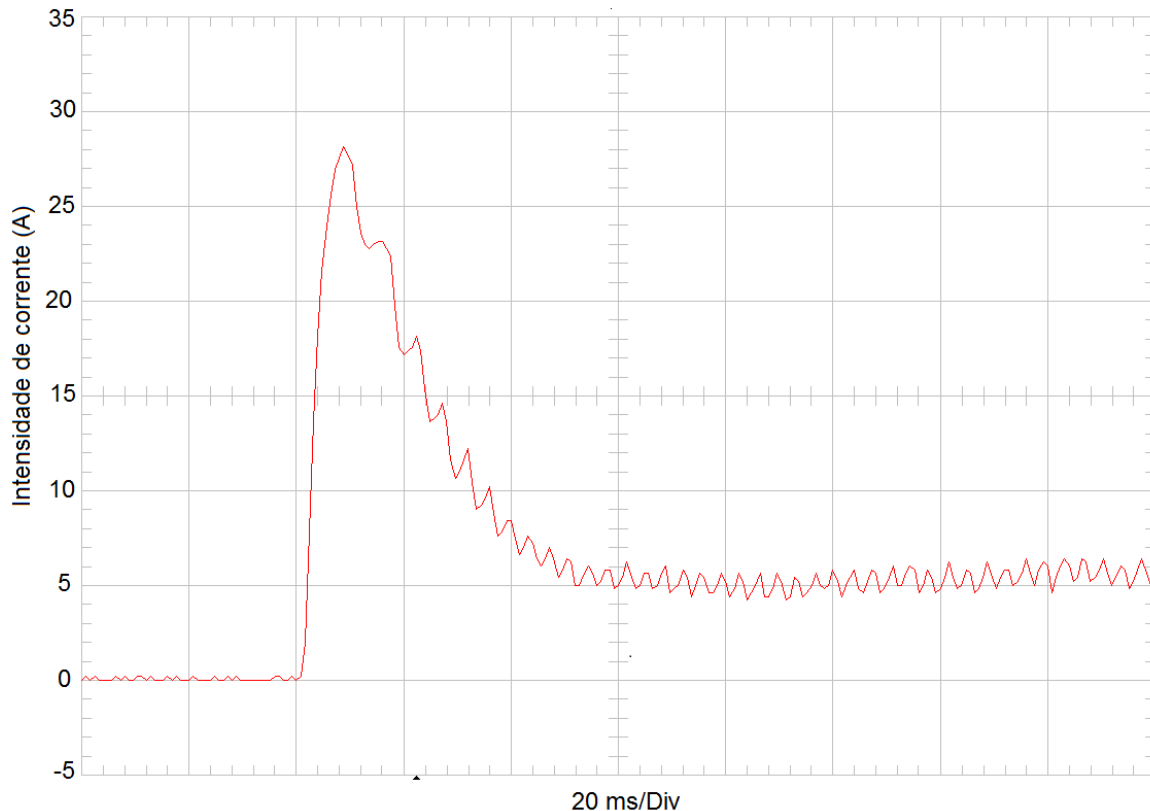


Figura 3.8 - Gráfico com pico de corrente e corrente média.

A Infineon Technologies tem uma gama de MOSFETs de potência, com uma elevada corrente de corte e uma boa capacidade de dissipação mesmo sem dissipador. Estes MOSFETs são designados de *Smart Power Switches* devido a serem interruptores inteligentes dotados de circuitos de controlo de potência que atuam em caso de sobreaquecimento e medem corrente. Considerando uma corrente máxima admitida pelo MOSFET superior à corrente de pico da bomba de água, foram seleccionados dois *Smart Power Switches* que preenchem este requisito, de forma a avaliar a performance de ambos, tal como apresentado na secção 4.3.1, (Infineon Smart Low-Side & High-Side Switches - Automotive Power Selection Guide, 2016).

3.3.2. Eletroválvulas

Para se ter o circuito capaz de trabalhar em diversos pontos de operação, a montagem experimental tem várias eletroválvulas que permitem redirecionar o fluido de trabalho, no entanto para uma utilização num veículo tem de se restringir ao essencial. Assim apenas é utilizada uma eletroválvula para o *bypass* do expensor, no caso do fluido de trabalho não preencher as condições necessárias.

A eletroválvula tem um consumo de 9 W e opera com uma tensão de 24 V, o que se traduz numa intensidade de corrente média de 2,66 A. No caso da montagem experimental, é possível operar com 24 V contudo no caso de uma aplicação no veículo será necessário a seleção de outra eletroválvula ou aplicar um transformador de 12 V para 24 V.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

4. Projeto do circuito de controlo

No presente capítulo serão apresentadas as escolhas de componentes a nível eletrónico tais como o microcontrolador e circuitos integrados. Serão também abordados os correspondentes circuitos eletrónicos e a construção das placas de circuito impresso de atuadores e sensores.

4.1. Sistema Embebido

Atualmente existe um leque bastante alargado de microcontroladores no mercado. Para simplificar a prototipagem optar-se-á por um microcontrolador com placa de desenvolvimento, não sendo necessário desenhar um circuito impresso numa fase inicial nem complicando as ligações na *breadboard*. Em termos de placas de desenvolvimento existem dois grandes nomes, *Arduino* e o mais recente, *chipKIT* com processadores da família *Microchip*[®].

As placas de desenvolvimento *Arduino* - processador *Atmel*[®] - são muito utilizadas e normalmente são dotadas de apenas processadores de 8 bits com velocidades de relógio entre 8 MHz e 16 MHz, correspondendo estas ao número de instruções por segundo. Têm um número de pinos relativamente baixo e são sempre dotadas de EEPROM interna, entre os 500 e 4000 bytes. Contudo há uma série com processadores do tipo ARM cujas instruções são de 32 bit, contudo estes normalmente não são dotados de EEPROM.

Já a *Microchip*[®] possui uma gama de microcontroladores mais ampla, tendo desde os típicos processadores de 8 bit até 32 bit, com velocidades de relógio por regra mais elevadas, em média cerca de 40 MHz mas o número de instruções por segundo não é diretamente relacionável como os microcontroladores da *Atmel*[®]. Normalmente as placas de desenvolvimento da *Microchip*[®] são muito caras e orientadas sobretudo para investigação e não para o utilizador comum dado que a programação é efetuada em baixo nível ou C. Posto isto, a *Digilent* decidiu desenvolver o *ChipKIT*, uma placa de

desenvolvimento bastante poderosa com uma arquitetura de 32 Bits, que atualmente conta com duas versões, Uno32 e Max32 e é agora possível programar em alto nível (C++) com ambiente equivalente ao *Arduino*. Atualmente nem há necessidade de utilizar o ambiente dedicado ao *chipKIT* (MPIDE), sendo que o *Arduino IDE* é compatível.

Na Tabela 4.1 pode-se verificar alguns parâmetros como arquitetura, memórias, velocidade de relógio, número de portas e módulos das placas de desenvolvimento a escolher. Após uma cuidada comparação, a escolha recaiu sobre o *chipKIT* Max32. Em termos de arquitetura, o *Arduino Leonardo* iria ficar bastante aquém na tarefa, pois trabalha a 8 bit e o relógio apenas tem 16 MHz. Tem a vantagem de ter EEPROM, mas facilmente se pode adicionar uma por SPI com bastante mais capacidade - a *Microchip*[®] tem soluções até 1 Mbit. O *Arduino Zero* é também eliminado da nossa escolha pois devido ao baixo número de pinos, ficaria sobre lotado e assim o *design* não seria à prova de revisões futuras. A nível de preços a *Microchip*[®] está bastante próxima dos *Arduinos*, ainda que com especificações ligeiramente superiores.

Tabela 4.1 - Comparação entre placas de desenvolvimento (RS-Components, 2016)

	chipKIT	chipKIT	Arduino	Arduino	Arduino
	Uno32	Max32	Leonardo	Due-ARM	Zero-ARM
Instruções (bit)	32	32	8	32	32
Clock [MHz]	80	80	16	84	48
Flash [kb]	128	512	32	512	256
RAM [kb]	16	128	2,5	96	32
EEPROM [kb]	0	0	1	0	0
I/O	53	85	20	54	14
SPI	2	4	1	4	6
I2C	2	5	1	2	6
ADC	16	16	12	12	6
Timers	5	5	4	9	6
PWM	5	5	7	12	20
CAN	0	2	0	2	0
Preço [€]	28	49,56	17,07	33,06	51,06

Aquando da comparação entre os *chipKIT* e os *Arduinos* ARM, verificou-se que os *chipKIT* têm uma maior versatilidade, a vantagem de serem compatíveis com as bibliotecas existentes para os *Arduino* e ainda se pode utilizar o ambiente de programação MPLAB, com o qual se obteve experiência prévia. Caso o ambiente de programação utilizado seja o *Arduino IDE*, é possível utilizar as bibliotecas efetuadas por outros utilizadores, específicas para alguns circuitos integrados. A nível de *hardware* são bastante equivalentes, embora o Max32 e o *Due-ARM* tenham portas CAN que serão utilizadas tanto para comunicação com o veículo como para comunicação com os sensores utilizados nas medições.

Considerando estas características o *chipKIT* Max32, dotado do microcontrolador PIC32MX795F512L é o que apresenta melhor relação entre viabilidade e capacidade de cálculo para a implementação que se pretende no presente trabalho.

4.2. Condicionamento de sinal

Atualmente diversos sensores/atuadores têm o seu próprio condicionamento de sinal ou comunicação para facilitar o *design* de sistemas embebidos. Com os sensores e atuadores que foram selecionados, serão utilizados vários módulos do microcontrolador mas é necessário implementar outras funções de condicionamento de sinal como o módulo CAN, o módulo de leitura dos termopar e os *Smart Power Switch* que funcionam conjuntamente com o módulo PWM. A Figura 4.1 mostra o diagrama de blocos do sistema eletrónico desenvolvido com os respetivos sensores e atuadores.

Como referido anteriormente, o controlador do sensor lambda WB *Motec* PLM comunica os dados por porta CAN ou, em alternativa, por uma saída analógica. Dado que a saída analógica é propensa a ruídos, o ideal será utilizar a saída digital. Desta forma irá ser adicionado o circuito necessário para a comunicação CAN, sendo que esta ficará disponível para comunicar com outros módulos ou com a unidade de controlo do motor do veículo. Para tal apenas será necessário adaptar a programação do microcontrolador de forma a implementar a norma SAE J1979 disponível nas portas OBD-II dos veículos atuais. Desta forma será possível receber o valor de outros sensores para além do sensor

lambda, como por exemplo o valor do caudal mássico de ar admitido pelo motor, que é também necessário.

O módulo de conversão analógico - digital (ADC - Analog-to-Digital Converter, na literatura Inglesa) será utilizado para ler os sensores que apresentam uma saída analógica. No caso do sensor MAF, a saída deste é normalmente de 0 V a 5 V, contudo o microcontrolador não é tolerante a 5 V no módulo ADC, pelo que será necessário um condicionamento de sinal. O sensor de pressão do fluido após o evaporador tem sinal de saída em corrente e não em tensão, como é normal. Um sinal com saída em corrente é bastante mais vantajoso do que um sinal com saída em tensão, pois com fios compridos ou de má qualidade não ocorre degradação do sinal e há assim uma boa imunidade ao ruído, contrariamente a uma saída em tensão. Com um sinal de saída entre 4 e 20 mA, consegue-se saber se algum fio ou o próprio sensor se encontra danificado, no caso de a saída estar igual a zero ou caso seja menor que 4 mA - é uma boa forma de fazer diagnóstico. Para medir esta corrente, é necessário converter para tensão para que seja possível o microcontrolador ler, porém também existe a possibilidade de utilizar um circuito integrado que leia diretamente esta corrente e a envie para o microcontrolador através de comunicação digital, por exemplo via SPI ou I2C. Esta solução não é relevante pois iria adicionar complexidade ao projeto e ao mesmo tempo traria um número muito reduzido de vantagens.

O sensor do caudal de fluido de trabalho tem um sinal de saída em frequência, para tal pode-se utilizar uma interrupção quando há mudança do nível lógico e calcular o período da onda, de forma a saber a frequência.

Os termopares têm uma saída analógica que deve ser amplificada e calibrada de acordo com a temperatura na junção fria, com o uso de amplificadores operacionais ou com circuitos integrados próprios para o efeito. Pode ser utilizado um amplificador operacional, mas que implicaria dimensionar o circuito, o que não era adequado visto que a diferença de resolução não é significativa.

A Maxim tem dois circuitos integrados, o MAX31855 e o MAX31850K, desenvolvidos especificamente para adquirir o sinal de um termopar e enviar, de forma digital, para um microcontrolador. Ambos os circuitos integrado fazem a compensação da junta fria e

convertem automaticamente os valores de tensão do termopar para valores de temperatura normalizados. Como forma de comunicação, o MAX31850K utiliza 1Wire que é um protocolo criado pela MAXIM que consiste em utilizar a mesma linha de comunicação para alimentação, informação e relógio. A principal vantagem é esta, pois de resto é um protocolo lento, com pouco suporte e complexo a nível de código. Desta forma optou-se por utilizar o MAX31855K, que trabalha por SPI, atingindo velocidades de 25 Mbit/s, contra os 100 kbit/s do protocolo 1Wire. A única desvantagem é ter de se utilizar uma porta para seleccionar cada circuito integrado (CS - *Chip Select*, na literatura Inglesa) a comunicar, sendo que para o desenvolvimento do projeto poderão ser necessários oito CI. A utilização de um circuito multiplexador ajuda a diminuir o número de saídas digitais utilizadas pelo microcontrolador, contudo a principal vantagem é a redução do número de circuitos integrados para a aquisição do sinal do termopar.

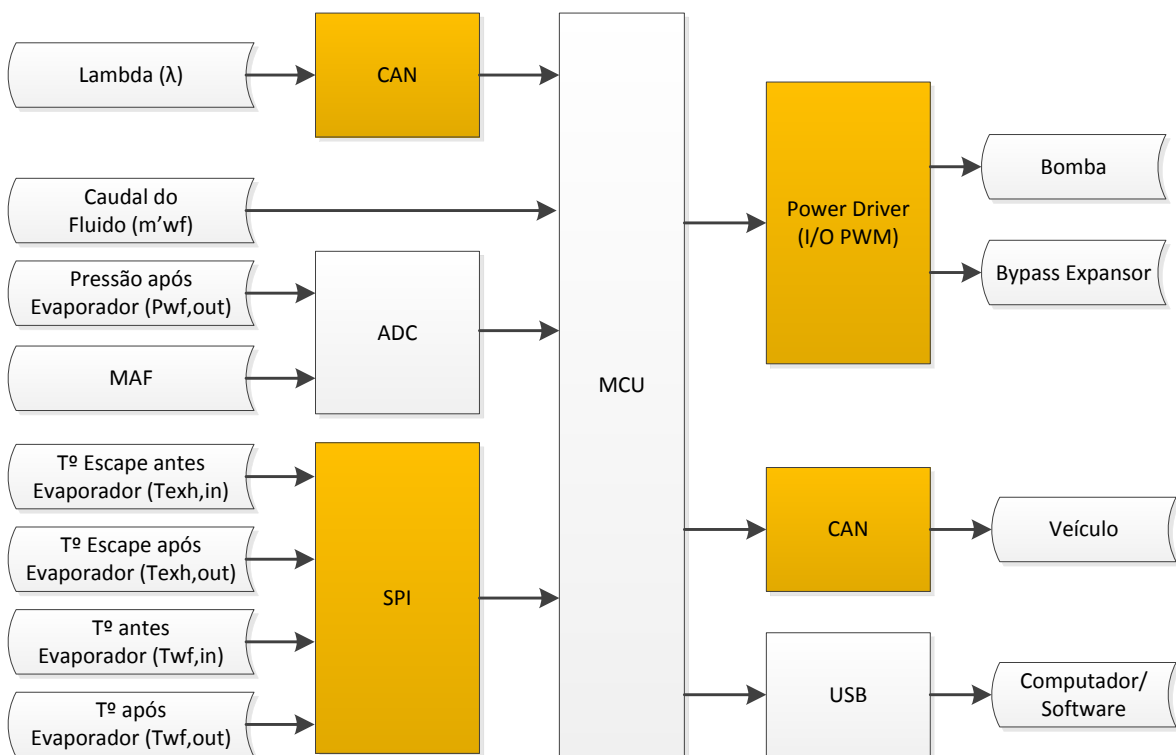


Figura 4.1 - Diagrama de blocos de controlo com módulos a adicionar e respetivos sensores e atuadores, a laranja módulos com adição de hardware.

4.2.1. Leitura de Termopares

Cada MAX31855K apenas pode adquirir o sinal de um termopar e comunicar o respetivo valor para o microcontrolador. Assim seriam necessários oito circuitos integrados e oito pinos digitais do microcontrolador para a seleção dos mesmos. Seria um aumento substancial de custo, pois cada circuito integrado tem um custo aproximado de 4€ e aumentaria a complexidade da placa de circuito impresso. Embora o custo não seja um facto crítico, devido à atual baixa produção em série, tentou-se encontrar uma solução mais simples com o uso do mínimo de recursos e mantendo a precisão oferecida pelo circuito MAX31855K.

A solução encontrada foi utilizar um *multiplexer* com oito entradas apenas em conjunto com um único MAX31855K. Para tal necessitava-se que o *multiplexer* tivesse uma baixa resistência e baixa corrente de fuga para diminuir ao máximo a queda de tensão neste. Um outro requisito é trabalhar com uma tensão de alimentação simples de 3,3 V. Selecionou-se um *Analog Devices* ADG408, que tem uma resistência interna máxima de 90 Ω e o valor máximo de corrente de fuga é 100 nA. Assim a queda de tensão máxima pode atingir 9 μ V, o que se traduz num erro máximo de 0,22 $^{\circ}$ C, (Analog Devices, 2015).

Desta forma é possível reduzir o número de circuitos integrados de oito para dois. O número de pinos digitais também foi reduzido de oito para quatro, sendo três para definir o endereço e um para ativar o MAX31855K. Os terminais “T-“ dos termopares foram ligados de forma comum ao pino correspondente do circuito integrado MAX31855K enquanto os pinos T+ foram ligados a cada uma das portas de comutação do multiplexer ADG408. Na Figura 4.2 pode-se visualizar o esquema eletrónico final para o condicionamento do sinal dos sensores de temperatura. A vermelho tem-se os conectores dos termopares, sendo possível ligar 4 termopares em cada. Pode-se verificar os T- todos ligados ao U10 (MAX31855K) e os T+ a cada um dos S no U2 (multiplexer). Estes são alternados de acordo com a configuração binária nos pinos A0, A1 e A2 e a saída, no pino 8, é ligada ao T+ do U10 de forma a conseguir-se ler cada termopar individualmente. Os pinos 5, 6 e 7 do MAX31855K são utilizados para a comunicação SPI com o microcontrolador.

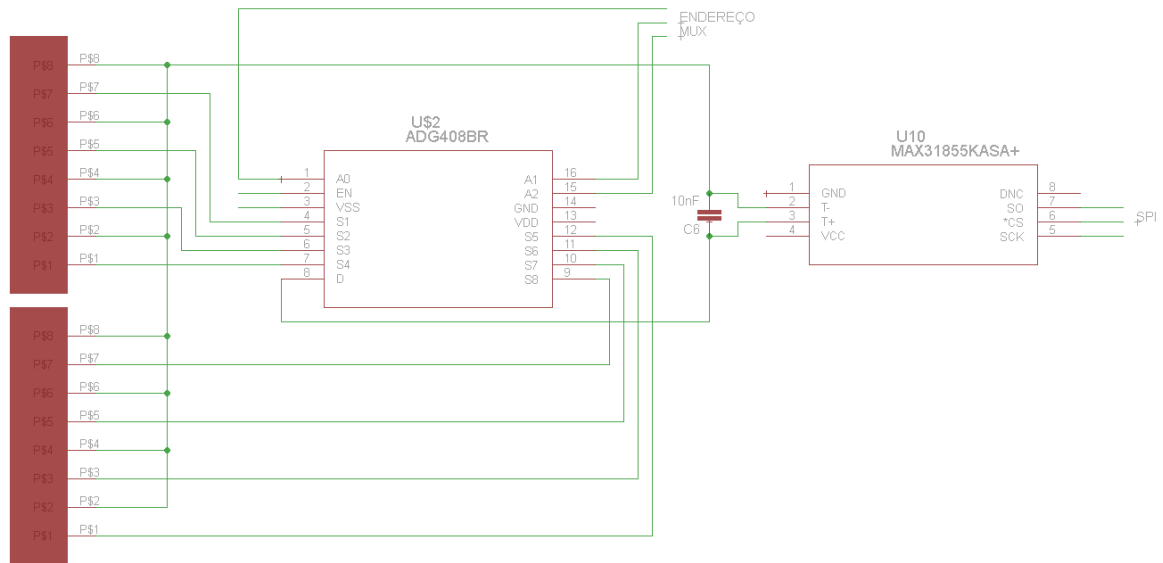


Figura 4.2 - Circuito elétrico de condicionamento e aquisição dos termopares do tipo K, com utilização de multiplexador e MAX31855K.

4.2.2. Módulo ADC

Os sensores cuja saída é analógica são: o sensor de pressão do fluido após o evaporador e o sensor de caudal mássico de ar. O sensor de pressão tem uma saída em corrente conforme já referido, contudo tem de ser convertida para tensão pois o microcontrolador não está preparado para ler em corrente. A corrente de saída é entre 4 e 20 mA, no entanto tem de ser convertida para uma gama de 0 - 3,3 V. De acordo com a lei de Ohm, o valor de resistência necessária para converter em tensão a corrente de saída é 165 Ω , então por ser o valor mais próximo, colocou-se uma resistência de 160 Ω , o que se traduz numa tensão de saída de 0,64 a 3,20 V. Esta resistência foi colocada em série com sinal de saída do sensor, de forma a que se adquira a queda de tensão na mesma.

O sensor MAF tem uma escala de saída de 0 - 5 V, sendo que esta tem de ser ajustada à escala de entrada no microcontrolador, que se situa nos 3,3 V como já referido. Para tal será necessário realizar um divisor de tensão em que se reduz a tensão proporcionalmente para 3,3 V. Na Figura 4.3 apresenta-se o circuito elétrico utilizado para reduzir o sinal de tensão do sensor de caudal mássico de ar.

Embora o valor de V_{out} não atinja um valor superior ao admitido pelo microcontrolador, para uma proteção acrescida, introduziu-se um amplificador operacional *rail-to-rail* que limita a tensão na sua saída (de entrada no microcontrolador) à tensão de alimentação, neste caso 3,3 V. O amplificador operacional utilizado é um MCP6024 da *Microchip*[®], que trabalha com uma tensão de alimentação simples de 3,3 V.

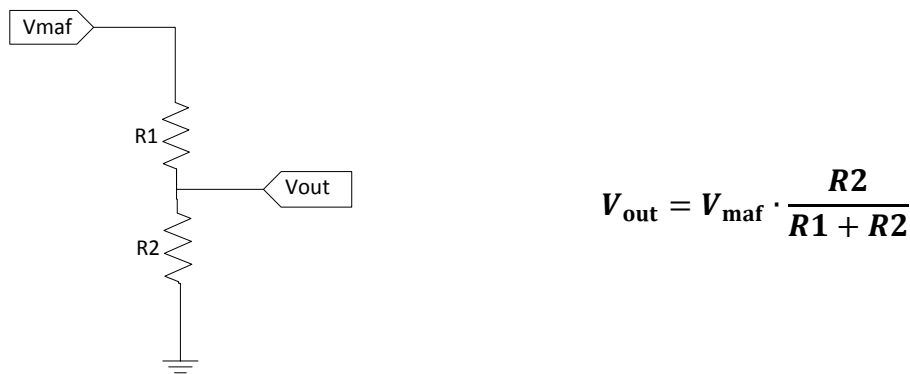


Figura 4.3 - Esquemático e equação de divisor de tensão utilizado no sinal de tensão do sensor MAF.

4.2.3. Módulos adicionais

CAN

Atualmente muitos sistemas embecidos utilizam o protocolo CAN como forma de comunicação. Nos automóveis é utilizado sob a norma SAE J1979, que é obrigatório em todos os veículos atuais. Segundo esta norma é possível fazer a leitura dos códigos de erro dos veículos e também a leitura de grandezas de funcionamento em tempo real. Assim, estando o microcontrolador utilizado - chipKIT MAX32 - preparado para comunicação CAN, pode-se numa fase futura utilizar este protocolo para obter o valor do coeficiente de excesso de ar (λ) e outros dados referentes ao motor do veículo (caudal mássico de ar ou até mesmo temperaturas de escape) sendo que será apenas necessária uma atualização do código do microcontrolador. Nesta fase, o protocolo CAN apenas será utilizado para a leitura dos dados enviados pelo controlador do sensor λ WB Motec PLM.

Embora o microcontrolador tenha capacidade para efetuar comunicação CAN este necessita de um *transceiver* CAN. O microcontrolador dispõe de dois pinos, um para transmissão e outro para recepção de dados da comunicação CAN, contudo não consegue

receber nem enviar diretamente os dados do barramento. A função do *transceiver* é efetuar esta conversão dos dados entre o microcontrolador e o barramento e o condicionamento do sinal entre a linha CAN e o microcontrolador, adaptando os níveis de tensão

Optou-se por seleccionar um *transceiver* CAN da *Texas Instruments*, o SN65HVD232Q, que apresenta as qualificações necessárias para aplicação em veículos automóveis. Trabalha com uma alimentação de 3,3 V e é capaz de operar com taxas de transferência até 1 Mbit/s.

EEPROM

O microcontrolador incorporado no *chipKIT* não tem capacidade de guardar dados de forma não volátil. Caso seja necessário guardar valores de parâmetros de configuração tem de ser implementada uma memória não volátil, sendo o mais adequado para este caso, uma EEPROM com comunicação compatível com o microcontrolador. Uma memória que utilize um barramento paralelo, apesar de ser mais rápida, ocuparia muitas portas do microcontrolador e a principal vantagem que é o tempo de leitura dos dados, não é um requisito necessário. Desta forma optou-se por uma memória cujo interface é por SPI, tal como o módulo de condicionamento do sinal de temperatura dos termopares, MAX31855K. A EEPROM seleccionada é uma *Microchip*[®] 25AA640 com 64 kbit de memória e admite uma tensão de alimentação de 3,3 V. Dado que já estamos a utilizar o barramento SPI apenas é necessário acrescentar uma linha digital para o *Chip Select* da EEPROM.

4.3. Saídas de potência

A montagem experimental utilizada tem dois componentes a atuar, sendo a bomba e a electroválvula de *bypass*. O principal atuador do sistema é a bomba do fluido de trabalho, pois permite-nos controlar o caudal de fluido de trabalho e consequentemente a sua temperatura. Desta forma tem de se garantir que o circuito de trabalho seja fiável e com uma boa resposta.

Devido à electroválvula ser um atuador que não necessita de um controlo proporcional e apresentar uma menor complexidade para o seu circuito de controlo, este não será abordado num subcapítulo. Optou-se também por seleccionar um interruptor de potência inteligente (SPS - smart power switches, na literatura Inglesa) tal como o utilizado para a bomba, contudo tem uma corrente nominal de apenas 7 A e uma corrente máxima de 21 A.

4.3.1. Teste do circuito de controlo da bomba do fluido de trabalho

Para o controlo da bomba foram seleccionados, para testes, dois interruptores de potência inteligentes da *Infineon*, um BTS441R e um BTS50080TMB. A capacidade de corrente nominal do BTS50080TMB é 9,5 A, valor próximo do requerido pela bomba em vazio que é de 6 A, e uma corrente limite de 90 A. O BTS441R apresenta um valor mais elevado de corrente nominal (21 A) e o máximo de corrente do BTS441R é de 65 A. O valor da corrente de pico da bomba é de 28 A, que se situa abaixo do valor máximo de ambos os *Smart Power Switches*.

Ambos os SPS apenas utilizam um pino para ativação, necessitando este apenas de uma linha digital, o BTS500 é ativo com a entrada a '0' e o BTS441R necessita de nível lógico '1'.

Previamente, para garantir que a corrente de limitação dos *Smart Power Switches* é inferior ao valor da corrente máxima no circuito da bomba do fluido de trabalho, no caso de um curto-circuito aos terminais desta, mediu-se a resistência dos fios de alimentação da bomba. A resistência de cada fio é cerca de 0,045 Ω , a que corresponde uma corrente superior a 100 A, valor superior ao da corrente de curto-circuito de ambos os SPS.

Numa primeira fase foram realizados testes com uma lâmpada de médios/máximos para verificar a capacidade de dissipação de cada transístor de potência e a capacidade de trabalho em modo PWM. A corrente nominal da lâmpada com médios e máximos em

paralelo era de 15 A, sendo superior à corrente de funcionamento da bomba do fluido de trabalho. O dissipador utilizado em ambos os circuitos integrados foi o mesmo.

Efetuar-se 5 testes diferentes. Dois dos testes com corrente contínua (DC - direct current, na literatura inglesa), respectivamente com e sem dissipador. E três testes foram efetuados com o *Smart Power Switches* em modo PWM com frequências de 122 Hz e 490 Hz e uma largura de pulso de 50 %, sendo 2 dos testes com dissipador e 1 sem dissipador. Com um osciloscópio *Fluke 124* obteve-se os gráficos de resposta dos SPS e do sinal de comando do microcontrolador. Os gráficos de resposta são medidos à saída do SPS, que nos mostra qual o valor da tensão a alimentar a carga, neste caso a lâmpada.

BTS500

A Figura 4.4 permite observar a variação da temperatura do BTS500 para os 5 testes efetuados, cada teste com uma duração máxima de 400 s. Nos testes em que o circuito integrado não está a trabalhar em modo de PWM, as temperaturas de trabalho são aceitáveis. Todavia, sem dissipador em DC a temperatura aproxima-se de 80 °C, não estando estabilizada aos 400 s. Com dissipador em DC a temperatura estabiliza a cerca de 42 °C, operando em PWM a uma frequência de 122 Hz este valor irá subir para 53 °C. Caso a frequência do PWM seja 490 Hz, o *Smart Power Switch* não tem capacidade de resposta e fica a trabalhar em regime transiente, não sendo possível concluir o teste. Desta forma irá ocorrer um aquecimento do mesmo, chegando a entrar em modo de segurança aos 98 °C.

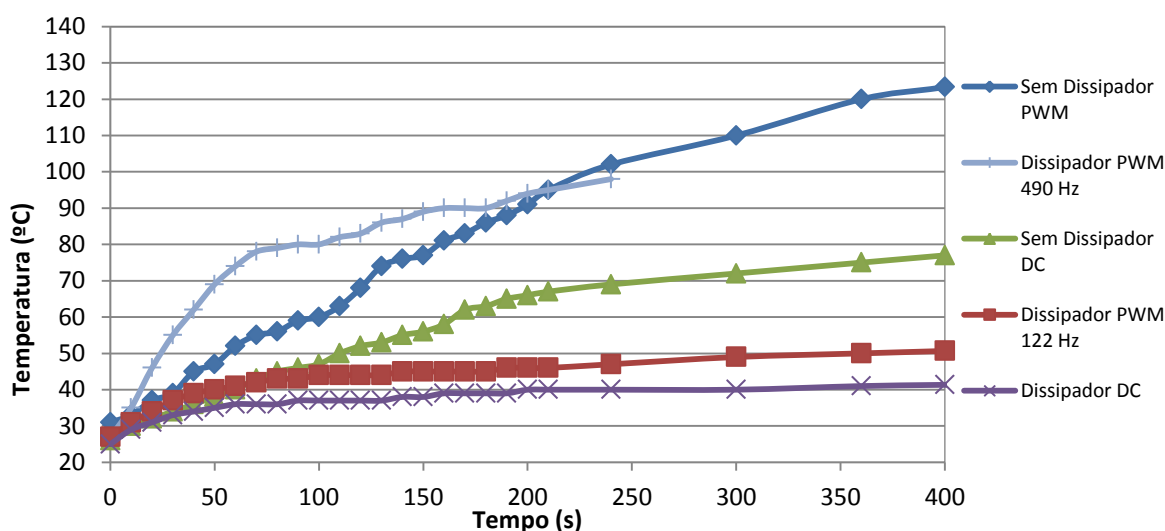


Figura 4.4 - Evolução da temperatura do *Smart Power Switch* BTS500 com o tempo para os diferentes testes efetuados - DC e PWM.

A Figura 4.5 mostra os gráficos da tensão de controlo e tensão medida aos terminais da lâmpada, com o SPS BTS500 a funcionar em modo de PWM a uma frequência de 490 Hz. O sinal de entrada no *power switch* é indicado a vermelho e o sinal de resposta a azul, quando o valor do sinal de entrada está a “0”, a saída é ativa e quando está a “1” é interrompida.

Verifica-se que ocorre algum atraso até a tensão estar completamente à saturação, este período é um regime transiente que vai fazer com que o SPS aqueça mais devido à queda de tensão neste, como se verificou na Figura 4.4. O *duty-cycle* utilizado no módulo PWM é de 50 %, mas com os tempos de transição tanto no corte como na saturação verifica-se que o mesmo não acontece e acaba por ter um valor médio superior aos 50 % desejados. Ao atingir os 98 °C o transistor fica a operar como demonstrado no gráfico inferior da Figura 4.5, não chega a atingir a saturação e apenas trabalha em regime transiente. Assim o funcionamento fica comprometido, sendo que o mesmo nem arrefece nem trabalha à saturação. A proteção em função da temperatura, segundo o *datasheet*, é apenas ativa aos 150 °C, pelo que esta situação ocorrerá devido à função de deteção de curto-circuito. O BTS500 admite uma queda de tensão máxima entre a tensão de alimentação e a tensão de saída de 2,5 a 4,5 V, sendo este valor afetado pela temperatura do mesmo. Assim, quando o BTS500 atinge a temperatura de 98 °C, a queda de tensão devida ao regime transiente faz ativar a proteção do curto-circuito.

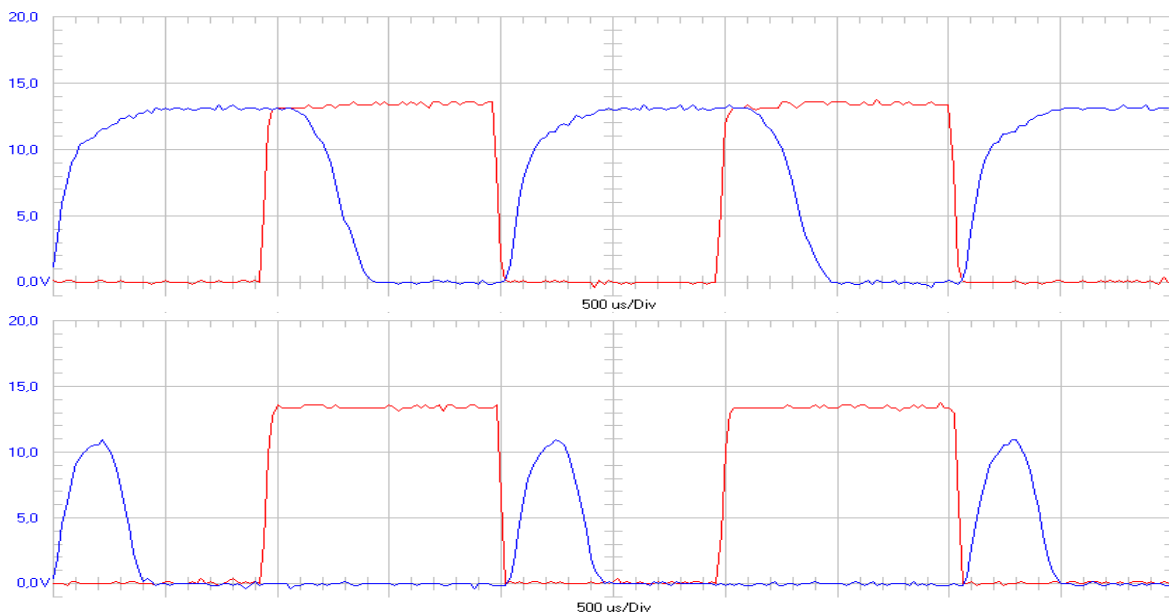


Figura 4.5 - Gráficos da tensão de controlo e resposta (V) do circuito integrado BTS500 a uma frequência de 490 Hz. Superior - resposta em regime normal; Inferior - resposta após atingir 98 °C.

Com uma frequência de 122 Hz, o funcionamento do BTS500 é mais viável. Os períodos transientes são menores e o SPS não aquece tanto. Contudo continua a uma temperatura mais elevada que o funcionamento em contínuo, dado que as comutações são o que dissipa mais potência. Na Figura 4.6 mostra-se os gráficos da tensão de controlo e tensão medida aos terminais da lâmpada, com o modo de PWM a funcionar a uma frequência de 122 Hz. Pode-se notar ainda um atraso no tempo de saturação e corte do *power switch*, mesmo com uma frequência mais baixa. Contudo, temos um *duty-cycle* mais próximo dos 50 %, contrariamente ao que ocorria a frequências mais elevadas.

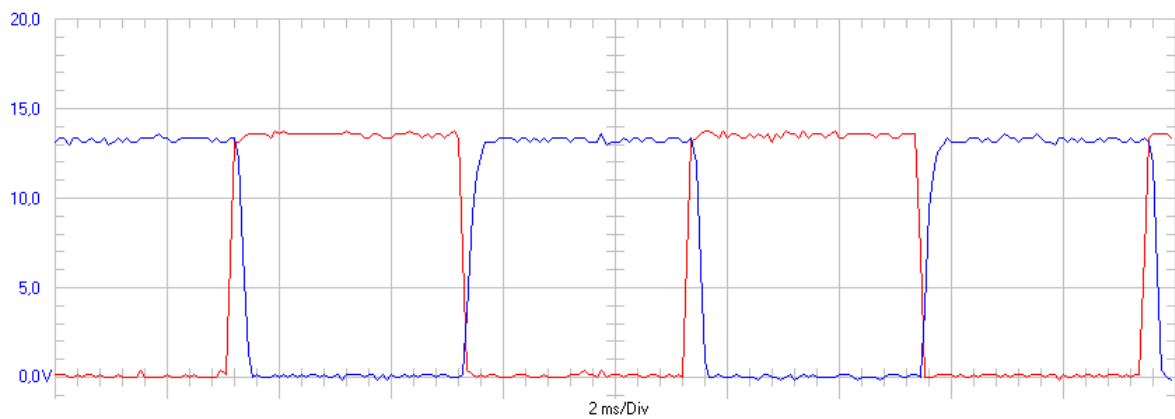


Figura 4.6 - Gráfico de resposta (V) do circuito integrado BTS500 a uma frequência de 122 Hz.

BTS441R

O BTS441R tem um tempo de resposta mais rápido e consegue temperaturas mais baixas, desde que utilizado em conjunto com um dissipador. Na Figura 4.7 pode-se verificar a diferença de temperaturas com e sem dissipador.

Este *Smart power switch* sem dissipador atinge temperaturas muito elevadas, chegando a entrar em modo de segurança e passando a funcionar intermitentemente antes do fim dos testes, a cerca de 135 °C. Contudo com dissipador consegue manter temperaturas bastante mais baixas que o SPS BTS500. Mesmo a uma frequência de 490 Hz - teste com dissipador - não se verificou um aumento significativo de temperatura relativamente ao teste em modo contínuo no BTS441R, o que não se verificava com o BTS500.

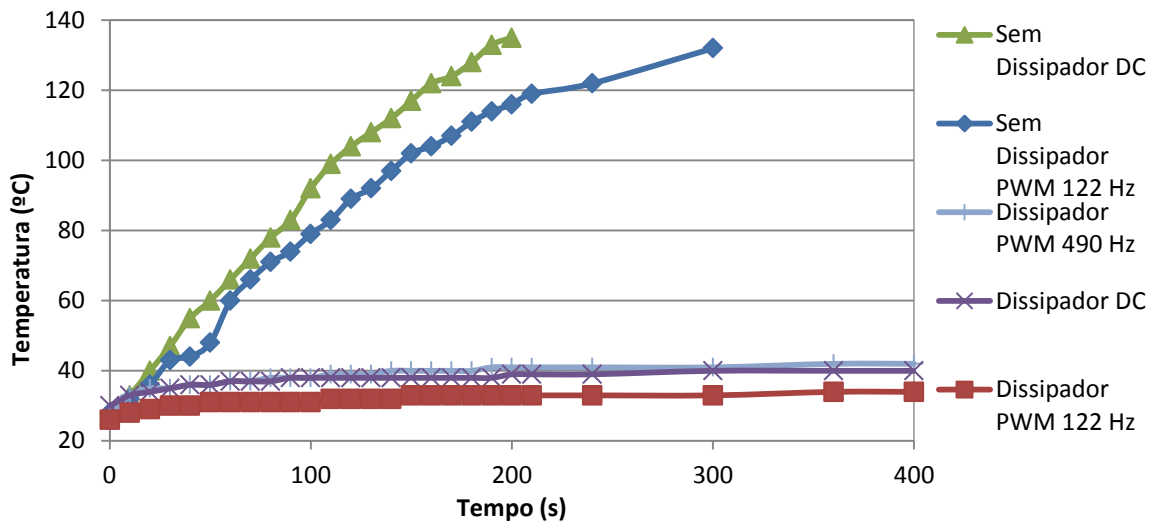


Figura 4.7 - Evolução da temperatura do circuito integrado BTS441R com o tempo para os diferentes testes efetuados - DC e PWM..

A trabalhar a uma frequência de 122 Hz, este *Smart power switch* tem bastante eficiência, pois a temperatura é menor que o teste em contínuo. Isto deve-se ao SPS conseguir compensar as perdas de transição nos momentos em que está desligado. A Figura 4.8 mostra a resposta do BTS441R para as duas frequências referidas e pode-se observar a diferença dos períodos de transição.

Tal como anteriormente referido, o sinal de entrada no *power switch* é indicado a vermelho e o sinal de resposta a azul. A onda vermelha é sempre quadrada pois é o sinal que sai do microcontrolador, contudo a resposta do *Smart power switch* não, como se pode visualizar. Com o aumento da frequência, há um aumento do tempo de transição, o que faz com que ocorra aquecimento. Contudo com uma frequência de 490 Hz, o BTS441R demonstrou um tempo de transição muito menor que o BTS500 e dessa forma o aquecimento é inferior.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a melhor opção para a interface de potência da bomba do fluido de trabalho é utilizar o BTS441R.

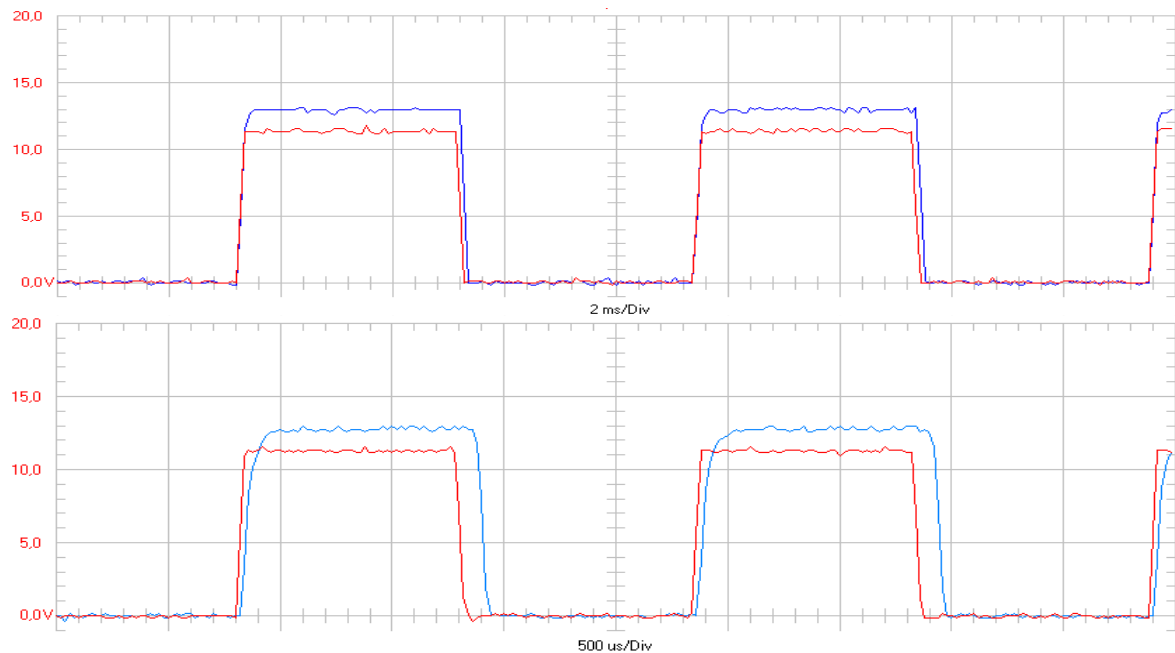


Figura 4.8 - Comparação da resposta do BTS441R consoante a frequência (2 ms/Div. - 122 Hz; 500us/Div. - 490 Hz).

Teste da resposta da bomba em função do *duty-cycle*

Efetuarão-se testes em PWM para verificar se esta permitiria controlar a bomba em malha aberta sem a necessidade de um controlo proporcional. Verificou-se também a temperatura do circuito integrado, após mais de 1 hora de testes esta não passou os 35 °C. Na Figura 4.9 apresenta-se o caudal da bomba do fluido de trabalho em função do *duty-cycle* aplicado. De modo a se observar a bomba se comportava de forma linear e sem histerese efetuaram-se testes a começar com um *duty-cycle* de 0 % até 100 % e a diminuir até 0 %, com uma frequência de 490 Hz. Incrementou-se o *duty-cycle* em degraus de 5 % e deixou-se estabilizar o caudal durante 20 s. Com o *software* LabView que se encontrava integrado na montagem experimental mediu-se o caudal e a pressão do fluido de trabalho. O teste foi efetuado para as seguintes pressões de trabalho: 500 kPa - pressão de trabalho requerida para o sistema - e 150 kPa, que se regularam através da válvula que simula o expansor. De modo a restringir o caudal foi utilizada uma torneira após a bomba do fluido de trabalho, que funciona em série com o circuito da montagem experimental, representado na Figura 3.1.

A Figura 4.9 permite observar que o sistema não se comporta da mesma forma com o caudal a aumentar e a diminuir. O valor de diferença atinge um valor máximo, erro superior a 100 % com a pressão de 500 kPa e um *duty-cycle* de 35 %, sendo que podemos concluir que o sistema tem histerese. Assim conclui-se que não é adequado efetuar um

controlo do caudal em malha aberta pela afinação unicamente do *duty-cycle* aplicado. A melhor solução consiste em utilizar um controlo do tipo PI ou PID, em que o *duty-cycle* será constantemente ajustado de modo a manter o valor do caudal pretendido.

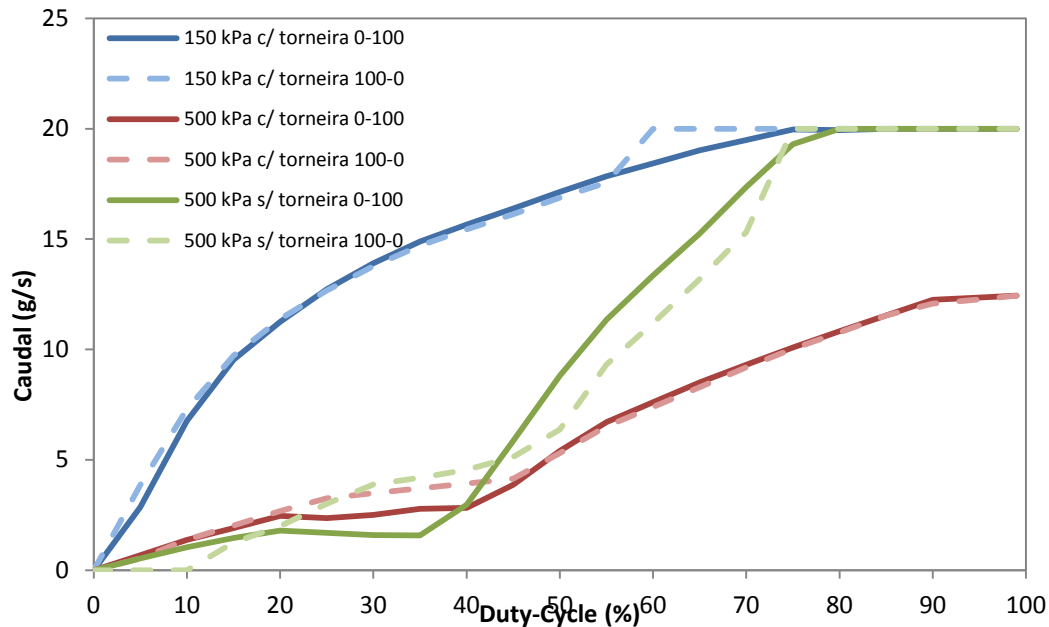


Figura 4.9 - Gráfico de caudal da bomba em função do *duty-cycle* aplicado.

4.4. Construção da placa de circuito impresso

Dada a complexidade do circuito a realizar e da utilização do microcontrolador PIC32MX795F512L e componentes associados de reduzidas dimensões, optou-se por manter o sistema embebido chipKIT e desenvolver uma placa de extensão (*shield* na literatura inglesa) com toda a eletrónica de instrumentação e de potência necessária. Não é viável a realização de uma placa com o microcontrolador incorporado na fase inicial do projeto, pois pretende-se uma prototipagem mais rápida para o caso de ser necessário corrigir erros efetuados durante o desenvolvimento ou mudar componentes.

Um *shield* é uma placa de circuito impresso feita de forma a encaixar na placa principal, normalmente a que contém o microcontrolador. O *shield* é construído de forma a ser possível encaixar vários *shield*, uns por cima dos outros. Alguns podem não ser compatíveis, caso utilizem linhas digitais ou analógicas que tenham de ser únicas, por

exemplo um pino de leitura ADC. Dado isto, terão de ser definidos os pinos a serem utilizados, para que não haja conflitos com as placas a utilizar. Neste caso apenas são utilizadas duas placas de expansão - condicionamento de sinal e atuadores - e o *chipKIT* é dotado de bastantes portos, pelo que selecionado primeiramente os pinos mais específicos será de fácil gestão.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os pinos no *chipKIT* MAX32 utilizados para a comunicação com os diferentes módulos e aquisição de dados dos sensores. Os pinos lógicos como o *Chip Select* ou o endereçamento do *multiplexer*, podem ser utilizados em quaisquer pinos do microcontrolador, desde que este permita um sinal de saída. A interrupção para leitura do caudal de fluido de trabalho, o módulo SPI e o módulo CAN apenas têm a possibilidade de trabalhar em certos pinos, pelo que se optou por selecionar estes previamente. Para reduzir o número de conectores e facilitar o desenho da placa de circuito impresso, selecionou-se os restantes pinos digitais em conectores que já teriam alguns pinos a ser utilizados.

Tabela 4.2 - Pinos utilizados para comunicação com os CI, sensores e *Smart Power Switches* no *chipKIT* MAX32.

Função	Pinos
Leitura lambda	14 e 15 (CAN 1)
Pressão do fluido	A1
Caudal mássico de fluido	3 (INT0)
Sensor de massa de ar	A3
SPI	29, 43, 52 (SPI2)
Termopar (CS)	53
Endereços Multiplexer	74,75,76, 77
EEPROM (CS)	72
Bomba	5 (PWM)
Bypass do Expansor (electroválvula)	6

4.4.1. Dimensionamento do circuito elétrico

Dado que os circuitos integrados (CI) utilizados são bastante completos com grande parte da instrumentação interna e funcionam maioritariamente à base de sinais digitais, não é necessário um dimensionamento muito complexo a nível eletrónico. Os CI normalmente incluem nas características técnicas (*datasheet*, na literatura Inglesa) montagens e valores típicos para condições normais de operação.

O importante acima de tudo é garantir que a corrente não excede os 18 mA nos pinos de entrada/saída do microcontrolador e a tensão não é superior a 3,3 V. Com o amplificador operacional referido na secção 4.2.2, a tensão utilizada para toda a instrumentação será o valor de saída máximo devido a este ter a característica *rail-to-rail*, isto é, mesmo que na entrada a tensão seja superior à tensão de alimentação, a saída do amplificador não excederá este valor. Adicionalmente a corrente de entrada no mesmo será bastante baixa, praticamente nula, devido à utilização do amplificador operacional, com uma muito elevada impedância de entrada. Na Figura 4.1 pode-se observar o circuito elétrico utilizado.

O circuito integrado *Microchip*[®] MCP604 contém quatro amplificadores operacionais, sendo que todos estão ligados para implementar a função de amplificador de ganho unitário (*buffer*). Tem-se duas entradas analógicas para tensão de entrada máxima de 5 V com resistências de 3300 Ohm e 1600 Ohm, o que segundo o divisor de tensão apresentado na Figura 4.3 se traduz numa tensão máxima de 3,37 V - este valor máximo nunca será atingido pelo sensor de caudal mássico instalado no veículo - contudo pode-se trocar as resistências para alterar o divisor de tensão. As duas entradas para medir o sensor de pressão, com saída em corrente apenas utilizam uma resistência de 165 Ohm, conforme explicado em 4.2.2.

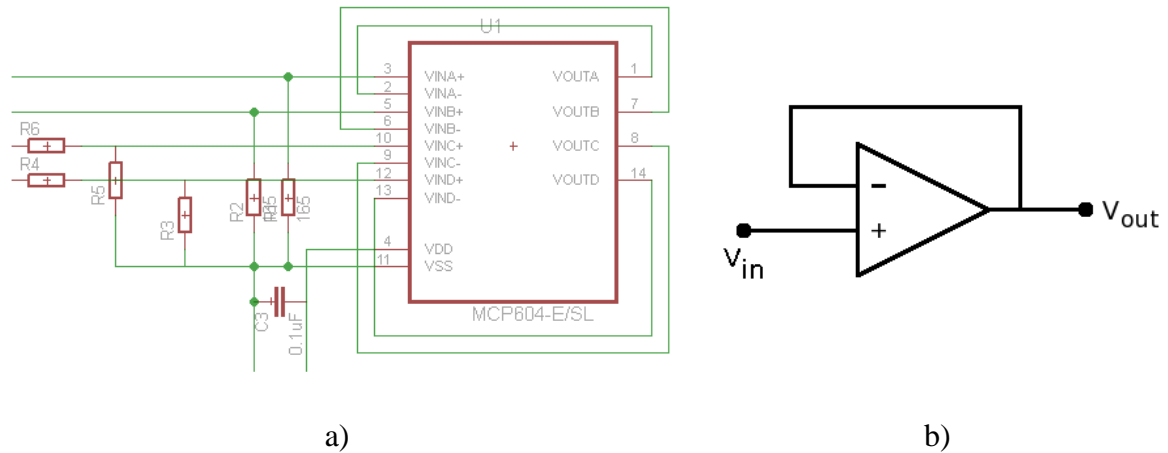


Figura 4.10 - Adaptação de impedâncias das entradas analógicas: a) Circuito do amplificador operacional e b) exemplo de um *buffer*.

Para a leitura dos termopares foi projetado o circuito conforme demonstrado na Figura 4.2 e explicado na secção 4.2.1.

Dado que se escolheu um microcontrolador com CAN, apenas é necessário um CAN *transceiver* para este ficar comunicável. Como é normal, e referido no *datasheet*, o circuito integrado necessita de uma resistência de 120 Ohm entre os pinos CANH e CANL conforme se pode observar na Figura 4.11. Para além disto, é ainda necessário conectar a alimentação, sem esquecer o típico condensador de desacoplagem e os pinos para comunicação ao microcontrolador D e R.

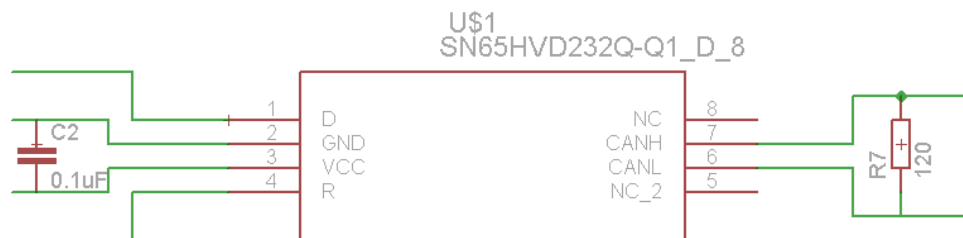


Figura 4.11 - Conexões do circuito elétrico do *transceiver* CAN.

O circuito de atuadores é uma placa de extensão que encaixa no topo da placa de condicionamento de sensores e contém os *Smart power switches* para controlar os atuadores. Na Figura 4.12 pode-se verificar as ligações e componentes necessários para o circuito elétrico dos atuadores ficar operacional. Embora os *Smart power switches* (BTS441R - bomba do fluido de trabalho e BTS133 - electroválvula de bypass do expensor) trabalhem com sinais digitais na entrada, optou-se por colocar um optoisolador para garantir a proteção do microcontrolador e isolamento das tensões de potência (12 V e

24 V) e da tensão de instrumentação e processamento (3,3 V). Este circuito integrado, representado como U3 no esquemático, faz com que não haja qualquer ligação elétrica entre o sinal enviado pelo microcontrolador e o recebido pelo *Smart power switch*. É um LED infravermelho que, no interior do circuito integrado *Avago ACPL-227* ativa um transistor fotossensível. As resistências (R1 e R8 - 100 Ohm) foram dimensionadas de forma a garantir uma corrente de 20 mA nos LEDs, dado que estes têm uma queda de tensão típica de 1,2 V, (Avago Technologies, 2010).

Ambos os *Smart power switch* têm uma gama de tensão de entrada bastante ampla, pelo que se optou por colocar um *pull down* por SPS de 10k Ohm (R2 e R3) e a resistência de sinal do BTS441R 3k Ohm (R4) e do BTS133 1650 Ohm foram dimensionadas de forma a respeitar o limite de 2 mA da corrente de entrada. É de salientar também o facto de o BTS441R necessitar de uma resistência na ligação à massa de 150 Ohm (R6), para proteção de sobre voltagem acima dos 47 V dado que tem um diodo *zener* interno com este valor. É necessária também a utilização de um diodo protetor de tensão inversa (D1), sem este diodo, aquando o desacoplamento da bomba do fluido de trabalho (carga indutiva) poderiam se atingir tensões inversas superiores a 30 V, o que poderia causar danos no circuito, (Infineon, 2009).

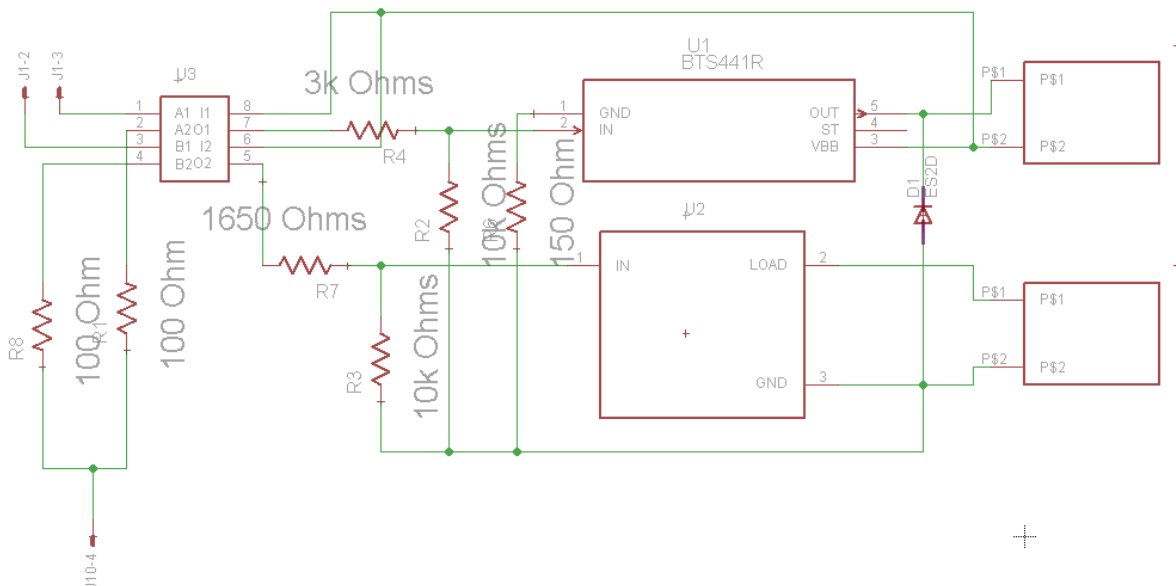


Figura 4.12 - Circuito elétrico da placa de atuadores.

4.4.2. Projeto da placa de circuito impresso

Para construir uma placa de circuito impresso, é necessário um dimensionamento prévio e o seu desenho com recurso a um *software* CAD (Computer Aided Design, na literatura Inglesa) específico para realização de esquemáticos elétricos, *footprints* (CAD físico) de circuitos integrados e posterior desenho da placa de circuito impresso. Existem vários *software* de projeto e desenho de PCB à escolha, desde bastante complexos para utilização industrial até alguns direcionados para estudantes. Devido à experiência prévia e à disponibilidade em *freeware*, optou-se pela utilização do *software* Eagle.

Este *software*, embora bastante simples permite ao utilizador uma liberdade bastante apreciável. Tem funções como desenho automático das rotas das pistas e cálculo de correntes máximas admissíveis, contudo em termos de biblioteca de circuitos integrados disponível com o *software* não é muito completo, pelo que certos CI a utilizar é necessário o completo desenho da sua *footprint*, e esquemático de representação para as ligações elétricas.

Após se desenhar os circuitos integrados que o programa não dispunha, construíram-se as ligações elétricas e procedeu-se ao desenho das placas. Dado que estas são construídas nos laboratórios da ESTG-IPLeia, há algumas limitações no processo de fabrico que são necessárias ter em conta. Na Tabela 4.3 pode-se confirmar estes valores. Embora estes valores não sejam muito restritivos, é necessário ter em conta aquando do desenho de placas pequenas ou complexas.

Tabela 4.3 - Limitações de dimensão na prototipagem de PCB's

Variável	Valor (mm)
Largura mínima para as pistas	0,3
Distância mínima entre ligações elétricas	0,3
Diâmetro mínimo de furo	0,6
Diâmetro interno da via	0,6 - 0,7
Diâmetro externo da via	1,5 - 2,0

Dado isto procedeu-se então à conclusão do projeto da PCB de sensores, como o resultado final como se pode ver na Figura 4.13. As linhas de sinal a castanho são implementadas na face superior da PCB, enquanto as linhas azuis serão fabricadas na face inferior. Os circuitos integrados foram colocados na face interior com a orientação mais conveniente para ligação aos conectores. Pode-se verificar nas laterais, a verde, os pinos usados para comunicação com o *chipKIT*, que também serão condutores para a placa de controlo dos atuadores que se apresenta na Figura 4.14.

A metodologia utilizada para o projeto da placa de atuadores foi a mesma que para a placa dos sensores, contudo teve-se em consideração o facto da intensidade de corrente ser muito mais elevada. Enquanto nos sensores a corrente é da ordem dos mA, os atuadores necessitam de vários Amperes. A bomba consome cerca de 7 A, pelo que as pistas de alimentação da mesma têm de estar preparadas para isso, para o cálculo da corrente admissível utilizou-se o módulo integrado no *software Eagle*. Pode-se também verificar a utilização de planos de massa e de potência, sendo neste caso específico utilizados para a dissipação de calor. A placa construída tem furos para a aplicação de dissipadores, mas com os planos e o facto da bomba do fluido de trabalho não consumir tanta corrente quanto a lâmpada, verificou-se que estes são dispensáveis.

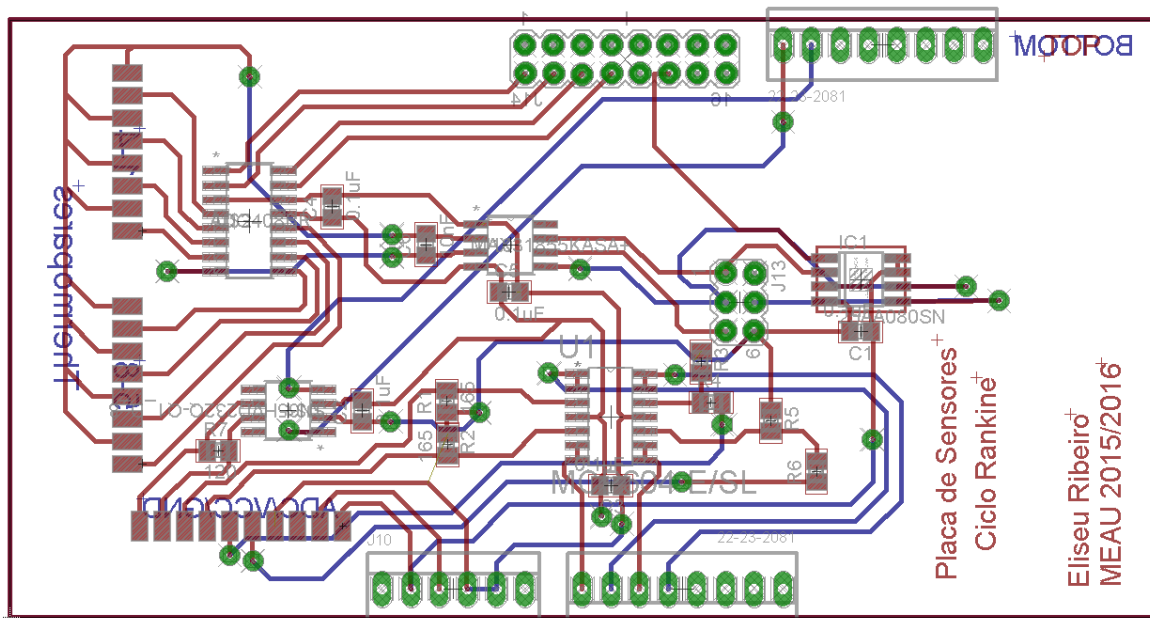


Figura 4.13 - Placa de circuito impresso dos sensores elaborada no *software* EAGLE

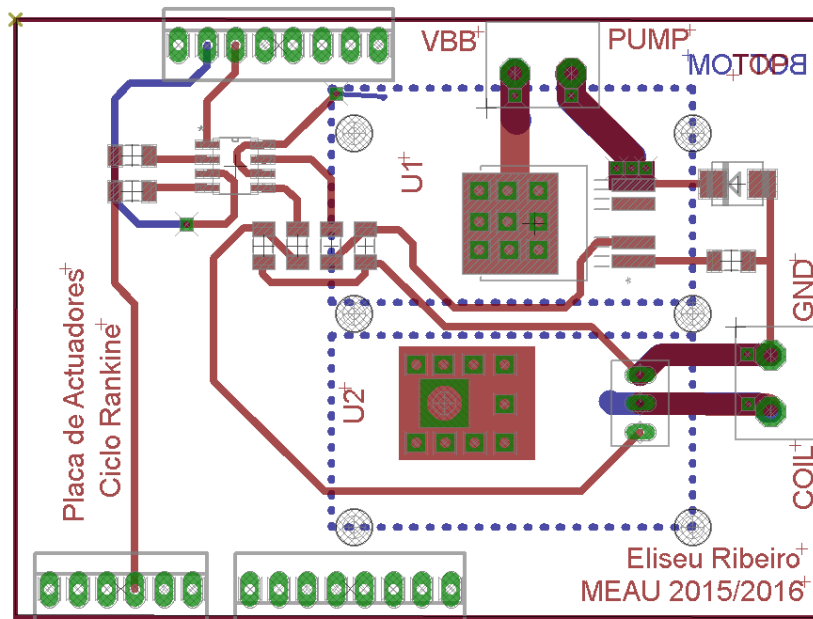
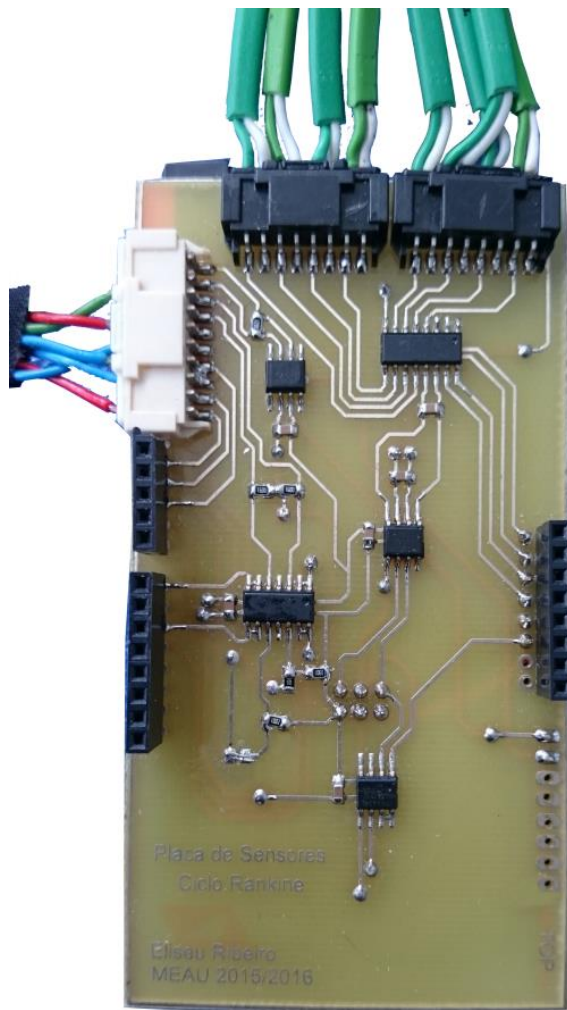
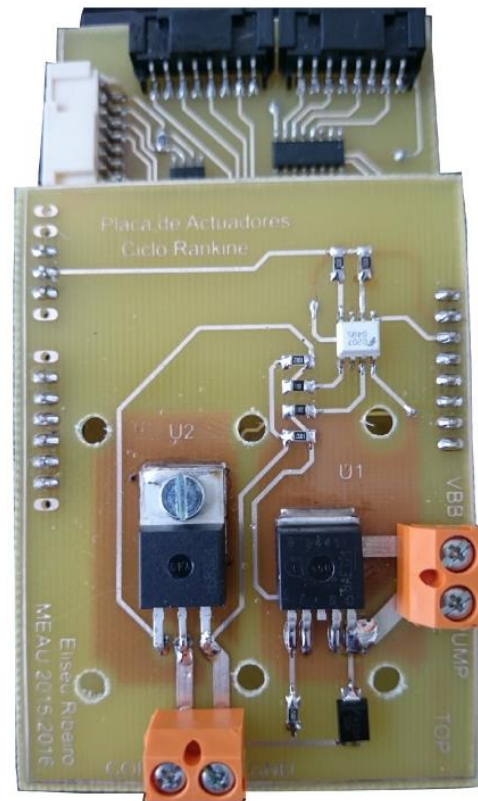


Figura 4.14 - Placa de circuito impresso dos atuadores elaborada no software EAGLE

As placas foram fabricadas nas instalações da ESTG - IPEleiria e o resultado final com os conectores e componentes pode ser visto na Figura 4.15. Pode-se visualizar os circuitos integrados e conectores na sua disposição final, conforme efetuado no *software Eagle*. Para a placa de sensores utilizaram-se conectores *Molex SMD* com uma distância entre pinos de 2 mm, sendo dois (de cor preta) utilizados para implementar as ligações aos termopares e um (de cor branca) utilizado para alimentação, linha CAN e restantes sensores. Os restantes terminais de ligação são genéricos para *shields*, no entanto são ainda utilizados dois conectores (de cor laranja) com aperto por parafuso com maior capacidade de corrente, para o circuito de potência na placa de atuadores.



a)



b)

Figura 4.15 - Placas de circuito impresso finalizadas: a)placa de sensores e b) placa de atuadores.

5. Desenvolvimento do *software* de controlo e interface de comunicação

Neste capítulo será apresentado a base teórica que permite quantificar a potência térmica introduzida no sistema, necessária para o cálculo e controlo do caudal de fluido de trabalho. É também apresentado o *software* de controlo desenvolvido e a interface de comunicação desenvolvida. (*Rankine Cycle Controller*), esta tem em vista o facilitar da visualização e afinação em tempo real dos parâmetros envolvidos no controlo.

5.1. Monitorização do sistema

Se o motor de um automóvel não fosse um sistema com diversos pontos de funcionamento e que estão constantemente em mudança, o controlo do ciclo de Rankine poderia ser realizado apenas com base na temperatura objetivo do fluido de trabalho. Contudo, em condições reais de utilização do veículo, as condições de trabalho variam significativamente e assim a potência térmica contida nos gases de escape. Desta forma o sistema de controlo terá de monitorizar e calcular a potência térmica nos gases de escape. Esta potência é transferida dos gases de escape para o fluido de trabalho através de um permutador de calor (evaporador). Numa primeira iteração considera-se uma eficiência de 100 %. De seguida o sistema terá de controlar o caudal mássico de fluido de trabalho no circuito de modo a garantir a temperatura do fluido de trabalho pretendida à saída do evaporador.

A potência térmica disponível nos gases de escape (\dot{Q}_g) é calculada através da equação (5.1), obtida através do caudal mássico de gases de escape (\dot{m}_g), do calor específico (c_{pg}) e das temperaturas dos gases de escape à entrada ($T_{g,in}$) e à saída do evaporador ($T_{g,out}$).

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot c_{pg} \cdot (T_{g,in} - T_{g,out}) \quad (5.1)$$

A temperatura dos gases de escape é medida diretamente através de sensores de temperatura (termopares). O caudal mássico dos gases de escape é calculado através da equação (5.2), sendo necessário medir o caudal mássico de ar admitido (\dot{m}_a), através do sensor MAF e o valor de lambda através do sensor lambda (λ).

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \frac{\dot{m}_a}{14.7 \cdot \lambda} \quad (5.2)$$

O calor específico é calculado em função da temperatura dos gases de escape ($T_{g,m}$) de acordo com a seguinte equação, (Domingues *et al.* 2013).

$$c_{pg} = 956 + 0.3386 \cdot T_{g,m} - 2.476 \times 10^{-5} \cdot T_{g,m}^2, \quad T_{g,m}(\text{K}) \quad (5.3)$$

De forma a simplificar o algoritmo de controlo, serão introduzidas tabelas de entalpia da água e será admitido o valor correspondente à temperatura da mesma com interpolações. A fórmula final de cálculo é a apresentada na equação seguinte

$$\dot{Q}_{wf} = \dot{m}_{wf} \cdot (h_{wf,out} - h_{wf,in}) \quad (5.4)$$

Considerando o valor de potência absorvida pelo fluido de trabalho igual à potência extraída dos gases de escape (eficiência de permutador de calor = 100 %), pode-se obter o valor do caudal mássico de fluido de trabalho através da seguinte equação.

$$\dot{m}_{wf} = \frac{\dot{m}_g \cdot c_p \cdot (T_{g,in} - T_{g,out})}{h_{wf,in} - h_{wf,out}} \quad (5.5)$$

Com o valor do caudal de fluido de trabalho pode-se utilizar o controlo PID para ajustar a saída do PWM para a bomba e assim ficar com um controlo eficaz em malha fechada. Nos casos em que a inércia térmica tem efeito sobre o sistema poderão ocorrer desvios do caudal mássico necessário, mas serão corrigidos pelo algoritmo de controlo.

5.2. Ambiente de programação

O *chipKIT* dispõe de um *software* próprio que permite a programação do microcontrolador e comunicação deste com o computador via porta série (MPIDE). Esta forma de comunicação, utiliza um conjunto de caracteres em código ASCII, não sendo muito prática nem de fácil visualização para o utilizador. Assim, optou-se por desenvolver uma aplicação gráfica dedicada, para permitir um melhor ajuste de parâmetros e ter uma interface mais fácil para o utilizador.

A escolha do *software* para a execução da aplicação gráfica recaía sobre duas possibilidades: o *LABView* da *National Instruments* ou o *Microsoft Visual Studio*. O *LABView* é mais direcionado para aplicações em que necessitamos de tratar uma grande quantidade de variáveis, especialmente entradas analógicas (tensão) ou mesmo saídas. O *LabView* é uma mais-valia quando em conjunto com placas de aquisição de dados da *National Instruments*. A montagem experimental já dispõe de uma aplicação *LabView* com estas placas, contudo estão dependentes de um computador. Embora nos permita ter um interface gráfico, é um pouco primitivo relativamente ao *Visual Studio*. Como o objetivo desta aplicação, é transmitir ao utilizador os dados de forma mais simples, sendo estes obtidos exclusivamente pela comunicação USB entre o computador e *chipKIT*, optou-se pela utilização do *Visual Studio*.

5.3. Algoritmo de controlo embestado

O algoritmo de controlo embestado (implementado no microcontrolador) desenvolvido e utilizado para controlar o sistema de ciclo de Rankine, consiste em 3 partes principais: i) a leitura e condicionamento de sinal; ii) o cálculo do ponto de operação desejado e, por fim, iii) o controlo da bomba do fluido de trabalho.

Como foi sendo explicado, existem vários tipos de sensores, sendo que se utilizou o módulo ADC para a leitura do sensor de pressão (cuja saída é em corrente) e o sensor de

caudal mássico de ar, instalado no veículo. O valor de coeficiente de excesso de ar é recebido por comunicação CAN e o caudal mássico de fluido de trabalho é lido através de pulsos cuja medição da frequência determina o caudal mássico. Na Figura 5.1 pode-se observar um fluxograma do algoritmo de controlo. Quando o sistema é iniciado, irá inicializar os módulos SPI e CAN. De seguida são carregados na RAM os valores das constantes PID e a tabela de entalpia guardados na EEPROM, para um acesso mais rápido e fácil. Após a fase de inicialização começa o ciclo principal com a verificação de dados provenientes pela porta série, para verificar se há novas mensagens enviadas pelo *software Rankine Cycle Controller*.

A leitura no módulo ADC dá-nos um valor binário de 0 a 1023, devido a este ser de 10 bits, sendo que o valor máximo (1023) corresponde a uma tensão de 3,3 V ou a uma tensão de referência que poderemos definir caso necessário. Este valor tem de ser convertido para as respetivas unidades do sensor através de uma função de transferência que depende do sensor e da sua gama de saída. Para a leitura do sensor MAF é necessário a utilização de uma tabela que está registada na RAM do microcontrolador e permite-nos obter o caudal mássico de ar, pois a curva característica do mesmo não é linear.

Devido a ser utilizado um único circuito integrado para a aquisição de todos os termopares, apenas se pode ler um de cada vez. Segundo o *datasheet*, o MAX31855K tem um tempo típico de conversão de 70 ms e este valor pode chegar a um máximo de 100 ms, no presente estudo são utilizados 9 termopares, assim, na melhor das hipóteses, cada sensor será atualizado a cada 900 ms o que permite uma taxa de atualização aproximada a 1,1 Hz. A temperatura dos gases de escape é a que terá a taxa de variação mais elevada, caso a taxa de aquisição não seja suficiente, pode-se optar por colocar outro circuito MAX31855K para duplicar a frequência de atualização, (Maxim, 2012).

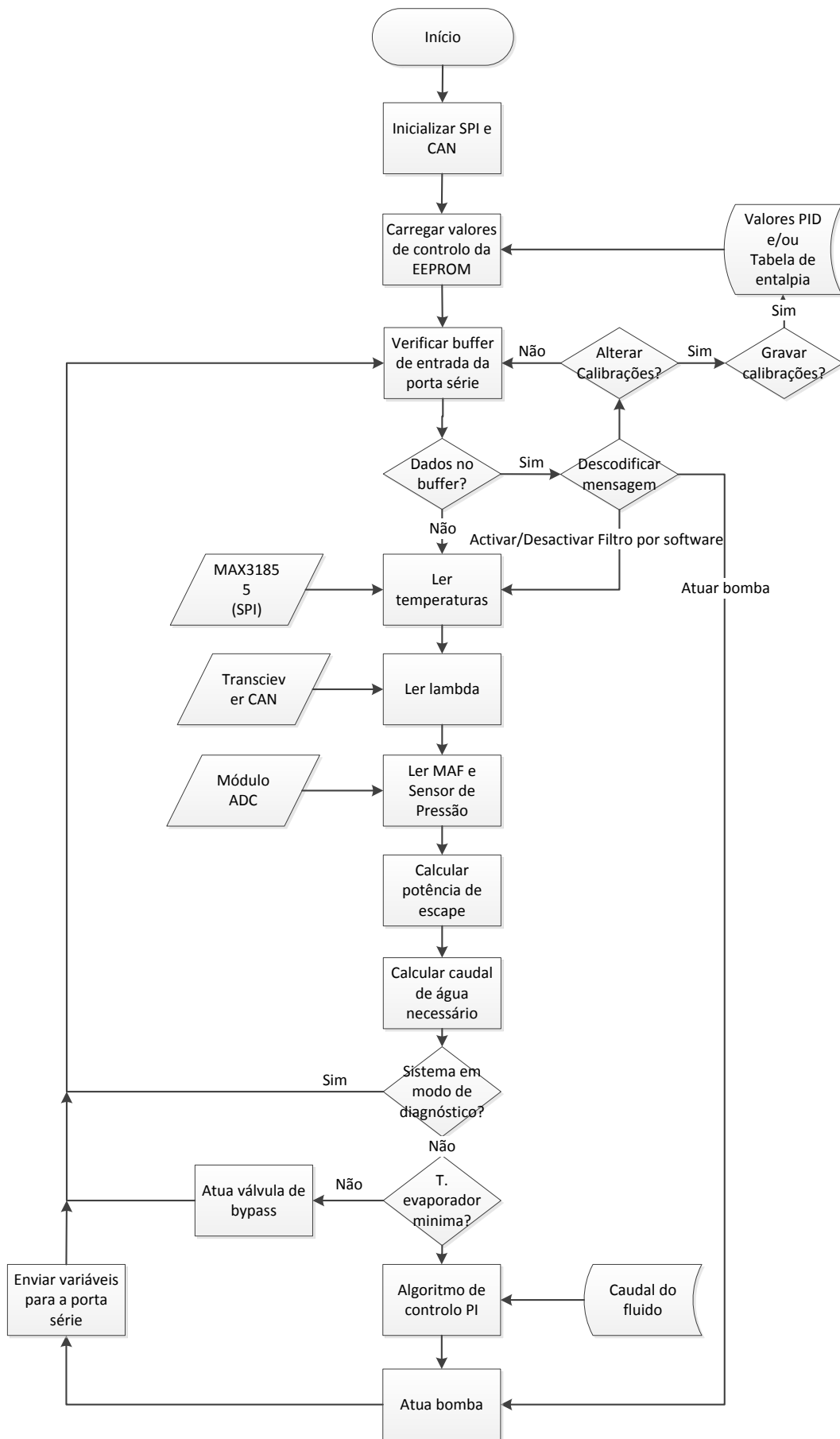


Figura 5.1 - Fluxograma do algoritmo de controlo.

Dado o valor do caudal mássico de fluido de trabalho ser um sinal em frequência, é necessário medir o período entre cada pulso de forma a calcular esta. Na Figura 5.2 pode-se ver a interrupção programada, que ativa cada vez que o valor no pino do microcontrolador é elevado ao valor lógico “1”. De seguida regista-se o valor do *timer* em microssegundos de forma a não perder precisão e quando esta interrupção ocorrer novamente será calculado o período. Assim pode-se saber a frequência, que por sua vez, permite determinar o caudal mássico de fluido de trabalho, dado que por cada 20 Hz tem-se um caudal de um grama de água por segundo.

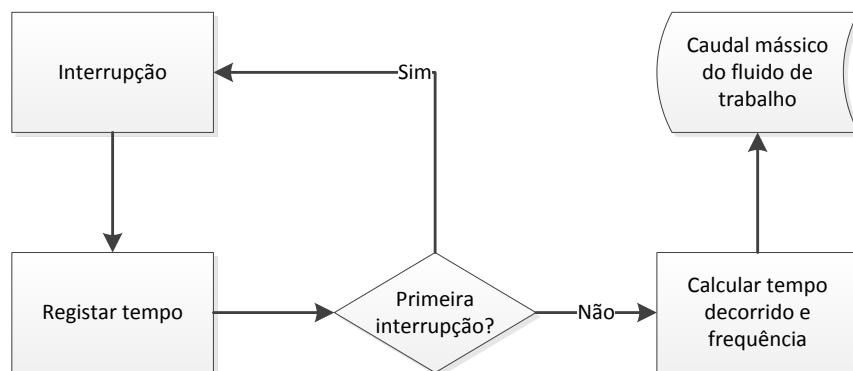


Figura 5.2 - Fluxograma da interrupção gerada pelo sensor do caudal mássico de fluido de trabalho.

O módulo CAN, utilizado para a leitura do valor lambda, é também dotado de uma interrupção. Sempre que o módulo encontra uma nova mensagem na linha CAN, verifica a identificação da mesma e caso esta corresponda ao identificador do módulo de PLM (ID - 101), será gerada a interrupção. Quando isto ocorre, a mensagem será armazenada num *buffer* (até ser recebida nova mensagem) e podemos assim decifrar o valor do coeficiente de excesso de ar da mistura, pois o mesmo é enviado em dois bytes. Para se efetuar a conversão para decimal apenas é necessário juntar concatenar ambos os bytes e dividir o valor por 1000 e obter-se-á o valor do lambda com 3 casas decimais.

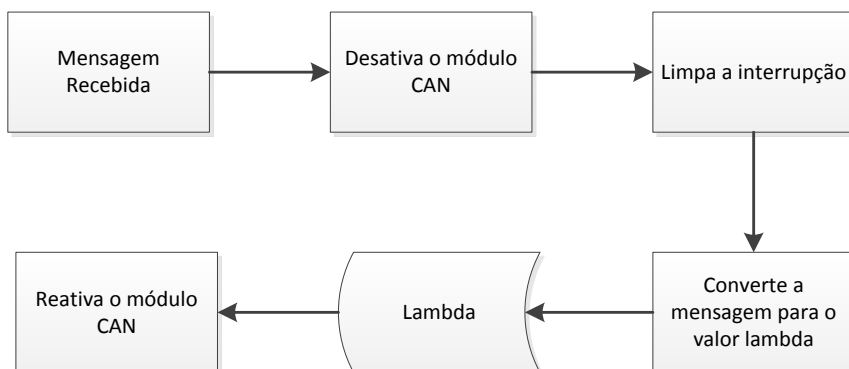


Figura 5.3 - Fluxograma da interrupção gerada pela mensagem CAN.

A porta série é constituída por duas partes, a parte que envia os valores das variáveis para o *software Rankine Cycle Controller* e a que recebe os comandos e ajustes deste. Utilizando a mesma variável que define a atualização dos termopares, tem-se uma atualização a cada 100 ms, o que nos confere uma taxa de atualização das variáveis no *Rankine Cycle Controller* de 10 Hz, valor suficiente para a monitorização do funcionamento do sistema que se pretende implementar com o *software Rankine Cycle Controller*.

O microcontrolador envia uma *string* com os valores adquiridos dos sensores e variáveis de controlo. Na Tabela 5.1 apresenta-se de que forma uma string de exemplo (r,2500,9250,45000,6000,2000,5000,50,700,0,1386,950,760,532,2451,1471,9000,) é repartida para o envio através de porta série. Sem o *software* desenvolvido as variáveis seriam de difícil visualização, ainda que possível devido à utilização da vírgula para separar cada uma das variáveis. Estas são multiplicadas por 100 antes do envio de forma a conservar 2 casas decimais.

Tabela 5.1 - Constituição de um exemplo de *string* enviada pelo microcontrolador via porta série.

Variável	Valor enviado
ID	r
$T_{wf,in}$	2500
$T_{wf,out}$	9250
$T_{g,in}$	45000
$T_{g,out}$	6000
\dot{m}_{wf}	2000
P_{wf}	5000
Kp	50
Ki	700
Kd	0
\dot{m}_a	1386
Λ	950
\dot{Q}_g	760
\dot{Q}_{wf}	532
\dot{m}_{wf} objetivo	2451
\dot{m}_g	1471
$T_{wf,out}$ objetivo	9000

As mensagens recebidas, conjuntos de caracteres enviados pelo *Rankine Cycle Controller* são primariamente identificadas por uma ou duas letras que indicam qual a ação a tomar. O código ativa a função correspondente a cada um dos identificadores, que se pode observar na Tabela 5.2.

O filtro ativo por *software* consiste numa variável que regista a média móvel das variáveis previamente guardadas num vetor, sendo apenas utilizado para as variáveis pressão e caudal de fluido de trabalho e caudal mássico do ar admitido pelo motor. O valor da média é utilizado para o controlo e também enviado para o computador. Desta forma consegue-se suprimir ruído como um filtro eletrónico de forma mais simples e de possível configuração, reduzindo os componentes necessários para o implementar em *hardware*.

Implementou-se o modo de diagnóstico para ser mais simples afinar o controlo PID. É possível controlar a bomba com o caudal e valores de PID desejados sem que seja necessário reprogramar o microcontrolador em tempo real. O valor do caudal desejado é enviado na mesma *string* que altera os valores do PID, esta *string* por exemplo pode ser representada por: (k,100,2000,050,700,0,9000,), sendo que o primeiro número “100” ativa o modo de diagnóstico, o segundo número é o caudal desejado (o modo de diagnóstico só ativa se for pedido um caudal diferente de “0”), os três seguintes valores são os valores do controlo PID e o último número é o valor da temperatura objetivo para o fluido de trabalho. É de salientar o facto de todos os valores estarem multiplicados por 100 como já referido.

Tabela 5.2 - Identificadores de comandos enviados pelo interface gráfico via porta série.

Identificador	Função
fn	Ativa o filtro via <i>software</i>
ff	Desativa o filtro via <i>software</i>
df	Desativa o modo de diagnóstico
k	Envia novos valores de PID e temperatura objetivo/envia e ativa o valor do caudal desejado para o modo de diagnóstico
sk	Grava os novos valores de PID na EEPROM
le	Lê a tabela de entalpia guardada na EEPROM
se	Guarda nova tabela de entalpia na EEPROM

Como fora previamente mencionado, a EEPROM é necessária para guardar valores de ajuste, pois o microcontrolador não é dotado de uma. Caso alteremos os valores de PID ou da tabela de entalpia (para um diferente fluido) seria necessário ajustar o código, contudo com a EEPROM podemos ajustar o valor e este será lido pelo microcontrolador no início e guardado na memória RAM para utilização subsequente.

5.4. Interface gráfico desenvolvido para aquisição e controlo

O *software Visual Studio* é dotado de vários componentes para fácil implementação de aplicações gráficas. O objetivo é a realização de uma aplicação simples que permita visualizar os dados de funcionamento do sistema de controlo, tal como os sensores adquiridos e o cálculo de potências, de forma simples e intuitiva com uma janela do *Windows*. O *Visual Studio* aplicação pode ser programado em Basic, Java ou várias vertentes de C. Devido a apresentar o ecossistema mais completo por ser de alto nível e ter a base em linguagem C, optou-se por utilizar linguagem C#. Esta linguagem é bastante similar à utilizada na programação do *chipKIT* (C++), mas como é de mais alto nível contém comandos mais completos e que permitem ter um código mais simples e conciso. Contudo para otimizar alguns ciclos, aquando da utilização de linguagens de alto nível, poderá ser necessário utilizar comandos mais simples, como os utilizados em linguagem C.

Na Figura 5.4 apresenta-se o ambiente da janela principal da aplicação desenvolvida, tais como os valores em tempo real (instantâneo) e em função do tempo (gráficos). Após serem recebidos pela porta série, a *string* é sujeita ao tipo de descodificação similar ao do microcontrolador e os valores são distribuídos pelas respetivas caixas de texto. Cada uma tem um nome como uma variável e esta é igualada ao respetivo valor convertido. Na parte identificada como “Dados em Tempo Real” pode-se ler estes valores dos sensores lidos pelo *chipKIT* e valores calculados, como o caudal mássico de gases de escape e potência térmica dos gases de escape do fluido de trabalho. Está também presente a opção para ativar ou desativar o filtro por *software*. A ocupar a maior parte do ecrã, tem-se do lado direito gráficos no tempo de potência e temperatura. No gráfico superior podemos verificar

a laranja a potência de escape e a do fluido de trabalho, em tempo real. O mesmo se verifica para a temperatura obtida e pretendida para o fluido de trabalho.

Na parte superior da janela tem-se opções relativas à comunicação e calibração de parâmetros, sendo estes parâmetros o PID e a entalpia do fluido de trabalho. Na Figura 5.5 pode-se visualizar o menu de comunicação com as opções inerentes. Pode-se seleccionar a porta de comunicação das que o *software* nos apresenta, pois este deteta quais estão ativas. É possível também seleccionar o *baud rate* para a comunicação, sendo que no nosso caso utilizamos sempre o mesmo - 115200.

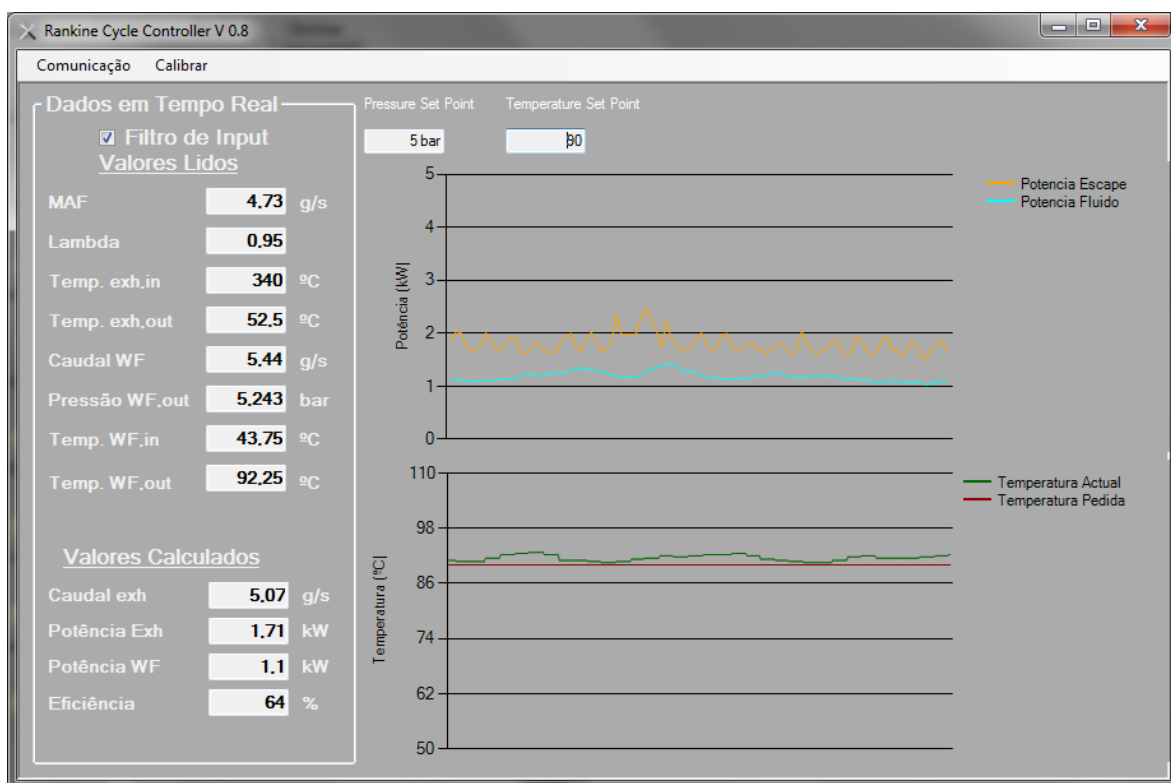


Figura 5.4 - Janela principal da aplicação desenvolvida, *Rankine Cycle Controller*.

No menu calibrar pode-se aceder aos dois submenu demonstrados na Figura 5.6, o submenu demonstrado em “a)” permite-nos alterar as constantes do PID, a temperatura objetivo e gravar estas na EEPROM após a alteração, ou serão esquecidas após o reinício do microcontrolador. É possível também visualizar o caudal pedido pelo controlo e o atual, no caso de se alterar o caudal pedido, o sistema entra em modo de diagnóstico e deixa de efetuar os cálculos, controlando apenas a bomba do fluido de trabalho. É uma função útil para o ajuste do PID ou para o diagnóstico da bomba. A opção de ter as tabelas da entalpia do fluido (demonstradas na parte b) da figura) como objeto de calibração, deve-se

sobretudo à possibilidade de testar diferentes fluidos. Estas podem ser alteradas e gravadas diretamente na EEPROM.

Uma outra função que não é visível, mas está em constante funcionamento, é a gravação de dados. De modo a possibilitar o tratamento de dados e a realização de gráficos com as temperaturas e potências (como visto na Figura 5.4 mas estes necessitavam de ser exportados para posterior tratamento. Assim implementou-se uma funcionalidade que grava todas as variáveis num documento de texto no computador, com uma diretoria e frequência pré-definida de 5 Hz, por motivos de espaço. Contudo poderá ser adicionada uma função *à posteriori* para alterar este valor e a diretoria. Exportou-se os documentos de texto para *Microsoft Excel*, os dados tratados e analisados serão utilizados no capítulo 6 para caracterização do funcionamento do sistema implementado.

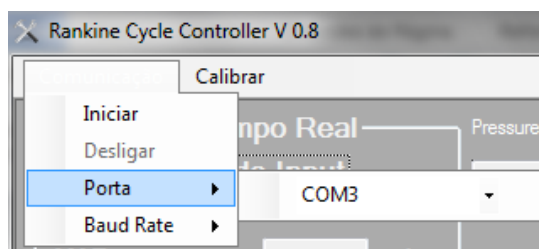


Figura 5.5 - Menu de comunicação com as opções para seleccionar a porta e o baud rate.

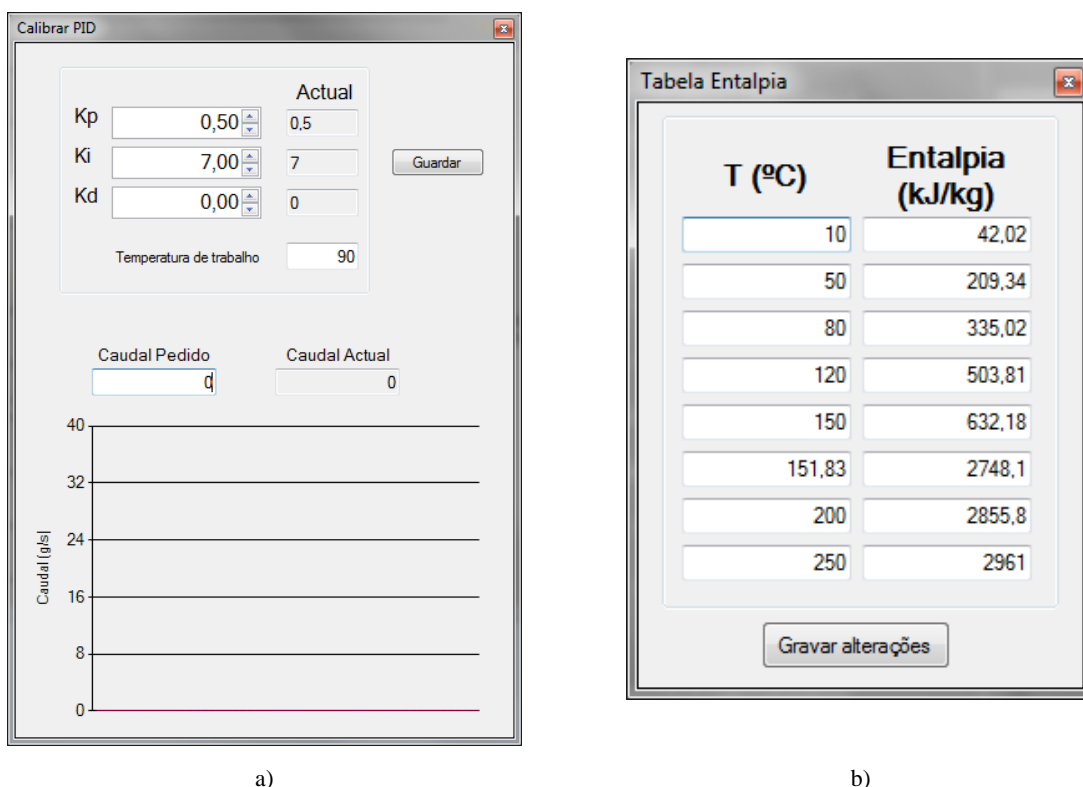


Figura 5.6 - Submenus incluídos no menu “Calibrar”: a) Calibrar PID e b) Tabela de entalpia.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

6. Análise e discussão dos resultados

No presente capítulo serão apresentados os testes que se efetuaram com o sistema de controlo desenvolvido e discutidos os resultados.

6.1. Caracterização dos testes realizados

Para efetuar os testes na montagem experimental, que foi realizada no laboratório de Engenharia Automóvel do IPEL, utilizou-se um veículo Ford Sierra MkI. Na Figura 6.1 pode-se observar a montagem experimental e o referido veículo. Este veículo tem aplicado um motor de 2 Litros com uma unidade de gestão eletrónica MOTEC M4, dispõe de um sensor MAF e um controlador de sonda lambda *Motec PLM*, tal como referido anteriormente na secção Sensores3.2. Tem também um acelerador remoto que permite controlar a posição da borboleta do veículo à distância, enquanto se monitorizam os dados do sistema de ciclo de Rankine. Devido à indisponibilidade das instalações, à data de realização dos testes, não foi possível efetuar os testes no banco de potência, pelo que a forma de variar a energia disponível nos gases de escape foi apenas com o controlo da borboleta e conseqüentemente pela velocidade de rotação do motor.

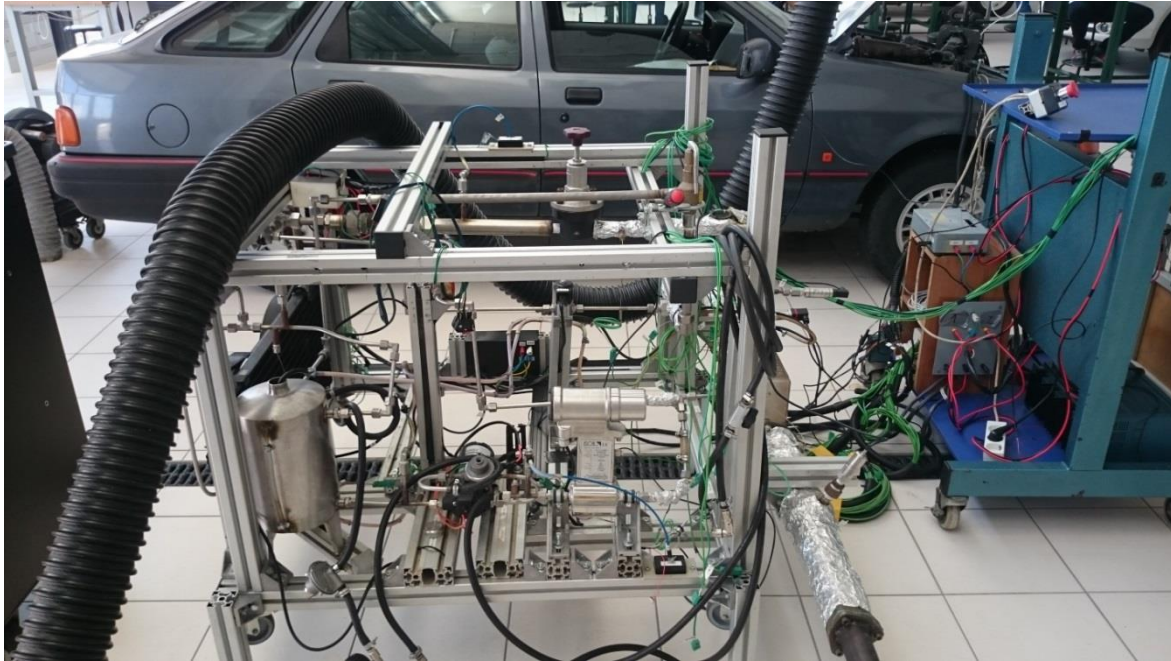


Figura 6.1 - Montagem experimental do ciclo de Rankine e o veículo utilizado.

Para a validação do sistema de controlo, efetuaram-se vários tipos de testes de modo a estudar e compreender a resposta do mesmo. Após tentativas prévias de controlar a bomba, optou-se por utilizar apenas um controlo PI (Proporcional e Integral), pois com um controlo PID as pequenas oscilações no caudal de fluido tornavam o sistema instável. Como abordagem inicial optou-se por realizar testes com a velocidade de rotação do motor constante às 2000 rpm e 3000 rpm sem carga. Por último, realizou-se um teste em que a temperatura pretendida seria constante com a velocidade de rotação do motor a variar para simular uma situação em que se está sujeito a diferentes potências de escape. O objetivo principal destes testes é demonstrar a capacidade de controlo do sistema desenvolvido, e a sua atuação eficaz em todas as condições de funcionamento do sistema de recuperação de energia.

Teste 1

O teste 1 visa verificar a repetibilidade e capacidade de manter a temperatura do fluido de trabalho à saída do evaporador nos valores pretendidos, sendo que este teve uma duração superior a 20 minutos, com o motor do veículo sempre às 2000 rpm. Na Tabela 6.1 pode-se comparar os valores médios para as diferentes condições do teste. A temperatura de entrada dos gases de escape no evaporador, estabilizou em cerca de 390 °C e a temperatura

do fluido de trabalho à saída do evaporador em 100 °C. A Figura 6.2. mostra a variação da temperatura do fluido de trabalho à saída do evaporador. A temperatura pretendida é indicada a vermelho (linha com traço grosso) e a temperatura obtida a azul (linha com traço fino). Após estabilizar a 100 °C, aumentou-se a temperatura para 110 °C, seguida de um arrefecimento a 100 °C e novo aquecimento, agora 120 °C, seguido de arrefecimento para 100 °C. Utilizou-se os seguintes valores para as constantes do controlo PI: $K_p = 0,5$ e $K_i = 10$.

Quando é solicitado um aumento de temperatura do fluido de trabalho à saída do evaporador o sistema de controlo implementado reduz a velocidade de rotação da bomba e consequentemente o caudal mássico de fluido de trabalho. Inicialmente observa-se um pico de temperatura, sendo que o sistema de controlo atua no sentido de alcançar o valor pretendido (110 °C). Após a temperatura estabilizar, esta fica dentro da margem requerida de ± 2 °C durante o tempo restante. O tempo que demora a estabilizar é cerca de 30 s, para uma potência térmica média de 3,3 kW. Devido a este valor de potência ser relativamente baixo, quando é solicitado uma temperatura superior, neste caso 120 °C, é necessário mais tempo para aumentar a temperatura do fluido, sendo necessários cerca de 50 s para estabilizar. No caso do arrefecimento, verificou-se que a temperatura obtida estabiliza a um valor médio de cerca de 102 °C, o valor pretendido era 100 °C.

Tabela 6.1 - Valores médios de temperatura e potência no teste 1.

N [rpm]	T_{wf,out} pretendida [°C]	T_{wf,out} obtida [°C]	T_{g,in} [°C]	T_{g,out} [°C]	Q̇_g [kW]	Q̇_{wf} [kW]
	110	109,9	388,6	63,9	3,3	2,4
2000	100	102,3	388,3	61,8	3,4	2,8
	120	118,1	388,6	65,0	3,2	2,1

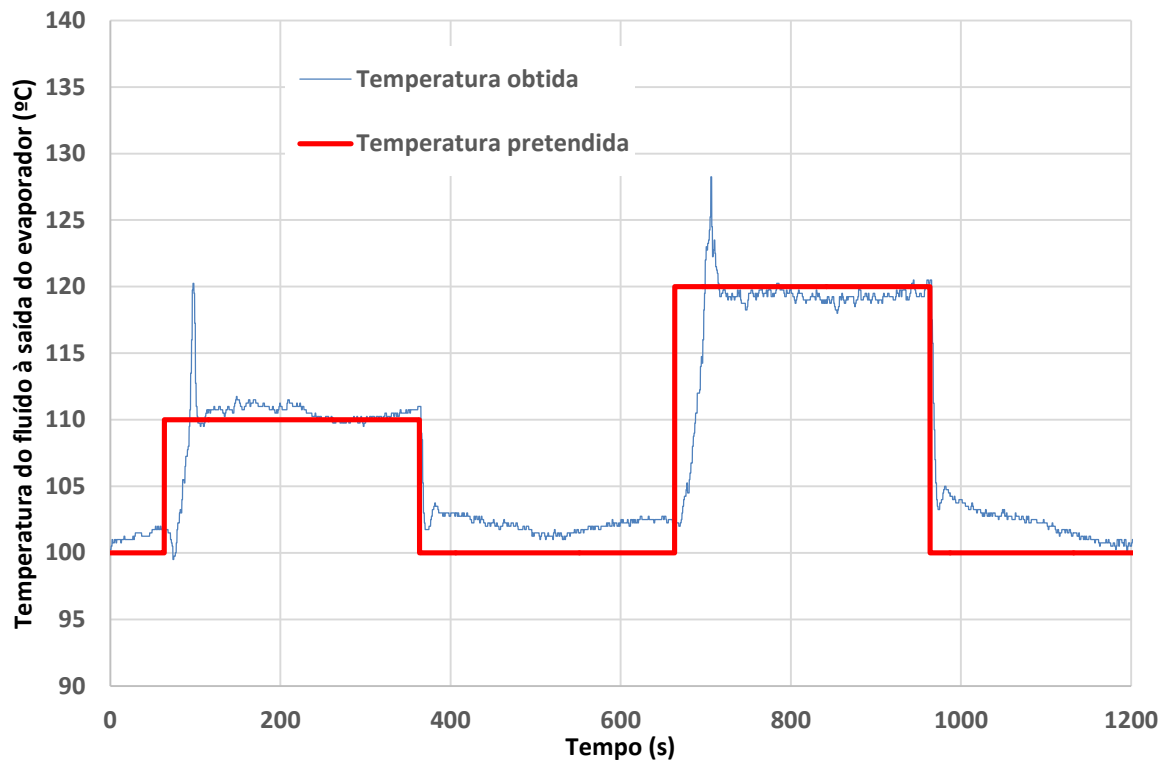


Figura 6.2 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 1.

Na Figura 6.3 pode-se visualizar a potência térmica disponível nos gases de escape, a potência térmica recuperada pelo fluido de trabalho e a temperatura pretendida. Os picos observados na potência térmica recuperada pelo fluido de trabalho não são reais e devem-se sobretudo a picos no caudal mássico de fluido de trabalho, calculados pelo algoritmo de forma a arrefecer o mesmo mais rapidamente. A sua ocorrência coincide com os picos de temperatura que se podem observar na Figura 6.2 e com os eventos em que é requisitado uma diminuição da temperatura. No entanto pode-se observar que a potência média é na ordem dos 2,5 kW e altera pouco com a temperatura pretendida, concluindo-se que o caudal mássico de fluido é o maior influenciador.

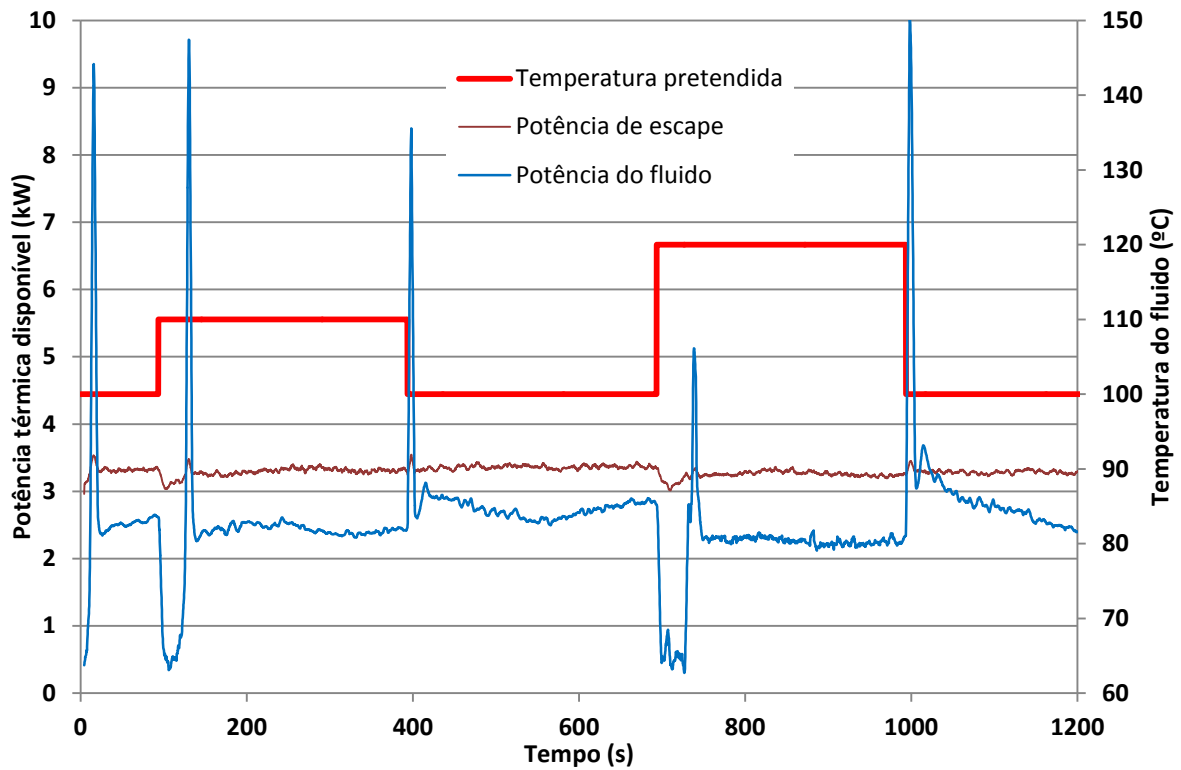


Figura 6.3 - Potência térmica disponível no escape e no fluido de trabalho - Teste 1.

Teste 2a

No teste 2a, manteve-se o sistema nas mesmas condições de caudal e temperatura de escape e conseqüentemente potência térmica, oscilando esta entre os 3 e 3,5 kW. A Tabela 6.2 apresenta os valores médios obtidos para as diferentes condições do teste. Relativamente ao teste 1, alterou-se o valor do caudal, o tempo foi reduzido de 5 para 2 minutos e as temperaturas foram aumentadas no primeiro degrau de 110 °C para 120 °C e no segundo degrau de 120 °C para 130 °C, a temperatura de referência manteve-se nos 100 °C. A Figura 6.4 mostra a temperatura pretendida e a temperatura obtida para o fluido de trabalho à saída do evaporador em função do tempo.

Embora se tenham mantido as constantes PI do teste 1 ($K_p = 0,5$ e $K_i = 10$), alterou-se a função que regula o mínimo de caudal mássico de fluido de trabalho aquando uma diferença muito elevada na temperatura objetivo, para de forma a evitar os picos, contudo o caudal era demasiado baixo (< 2 g/s). Isto resultou num maior tempo de subida e não foi suficiente para evitar o pico inicial aos 120 °C. Também se verificou um aumento da instabilidade quando a temperatura pretendida era de 130 °C, embora aos 120 °C tenha

estabilizado, ainda que a uma temperatura ligeiramente mais baixa. Desta forma pode-se verificar que o comportamento não é similar para todas as situações.

Tabela 6.2 - Valores médios de temperatura e potência no teste 2a

N [rpm]	$T_{wf,out}$ pretendida [°C]	$T_{wf,out}$ obtida [°C]	$T_{g,in}$ [°C]	$T_{g,out}$ [°C]	\dot{Q}_g [kW]	\dot{Q}_{wf} [kW]
	120	114,2	383,7	63,4	3,2	1,7
2000	100	103,5	383,3	61,0	3,3	3,2
	130	121,3	383,5	65,8	3,1	1,4

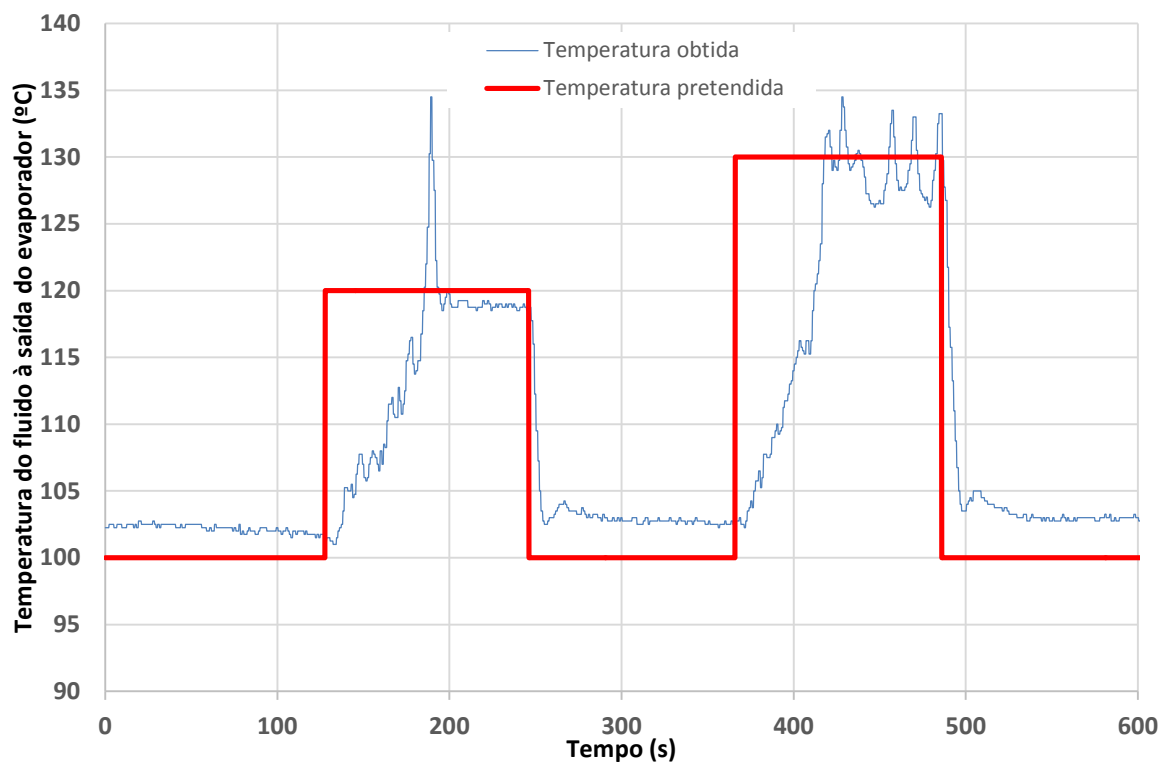


Figura 6.4 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 2a.

Teste 2b

O teste 2b visa repetir o teste 2a, contudo foi alvo de alterações no algoritmo de forma a tentar corrigir os picos iniciais e minimizar as oscilações no valor de temperatura como acontecia anteriormente. Para tal definiu-se um limite de caudal mínimo (5 g/s), o que ajudou a aumentar a temperatura mais rápido. O controlo PI também foi ajustado, sendo

que se utilizou: $K_p = 0,5$ e $K_i = 7$. Adicionalmente, pretendia-se aproximar ainda mais a temperatura dos $100\text{ }^\circ\text{C}$ no arrefecimento. A velocidade de rotação do motor foi também aumentada para 3000 rpm de forma a termos mais potência disponível no escape (5,5 a 6,4 kW), embora se tenha começado o teste com temperaturas de escape mais baixas. Pode-se observar os valores médios na Tabela 6.3 e o gráfico de temperatura na Figura 6.5.

Tabela 6.3 - Valores médios de temperatura e potência no teste 2b.

N [rpm]	$T_{wf,out}$ pretendida [$^\circ\text{C}$]	$T_{wf,out}$ obtida [$^\circ\text{C}$]	$T_{g,in}$ [$^\circ\text{C}$]	$T_{g,out}$ [$^\circ\text{C}$]	\dot{Q}_g [kW]	\dot{Q}_{wf} [kW]
3000	120	118,9	419,4	62,5	5,5	3,7
	100	102,2	453,2	62,8	6,2	5,1
	130	127,8	474,1	66,0	6,4	4

A comparação dos resultados obtidos nas Figura 6.4 e Figura 6.5 permite verificar que os picos iniciais que ocorriam no teste 2a foram suprimidos e o sistema estabiliza mais rapidamente. O facto de o sistema estabilizar mais rapidamente deve-se a uma maior potência no escape, pois o teste foi iniciado com uma temperatura de $360\text{ }^\circ\text{C}$, o que não correspondia à temperatura estabilizada no escape também se efetuaram pequenos ajustes no caudal mínimo necessário para um aumento de temperatura acelerado. Os motivos de não se ter estabilizado a temperatura foram devidos à necessidade de ter o veículo o mínimo tempo possível a esta velocidade de rotação (3000 rpm) e de poder verificar se o sistema alteraria o seu comportamento. Conseguiu-se uma temperatura obtida muito próxima da temperatura pretendida, estando dentro da margem dos $2\text{ }^\circ\text{C}$. Apenas aos $100\text{ }^\circ\text{C}$ se obtém maiores oscilações, contudo deve-se à dificuldade de arrefecer devido à potência dos gases de escape ser mais elevada e possivelmente à mudança das constantes PI.

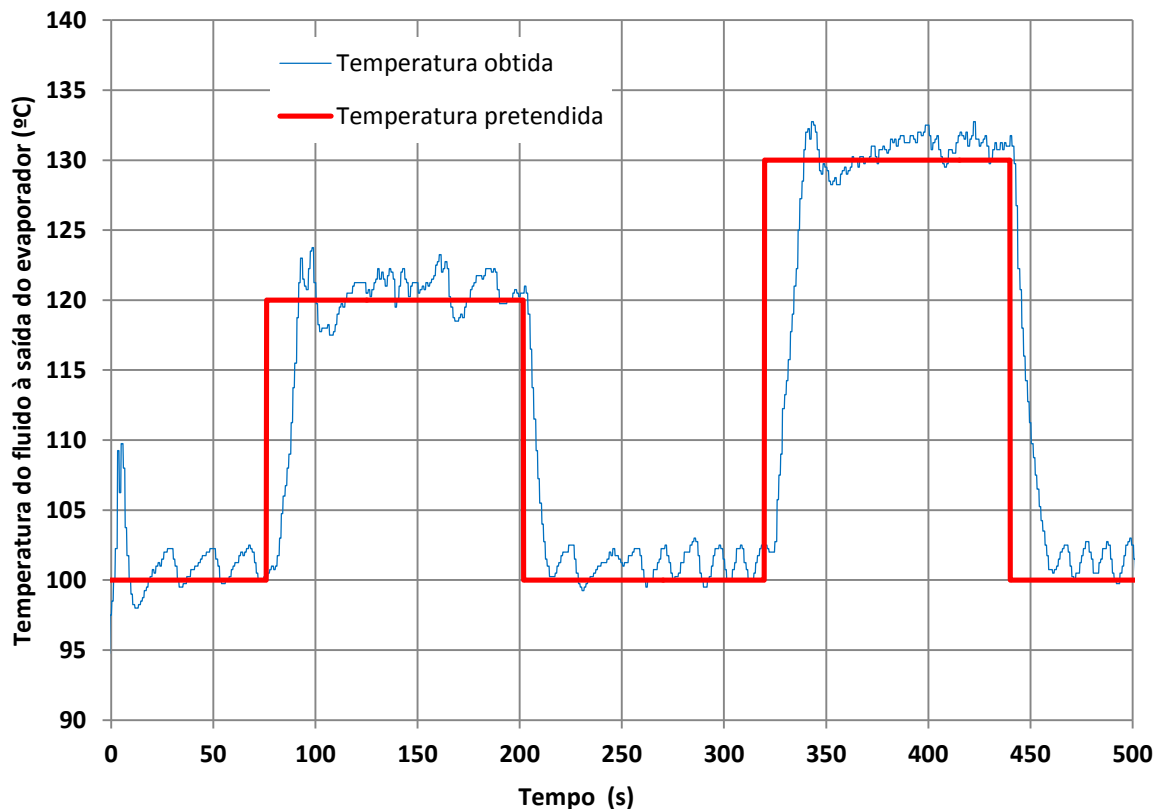


Figura 6.5 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 2b.

Teste 3

Como teste 3, optou-se por fazer um ensaio em que a temperatura pretendida seria sempre constante e a condição do motor iria variar. Este teste é o que podemos obter mais próximo de uma utilização real, pois o que necessitamos é de manter o fluido a uma temperatura constante, independentemente da carga do veículo. Colocou-se a temperatura objetivo do fluido a 120 °C e foi-se variando a velocidade de rotação do motor, o que influencia diretamente o caudal mássico de ar e consequentemente de gases de escape. Na Tabela 6.4 pode-se observar os valores médios obtidos durante o teste e na Figura 6.6 pode-se observar o gráfico após a estabilização da temperatura do fluido de trabalho.

O teste 3 começou com a montagem do ciclo de Rankine e o motor do veículo frios. Foram necessários cerca de 420 s para atingir a temperatura objetivo, mas numa situação de estrada teremos uma carga de motor maior o que se reflete numa maior potência de escape e num menor tempo de aquecimento. Verifica-se que mesmo com grandes oscilações, desde 1,5 kW (potência térmica ao ralenti) e chegando a atingir mais de 9 kW a

temperatura objetivo manteve-se praticamente sempre nos $120\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o valor médio desta foi de $121,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 6.4 - Valores médios de temperatura e potência no teste 3.

N [rpm]	$T_{wf,out}$ pretendida [$^{\circ}\text{C}$]	$T_{wf,out}$ obtida [$^{\circ}\text{C}$]	$T_{g,in}$ [$^{\circ}\text{C}$]	$T_{g,out}$ [$^{\circ}\text{C}$]	\dot{Q}_g [kW]	\dot{Q}_{wf} [kW]
Variável	120	121,1	393,6	60,6	4,8	3,8

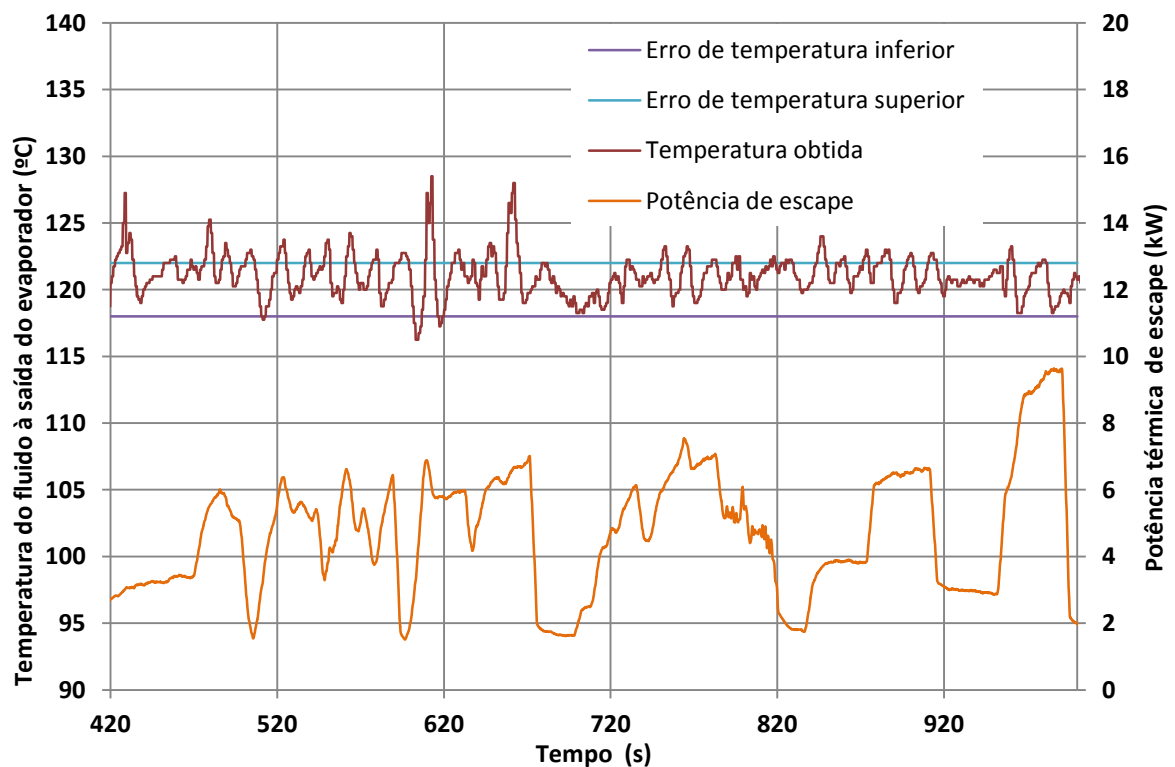


Figura 6.6 - Temperatura do fluido à saída do evaporador - Teste 3.

Em termos de erro percentual de temperatura a Figura 6.7 demonstra a gama em que a mesma se situa e a equação 6.1 demonstra de que forma o erro foi calculado. Pode-se verificar que o maior erro de temperatura ocorreu próximo dos 620 s. Houve um aumento repentino da potência de escape, sendo que o motor encontrava-se ao ralenti e passou para uma velocidade de rotação mais elevada. Enquanto isto o sistema trabalhava para aumentar a temperatura do fluido, devido à potência térmica disponível ser baixa e este ter uma temperatura abaixo do desejado. Com o aumento momentâneo da potência térmica ocorreu a subida repentina da temperatura do fluido, pois a resposta do sistema não foi suficiente. Contudo em situações em que o sistema opera em cargas mais elevadas é pouco provável

que ocorram situações semelhantes. Na Figura 6.8 é possível observar a temperatura dos gases de escape à entrada e saída do evaporador. Como se verifica, a temperatura média dos gases de escape à entrada do evaporador está a aumentar. Isto deve-se aos componentes do veículo (motor e sistema de escape) e ao evaporador ainda não terem atingido uma temperatura estável. Pode-se concluir que para as condições do teste a temperatura média seria ligeiramente acima dos 400 °C, já a temperatura à saída do evaporador situa-se acima dos 50 °C.

$$\text{Erro} = \frac{|T_{\text{pretendida}} - T_{\text{obtida}}|}{T_{\text{pretendida}}} \quad (6.1)$$

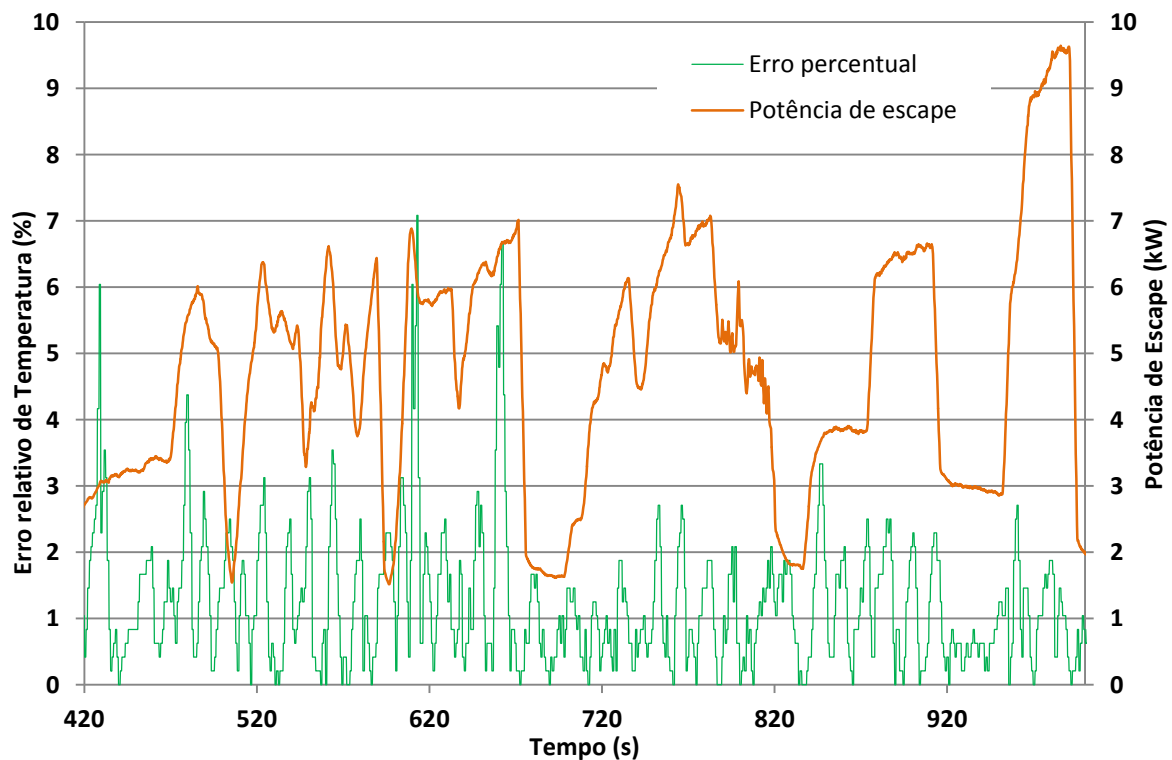


Figura 6.7 - Erro relativo da temperatura para o teste 3.

Como já referido a inércia do sistema (evaporador e fluido de trabalho) também tem um papel desestabilizador e ajuda a provocar oscilações na temperatura. Enquanto o sistema de controlo está a tentar combater a subida ou descida de temperatura repentina, irá incitar o oposto quando consegue reverter a situação. Porém o facto de a temperatura ser um pouco elevada em certas situações não é um problema, pois o objetivo é garantir a vaporização e não limitar a temperatura máxima. Não pode ser demasiado baixa em que ocorram mudanças bruscas de fase (vapor - líquido), dado que pode se traduzir em danos e

instabilidade do sistema. Utilizando uma margem de segurança, é possível prevenir que isto nunca aconteça e caso a temperatura vá baixar da temperatura de vaporização da água, a válvula de segurança será atuada e não ocorrerão danos no expansor, no caso de ser uma turbina.

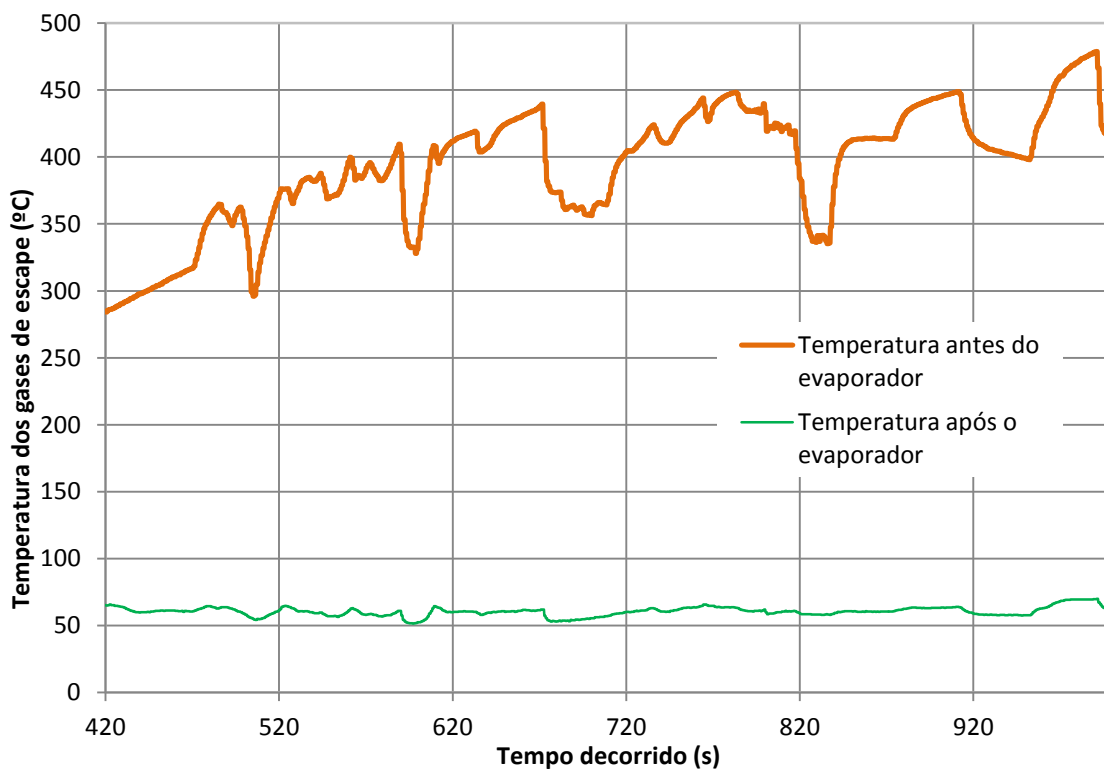


Figura 6.8 - Temperatura dos gases de escape antes e depois do evaporador - Teste 3.

O facto de não se ter utilizado o banco de potência para simular um percurso em estrada ou a simples introdução de carga no veículo/motor limitou um pouco os testes. Seria possível testar com rotações mais baixas e potências de escape mais elevadas. Desta forma conseguir-se-ia abranger uma maior gama de funcionamento do motor e verificar a resposta do sistema. Com mais carga tem-se mais massa de ar e combustível o que se traduz numa maior potência de escape.

Contudo a parte mais crítica do controlo do ciclo é quando se tem potências térmicas baixas no escape e necessitamos de caudais mínimos no ciclo. Nesta gama é difícil controlar a bomba. Todavia, com os testes efetuados, em que a carga e consequentemente a potência de escape são baixas, conseguiu-se provar que é possível.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

7. Conclusão

Atualmente os construtores automóveis estão a apostar no desenvolvimento do ciclo de Rankine, contudo é necessário um controlo adequado do fluido de trabalho para o sistema operar dentro das condições ótimas para geração de energia. Como se verificou na revisão bibliográfica, embora todos os sistemas de controlo sejam diferentes, a sua base de operação é a mesma: controlar o caudal de fluido de trabalho, para garantir a temperatura e a pressão do fluido de trabalho pretendidas para as diferentes condições de operação. Neste enquadramento, o objetivo do presente projeto foi o de obter a temperatura do fluido de trabalho, através do controlo do caudal de fluido de trabalho, sendo que não se controlará a pressão devido à inexistência de um expansor operacional.

Um sistema embebido tem capacidade de efetuar o controlo do sistema do ciclo de Rankine de forma autónoma relativamente à ECU do motor de combustão interna. São necessários sensores para aquisição de dados: temperatura antes e depois do evaporador, para o fluido de trabalho e para os gases de escape, um sensor de caudal mássico para o fluido de trabalho e um sensor para o caudal mássico do ar admitido pelo motor, sensor lambda e sensor de pressão do fluido de trabalho após o evaporador. Assim é possível determinar a potência térmica disponível nos gases de escape e o caudal de fluido de trabalho necessário para se atingir as temperaturas objetivo. Ao nível dos atuadores é necessário controlar a bomba do fluido de trabalho e a válvula de *bypass* ao expansor. Caso se instale um expansor operacional este também terá de ser controlado.

Com os objetivos delineados projetou-se o circuito de controlo capaz de adquirir e condicionar os dados dos sensores utilizados e converter os mesmos no ponto de utilização desejado. Desenvolveu-se uma placa de circuito impresso para os sensores e uma para a eletrónica de potência de controlo dos atuadores. Também foi desenvolvida uma aplicação para *Windows* que comunica com o microcontrolador e permite visualizar os dados de funcionamento do sistema em tempo real, gravar os mesmos e proceder as configurações do sistema de controlo, nomeadamente ajuste do PID e tabela de entalpia. A criação desta aplicação foi muito útil para calibrar e programar o algoritmo de controlo. Facilitou

bastante também o tratamento de dados, devido à função de exportar estes para um ficheiro externo.

Efetuarão-se diferentes testes com várias temperaturas objetivo, sendo que um dos testes foi efetuado com potência térmica variável, através da variação da velocidade de rotação do motor de combustão. Os resultados dos testes foram bastante satisfatórios, dado que se efetuou com sucesso o controlo da temperatura do fluido de trabalho à saída do permutador de calor e se conseguiu manter a temperatura em torno de uma margem aceitável da temperatura objetivo (intervalo de 2 °C). Assim provou-se que tanto a montagem como o controlo eletrónico são capazes de avançar para uma fase mais definitiva e poderá ser estudada a sua aplicação num veículo automóvel.

Após a realização do presente estudo, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Teste do controlo do ciclo de Rankine no banco de potência com um ciclo que simule a situação em estrada e verifique a capacidade dos componentes se sujeitarem a potências térmicas mais elevadas;
- Montagem de um expansor funcional e da eletrónica correspondente, de forma a avaliar a eficácia do sistema e poder realizar-se o algoritmo de controlo do expansor;
- Implementação de um módulo de diagnóstico que verifique constantemente os transdutores e sensores se os valores emitidos por estes correspondem aos pontos de funcionamento;
- Integração das placas desenvolvidas (placa de aquisição de dados e placa dos atuadores) com o *chipKIT* numa única ECU.

Bibliografia

- Analog Devices. (2015). High Performance Analog Multiplexers. *Data Sheet ADG408/ADG409*. Analog Devices, Inc.
- Avago Technologies. (20 de Julho de 2010). DC Input Multi-Channel Half-Pitch. *ACPL-227 Datasheet*.
- Basics, E. (2010). *The Basics of Air Fuel Ratio*. Obtido de Engine Basics: <http://www.enginebasics.com/EFI%20Tuning/AF%20Ratio%20Basics.html>
- Bosch. (2015). Air-mass meters. *Hot-film air-mass meter, Type HFM 5*. Germany.
- Clemson. (2015). *Oxygen Sensors*. Obtido em 2016, de Clemson Vehicular Electronics Laboratory: <http://www.cvel.clemson.edu/auto/sensors/oxygen.html>
- Domingues, A., Santos, H., & Costa, M. (2013). Analysis of vehicle exhaust waste heat recovery potential using a Rankine cycle.
- Duff, M., & Towey, J. (2010). *Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility*.
- Endo, T., Kawajiri, S., Kojima, Y., Takahashi, K., Baba, T., Ibaraki, S., *et al.* (2007). *Study on Maximizing Exergy in Automotive Engines*. SAE International.
- Horst, T. A., Rottengruber, H.-S., Seifert, M., & Ringler, J. (2013). Dynamic Heat Exchanger Model for Performance Prediction and Control System Design of Automotive Waste Heat Recovery Systems. In *Applied Energy* (pp. 293-303). Munich, Germany.
- Infineon. (30 de 01 de 2009). Smart Power High-Side-Switch. *BTS441R Datasheet*. Infineon Technologies AG.
- Infineon Smart Low-Side & High-Side Switches - Automotive Power Selection Guide*. (03 de Novembro de 2016). Obtido em 13 de Março de 2017, de Infineon: <http://www.infineon.com/cms/en/product/power/smart-low-side-and-high-side-switches/channel.html?channel=db3a30433dfcb54c013dfda067250219>
- Isoil, I. (04 de 03 de 2011). Operating and Installation Manual. *Converter ML4-F1*. Cinisello Balsamo, Itália.
- Maxim. (2012). Cold-Junction Compensated. *MAX31855K Datasheet*. Maxim Integrated Products.
- Nagai, H., Saitou, T., Ishikawa, T., & Mizoguchi, S. (2014). *Patente N.º EP 2 762 713 A1*. Japão, Kanagawa.

- Peralez, J., Tona, P., Lepreux, O., Sciarretta, A., Voise, L., Dufour, P., *et al.* (2013). *Improving the Control Performance of an Organic Rankine*. Florence.
- Pinheiro, S. (2015). *Implementação e avaliação de desempenho de sistema de aproveitamento de energia contida nos gases de escape de veículos automóveis*. Leiria.
- RS-Components. (2016). Obtido em 20 de Novembro de 2016, de RS-Components: <http://pt.rs-online.com/>
- Tona, P., Peralez, J., & Sciarretta, A. (2012). Supervision and control prototyping for an engine exhaust gas heat recovery system based on a steam Rankine cycle. In *2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Taiwan.
- USBR. (2015). *USBR*. Obtido em 22 de 01 de 2015, de U.S. Department of the Interior: http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/chap14_06.html