

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



# **Sistema de Monitorização e Controlo de Máquina de Extração de Bebidas**

**Ricardo Reis**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Armando Araújo

27 de Outubro de 2014



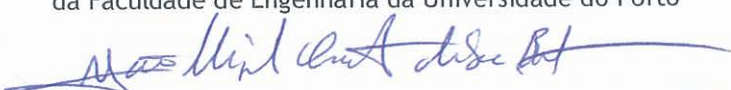
A Dissertação intitulada

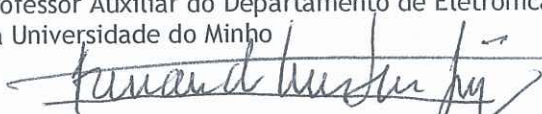
“Sistema de Monitorização e Controlo de Máquina de Extração de Bebidas”

foi aprovada em provas realizadas em 08-10-2014

o júri

  
Presidente Professor Doutor Mário Jorge Rodrigues de Sousa  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
Professor Doutor João Miguel Clemente de Sena Esteves  
Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica Industrial da Escola de Engenharia  
da Universidade do Minho

  
Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.

  
Autor - Ricardo Miguel Lopes Reis



# Resumo

A presente tese de dissertação tem por objetivo melhorar o desempenho dos sistemas de refrigeração para bebida à pressão, existentes em restaurantes e bares. Depois de analisar vários sistemas, concluiu-se que existe espaço para possíveis melhorias técnicas nas soluções que existem atualmente no mercado.

O modo de funcionamento do sistema de refrigeração é baseado no clássico *Ciclo de Compressão de Vapor*, encontrado em diferentes aplicações, como a presente no frigorífico doméstico. O evaporador está alojado num tanque que contém água fria, onde, por condução térmica, a bebida contida no barril, é arrefecida. Uma vez arrefecida a uma temperatura mais baixa, a bebida segue através de uma coluna até à torneira, onde chega pronta a ser consumida.

O sistema é composto por dois circuitos, um para o fluido de refrigeração; o outro para a bebida. O circuito de refrigeração tem que produzir uma massa de gelo dentro do tanque de água, que funciona como uma bateria, armazenando a energia para arrefecer grandes quantidades de bebida. Essa massa de gelo é controlada por um sensor, introduzido no tanque de água. O sensor envia informação ao controlador, que decide quando deve ligar ou desligar o compressor. É muito importante que a massa de gelo atinja a quantidade ótima, de modo a maximizar a quantidade de bebida arrefecida.

Neste documento é encontrada uma nova proposta para a arquitetura do módulo de controlo, onde se pretende dar uma maior autonomia de funcionamento às máquinas de extração de bebida. É também feito um estudo para a implementação de um sensor resistivo para medição de caudal.

De seguida é desenvolvido um modelo termodinâmico das máquinas de extração de bebida, em MatLab, capaz de simular o seu comportamento. São também implementados dois métodos de controlo. Um primeiro é baseado nos sistemas atualmente no mercado, e um segundo que pretende diminuir os consumos elétricos e o desgaste mecânico. Por fim, é apresentado um algoritmo para medição do volume extraído, utilizando o sensor resistivo realizado anteriormente.



# Abstract

This dissertation thesis aims to improve the performance of refrigeration systems for beverages in restaurants and bars. After reviewing several systems, it was realized that improvements of the actual solution may still be possible.

The operation of such refrigerating system is based on the classic *Vapor Compression Cycle*, present in many different applications, like our home fridge. The evaporator is housed in a tank containing cold water where the drink from the barrel is cooled down when passing through heat exchange. The drink, once ready, follows through a cooled column, to the tap, ready to be consumed.

The system is composed by two circuits; One for the cooling fluid, and other to the circuit of the beverage. The cooling circuit has to produce a mass of ice inside the water tank, that's going to work like a battery, keeping the energy stored to cool large quantities of beverage in a short period of time. This mass of ice is controlled by a sensor, placed in the water tank. The sensor gives information for the main controller, which decides when the compressor should be turned on or off. It's very important that the mass of ice reaches the perfect quantity, in order to maximize the amount of cooled drink.

In this document, it's offered a new proposal for the architecture of the control module, which is intended to give a greater freedom to run the refrigeration systems of cooling beverage. It is also presented a study and an implementaion of a resistive sensor for flow measurement.

A thermodynamic model of the refrigeration systems is also present in this work. It was created using MatLab, which is able to simulate the system behavior. Two control methods are also implemented. The first it's based on systems currently on the market, and the second intends to reduce the electrical consumption and mechanical wear. Finally, is exposed an algorithm for measuring the volume extracted with the previously developed resistive sensor.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Armando Araújo, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, à Doutora Cristina Silva e ao Engenheiro Jorge Pires da Unicer - Bebidas, SA pela orientação, pela oportunidade oferecida, pela partilha de conhecimentos e pela disponibilidade e empenho demonstrados desde o início da dissertação.

Agradeço também à minha família, que nunca deixou de me apoiar e de acreditar nesta etapa da minha vida académica.

Aos meus colegas e amigos, pela prova de amizade e partilha de conhecimento.

À Luísa Alves, minha namorada, pelo carinho, dedicação e sacrifício demonstrados.

Em especial, gostaria de agradecer e dedicar esta dissertação ao meu Avô, pela experiência e momentos partilhados, que criaram, desde pequeno, a ambição de um dia ser Engenheiro.

Ricardo Reis



*"Experience is the name everyone gives to their mistakes."*

Oscar Wilde



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1	Instalações de extração de bebidas . . . . .	3
2.2	Funcionamento de uma máquina de extração de bebidas à pressão . . . . .	5
2.3	Refrigeração . . . . .	10
2.3.1	Refrigeração por compressão de vapor . . . . .	10
2.3.2	Outros métodos usados para refrigeração de bebidas . . . . .	12
2.4	Sensores de medição/deteção de caudal . . . . .	15
2.5	Controlo de motores de indução CA monofásicos . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Hardware</b>	<b>19</b>
3.1	Deteção de caudal . . . . .	19
3.2	Redesenho do módulo de controlo . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>27</b>
4.1	Modelação em MATLAB de uma MEB standard . . . . .	27
4.2	Algoritmo de controlo . . . . .	38
4.2.1	Controlo SISO . . . . .	39
4.2.2	Controlo preditivo . . . . .	41
4.3	Algoritmo de deteção de caudal . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>51</b>
5.1	Conclusões . . . . .	51
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	52
	<b>Referências</b>	<b>53</b>



# Lista de Figuras

2.1	Instalação de uma máquina de extração de bebidas à pressão [1]	4
2.2	Máquina de extração de bebidas Modelo Horizontal e Vertical	5
2.3	Banco de Gelo	7
2.4	Unidade de Frio [2]	8
2.5	Máquina de estados AL101	9
2.6	Módulo de Controlo AL901-C	9
2.7	Esquema de um sistema de refrigeração por compressão de vapor	11
2.8	Efeito Peltier	12
2.9	SuperBock XpresS	13
2.10	Esquema de um sistema de refrigeração solar	13
2.11	bioCooler Coca-Cola e eCooler	14
2.12	Esquema para sensor Ultrassónico/Ótico de medição de caudal	15
3.1	Detetor de caudal	20
3.2	Registo quatro tiragens 20cl	21
3.3	Registo tiragem final de barril	21
3.4	Modelo proposto para o Módulo de Controlo	22
3.5	Modelo proposto para o Controlo e Monitorização dos Motores	24
3.6	Fonte de alimentação	26
4.1	Resistência térmica paredes	28
4.2	GUI Matlab	34
4.3	Temperatura água Compressor ligado /Agitador ligado	35
4.4	Temperatura água Compressor desligado /Agitador ligado	36
4.5	Temperatura água Compressor/Agitador desligado	36
4.6	Temperatura bolsa de ar Compressor desligado /Agitador desligado	37
4.7	Máquina de estados para o controlador SISO	39
4.8	Registo da massa de gelo durante uma semana com controlador SISO	40
4.9	Máquina de estados Modo Reativo para o controlador preditivo	42
4.10	Máquina de estados Modo Passivo para o controlador preditivo	43
4.11	Registo da massa de gelo durante uma semana com controlador preditivo	44
4.12	Sinal filtrado, referente a quatro extrações de 20 cl	47
4.13	Deteção do declive, referente a quatro extrações de 20 cl	47
4.14	Sinal final, referente a quatro extrações de 20 cl	48



# Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa entre EMR e SSR [3] . . . . .	17
3.1	Consumo elétrico dos principais componentes . . . . .	26
4.1	Dimensões das faces isoladas do banco de gelo . . . . .	29
4.2	Variáveis de entrada/saída do algoritmo MEB . . . . .	33
4.3	Massa de gelo Real vs Simulado . . . . .	37
4.4	Matriz de consumo . . . . .	38
4.5	Consumos elétricos durante uma semana com controlador SISO . . . . .	40
4.6	Consumos elétricos durante uma semana com controlador SISO sem delay . . . . .	41
4.7	Consumos elétricos durante uma semana com controlador preditivo . . . . .	44
4.8	Comparação do consumo elétrico e desgaste mecânico entre controladores . . . . .	45
4.9	Resultados do algoritmo de detecção de caudal . . . . .	49



# Abreviaturas e Símbolos

AC ou CA	Corrente alternada
ADC	Conversor analógico para digital
COP	Coefficiente de performance
DC ou CC	Corrente contínua
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
EMI	Interferência eletromagnética
EMR	Electromechanical Relays / Relés Eletromecânicos
kg	Quilograma
kWh	Quilowatt-hora
LED	Diodo emissor de luz
m	Metro
MCU	Microcontrollers
MEB	Máquina de extração de bebidas
MIMO	Multiple-input and Multiple-output
NTC	Negative Temperature Coefficient
PSU	Power supply unit
R-134a	1,1,1,2 Tetrafluoroetano
RTC	Real-time clock / Relógio de tempo real
SISO	Single-input Single-output
SSR	Solid State Relay / Relé de estado sólido
TP	Tara Perdida
TR	Tara Retornável



# Capítulo 1

## Introdução

Pretende-se neste capítulo dar a conhecer, de uma forma breve, todo o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação, realizada como projeto final de curso do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Na secção 1.1 é exposto o que motivou e impulsionou a escolha e desenvolvimento deste tema; na secção 1.2 são apresentados os objetivos propostos para a realização da dissertação; por último, na secção 1.3 é dada a conhecer a estrutura do presente documento.

### 1.1 Motivação

Atualmente, uma grande percentagem de consumo energético em todo o mundo provem da exploração de combustíveis fósseis. Sendo uma fonte de energia não renovável, a sua escassez é inevitável e a procura pela diminuição do seu consumo tem sido fortemente impulsionada. Estima-se que os sistemas de arrefecimento utilizem aproximadamente 10% a 20% de toda a eletricidade consumida no mundo [4].

Em 2010 foi iniciado um projeto de parceria Reitoria/Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/UNICER Bebidas SA, com vista a avaliar e otimizar a eficiência energética das máquinas de refrigeração para extração de bebidas à pressão. Pretendia-se fazer uma análise aprofundada dos atuais sistemas de tiragem de cerveja. Para tal, instalaram-se sensores de pressão e temperatura em pontos fundamentais, para uma total caracterização da máquina. Foram montados vinte e dois sensores de temperatura e cinco sensores de pressão, assim como sensores de medição de consumos energéticos. Com este estudo foi possível detetar algumas ineficiências na arquitetura atual das máquinas de extração de bebidas, nomeadamente da máquina de estados finitos, que a controla. Com base nos testes realizados e no acompanhamento do projeto, ao longo dos últimos 3

anos, esta dissertação tem como objetivo apresentar soluções para os problemas encontrados. Para isso, vão ser analisadas alternativas ao atual funcionamento do controlador da máquina, dando ao sistema um maior poder de decisão, garantindo assim uma maior eficiência, tanto a nível energético, como a nível do desgaste mecânico.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação têm como objetivo apresentar um redesenho da solução atual que controla as máquinas de extração de bebidas. Esta nova solução deverá ser capaz de diminuir os consumos de energia e o desgaste mecânico que existem no sistema atual. Será também realizada uma medição do volume extraído de bebida por máquina, possibilitando a criação de uma estimativa do volume de bebida extraída de uma determinada máquina.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos.

No 1 capítulo é apresentada a motivação para o desenvolvimento desta dissertação, assim como os objetivos proposto.

É realizada uma revisão bibliográfica no capítulo 2, sobre as instalações de extração de bebida, a termodinâmica utilizada em sistemas de arrefecimento de bebidas, os sensores de medição de volume de líquido e uma avaliação comparativa entre dois sistemas de controlo de um motor AC.

O capítulo 3, expõe a elaboração, a nível do hardware, necessária para concretizar os objetivos propostos. Inicia-se com o desenvolvimento de um sensor para a medição de volume líquido, e é seguido por um estudo sobre a implementação um novo módulo de controlo.

No capítulo 4, é apresentado o desenvolvimento do software. Este encontra-se dividido em três secções principais; o desenvolvimento do modelo termodinâmico de uma máquina de extração de bebidas, o sistema de controlo e o algoritmo de deteção de caudal utilizando o sensor desenvolvido nesta dissertação.

O capítulo 4, apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento desta dissertação e possíveis trabalhos futuros.

Por último, encontram-se enumeradas as referências bibliografias, que ofereceram o suporte necessário à realização deste trabalho.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Instalações de extração de bebidas

Uma instalação de bebidas à pressão pode ser apresentada sob vários formatos. Estes são caracterizados consoantes a sua capacidade de extração, e são adaptados aos diferentes pontos de venda, garantindo sempre a melhor qualidade da mesma.

A instalação mais usual e conhecida é a que existe para barril de tara retornável. Esta é implementada em pontos de venda com um consumo regular, e pode variar em quatro capacidades de arrefecimento; 60Lts, 100Lts, 100Lts Plus e 200Lts. Este tipo de instalação suporta até três tipos diferentes de bebidas por máquina, e os barris usados apresentam uma capacidades que varia entre os 20Lts e os 50Lts [1].

Para um ponto de venda de elevado consumo, é instalada uma solução bastante semelhante à referenciada anteriormente. A principal diferença reside na instalação de tanques arrefecidos com a capacidade de 500Lts ou de 1000Lts, em alternativa ao barril TR. Este tipo de instalação, conhecida como Bier-Drive, permite uma tiragem mais frequente, sem riscos de exceder a capacidade de arrefecimento da máquina, visto que a bebida já se encontra arrefecida. Ao ser acondicionada desta forma, é também assegurado que as suas características permanecem inalteradas durante mais tempo.

Num ponto de venda com um consumo baixo, é instalada uma máquina de barril de tara perdida. Tendo capacidade para apenas 20Lts, garante que as necessidades do ponto de venda são satisfeitas, sem prejudicar a qualidade do produto a comercializar.

Dos três formatos de instalação previamente enumerados, apenas são utilizadas dois tipos de máquinas de extração diferentes. Neste trabalho, será dado uma maior ênfase à máquina de extração de bebida de barril TR e Bier-Drive, apresentadas no ponto 5 da figura 2.1.



Figura 2.1: Instalação de uma máquina de extração de bebidas à pressão [1]

Uma instalação de extração de bebidas para barril TR ou Bier-Drive 2.1, é constituída pelos seguintes componentes:

1. Extrator “click” - é responsável pela ligação do barril à tubagem. Este faz a injeção de gás pressurizado ( $\text{CO}_2$ ) dentro do barril e a extração da bebida por diferença de pressão. Apresenta dois pontos de ligação destinados ao gás e ao produto.
2. Garrafa gás ( $\text{CO}_2$ ) - Armazena o gás sob pressão, estando aproximadamente a 50 bar. É genericamente utilizado ( $\text{CO}_2$ ) nas instalações.
3. Monómetro/Manoedutor - Garante que a pressão injetada para o barril não excede o valor recomendado, entre 2 e 3 bar. Este ponto é fundamental para se conseguir ter um controlo, não só do caudal da extração, mas também para evitar a ocorrência de gaseificação excessiva.
4. Barril – É o recipiente no qual está armazenado o produto sob pressão. Este pode variar em formato e capacidade. Para cerveja, são tipicamente utilizados barris de 30Lts e 50Lts de aço inox, ou poliuretano e, por vezes, instalações de Bier-Drive. Para refrigerantes e vinho, os barris já apresentam um formato mais semelhante ao de uma botija de ( $\text{CO}_2$ ), com capacidade para 20Lts, e uma construção em poliuretano.
5. Máquina de extração de bebidas, MEB – Garante o arrefecimento da bebida até à temperatura desejada. Este ponto será posteriormente abordado com maior detalhe.

6. Tubagem de python – Permite a passagem da bebida, desde o barril até à máquina de extração e, de seguida, até à torneira de extração. Esta tubagem garante um controlo de temperatura em todo o percurso do produto no exterior da máquina. A tubagem a jusante da máquina é arrefecida através da circulação de água proveniente do banco de gelo, garantindo entre tiragens, uma temperatura constante.
7. Torneira de extração – É o último local de passagem do produto até chegar ao copo. Apesar do princípio de funcionamento das instalações não variar muito a nível mundial, a torneira é algo que caracteriza a marca e o produto, encontrando um número infindável de formatos e feitios. O seu funcionamento é simples, mas a mais ligeira interferência pode provocar alterações na extração final, conduzindo a uma maior ou menor formação de espuma.

Todos estes componentes são indispensáveis para se conseguir uma boa extração.

## 2.2 Funcionamento de uma máquina de extração de bebidas à pressão

No mercado atual, as máquinas de extração de bebidas apresentam uma arquitetura simples e universal. A sua constituição é muito semelhante à de um frigorífico, tendo duas zonas separadas fisicamente; um banco de gelo e uma unidade de frio 2.2. A tecnologia que estas máquinas utilizam para transferir calor consiste na refrigeração por compressão de vapor, sendo uma das formas globalmente mais utilizada na indústria de refrigeração.

As máquinas utilizadas a nível nacional, como já referido anteriormente, podem apresentar capacidades diferentes. Estas capacidades, expressas em litros, traduzem a quantidade máxima de produto capaz de ser arrefecido pela máquina numa tiragem contínua.

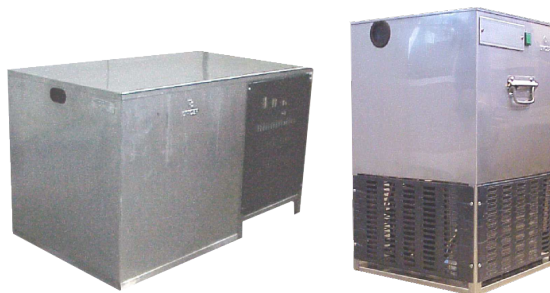


Figura 2.2: Máquina de extração de bebidas Modelo Horizontal e Vertical

De forma a tornar mais versátil a instalação no ponto de venda, a sua arquitetura varia em dois formatos; existe uma versão mais comum, denominada de Vertical 2.2, em que a unidade de frio se encontra na zona inferior e o banco de gelo na superior, tirando partido do espaço em altura; a versão Horizontal 2.2. Esta última foi projetada para responder à necessidade de encontrar uma alternativa, à falta de espaço vertical nos pontos de venda. Neste caso a unidade de frio e o banco de gelo estão lado a lado. Além das tipologias anteriormente descritas, é também utilizado, embora menos frequentemente, aquele que é conhecido por "Modelo Invertido". Este surgiu da iniciativa da Unicer de melhorar a eficiência da máquina, e foi concebido através da troca da posição do banco de gelo com a unidade de frio, numa máquina standard Vertical. O princípio seguido para esta inversão, foi o de que o calor produzido pelos motores presentes na zona inferior da máquina, bem como o condensador, estariam a induzir um aumento da temperatura na base do tanque de água, levando a uma ineficiência da mesma. Em teste preliminares, através da utilização de um medidor de consumos elétricos Silvercrest, e dois modelos de máquinas com a mesma potência, foi possível identificar uma diferença no consumo de 2kWh, num período de 48 horas. Isto permitiu concluir que o modelo Invertido realmente apresenta uma melhoria na eficiência.

### **Banco de Gelo**

Podemos comparar o banco de gelo com uma bateria, pois é aqui que é armazenada a capacidade de arrefecimento da máquina.

O tanque é constituído por uma caixa em poliuretano de alta densidade, com o topo aberto. No seu interior, na zona mais periférica, está o evaporador e, na zona central uma, ou mais, serpentinas de arrefecimento das bebidas. O material de construção do evaporado consiste num tubo de cobre com cerca de 3/8' e numa serpentina de arrefecimento em aço inox, com 5/16' de diâmetro. Os comprimentos destes varia consoante a capacidade da máquina. Por fim, temos um motor agitador, que garante uma temperatura uniforme no banco de gelo. Este motor serve também como bomba, enviando água arrefecida através da tubagem de python, até à torneira. Desta forma é garantido que a bebida presente na tubagem está devidamente arrefecida. Para garantir que o gelo não entra em contacto com as serpentinas de arrefecimento, este é controlado por uma sonda. Este mede a resistência do meio através de dois eléctrodos. Assim que a sonda se encontra coberta pelo gelo, o controlador desliga o compressor e a ventoinha, impedindo assim a formação excessiva de gelo.

Para que o gelo atinja o seu nível máximo são necessárias aproximadamente nove horas, dependendo da capacidade do tanque e da temperatura exterior.

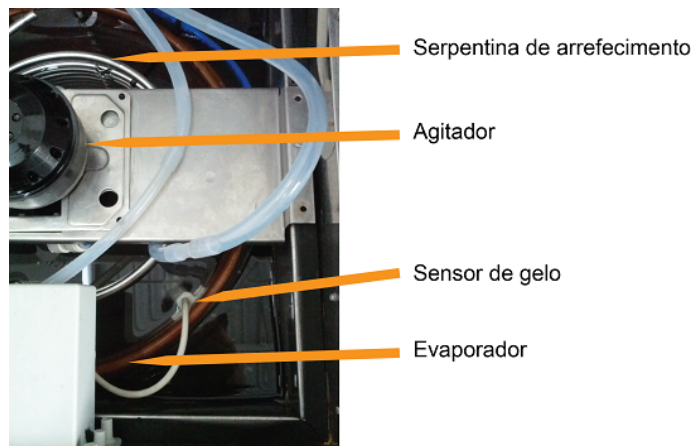


Figura 2.3: Banco de Gelo

### Unidade de frio

O objetivo da Unidade de frio é a transferência de calor do banco de gelo para o exterior, permitindo assim a formação de gelo. Para isso, são necessários quatro componentes essenciais: um condensador, um compressor, uma válvula de expansão e um evaporador. Estes estão presentes em todos os refrigeradores que utilizam compressão de vapor. Esta tecnologia é possível através da utilização de um circuito fechado, por onde circula um fluido refrigerante, R-134a. Este, ao passar pelo evaporador, absorve o calor do banco de gelo levando-o para o condensador, presente na unidade de frio, onde, por sua vez, é transferida para o ambiente. Para que esta troca de calor ocorra, é necessário que a temperatura no evaporador seja mais baixa do que no banco de gelo e que a temperatura do condensador seja mais alta que a temperatura do ambiente. Isto é conseguido através da inclusão de um compressor entre o evaporador e o condensador. Desta forma, a pressão do fluido refrigerante aumenta, elevando também a sua temperatura de saturação, permitindo que sejam atingidos os valores necessários para a troca de calor. Para aumentar a troca de calor do condensador para o ambiente é utilizada uma ventoinha que força a passagem do ar pelas placas do condensador.

O compressor é hermético e funciona através de um motor de indução, que se encontra no seu interior. A sua potência varia com a capacidade da máquina. Uma máquina de 100Lts apresenta uma potência instalada de aproximadamente 600W (p.e).

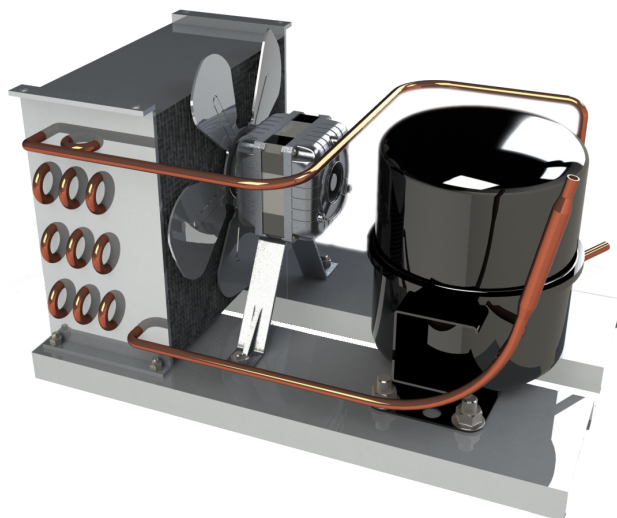


Figura 2.4: Unidade de Frio [2]

### Módulo de Controlo

O módulo de controlo é o "cérebro" da máquina; liga e desliga o compressor e a ventoinha, consoante a quantidade de gelo que é apresentada no tanque de água. Atualmente, os controladores que se encontram no mercado Ibérico apresentam uma máquina de estados simples e similar. Relativamente à eletrónica, existe pouca diferença entre modelos, podendo verificar-se alguma evolução ao longo dos anos.

Para este trabalho vão ser analisados os dois modelos mais utilizados pela Unicer Bebidas S.A., em Portugal. O princípio de funcionamento dos controladores é simples, mas ineficiente em termos energéticos. Estes, baseados num sistema *Single-input Single-output*, SISO, apresentando um *input* e um *output* - o sensor de gelo e o controlo do compressor/ventoinha, respetivamente. O sensor de gelo [2.3](#) funciona através da diferença de resistência da água e do gelo, detetando quando os seus terminais estão cobertos por gelo. Rapidamente se entende que uma diferença mínima na espessura de gelo é o suficiente para enviar um sinal ao controlador, provocando arranques sucessivos do compressor.

Visto que o controlador apenas atua sobre o compressor/ventoinha, o funcionamento do agitador é constante e independente de condições externas. Os modelos analisados apresentam apenas uma diferença de funcionamento entre si, sendo o modelo mais recente uma solução para o problema do sensor de gelo descrito anteriormente.

O modelo mais antigo (AL 101 da REFRIGERACIÓN BARCINOVA, S.A.), ainda presente

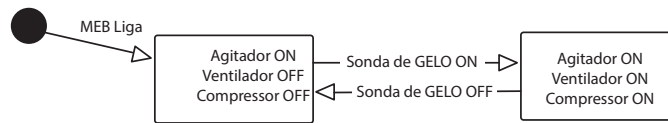


Figura 2.5: Máquina de estados AL101

em grande número no mercado, contém uma máquina de estados finita 2.5 com apenas dois estados, que ligam e desligam o conjunto compressor/ventoinha, consoante os sinais emitidos pelo sensor de gelo. A sua simplicidade leva o conjunto a situações de arranques sistemáticos, causando desgaste prematuro nos motores. Em termos de hardware, esta máquina de estados é conseguida através de um simples comparador. Este recebe o *input* do sensor de gelo e, consoante a resistência deste, arma ou desarma um relé.



Figura 2.6: Módulo de Controlo AL901-C

Já o modelo (AL 901 da REFRIGERACIÓN BARCINOVA, S.A.), mais recente, tenta responder aos arranques sistemáticos a que a unidade de frio é sujeita com o modelo anterior. Apresenta três estados 4.7, em que um deles garante que os motores não são acionados em períodos curtos. Leva a uma espera de 23 minutos após ser detetada a falta de gelo. Isto é conseguido através da implementação do circuito do modelo AL 101, em conjunto com um micro-controlador que faz a espera necessária.

## 2.3 Refrigeração

A refrigeração pode ser entendida como o processo de transferência de calor, levando a uma redução de temperatura de um produto ou de um lugar.

Ao longo dos últimos tempos, o Homem tem procurado a solução perfeita para uma refrigeração mais eficiente. A necessidade de arrefecimento dos alimentos foi um dos principais impulsionadores, mas até meados do século XIX, os únicos meios disponíveis eram naturais, através da utilização de gelo ou de arrefecimento por evaporação. O gelo tornou-se assim num produto procurado por todo o mundo. Guardado durante o inverno, em casas isoladas termicamente por serradura e cortiça, e vendido em épocas quentes, a importação, e exportação atingiu o seu pico em 1872 [5].

No início da segunda metade do século XVIII, os avanços tecnológicos nesta área começaram a fazer-se sentir, e William Cullen, um professor e médico escocês, fez a primeira demonstração em público de um sistema de arrefecimento artificial. No entanto, só em 1834 é que Jacob Perkins, físico e engenheiro mecânico, criou o primeiro refrigerador para uso prático, utilizando a tecnologia de compressão de vapor [5].

### 2.3.1 Refrigeração por compressão de vapor

Atualmente a refrigeração por compressão de vapor é um dos princípios mais usadas em todo o mundo, estima-se que 95% de todas as instalações utilizem este princípio como forma de arrefecimento [6]. O baixo custo de implementação e a versatilidade desta tecnologia, fizeram-na evoluir e amadurecer tornando-se a forma mais eficiente de refrigeração utilizada nos dias de hoje. Porém, durante muito tempo esta tecnologia utilizou gases refrigerantes nocivos para o ambiente, levando a sua utilização a grandes controvérsias. Só na década de 70 é que a procura por alternativas mais seguras começou.

O processo de evaporação e condensação ocorre em quase qualquer combinação de temperatura e pressão. A refrigeração por compressão de vapor tira proveito desse fenómeno, utilizando um fluido refrigerante, em circuito fechado, como meio de transporte de calor, transferindo este de uma zona não desejável e libertando num outro local 2.7. Existem diversas arquiteturas para este sistema, porém todas utilizam quatro componentes base para a sua construção; Evaporador, Compressor, Condensador e Válvula de Expansão.

O processo de refrigeração começa no *Evaporador*. Aqui ocorre a transformação do líquido de refrigeração em gás. O processo de evaporação de qualquer líquido é endotérmico, consumindo

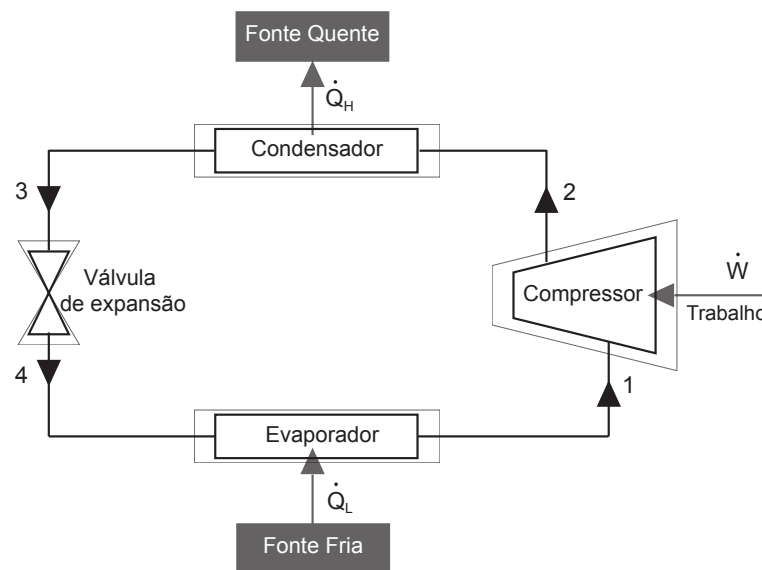


Figura 2.7: Esquema de um sistema de refrigeração por compressão de vapor

energia na forma de calor proveniente do meio em redor. Após o calor do meio ser absorvido, o gás segue para o compressor Ponto 1 2.7. No *Compressor*, o gás é bombeado do evaporador garantindo uma temperatura e pressão correta para a ocorrência de evaporação. Em simultâneo, o gás sofre uma compressão, aumentando a sua pressão, e consequentemente a sua temperatura Ponto 2 2.7. Com a pressão e a temperatura correta, o gás sobreaquecido entra no *Condensador*, transportando o calor que absorveu no evaporador. A diferença de temperatura entre o gás e o meio onde se encontra o condensador, vai forçar a ocorrência de condensação, transformando-o de novo em líquido e libertando a energia absorvida no evaporador e no compressor para o meio ambiente Ponto 3 2.7. Na saída do Condensador a pressão do gás e da temperatura não permitem a ocorrência de evaporação, sendo necessário reduzir a pressão. É instalada uma *Válvula de expansão* entre o condensador e o evaporador com essa finalidade. A implementação deste dispositivo é realizada de diferentes formas, podendo passar por uma simples válvula, uma "placa de orifício", ou por um tubo capilar. Será o custo da solução que vai determinar o que usar. Por fim, o ciclo do fluido de refrigeração entra de novo no evaporador à temperatura e pressão corretas Ponto 4 2.7.

Em certas arquiteturas, é usual acrescentar um permutador de calor interno. A sua utilização provoca um sobreaquecimento do fluido de refrigeração, melhorando a eficiência e evitando alguns problemas encontrados na refrigeração por compressão de vapor. É realizada uma transferência de calor entre a saída do condensador e a do evaporador, garantindo não só um aumento de temperatura do fluido refrigerador no evaporador, mas também a sua entalpia. Dessa forma é possível extrair mais calor, assegurando que apenas entra no compressor fluido no estado gasoso.

### 2.3.2 Outros métodos usados para refrigeração de bebidas

Apesar da maioria das soluções para refrigeração serem baseadas no princípio de compressão de vapor, nem sempre é vantajoso o uso desta tecnologia. Nesta secção é possível encontrar um estudo de algumas soluções alternativas, baseadas em diferentes princípios de refrigeração.

#### Efeito Peltier

Descoberto pelo físico Jean Charles Athanase Peltier, em 1834, foi descrito como "a capacidade de transferência de calor entre a junção de dois materiais diferentes, através da passagem de corrente elétrica".

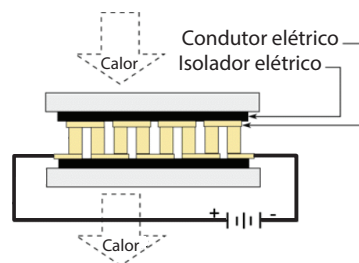


Figura 2.8: Efeito Peltier

Através da aplicação de uma tensão elétrica nos terminais de uma placa Peltier, é possível obter uma variação de temperatura entre o lado quente e o lado frio que pode atingir um  $\Delta T$  de  $60^{\circ}\text{C}$ . Esta diferença de temperatura decai quando a transferência de calor aumenta, sendo inversamente proporcional. Assim, só é possível obter um  $\Delta T$  alto quando a transferência de calor  $Q$  é baixa. Da mesma forma, para se obter um  $Q$  elevado, é necessário manter a temperatura dos dois lados da placa o mais próxima possível.

Este método possibilitou a criação de produtos que não eram possíveis com a compressão de vapor. O tamanho reduzido e a inexistência de partes moveis/fluido de refrigeração, abriram um caminho para soluções de arrefecimento portáteis, pequenas e fáceis de instalar. Em contrapartida a ineficiência e baixa capacidade de arrefecimento limitaram o seu crescimento a um pequeno segmento do mercado, no qual a necessidade de um arrefecimento rápido não faz parte dos requisitos principais.

Na máquina XpresS da Super Bock é utilizado o efeito Peltier. Através de uma placa montada num dissipador é retirado o calor presente no interior da máquina, onde se encontra o barril, e este é transferir para o exterior. A placa utilizada apresenta uma capacidade de arrefecimento máximo  $Q_{max}$  de 50 Watts, necessitando de 48 horas para arrefecer 5 litros de cerveja a uma temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  até uma temperatura de consumo de  $5^{\circ}\text{C}$  [7].



Figura 2.9: SuperBock Xpres

### Alternativas ecológicas

A procura pelo uso alternativo fontes de energia renováveis tem vindo a tornar-se uma necessidade nos dias de hoje e o uso da radiação solar uma fonte de estudo cada vez maior. Estima-se que o total de energia irradiada pelo Sol para a superfície do planeta Terra seja de  $1.74 \times 10^{17} \text{W}$  e que, devido a fenómenos de reflexão e absorção da atmosfera, apenas 47.2% seja absorvida pela superfície do planeta. Contudo, considerando os gastos energéticos no ano de 2008, apenas seriam necessárias duas horas da energia solar absorvida pela terra para satisfazer a humanidade por 1 ano [8]. É possível assim entender, que a fonte de energia não é um problema, mas sim o custo/eficiência bastante elevado, no desenvolvimento de ferramentas capazes de converter essa energia em energia útil ao Homem, tornando impraticável apenas esse tipo de exploração.

Os sistemas de **Refrigeração Solar** utilizam parte do princípio de funcionamento da Compressão a Vapor. No entanto, em vez de apresentarem um compressor para aumentar a pressão do fluido de refrigeração, fazem uso da energia irradiado pelo sol, o que torna o sistema independente da rede elétrica.

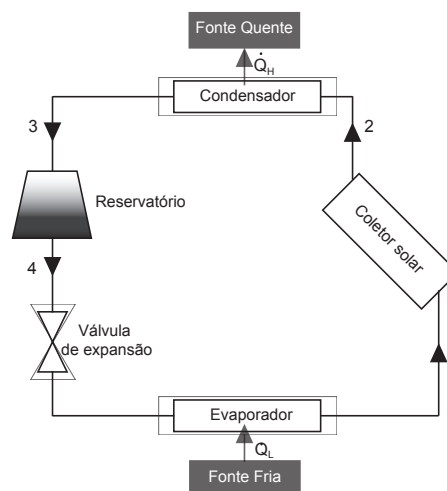


Figura 2.10: Esquema de um sistema de refrigeração solar

Na figura 2.10, é apresentado o esquema de refrigeração solar por sorção, utilizando um coletor solar para a absorção do calor irradiado pelo sol durante o dia. O fluido, presente no coletor, fica isolado do condensador e do evaporador, através das válvulas 1 e 2. Quando a sua pressão atinge a do condensador, a válvula 2 abre, transferindo o fluido em estado gasoso para o coletor. Este é armazenado num tanque, enquanto a sua temperatura continua a aumentar. Quando esta atinge um máximo, ou a radiação solar começa a decair, é fechada a válvula 2. Deixando a sua pressão e temperatura decair, através de transferências de radiação e de convecção. Quando a pressão atinge a do evaporador, é aberta a válvula 4, fazendo-o circular pela válvula de expansão até ao evaporador, absorvendo o calor do meio, através de evaporação. Após isto, é aberta de novo a válvula 1, transferindo o fluido para o coletor e, recomeçando o ciclo [9].

Um exemplo da utilização desta tecnologia é o *beerCooler*, imagem 2.11 esquerda, desenvolvido pela *Coca-Cola*, para ser utilizado em lugares quentes e remotos, onde o acesso a eletricidade é bastante limitado ou mesmo inexistente.

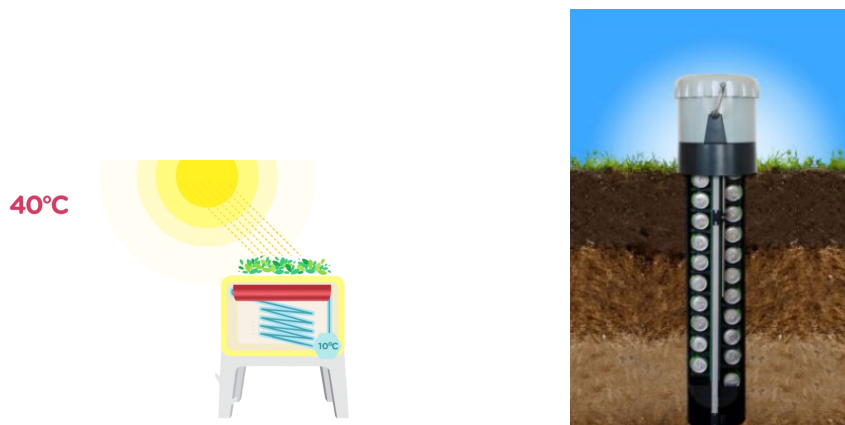


Figura 2.11: bioCooler Coca-Cola e eCooler

Outros projetos, como o *eCooler*, utilizam o meio em redor para alcançarem o arrefecimento de bebidas, imagem 2.11 direita. Neste caso, através da diferença de temperatura encontrada no subsolo, são arrefecidas latas de bebida. Como a zona superior do tubo se encontra isolada, a temperatura no seu interior diminui. Este tipo de instalação apresenta um mercado limitado, sendo necessário viver em zonas frias do globo.

## 2.4 Sensores de medição/deteção de caudal

Atualmente é possível encontrar um grande número de soluções para a medição do volume de líquidos. Estas são caracterizadas pela tecnologia que empregam e pela precisão/resolução que apresentam.

Nesta secção são dados a conhecer algumas das diferentes tecnologias utilizadas, as suas características e o seu princípio de funcionamento.

Os sensores usados para medição e deteção de caudal, encontram-se divididos em três grandes grupos; Mecânico, Ultrassónico/Ótico e Eletromagnético.

Os **Mecânicos**, utilizam o caudal do fluido para criar movimento em componentes dos sensores, correspondendo a turbinas, pistões ou discos. Uma parte do caudal é transformada em movimento mecânico, que é medido através de *encoders* e posteriormente convertido em sinais elétricos.

O seu preço reduzido, torna este tipo de sensor um dos mais utilizados. O preço pode ir da faixa das dezenas de euros até aos milhares, dependendo da precisão/resolução.

A utilização de sensores **Ultrassónicos** e **Óticos**, reduz a necessidade de interagir com o meio. Estes utilizam emissores e recetores de som ou luz, que atravessam o tubo 2.12. Com a alteração no caudal do líquido, o sensor recebe um sinal que se encontra desfasado do inicial. Esta diferença permite estimar a velocidade do líquido.

Este sensor apresenta uma precisão/resolução superior aos Mecânicos, que pode variar entre 1% e 3%, sendo o seu custo uma reflexo disso mesmo. Na escala mais baixa de características, o seu preço atinge as centenas de euros.

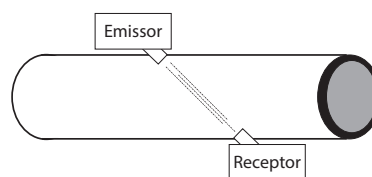


Figura 2.12: Esquema para sensor Ultrassónico/Ótico de medição de caudal

A tecnologia de medição de caudal através de sensores **Magnéticos**, é uma das que apresenta melhor precisão. Sendo utilizada na maioria das instalações industriais, para medição de grandes quantidades de líquido. Realiza-se através da indução de um campo magnético na tubagem, causando uma diferença de potencial no fluido, diretamente proporcional ao caudal. Este efeito é explicado pelo fenómeno da "Indução Eletromagnética", descoberto por Michael Faraday. A

diferença de potencial, é medida através de sondas metálicas introduzidas na tubagem, perpendicularmente ao caudal.

O seu preço atinge os milhares de euros, sendo apenas usada em soluções que obriguem uma precisão inferior a 1%.

No primeiro semestre de 2014 foi realizada uma tese, pelo Eng. João Manuel Corrêa, baseado no mesmo projeto da presente dissertação, com o tema "Monitorização de uma máquina de cerveja". Nesse tese é apresentada uma solução de monitorização do percurso de abertura de uma torneira, através do efeito Hall. Esta solução, com um custo de implementação baixo, apresenta também erros na leitura, devido à possibilidade de receber um feedback errado, quando a torneira permanece aberta sem extração de líquido.

## 2.5 Controlo de motores de indução CA monofásicos

Nesta secção vamos fazer uma breve análise comparativa de dois métodos utilizados na indústria, para o controlo de motores CA monofásicos de indução, relés eletromecânicos e relés de estado sólido. Este estudo tem por objetivo compreender qual dos dois sistemas melhor se enquadra no redesenho do sistema de controlo das MEB.

Ao longo dos anos, os EMR's (relés eletromecânicos) têm sido a forma mais utilizada para realizar o controlo sobre cargas elétricas garantido, um isolamento galvânico entre o controlador e a carga controlada.

O funcionamento de um EMR, assemelha-se a um interruptor; o circuito é fechado, permitindo a passagem de corrente quando este é ativado e abre o circuito quando é desativado. O acionamento do interruptor é conseguido utilizando uma bobina, que, quando alimentada, produz um campo magnético. Isto faz acionar uma alavanca, que junta dois contactos elétricos, fechando o circuito de potência. O circuito abre quando deixa de fluir corrente na bobina, permitindo a alavanca, sob tensão de uma mola, voltar ao estado original.

Os relés podem ser divididos em duas áreas de atuação; para sinais de dados e para circuitos de potência. Na área de sinais de dados, podem ser comutadas cargas num valor aproximado de 2A de cargas resistivas. Já em circuitos de potência, de acordo com o IEC 255, o valor de comutação pode atingir os 600V e os 100A [10].

Apesar da sua grande utilização e das potências capazes de atuar, o seu funcionamento assenta em pressupostos que impõem algumas limitações, mais especificamente no tempo de atuação e na sua vida elétrica.

Existem dois *delays* que contribuem para o atraso na resposta. O primeiro diz respeito à componente elétrica, e é causado pela necessidade de criar um campo magnético suficientemente grande para fazer atuar as partes mecânicas, o outro delay corresponde ao movimento dessas

mesmas partes. Os dois delays são influenciados diretamente pela massa das partes móveis e a sua soma corresponde a um valor típico de 5 a 20 milissegundos [11].

A vida elétrica é especificada pelo fabricante e representa o número de operações que o EMR deverá realizar antes de uma falha. Esse valor é tipicamente de algumas centenas de milhares, mas é dependente da carga que é comutada. Para uma carga resistiva é possível assumir que esse valor passa para 75% do nominal. Em situações de cargas indutivas devido ao arco elétrico entre os contactos, o valor pode atingir os 40%. Em motores corresponde a 20% [11]. Existem inúmeros fatores que contribuem para o desgaste mecânico dos EMR's. Grande parte está associada aos contactos elétricos devido ao choque mecânico e a efeitos elétricos, como o arco elétrico e a força eletromotriz inversa, causados na comutação. Estes efeitos elétricos podem ser minimizados através da utilização de circuitos de supressão que limitam a corrente de sobretensão, no momento de comutação. Esses circuitos podem passar por díodos de potência, varistores ou "snubber".

Com o desenvolvimento cada vez maior dos semicondutores, o aparecimento de alternativas ao EMR começaram a surgir. A utilização de SSR's (relés de estado sólido), permitiu o desenvolvimento de controladores mais precisos e fiáveis, diminuindo assim o custo do ciclo de vida.

A funcionalidade de um SSR é em muito similar a um EMR, possibilitando a comutação de cargas AC ou DC, através de um sinal de controlo. No entanto, ao contrário do EMR, não utiliza partes móveis, tornando a sua utilização bastante aliciente. Na sua implementação são utilizados tiristores, ou transístores, que possibilitam a comutação de cargas que podem ir de poucos miliamperes a dezenas de amperes. O seu tempo de comutação é também reduzido, ficando na ordem das poucas centenas de micro-segundos, ao contrario dos EMR, permitindo um controlo por ângulo de fase. Em cargas AC são utilizados TRIAC, da família dos tiristores, também designados por tiristores bidirecionais. São compostos por dois tiristores numa configuração inversa e paralela. O terminal de disparo (gate) é partilhado entre os dois tiristores, impondo algumas dificuldades no acionamento separado dos tiristores. O isolamento galvânico entre o circuito de potência e o de controlo é assegurado através de isoladores óticos. Este tipo de isoladores apresenta tipicamente dois lados separados fisicamente. Do lado de controlo um LED de radiação infravermelha e do lado da potência, um fototransistor.

Tabela 2.1: Tabela comparativa entre EMR e SSR [3]

	EMR	SSR
Sensível a corrosão, oxidação ou contaminação	Sim	Não
Tempo de comutação	5-10 ms	<1ms
Ciclo de vida	>100 k	>100 M
Modo de falha	Aberto	Fechado
Ponto de falha normal	Contactos	LED
Resistência dos contactos abertos	<1M ohms	<20K ohms
Resistência dos contactos fechados	<.05ohms	<.1ohms



## Capítulo 3

# Hardware

Este capítulo apresenta o desenvolvimento a nível do hardware que foi realizada, com o objetivo de cumprir os objetivos inicialmente traçados, para esta dissertação.

Encontra-se dividido em duas secções principais. Na primeira, é estudada uma forma de deteção de caudal, possibilitando ao controlador obter uma medição dos consumos de bebida extraída e garantindo uma resposta mais exata no acionamento da máquina. Na segunda secção, é apresentado um estudo para a implementação de um novo módulo de controlo capaz de incorporar, tanto o novo sensor de caudal, como de suportar um novo algoritmo de controlo, desenvolvido no capítulo 4. Todo o redesenho do novo módulo de controlo foi realizado tendo como objetivo atingir a mesma meta orçamental dos módulos antigos, tentando dessa forma minimizar a utilização de componentes com custos elevado.

### 3.1 Deteção de caudal

Para se conseguir estimar o balanço energético dentro do banco de gelo, assim como entender o padrão de consumo exigido à máquina, é necessário que o módulo de controlo receba um *feedback* cada vez que seja realizada uma extração de bebida. Desta forma, é possível passar de um controlador baseado num modelo SISO, para um baseado num modelo *Multiple-input Multiple-output*, MIMO.

Como foi referido na secção 2.4, existem inúmeros métodos para medir e estimar o volume por unidade de tempo de um líquido. Porém, grande parte das soluções encontradas apresentavam um custo elevado, tornando inviável a sua aplicação em grande escala. Assim, o requisito principal baseou-se no custo da solução final em detrimento da precisão nas medições efetuadas. Foi também imposta a condição de não interferir diretamente com o líquido, de modo a evitar

problemas de cavitação/gasificação do produto e possíveis contaminações. Devido a estes requisitos e condições impostas, todas as soluções encontradas atualmente no mercado acabaram por ser excluídas.

Com o objetivo de dar resposta às condições impostas, analisou-se o comportamento resistivo do fluido. Partiu-se do princípio que a resistência elétrica de um fluido estacionário apresentaria um comportamento diferente da resistência elétrica de um fluido em movimento.

Para esse desenvolvimento, foram introduzidas duas sondas metálicas, no percurso da bebida, isoladas entre si de forma a poder medir a resistência entre elas.

Tentando minimizar a introdução de novas matérias no circuito habitual do produto, utilizaram-se componentes já presentes na máquina. Neste caso foram usadas duas pontas da serpentina de arrefecimento, onde foram soldados fios elétricos. Na figura 3.1, podemos ver a implementação utilizada.



Figura 3.1: Detetor de caudal

No acondicionamento do sinal, foi utilizado um divisor resistivo, acoplado diretamente a um ADC. Partindo-se dessa forma para uma primeira análise da resistência elétrica.

Para a aquisição digital, foi utilizado um micro-controlador ATmega32u4, com um ADC incorporado de 10-bit e um módulo Bluetooth, para permitir a receção em tempo real dos dados em formato bruto. A frequência de amostragem foi de 45Hz, imposta pelo circuito montado.

Após várias análises e medições, verificou-se que a resistência média entre as sondas, apresentava um valor próximo dos 300k ohm. Para garantir uma leitura a meio da escala, optou-se por um valor igual para o divisor resistivo, constituído por duas resistências de igual valor.

## Resultados

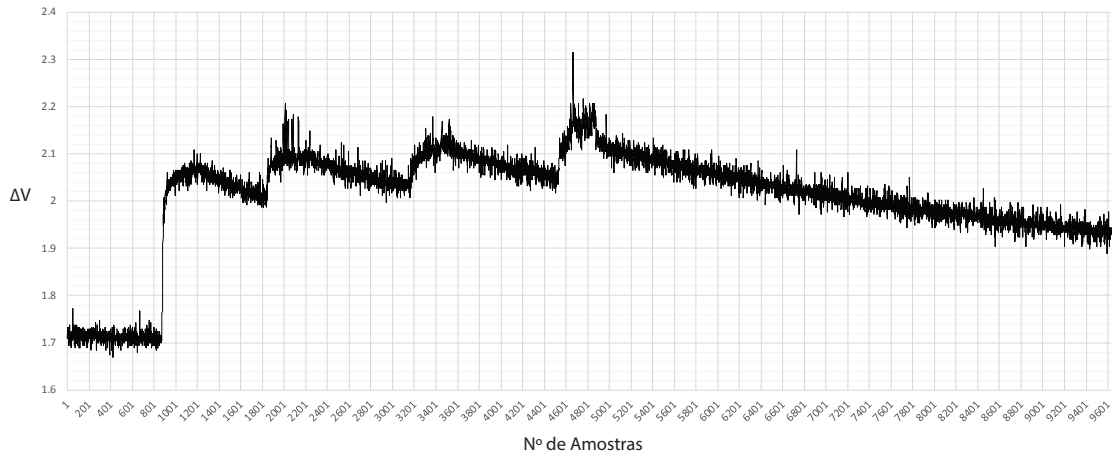


Figura 3.2: Registo quatro tiragens 20cl

É possível ver na figura 3.2 o valor da tensão do divisor resistivo, em formato bruto, recolhido após 4 extrações de cerveja, cada uma correspondente a um copo de 20cl.

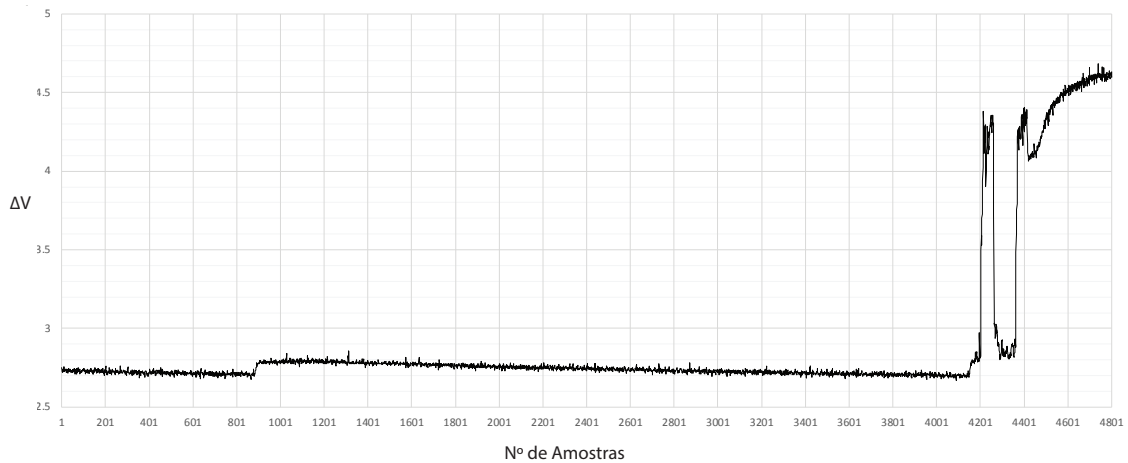


Figura 3.3: Registo tiragem final de barril

Na figura 3.3, é apresentada a variação abrupta do sinal, quando a cerveja presente no barril acaba. Este comportamento é de fácil entendimento, já que quando a cerveja acaba, toda a tubagem deixa de ter líquido e passa a conter espuma, aumentando a resistência entre as sondas para valores na ordem dos megaohm.

### 3.2 Redesenho do módulo de controlo

Nesta secção é dado a conhecer uma nova proposta de arquitetura para o hardware do módulo de controlo. A necessidade de desenvolvimento desta advém, fundamentalmente, dos requisitos impostos pelo novo algoritmo desenvolvido.

Para este redesenho foram também estudados os problemas encontrados nos controladores utilizados atualmente. Tentou-se evitar e reduzir a frequência de ocorrência de avarias desta unidade.

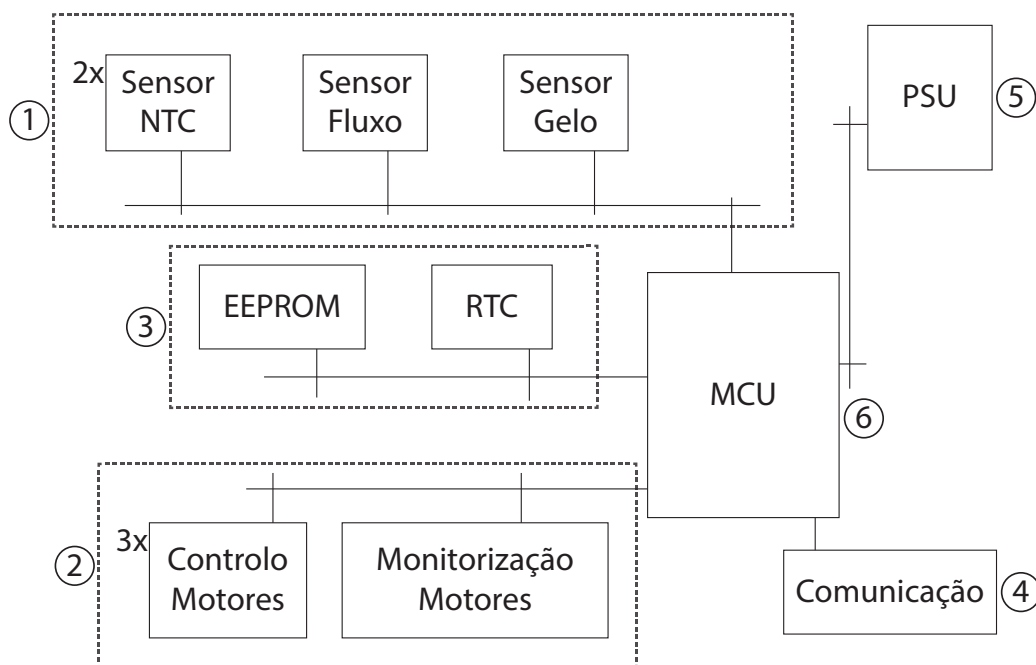


Figura 3.4: Modelo proposto para o Módulo de Controlo

O modelo proposto está dividido em seis sub-módulos; 1-Sensorização, 2-Controlo e Monitorização dos Motores, 3-Memória e Relógio de tempo real, 4-Comunicação, 5-Fonte de Alimentação e 6-Micro-controlador. Cada um deles apresenta novas funcionalidades que possibilitam a implementação do novo algoritmo de controlo, com uma maior eficiência energética e mecânica. Para além disso, a incorporação de todos os sub-módulos, numa única unidade de controlo, permite um estudo alargado do comportamento da MEB em situações reais, obtendo-se assim uma plataforma para futuro estudo e desenvolvimento.

### **Sensorização**

A Sensorização é responsável pelo envio da informação sobre o estado atual da MEB, ao controlador. Esta unidade apresenta três tipos de sensores, sendo o seu acondicionamento realizado de forma similar.

Para o controlador poder estimar o estado do banco de gelo, é necessário que este consiga interpretar o meio ambiente que o rodeia. Para isso optou-se pela utilização de dois sensores de temperatura NTC; Um para possibilitar a obtenção da temperatura ambiente, e outro para a temperatura do banco de gelo. Este último apenas é necessário nas primeiras horas de funcionamento da MEB, permitindo obter a temperatura inicial da água considerado como opcional, no caso de se utilizar outro método para a sua obtenção. Um exemplo é a introdução do valor manualmente, igualado à temperatura ambiente ou calculado em função do consumo energético.

O sensor de caudal, estudado na secção 3.1, permite não só traçar um perfil de utilização da MEB no ponto de venda, como também dar uma resposta mais rápida ao acionamento da unidade de frio. É também utilizado para estimativa da massa de gelo presente na MEB.

De forma a possibilitar, ao controlador, ter um ponto de referência para corrigir a previsão do estado do banco de gelo, manteve-se o sensor de gelo, neste caso, com uma posição fixa. A aquisição do sinal é análoga ao do sensor de caudal, já que, da mesma forma, utiliza a resistividade elétrica do meio presente entre as duas sondas metálicas. Esta varia entre Mohm e kohm, consoante se encontre coberta de gelo ou não.

### **Controlo e Monitorização dos Motores**

Para o controlo dos motores AC, optou-se pela utilização de TRIAC's, acionados através de isoladores óticos. Como foi possível estudar na secção 2.5, as vantagens de utilização de SSR são inúmeras, porém é necessário uma exponencial atenção no seu dimensionamento.

Neste caso, de forma a possibilitar o controlo independente dos três motores, Agitador, Ventilador e Compressor, optou-se pela escolha de um circuito por motor.

Para lidar com o ruído eletromagnético, EMI, e com picos de tensão, causados pela comutação dos TRIAC's, foi adicionado, no dimensionamento do circuito, um *RC snubber*, composto por uma resistência e um condensador.

Com o aumento das potências comutadas as interferências eletromagnéticas e picos de tensão também aumentam. Além disso, visto não ser necessário fazer um controlo do ângulo de disparo do TRIAC no compressor, utilizou-se isoladores-óticos com deteção de passagem por zero.

Assim, é garantida a comutação da carga em amplitudes baixas da onda sinusoidal, impedindo a formação de *kickback's* por parte do motor.

Realizou-se a montagem do circuito 3.5 numa *breadboard*, o qual permitiu obter uma validação de funcionamento, utilizando o TRIAC BT139 e o isolador-ótico MOC3021. O controlo foi realizado apenas no ventilador e no agitador, devido à impossibilidade de obter isolador-ótico com deteção de passagem por zero, MOC3041.

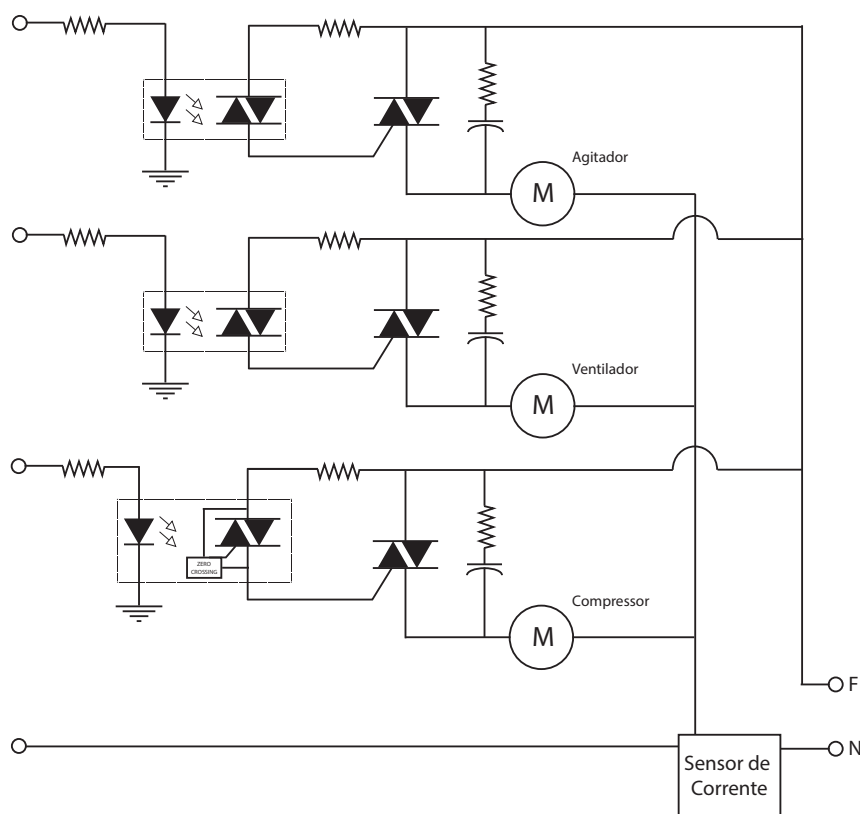


Figura 3.5: Modelo proposto para o Controlo e Monitorização dos Motores

Para realizar a monitorização individual dos motores, decidiu-se fazer uma medição da corrente, tornando possível a perceção de pequenas alterações no funcionamento dos componentes.

Em testes preliminares, através da utilização de um amperímetro, identificou-se uma variação de  $\approx 0.1$  A na corrente consumida pelo compressor, após desligar a ventilação do condensador. Isto acontece devido ao aumento da temperatura e pressão do fluido no condensador, obrigando o compressor a exercer mais força e, conseqüentemente, a consumir mais energia. Desta forma, é possível, não só detetar avarias nos motores, mas também detetar uma das principais causas de mau funcionamento da MEB - a má ventilação do condensador.

Devido ao custo dos sensores de corrente, e não havendo a necessidade da monitorização individual dos motores, em simultânea, foi usado apenas um sensor, ligado a um condutor comum dos três motores. Permitindo, através do acionamento alternado dos TRIAC's, uma leitura individual dos motores.

### **Memória e Relógio de tempo real**

Para poder traçar um perfil do consumo de bebida no ponto de venda, é preciso guardar as informações obtidas através do sensor de caudal. Para garantir uma boa previsão das necessidade da massa de gelo, o controlador terá de armazenar a informação referente a um ano de tiragens, com uma frequência de amostragem de uma hora, correspondendo a 8760 valores. Considerou-se a necessidade de um ano, devido ao comportamento sazonal associado ao consumo de bebidas.

De forma a limitar a capacidades da memória necessária, atribuiu-se um tamanho máximo de 1 byte, para o valor guardado, correspondendo a um intervalo de [0 ,255], Acabando por ser ocupados menos de 9 kB num ano de registo. Este valor não deve ser entendido como os litros consumidos em determinada hora, mas sim como um valor percentual da utilização da MEB.

Outros valores, como consumo de bebida total, número de barris gastos, consumo elétrico e alertas de mau funcionamento, são também armazenados na unidade de memoria. Dessa forma, considerou-se como requisito uma memória com um mínimo de 10kB, não sendo um problema no caso de utilização de memórias *flash*.

Como é necessário manter um registo de consumo ao longo do ano, a utilização do micro-controlador como relógio tornaria o sistema instável. Cada vez que cada vez que a máquina fosse desligada, o sistema perderia a hora e a data. Por essa razão, recorreu-se à inclusão de um módulo RTC, permitindo ao sistema ser desligado, sem a perda da referência temporal.

### **Sinalização e Comunicação**

A inclusão deste sub-módulo na nova arquitetura, acrescenta duas funcionalidades.

A primeira, com um carácter preventivo, tem por objetivo alertar o utilizador/ponto de venda, da má utilização da MEB, má ventilação do condensador ou de uma temperatura ambiente extremamente alta. Alertando também para situações de final de barril ou espuma no sistema, evita-se o desperdício de bebidas. Este tipo de comunicação é realizado através de um *buzzer* ou indicação luminosa.

A segunda funcionalidade é destinada à assistência técnica, para manutenção e recolha de dados. É apresentada em dois formatos, através de comunicação de cabo serial ou por *bluetooth*, sendo o fator custo o mais determinante.

### Fonte de Alimentação

Para o funcionamento de todo o sistema, foi fundamental dimensionar uma alimentação capaz de fornecer uma tensão de 5V e uma corrente máxima com capacidade para todos os componentes. Porém, visto nesta tese não ter sido realizada a escolha individual dos componentes, foi essencial realizar um estudo do consumo máximo em cada um deles. Neste estudo, foram apenas considerados aqueles com um maior consumo 3.1.

Tabela 3.1: Consumo elétrico dos principais componentes

Módulo	Unidades	Consumo máximo (mA)
Isolador-ótico	3	≈ 10
Sensor Corrente	1	≈ 10
Comunicação	1	≈ 40
Micro-controlador 8-bit	1	≈ 10
Memoria Flash	1	≈ 10
Total		≈ 100

Considerando os consumo reduzidos, optou-se pela utilização do dimensionamento presente nos módulos antigos, composto por um transformador, um retificador de onda completa e um regulador de tensão, representado na figura 3.6. Com o acréscimo de um circuito de detecção de passagem por zero, constituído por um transistor NPN e três resistências, possibilitando fazer um controle, por ângulo de disparo, nos TRIAC's.

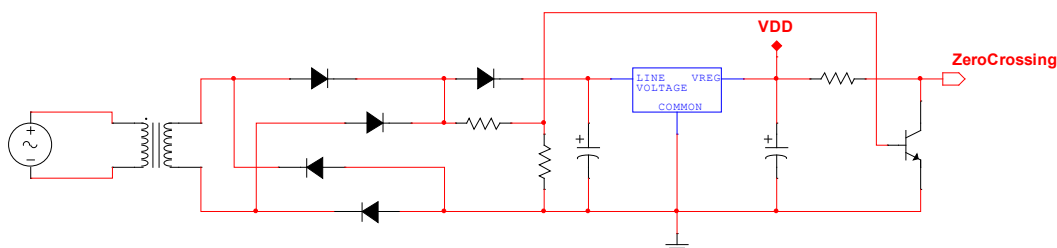


Figura 3.6: Fonte de alimentação

## Capítulo 4

# Software

Neste capítulo é apresentado o trabalho desenvolvido a nível de *Software* para a modelação e controlo de uma máquina de extração de bebidas. Para simulação e validação utilizou-se, como ferramenta principal de trabalho, o MATLAB R2013a.

Este capítulo está dividido em três secções: Na primeira, foram estudados os processos de troca de calor envolvidos no funcionamento da máquina de extração de bebidas, bem como a sua modelação. São apresentados os resultados simulados *versus* os valores reais, obtidos através de sensorização da máquina; Na segunda parte, foram implementados dois algoritmos para o controlo da máquina. O primeiro baseado no modelo de funcionamento atual e o segundo desenvolvido com o objetivo de diminuir os consumos elétricos e o desgaste mecânico. Por fim, é apresentada a terceira secção, onde foi desenvolvido um algoritmo para a aquisição e processamento do sinal recolhido do sensor de caudal 3.1.

### 4.1 Modelação em MATLAB de uma MEB standard

O princípio de funcionamento de uma MEB, como referido anteriormente, é baseado num sistema de refrigeração por compressão a vapor. Ao contrário de um frigorífico convencional, que tem como objetivo manter uma temperatura constante em toda a área, uma MEB necessita apenas de congelar um volume predefinido de água, de forma a armazenar essa "energia" para alturas de maior consumo. Deste ponto de vista, é lógico considerar que quanta mais água congelada existir, maior será a capacidade da máquina para lidar com situações de consumo bastante irregulares. Também é necessário impedir o congelamento da bebida, que se encontrar no interior da serpentina. Está especificado, pelo manual de instalação das MEB's [1], que para o modelo standard, 100L, a quantidade de gelo desejada é de 25kg, congelando cerca de 45% da água.

De seguida, será exposto o estudo termodinâmico realizado, de modo a possibilitar a modelização da energia envolvida no equilíbrio térmico de uma MEB de 100L. O estudo encontra-se

dividido em três áreas: *Ganhos Energéticos*, *Capacidade Frigorífica* e *Ganhos Energéticos durante uma extração*.

Esta secção termina com uma comparação entre os resultados simulados e os esperados.

### Ganhos Energéticos

No capítulo 2.3.1 estudou-se como um sistema de refrigeração por compressão a vapor é capaz de arrefecer uma MEB e quais são os componentes necessários. Com vista a realizar uma modelação o mais aproximada da realidade, procedeu-se a um estudo das principais trocas térmicas envolvidas no equilíbrio termodinâmico da MEB. Considerando o banco de gelo como um cubo, com aproximadamente  $0.047 \text{ m}^3$ , assumiu-se que todas as faces seriam zonas de transferência térmica. Para além desse somatório, o agitador e a bebida arrefecida foram também tidos em consideração.

Das seis faces do banco de gelo, cinco são revestidas com isolamento em poliuretano de alta densidade envolvido por aço inoxidável, deixando a sexta face, o topo, sem isolamento. Este apresenta, entre o banco de gelo e a cobertura da máquina, uma zona com 0.07 m de altura, onde se encontra instalado o agitador.

Analisando as cinco faces com isolamento, podemos concluir que existem cinco pontos de resistência térmica. Na figura 4.1 é representado o problema.

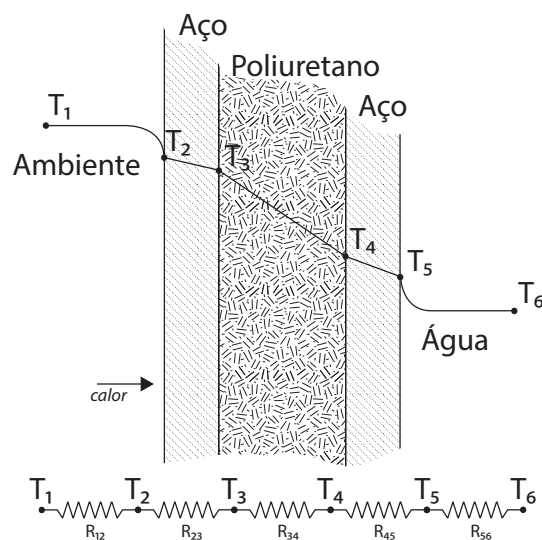


Figura 4.1: Resistência térmica paredes

Dessas cinco resistências, a primeira e a última consideraram-se resistências térmicas de convecção, e as restantes três, resistências térmicas de condução.

Para calcular a resistência por convecção foi utilizada a equação:

$$R_{12} = R_{56} = \frac{1}{h \times A} \quad (4.1)$$

onde:

$h$  = Coeficiente de transferência térmica por convecção ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )

$A$  = Área de transferência térmica ( $m^2$ )

e os coeficientes de transferência térmica por convecção natural [12]:

Air : 5 - 25 ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )

Water: 20 - 100 ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )

Para calcular a resistência por condução foi utilizada a equação:

$$R_{23} = R_{34} = R_{45} = \frac{L}{k \times A} \quad (4.2)$$

onde:

$L$  = Espessura do material (m)

$k$  = Coeficiente de transferência térmica por condução ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )

$A$  = Área de transferência térmica ( $m^2$ )

Coeficiente de transferência térmica por condução [12]:

Aço inoxidável: 16 ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )

Poliuretano de alta densidade: 0.03 ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ )

Foi necessário proceder à medição das áreas correspondentes às 5 faces, para a realização do cálculo das resistências equivalentes. Na tabela 4.1 é possível consultar as medidas utilizadas para esses cálculos, bem como os resultados obtidos.

Tabela 4.1: Dimensões das faces isoladas do banco de gelo

	Espessura (m)		Altura (m)	Largura (m)	Área ( $m^2$ )	$R_{eq}(W^{-1} \cdot ^\circ C)$
	Aço	Poli.				
Lateral	0.001	0.020	0.310	0.385	0.119	10.475
Frente	0.001	0.020	0.310	0.400	0.124	10.082
Trás		0.035				16.130
Base	0.001	0.035	0.385	0.400	0.142	8.224

Através da lei de Newton do arrefecimento, chegou-se à expressão análoga que permite obter a energia transferida entre o ambiente e as faces do banco de gelo.

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{R_{eq}} \quad (4.3)$$

onde:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \text{Energia transferida (W)} \\ T_i &= \text{Temperatura inicial (}^\circ\text{C)} \\ T_o &= \text{Temperatura final (}^\circ\text{C)} \\ R_{eq} &= \text{Resistência térmica equivalente (W}^{-1} \text{ }^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

Para o cálculo do diferencial de temperaturas,  $T_i - T_o$ , assumiu-se, para todas as faces,  $T_o$  como a temperatura da água presente no banco de gelo. Para quatro das cinco faces isoladas,  $T_i$  seria igual à temperatura ambiente. No caso da quinta faces (base), como  $T_i$  está diretamente relacionado com o calor gerado pela unidade de frio após medição, utilizou-se, durante o período de funcionamento, um valor de temperatura ambiente  $+10^\circ\text{C}$  e um valor de temperatura ambiente, quando se encontra desligada.

Dos ganhos térmicos, para um estado de funcionamento sem extração de bebida, resta apenas a face do topo. Neste caso contabilizaram-se três transferências de calor, sendo o calor produzido pelo agitador a parte que mais influencia o somatório.

O agitador, para além de garantir uma temperatura uniforme no banco de gelo, tem também a função de arrefecer a bebida que se encontra parada na tubagem, a jusante da MEB, trabalhando como uma bomba. Esta transferência térmica influencia no balanço energético e pode ser descrita através da equação 4.4.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times (T_i - T_o) \quad (4.4)$$

onde:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \text{Calor transferido (W)} \\ \dot{m} &= \text{Caudal do fluido (kg/s)} \\ c_p &= \text{Calor específico (J/(kg }^\circ\text{C))} \\ T_i &= \text{Temperatura de entrada (}^\circ\text{C)} \\ T_o &= \text{Temperatura de saída (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

Através de medição, obteve-se um valor para o caudal da água bombeada de  $0.0789 \text{ kg/s}$ , na instalação em estudo. O calor específico da água foi considerado como  $4.185 \text{ J/(kg }^\circ\text{C)}$  [13]. Já no caso do diferencial de temperatura, visto a impossibilidade de obter um valor exato, assumiu-se

um valor máximo de 0.2°C, dependendo de uma relação entre a temperatura da água e da temperatura ambiente.

Outro fator que influencia a transferência térmica entre o banco de gelo e o exterior, é o eixo do agitador. Construído em aço inoxidável com um diâmetro de 0.007 m, o calor gerado pela bobine do agitador é transferido pelo eixo, imerso na água. Para calcular essa energia foi utilizada a equação para superfícies estendidas [13], que é expressa em 4.5.

$$\dot{Q} = \sqrt{h \times P \times k \times A} \times (T_i - T_o) \quad (4.5)$$

onde:

$\dot{Q}$  = Calor transferido (W)

$h$  = Coeficiente de transferência térmica por convecção (W/(m<sup>2</sup>°C))

$P = \Pi \times \text{Diámetro}$

$k$  = Coeficiente de transferência térmica por condução (W/(m<sup>2</sup>°C))

$A = \Pi \times \text{Diámetro}^2/4$

$T_i$  = Temperatura da bolsa de ar (°C)

$T_o$  = Temperatura da água (°C)

Por fim, foi necessário ter em consideração a transferência térmica na face superior, entre a água e a bolsa de ar. Esta troca de energia ocorre por convecção e pode ser descrita através da equação 4.3 em conjunto com a 4.1. A temperatura, presente na bolsa de ar, é o resultado de um equilíbrio entre a temperatura ambiente, a temperatura da água e a temperatura do agitador. A relação obteve-se de forma empírica, devido à complexidade no estudo das trocas de ar entre o exterior e a bolsa de ar.

Com as equações enunciadas até aqui, é possível obter uma expressão referente aos ganhos energéticos totais 4.6. No entanto, é imprescindível ter em consideração o estado de funcionamento dos componentes da máquina.

$$\dot{Q}_{\text{ganhos}} = 2 \times \dot{Q}_{\text{faceLateral}} + \dot{Q}_{\text{faceFrente}} + \dot{Q}_{\text{faceTras}} + \dot{Q}_{\text{faceBase}} + \dot{Q}_{\text{topo}} \quad (W) \quad (4.6)$$

Nesta expressão, temos dois fatores que dependem do estado da máquina. Como referido anteriormente, se o compressor estiver a trabalhar, o calor gerado vai influenciar a temperatura da base, e por consequentemente  $\dot{Q}_{\text{faceBase}}$  vai ser maior. Da mesma forma, se o agitador estiver a trabalhar, o  $\dot{Q}_{\text{topo}}$  será também maior. Nesse caso, a formulação do problema envolve algo mais do que a soma de 10°C à temperatura ambiente. É necessário considerar a água bombeada, assim como o calor transferido pelo eixo e pela bolsa de ar.

*Agitador ligado*

$$\dot{Q}_{topo} = \dot{Q}_{\text{AguaBombeada}4.4} + \dot{Q}_{\text{EixoAgitador}4.5} + \dot{Q}_{\text{faceTopo}4.3} \quad (W) \quad (4.7)$$

A temperatura da bolsa de ar é influenciada pela temperatura ambiente, pela temperatura da água e pela temperatura do agitador.

*Agitador desligado*

$$\dot{Q}_{topo} = \dot{Q}_{\text{EixoAgitador}4.5} + \dot{Q}_{\text{faceTopo}4.3} \quad (W) \quad (4.8)$$

A temperatura da bolsa de ar é influenciada apenas pela temperatura ambiente e pela temperatura da água.

**Capacidade frigorífica**

Para modelizar o calor retirado do banco de gelo, pela unidade de frio, foi tido em consideração que o COP (coeficiente de performance) do ciclo de refrigeração por compressão a vapor, não é constante. Este valor depende da diferença de temperatura entre o condensador e o evaporado. Quando a diferença de temperatura aumenta, a transferência de calor do banco de gelo para o ambiente diminui.

Como ponto de partida para encontrar essa relação, analisou-se a folha de dados do compressor em uso [14], onde foi possível concluir que a potência frigorífica, quando o evaporador se encontra a uma temperatura de 0°C, é aproximadamente de 450 W. Devido à falta de dados para as restantes temperaturas, e à impossibilidade de obter a temperatura do fluido, no evaporado e no condensador, foram realizados ensaios, no quais se levou a água do banco de gelo da temperatura ambiente até à temperatura de 0°C. Através da análise dos registos da temperatura da água e da temperatura ambiente, obtidos nestes ensaios, alcançaram-se aos valores expressos na equação 4.9.

$$\dot{Q}_{\text{unidadeFrio}} = 450 + 865 * \left( \frac{\text{Temperatura}_{\text{Agua}}}{\text{Temperatura}_{\text{Ambiente}} + 10} \right) \quad (W) \quad (4.9)$$

**Ganhos Energéticos numa extração**

Durante a extração de uma bebida, para que seja arrefecida, ocorre uma troca de calor entre o fluido e o banco de gelo. É possível calcular essa transferência de energia através da utilização da equação 4.4 referida em cima.

Nesse cálculo, considerou-se o calor específico para a cerveja, com um valor de 3.768 J/(kg °C) [15]; como temperatura de entrada,  $T_i$ , um valor igual à temperatura ambiente, visto o barril

encontrar-se habitualmente a essa temperatura. No caso da temperatura de saída,  $T_o$ , sendo este dependente da máquina utilizada e do comprimento da serpentina de arrefecimento, após medições, assumiu-se um valor constante de 2°C.

### Modelização

Utilizando a ferramenta de cálculo MATLAB, foi criado um algoritmo, com as funções descritas anteriormente, capaz de simular o comportamento de uma MEB. Os parâmetros de entrada e saída estão descritos na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Variáveis de entrada/saída do algoritmo MEB

Entrada	$Temperatura_{Ambiente}$	(°C)
	$Temperatura_{Agua}$	(°C)
	$Massa_{Gelo}$	(kg)
	$Compressor_{LigadoDesligado}$	
	$Agitador_{LigadoDesligado}$	
	$Extração_{cerveja}$	(kg/s)
Saída	$Temperatura_{Agua}$	(°C)
	$Massa_{Gelo}$	(kg)

Com a análise realizada de todas as grandezas envolvidas nas trocas de calor, procedeu-se ao seu somatório, bem como à conversão das unidades de watt para quilojoule/minuto. Na equação 4.10 está representada essa soma. É necessário ter em consideração que as parcelas  $\dot{Q}_{unidadeFrio}$  e  $\dot{Q}_{extracao}$ , apenas apresentam peso na equação, quando o compressor se encontra ligado ou ocorre uma extração.

$$Q_{recebido} = (\dot{Q}_{ganhos} - \dot{Q}_{unidadeFrio} + \dot{Q}_{extracao}) * 60 * 10^{-3} \quad (Kj/min) \quad (4.10)$$

Através da obtenção do valor de  $Q_{recebido}$ , tornou-se possível o cálculo da temperatura/massa de gelo presente no banco de gelo. Contudo, para se conseguir replicar as propriedades físicas da água, foi necessária a implementação de condições/restrições a esse cálculo.

**if**  $Temperatura_{Agua} \geq 0$  **then**

$$Temperatura_{Agua} = Temperatura_{Agua} + \frac{Q_{recebido}}{c_{pagua} * Massa_{agua}}$$

$$Massa_{gelo} = 0$$

**else**

$$Temperatura_{Agua} = 0$$

$$Massa_{gelo} = Massa_{gelo} - \frac{Q_{recebido}}{L_{fusaoagua}}$$

**end if**

No cálculo da massa de gelo, foi utilizado como calor latente de fusão da água,  $L_{fusao_{agua}}$ , o valor de 333 kJ/kg. Já para o cálculo da temperatura da água, assumiu-se que a massa da mesma seria aproximadamente 46kg.

Com forma de facilitar o controlo e visualização durante a simulação, desenvolveu-se uma interface gráfica. Nesta ferramenta é possível decidir quando e quais os componentes que devem ser ligados e desligados, alterar *SetPoint's* para a massa de gelo, realizar extrações de cerveja e consultar consumos elétricos, assim como tempo de funcionamento de cada componente.

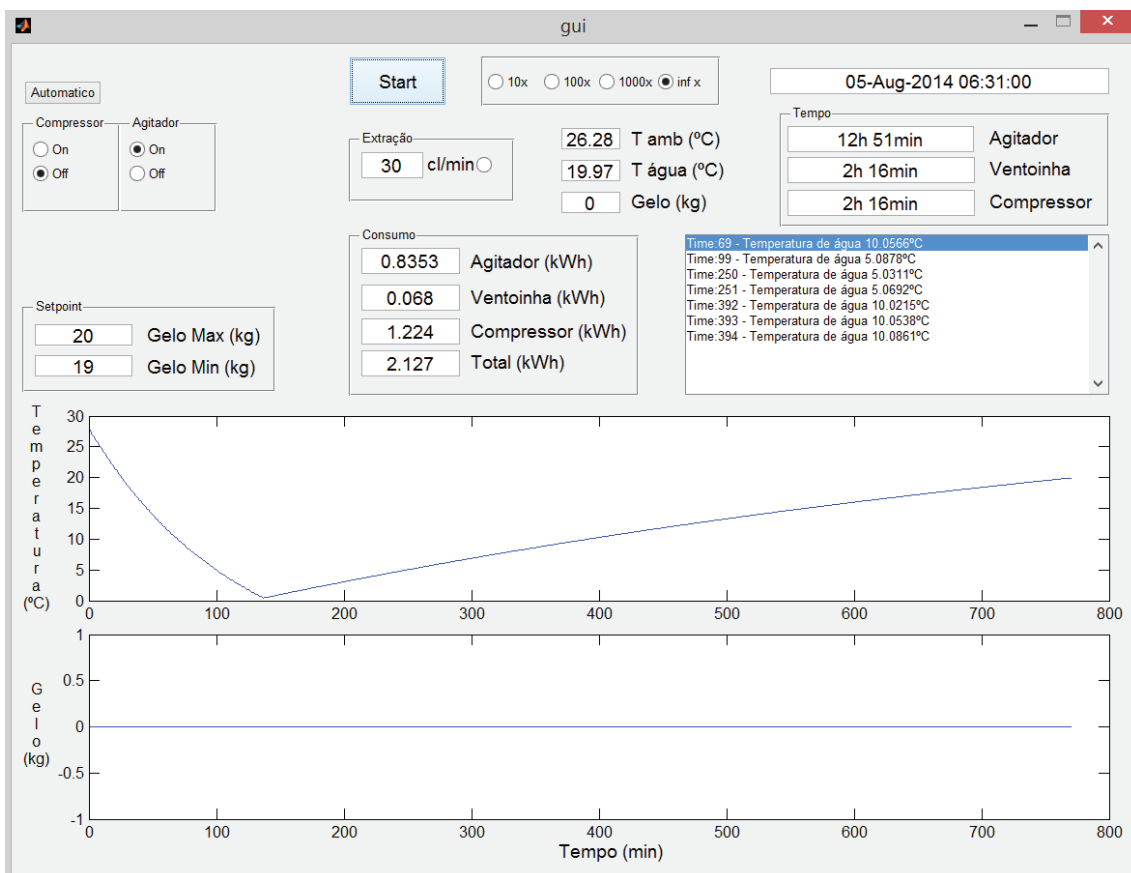


Figura 4.2: GUI Matlab

Para os consumos elétricos foi considerado, após medição, um valor fixo em cada um dos três componentes. No caso do compressor, este apresenta variações consoante o diferencial de temperatura ambiente/água, considerado irrelevante neste estudo.

Agitador	65 W
Ventilador	30 W
Compressor	540 W

## Resultados

Para validação das equações utilizadas nos ganhos energéticos, foram recolhidos dados referentes a temperatura da água, do ambiente e da bolsa de ar. Os instrumentos de medição utilizados foram da marca *ebro Electronic* com sensores *PT1000*, apresentando uma precisão inferior a  $0.2^{\circ}\text{C}$  e uma frequência de amostragem de 1 minuto.

Realizaram-se ensaios experimentais, simulando o comportamento da MEB em diferentes situações. No primeiro 4.3, como referido anteriormente, a água do banco de gelo foi arrefecida, partindo da temperatura ambiente até um valor próximo dos  $0^{\circ}\text{C}$ . Tanto o compressor como o agitador permaneceram ligados durante todo o ensaio. No segundo 4.4 apenas o agitador permaneceu ligado e no terceiro 4.5 toda a máquina esteve desligada.

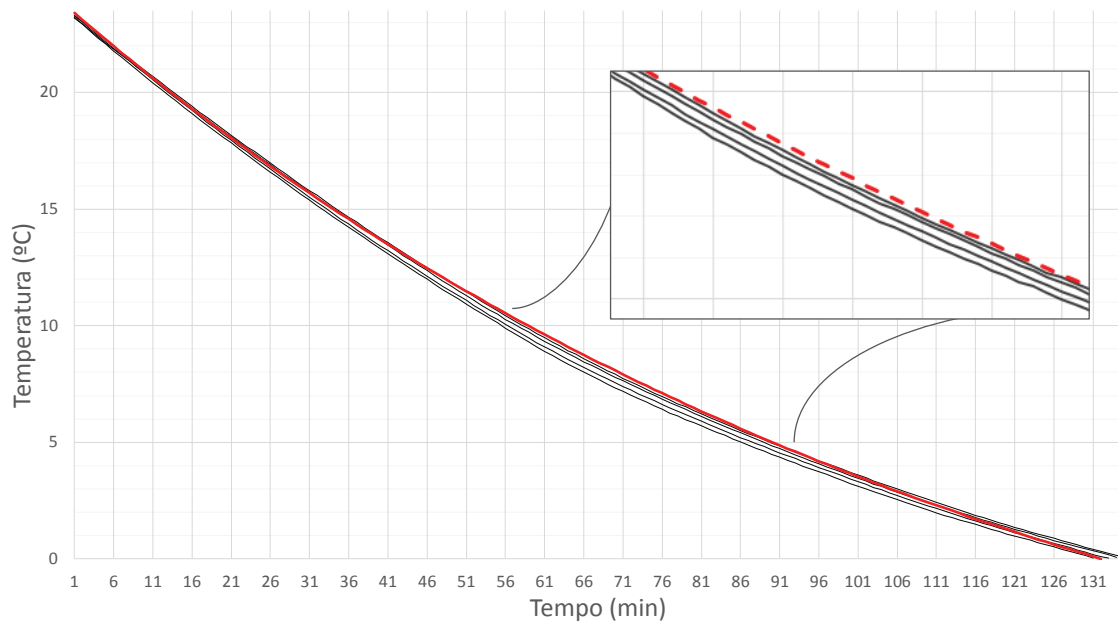


Figura 4.3: Temperatura água Compressor ligado /Agitador ligado

No gráfico da figura 4.3, estão representados, a preto, quatro ensaios referentes à temperatura da água para o primeiro modo de funcionamento. O vermelho tracejado corresponde ao resultado da simulação. Utilizou-se, para a temperatura ambiente, um valor médio dos três ensaios, considerando a baixa variação de temperatura.

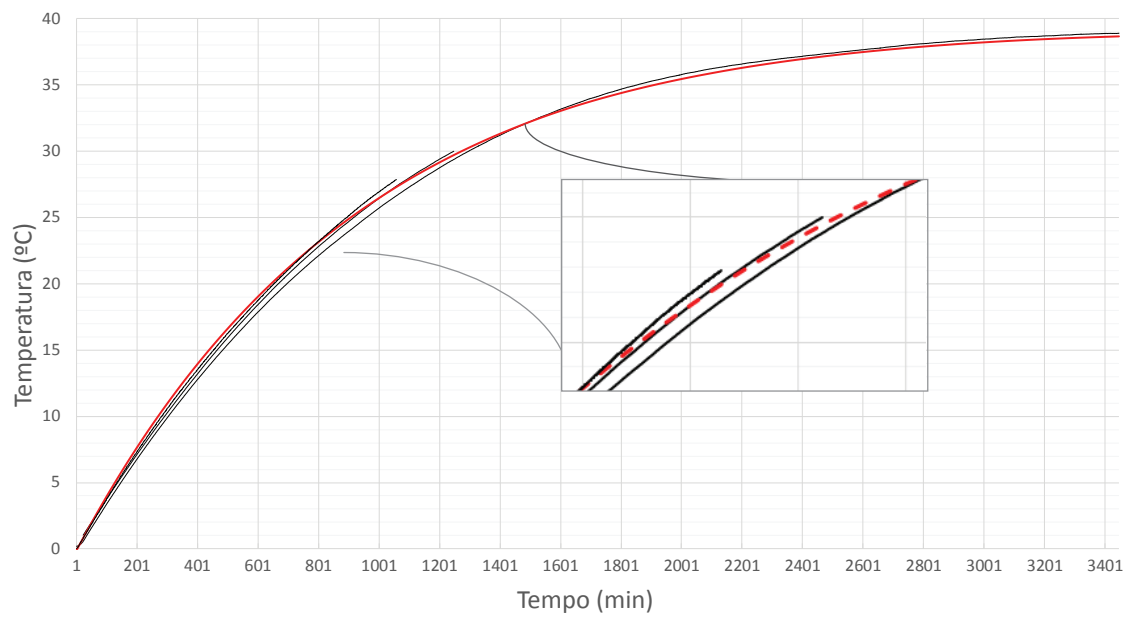


Figura 4.4: Temperatura água Compressor desligado /Agitador ligado

No segundo modo, simularam-se os ganhos energéticos com o agitador em funcionamento 4.4. Foram realizados três ensaios, dois dos quais com uma duração aproximada de 18 horas, e um terceiro com a duração de dois dias e meio. Foi usado o registo da temperatura ambiente, recolhido durante os ensaios, como entrada na simulação, permitindo assim representar a variação de temperatura ao longo do dia.

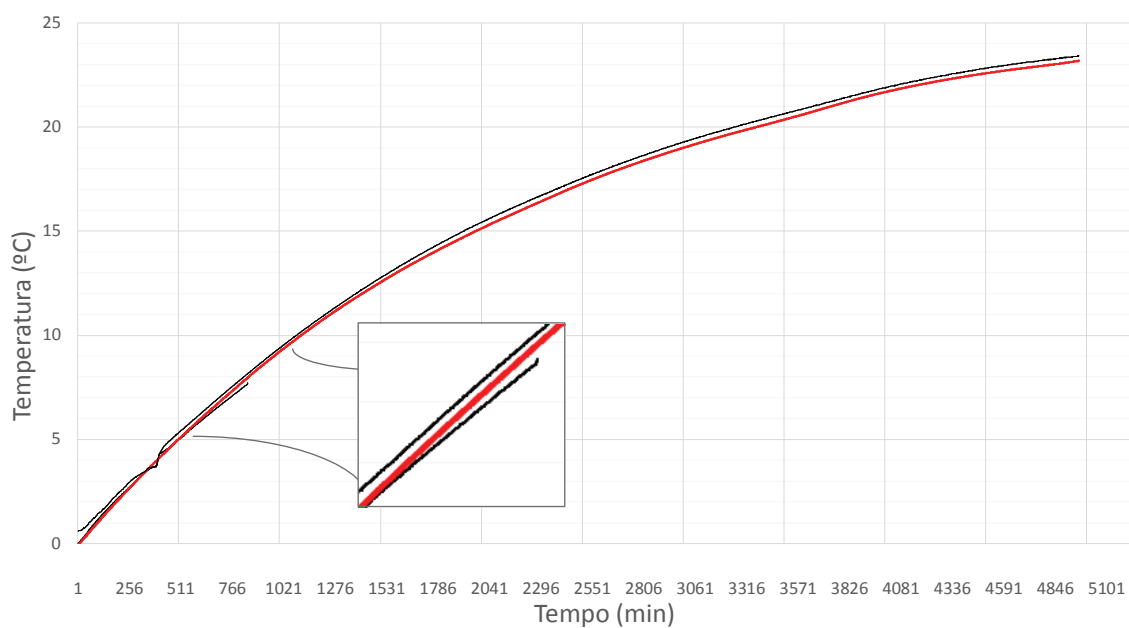


Figura 4.5: Temperatura água Compressor/Agitador desligado

Por fim, para o terceiro modo, é apresentado na figura 4.5 o resultado para os ganhos energéticos, quando a máquina se encontra completamente desligada. Mais uma vez, foi utilizado o registo da temperatura ambiente como entrada.

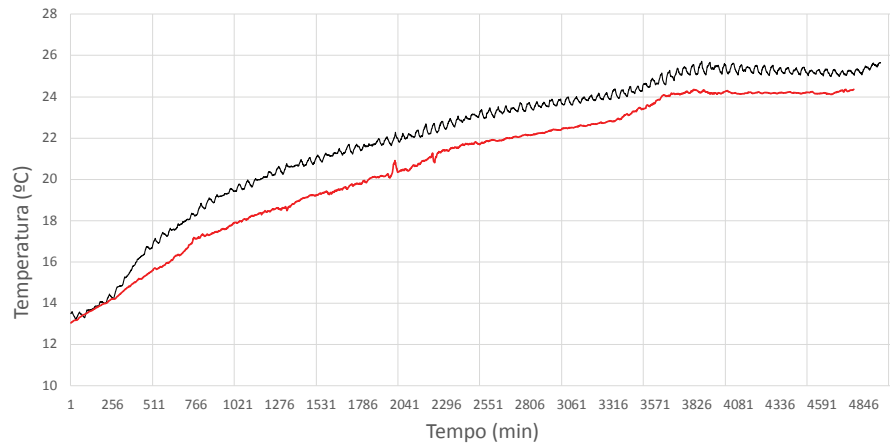


Figura 4.6: Temperatura bolsa de ar Compressor desligado /Agitador desligado

Registou-se ainda o valor da temperatura da bolsa de ar durante o terceiro modo de funcionamento, representado na figura 4.6.

O valor da quantidade de gelo formado em função do tempo, é mais complexo de se obter, já que a recolha de dados obriga ao fim do ensaio. Realizaram-se duas medições, onde se interrompeu a formação de gelo antes do compressor desligar. Para contabilizar a massa de gelo, retirou-se toda a água em estado líquido e subtraiu-se à quantidade inicial. Na tabela 4.3 podemos ver os resultados obtidos, onde, o tempo corresponde ao número de minutos a partir do momento que se atingiu o valor de 0°C.

Tabela 4.3: Massa de gelo Real vs Simulado

Tempo (min)	Real (kg)	Simulado (kg)
191	≈ 10.5	9.5
359	≈ 19	20

## 4.2 Algoritmo de controlo

Neste ponto é apresentado o estudo e implementação de dois métodos de controlo, para a modelação realizada na secção 4.1. O primeiro método, representa o funcionamento dos controladores que se encontram atualmente no mercado. Esse modelo foi implementado através do funcionamento descrito na secção 2.2. Com a análise dos resultados obtidos na implementação desse controlador, realizou-se um segundo método, baseado num modelo preditivo, com o objetivo diminuir o consumo energético e o desgaste mecânico.

Para se conseguir um comportamento mais exato na implementação dos dois algoritmos, construíram-se duas matrizes de consumo. Na representada em 4.4, são apresentados os consumos em litros por hora, durante uma semana. A segunda matriz, teve como base os valores da primeira matriz, porém a sua representação é dada em litros por minuto, tendo sido feita uma distribuição aleatória por cada hora. A base da criação destas matrizes, parte de valores de vendas diárias reais de um ponto de venda, ocorridos durante o mês de Julho. Este é colocado na categoria de grande volume de vendas, e apresenta um horário de abertura de aproximadamente treze horas diárias, iniciando as vendas às dez horas da manhã e terminado entre a meia-noite e as duas horas da manhã, como pode ser entendido através da análise da tabela.

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
0h / 1h	0	0	0	0	13.80	17.37	17.54
1h / 2h	0	0	0	0	10.75	16.15	19.80
2h / 3h	0	0	0	0	0	0	0
3h / 4h	.	.	.	.	.	.	.
10h / 11h	.	.	.	.	.	.	.
11h / 12h	0	0	0	0.85	0	0	0
12h / 13h	0	0.28	3.80	4.54	2.91	1.01	11.18
13h / 14h	0	0	0.86	5.72	4.12	14.03	12.21
14h / 15h	0	1.08	0	0	0	10.61	1.44
15h / 16h	0	0	0	0	0	0.63	5.75
16h / 17h	0.69	1.98	0	0.91	0.87	2.42	1.96
17h / 18h	2.67	0	0	0	0	4.21	1.02
18h / 19h	5.36	8.44	6.30	5.43	4.46	8.26	1.24
19h / 20h	11.49	10.15	10.08	9.80	10.08	14.88	11.51
20h / 21h	13.19	12.75	11.45	17.32	12.72	16.39	16.21
21h / 22h	15.21	18.46	15.74	19.40	6.91	19.98	11.32
22h / 23h	18.28	11.44	6.91	11.01	19.17	18.88	1.44
23h / 24h	0.34	0.91	3.93	3.71	18.42	17.52	0.91

Tabela 4.4: Matriz de consumo

### 4.2.1 Controlo SISO

O controlo atual de uma MEB é baseado num sistema *Single-input Single-output*. Recebe como input, o sinal proveniente do sensor de gelo e, com base nesse valor binário, atua sobre a unidade de frio, ligando-a ou desligando-a. A máquina de estados apresenta ainda um *delay* entre atuações, evitando que a unidade de frio seja submetida a arranques sucessivos.

Como a formação de gelo é irregular, tornou-se impossível a simulação precisa. Para superar este obstáculo, considerou-se um *SetPoint* máximo e mínimo para a formação da massa de gelo, com uma diferença máxima de meio kg de gelo.

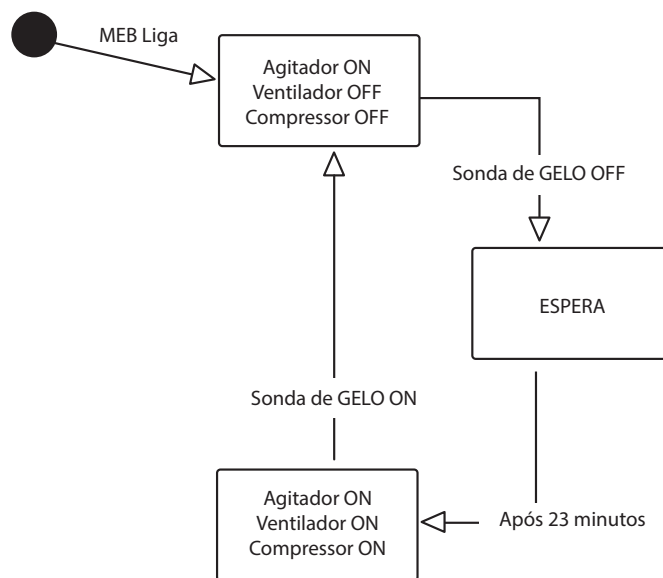


Figura 4.7: Máquina de estados para o controlador SISO

Para a simulação do controlo, foi implementada, em MATLAB, a máquina de estados representativa do atual funcionamento 4.7. Na primeira etapa, a unidade permanece desligada e apenas o agitador se encontra em funcionamento. Após ser detetada uma massa de gelo inferior ao *Set-Point* mínimo, o controlador aguarda cerca de 23 minutos até acionar a unidade de frio. Esta desliga-se quando a massa de gelo passar o *SetPoint* máximo, voltando ao estado inicial.

Para a variável da temperatura ambiente, foi criado um vetor, com a duração de uma semana, através dos dados recolhidos durante os ensaios realizados na secção 4.1.

A partir da segunda matriz de consumo, representada em litros por minuto, simulou-se o funcionamento da MEB durante o período de uma semana, 168 horas. Iniciou-se com uma massa de

gelo de 25kg. Consideraram-se como *SetPoint* máximo e mínimo, para a massa de gelo, 25 kg e 24.5 kg respetivamente.

## Resultados

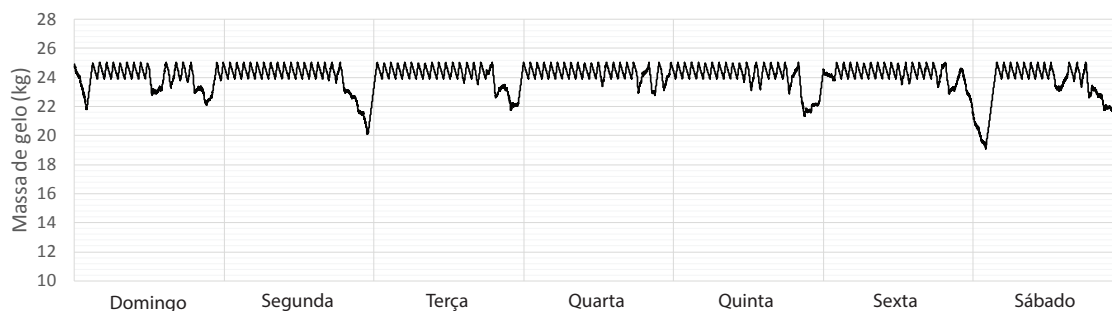


Figura 4.8: Registo da massa de gelo durante uma semana com controlador SISO

Através da simulação efetuada, obtiveram-se os valores de consumo elétrico e de utilização dos componentes. Na figura 4.8 é possível consultar as variações na massa de gelo durante todo o ensaio.

Durante o período das 168 horas simuladas, o agitador permaneceu todo o tempo ligado, resultando numa utilização percentual de 100%. Já a unidade de frio, compressor e ventilador, apresentaram uma utilização de 50%, resultando em aproximadamente 84 horas ligados. Os consumos elétricos, percentagem de utilização e custo, podem ser consultados na tabela 4.5.

	Consumo elétrico	Utilização	Custo
Agitador	10.92 kWh	100%	
Ventilador	2.54 kWh	50%	
Compressor	45.66 kWh	50%	
Total	59.12 kWh		9.12 € <sup>1</sup>

Tabela 4.5: Consumos elétricos durante uma semana com controlador SISO

Realizou-se também um ensaio em que se retirou o *delay* de 23 minutos, imposto para reduzir o número de vezes que a unidade de frio entra em funcionamento. Os consumos, bem como a taxa de utilização, estão representados na tabela 4.6. Em relação ao número de vezes que a unidade de frio entrou em funcionamento, foi possível contabilizar  $\approx 220$ , em comparação com as  $\approx 110$  no controlo com *delay*.

<sup>1</sup>Consumo calculado com base na tarifa simples para BTN 20,7kVA EDP Energias de Portugal.

	Consumo elétrico	Utilização	Custo
Agitador	10.92 kWh	100%	
Ventilador	2.543 kWh	50%	
Compressor	45.78 kWh	50%	
Total	59.25 kWh		9.14 € <sup>1</sup>

Tabela 4.6: Consumos elétricos durante uma semana com controlador SISO sem delay

### 4.2.2 Controlo preditivo

Aqui é apresentada uma proposta para um novo algoritmo de controlo das MEB. Ao contrário do controlador SISO, este baseia-se em múltiplas variáveis de entrada e saída, para realizar a gestão do banco de gelo.

Através da análise do registo recolhido no ensaio 4.8, com o controlador SISO, foi possível confirmar que este tenta manter uma massa predefinida de gelo, independente das extracções realizadas. Esse comportamento, já esperado, leva a um consumo elétrico e mecânico elevado e desnecessário. Nesta nova proposta, é apresentado um algoritmo que utiliza os registos recolhidos pelo sensor de caudal, para prever as necessidades do ponto de venda ao longo do dia. Assim, a unidade de frio é acionada em alturas que seja previsível a ocorrência de uma extracção de bebida ou quando a massa de gelo atinge um valor mínimo, evitando o consumo elétrico elevado em horas de fecho do estabelecimento. Foi também implementado, em conjunto, o algoritmo desenvolvido na secção 4.1, para possibilitar ao controlador estimar a massa de gelo presente.

No desenvolvimento do novo algoritmo considerou-se a necessidade de três modos distintos de funcionamento, cada um com um grau de atuação diferente. Criaram-se para isso 3 máquinas de estados, governadas por um algoritmo que decide qual dos modos deve entrar em funcionamento.

```

if DetecaoDeExtracao then
    MODO = Reativo
else
    if ConsumoProximaHoraMatrix > 0 then
        MODO = Ativo
    else
        MODO = Passivo
    end if
end if

```

O primeiro, denominado de *Reativo*, tem como objetivo atuar caso seja detetada uma extração de bebida, garantindo sempre uma massa de gelo muito perto do limite máximo. Esta implementação, permite obter uma resposta rápida à perda de massa de gelo, ocorrida durante a extração de grandes volumes de forma repentina.

A máquina de estados criada, representada em 4.9, é composta por três estados. Em semelhança com o controlador SISO, o agitador permanece sempre ligado, garantindo assim uma temperatura uniforme, tanto no banco de gelo, como na coluna de extração. Foi também acrescentado um estado, no qual o ventilador permanece ligado durante um minuto, após ser desligado o compressor, permitindo assim extrair todo o ar quente remanescente no compressor e no condensador. O intervalo de referência considerado para a quantidade de massa de gelo, foi entre o *SetPoint* máximo e *SetPoint* máximo - 3kg, tendo sido parametrizado para 25kg e 22kg, respetivamente.

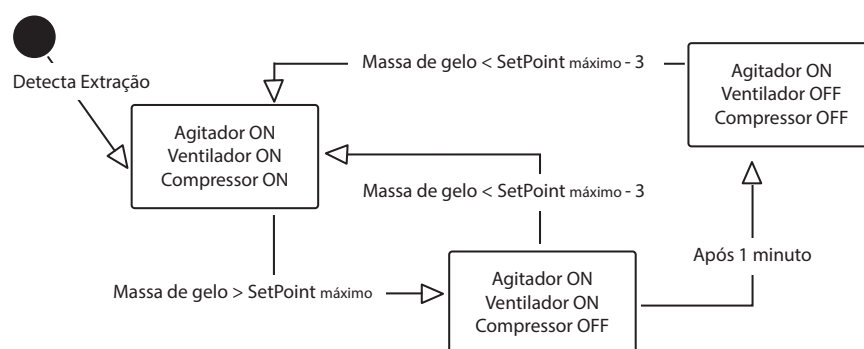


Figura 4.9: Máquina de estados Modo Reativo para o controlador preditivo

Para a criação do segundo modo de funcionamento, denominado de *Ativo*, foram impostos os mesmos estados representados em 4.9, com a diferença do intervalo de referência para a massa de gelo. Considerada neste caso entre o *SetPoint* máximo e *SetPoint* máximo - 8kg, tendo sido parametrizado para 25kg e 17kg, respetivamente.

Este modo tem como objetivo entrar em funcionamento caso seja previsível a ocorrência de uma extração na próxima hora, garantindo assim a quantidade de gelo recomendada. Para essa previsão é utilizada a matriz de consumo do ponto de venda, criada através da recolha do sinal do sensor de caudal.

O terceiro modo, apelidado de *Passivo*, é aquele que apresenta uma maior influência na redução dos consumos elétricos e mecânicos, tendo como função manter a máquina num estado de *standby*. Para isso foram implementados quatro estados, representados na figura 4.10.

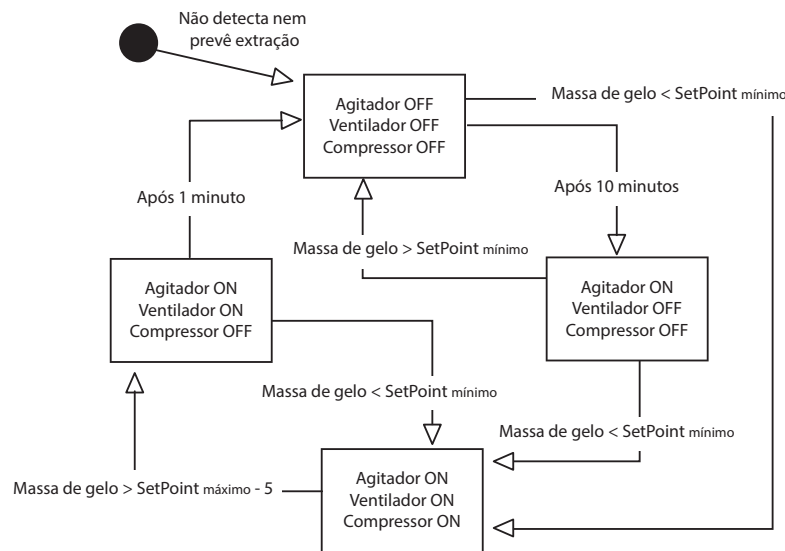


Figura 4.10: Máquina de estados Modo Passivo para o controlador preditivo

O intervalo de referência para a massa de gelo, neste modo, sofre uma variação bastante acentuada, em relação aos restantes. Passando para os valores de *SetPoint* máximo - 5 e *SetPoint* mínimo, tendo sido parametrizado para 20kg e 15kg, respetivamente.. Após a análise, considerou-se serem estes os valores que melhor permitem a recuperação da MEB em casos de extracções inesperadas.

Com base no trabalho realizado na secção 4.1, identificou-se o agitador, como sendo a principal fonte de perda da massa de gelo, tornando-se óbvia a necessidade de parar o seu funcionamento sempre que possível. No entanto, devido à impossibilidade de o parar por completo, sob o risco de deixar aquecer a bebida a jusante da MEB, realizou-se um estudo com a finalidade de encontrar um ponto de equilíbrio entre desligar o agitador e manter a bebida arrefecida.

Com esta análise, foi possível concluir que a permanência do agitador ligado durante um minuto em cada dez desligados, permite à bebida manter a mesma temperatura e, ao mesmo tempo, reduzir em quase um décimo a utilização do motor.

De igual forma as outras duas máquinas de estados, implementou-se também um estado que possibilitava retirar o calor do condensador e compressor após este ser desligado.

Elaborou-se um ensaio com o novo controlador, para detetar as diferenças no consumo e comportamento da MEB, em relação ao controlador SISO. Para isso, foram utilizados os mesmo dados da temperatura ambiente e de consumo de bebida, sendo que neste caso também foi utilizada a matriz de consumos em litros por hora 4.4. Dando a possibilidade ao controlador de entender os hábitos de utilização da MEB no ponto de venda.

Consideraram-se para a massa de gelo, como *SetPoint* máximo e mínimo 25 kg e 15 kg, respetivamente.

## Resultados

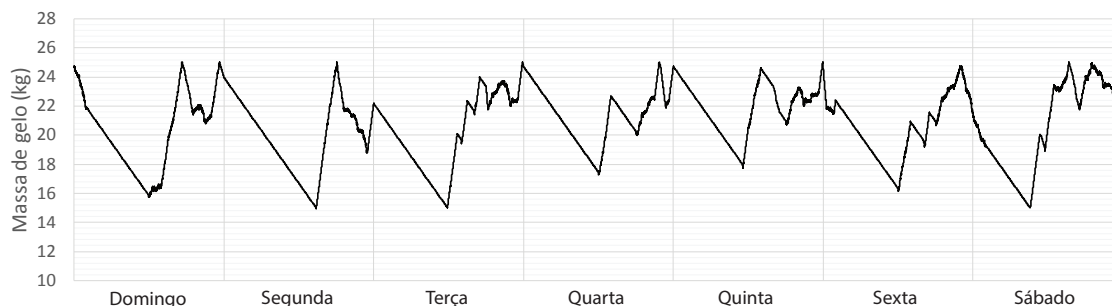


Figura 4.11: Registo da massa de gelo durante uma semana com controlador preditivo

Os resultados da simulação de 168 horas permitiram chegar aos dados representados na tabela 4.7. Onde, o agitador apresenta um total de 94 horas de utilização e a unidade de frio de 67 horas. O número de vezes que o compressor e ventilador entram em funcionamento passou para um valor de  $\approx 22$ .

	Consumo elétrico	Utilização	Custo
Agitador	6.16 kWh	56%	
Ventilador	2.02 kWh	40%	
Compressor	36.44 kWh	40%	
Total	44.58 kWh		6.88 € <sup>1</sup>

Tabela 4.7: Consumos elétricos durante uma semana com controlador preditivo

Na tabela 4.8, está representada uma comparação do consumo elétrico e desgaste mecânico entre os dois modos de funcionamento, durante uma semana, ou um ano de utilização. A avaliação anual consiste numa estimativa, dada a impossibilidade de obter os valores de consumo e da temperatura ambiente referentes a esse período de tempo.

Em termos de consumos elétricos, foi possível obter uma redução de quase 25%, representando um valor superior a 4 kg de  $CO_2$ <sup>2</sup>, por semana, que não são emitidos para o meio ambiente. Esse número rapidamente aumenta quando considerado o parque de MEB que a Unicer possui.

<sup>2</sup>Valor de conversão 283,83 g/kWh referente ao mês de Junho de 2014, publicado pela EDP Energias de Portugal.

		SISO	Preditivo		
Semanal	Consumo elétrico	59.12 kWh	44.59 kWh	-14.53 kWh	
	Custo	9.12 € <sup>1</sup>	6.88 € <sup>1</sup>	-2.24 € <sup>1</sup>	
	Utilização	Agitador	100%	56%	-44%
		Ventilador	50%	40%	-10%
		Compressor	50%	40%	-10%
Número de arranques	110	22	-88		
Anual	Consumo elétrico	3.07 MWh	2.32 MWh	-755.61 kWh	
	Custo	474.33 € <sup>1</sup>	357.7€ <sup>1</sup>	-116.59 € <sup>1</sup>	
	Número de arranques	5720	1144	-4576	

Tabela 4.8: Comparação do consumo elétrico e desgaste mecânico entre controladores

### 4.3 Algoritmo de detecção de caudal

Para possibilitar ao controlador traçar um perfil de utilização da MEB, assim como ligar a unidade de frio após a ocorrência de uma extração de bebida, foi necessário converter o sinal recolhido do sensor de caudal, no capítulo 3, para algo representativo do volume real extraído.

Na realização deste trabalho, tornou-se necessário dar uma especial atenção a memória utilizada e a capacidade de processamento. Considerando que a implementação final será realizada num micro-controlador de 8-bits, as funções e operações implementadas tiveram que ser limitadas, possibilitando a execução dos dois algoritmos em simultâneo, o de detecção de caudal e o de controlo da MEB.

Através da análise dos sinais obtidos do sensor de detecção de caudal, na secção 3.1, constatou-se que, durante um extração a variação do mesmo não é constante, e que este tende a estabilizar após um período de repouso. Na ocorrência de caudal, o sinal apresenta inicialmente um declive positivo, diminuindo ao longo da extração. Só após o fecho da torneira, é que este começa a diminuir, aproximando-se do seu valor inicial. Conseguiu-se também perceber que na ocorrência de final de barril, é apresentado um declive bastante acentuado, assumindo valores perto do limite máximo.

Durante o acondicionamento do sinal, optou-se por uma aquisição sem a aplicação de uma filtragem analógica. Assim, foi necessário desenhar, antes de qualquer tentativa de interpretação dos dados, um filtro digital, permitindo a remoção do ruído presente no sinal.

Para a sua implementação, utilizou-se um filtro de média deslizante, com uma janela de 32 valores. Para, evitar ocupar demasiado a memória do micro-controlador, foi desenvolvida uma função que recebe apenas como valores de entrada o valor filtrado anteriormente, o somatório da janela e o valor a ser filtrado. A escolha do tamanho da janela, sendo igual a potência de dois, permite a divisão através da deslocação de bit para a direita, diminuindo a necessidade de processamento.

**function** MÉDIA DESLIZANTE (*Output*( $n - 1$ ), *Soma*, *Input*( $n$ ))

*Soma* = *Soma* - *Output*( $n - 1$ ) + *Input*( $n$ )

*Output*( $n$ ) = *Soma* /  $k$

**return** *Output*( $n$ ), *Soma*

**end function**

Com a aplicação do filtro de média deslizante, sobre o sinal recolhido 3.2, referente a quatro extrações de cerveja, em copos de 20cl, foi permitida a remoção de grande parte do ruído existente, obtendo-se o sinal representado no gráfico 4.12.

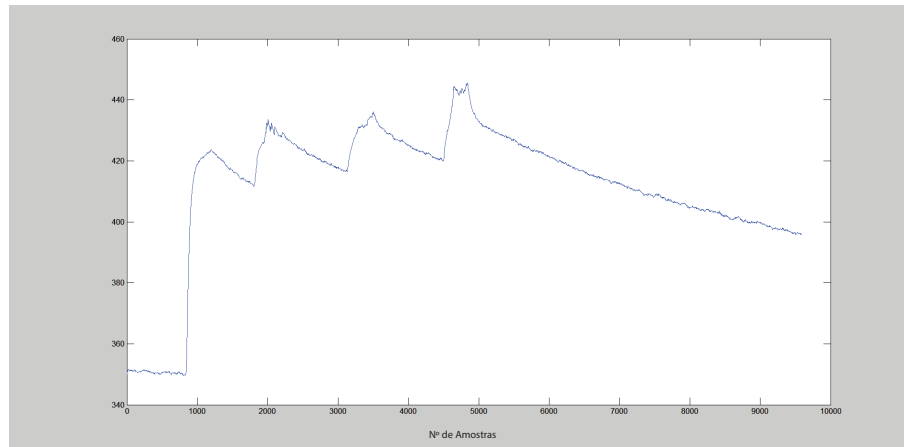


Figura 4.12: Sinal filtrado, referente a quatro extrações de 20 cl

A partir do sinal filtrado, iniciou-se a interpretação dos valores recebidos. Facilmente se entendeu que a procura por um declive, permitiria detetar o início e o final da extração.

Começou-se por se aplicar uma subtração entre o valor atual e o valor da amostra anterior. A esse resultado foi atribuído um ganho, aumentando a sua amplitude final.4.13.

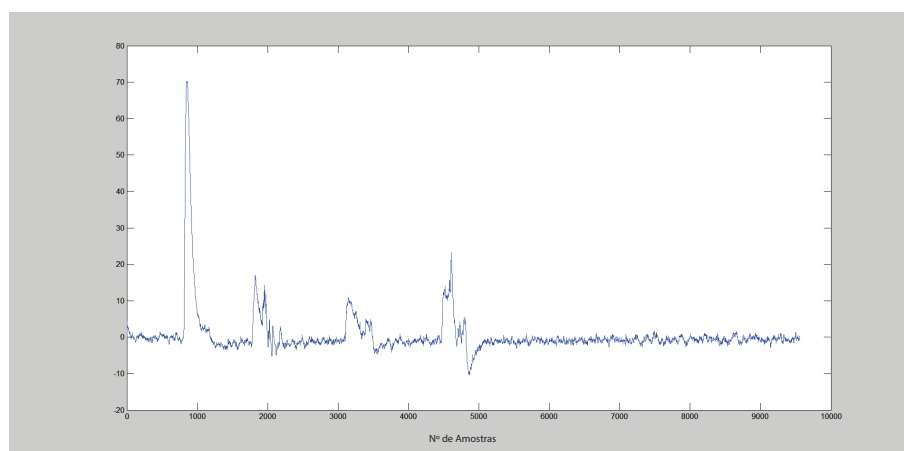


Figura 4.13: Detecção do declive, referente a quatro extrações de 20 cl

Através dos resultados obtidos, correspondentes ao declive do sinal, foram criadas regras de filtragem para separar três tipos de situações; extrações reais, erros de leitura e final de barril.

Considera-se como o início de uma extração, quando o valor do declive apresentado ultrapassa um determinado *threshold*, no caso escolhido 5. Porém, se este atingir o *threshold* máximo de 150, é classificado como extração com final de barril.

O final da extração é validado, quando o valor do declive é menor que o *threshold*. Para minimizar falsas interpretações, criou-se a condição, que possibilita, ao valor do declive, assumir valores inferiores ao *threshold*, após um início de extração, desde que o número de amostras com esse valor seja inferior a 25.

Foi forma possível filtrar o sinal, obtendo apenas os valores referentes às extrações. No gráfico 4.14, é possível ver as quatro extrações recolhidas do sinal inicial 3.2.

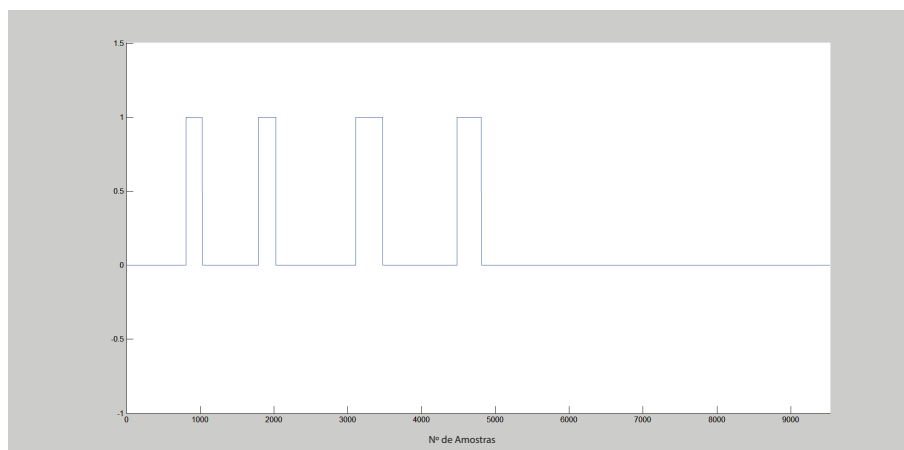


Figura 4.14: Sinal final, referente a quatro extrações de 20 cl

**Resultados**

Após implantação do algoritmo, foram realizadas algumas extrações de cerveja de modo a obter um valor comparativo. Na tabela 4.9, são apresentados os números de amostras associadas a cada uma das extrações, sendo o volume apenas uma aproximação do valor real extraído.

Volume Copo	Número de amostras
20cl	121
20cl	150
20cl	122
20cl	141
20cl	160
40cl	478
40cl	448
50cl	554

Tabela 4.9: Resultados do algoritmo de detecção de caudal



## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Na presente dissertação, elaborou-se um estudo acerca do sistema de controlo de uma Máquina de extração de bebidas à pressão de 100L e da sua topologia. Através deste, chegou-se à conclusão da necessidade de ver executado o desenho de uma nova plataforma de controlo. Permitindo assim diminuir o consumo energético e o desgastes mecânico, garantindo simultaneamente a extração da bebida à temperatura mais adequada.

Analisaram-se alternativas ao acionamento dos motores AC, utilizado atualmente. Tendo sido testado, com sucesso, a substituição por *Solid State Relay*, permitindo assim remover a principal causa de avaria dos controladores, oferecendo também uma maior liberdade no seu acionamento.

De forma a permitir ao controlador estimar a quantidade de líquido extraído, implementou-se um sensor resistivo no circuito de passagem do produto. Após a implementação de um algoritmo para realizar a filtragem dos dados do sensor e estimar o tempo de abertura da torneira, foram realizados testes, onde se tornou clara a possibilidade de identificar, não só a abertura da torneira, como as diferentes quantidades de bebida em cada extração. Assim, o controlador tornou-se apto a estimar o número de extrações ocorridas, e a definir o hábito de consumo do ponto de venda.

A nível de software, criou-se um modelo termodinâmico da Máquina de Extração de Bebida em MatLab, onde foi tido em consideração as perdas e os ganhos de calor. Para isso, estudaram-se modelos similares e realizaram-se medições de temperatura em diferentes cenários de utilização. Com os resultados reais e os valores obtidos em simulações, foi possível validar o modelo desenvolvido. Posteriormente, foram desenvolvidos dois algoritmos de controlo, o primeiro com uma máquina de estados representativa dos sistemas encontrados no mercado, e o segundo com um modelo baseado nos hábitos de consumo do ponto de venda. Através de uma análise comparativa dos dois sistemas, detetou-se a diminuição no consumo elétrico, assim como a redução do tempo de utilização de cada um dos componentes, resultando num menor desgaste mecânico e numa maior eficiência. Com a alteração do modo de controlo da máquina de extração, foram alcançados

resultados bastante promissores, permitindo redução dos gastos elétricos em quase 25%. Multiplicando este valor pelo total de máquinas pertencentes à Unicer, é possível obter uma redução de  $\approx 15.1$  GWh ou  $\approx 4100$  toneladas de  $CO_2$  por ano, o que contribui para a redução da *Pegada Ecologia* da empresa e dos respetivos pontos de venda.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Na continuação de desenvolvimento deste projeto, são sugeridos como desenvolvimentos futuros:

- Elaboração de um circuito de acondicionamento do sinal para o sensor de caudal.
- Realização de um protótipo para o novo controlador.
- Otimização do algoritmo de controlo.
- Otimização do algoritmo de deteção de caudal.

# Referências

- [1] Unicer. "Servida a Rigor".
- [2] Mohamed Jemmali. Grabcad, Janeiro 2014. URL: <http://grabcad.com/library/chiller-unit-for-refrigerator>.
- [3] Tyco Electronics Corporation. Electromechanical vs. solid state relay characteristics comparison. 13C3235.
- [4] Lucas L. "iir news.". *International journal of refrigeration*, 1998.
- [5] *Refrigeration and Air conditioning*. EE IIT, Kharagpur, India, 1 edition, 2008.
- [6] Clito Afonso. *Termodinâmica para Engenharia*. FEUP Edições, 2012.
- [7] *Super Bock XpresS Máquina de Cerveja à Pressão*. FLAMA, 3001fl edition.
- [8] H. Z. Hassan. "a solar powered adsorption freezer: A case study for egypt's climate". *International Journal of Energy Engineering*, 2013.
- [9] Sanford A. Klein and Douglas T. Reindl. "Solar Refrigeration". *A S H R A E*, Setembro 2005.
- [10] IXYS INTEGRATED CIRCUITS DIVISION. Advantages of solid-state relays over electro-mechanical relays. AN-145.
- [11] Agilent Technologies. Maximizing the life span of your relays, 2002. Application Note 1399.
- [12] The engineering toolbox. URL: <http://www.engineeringtoolbox.com/>.
- [13] THEODORE L. BERGMAN FRANK P. INCROPERA, DAVID P. DEWITT and ADRIENNE S. LAVINE. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. JOHN WILEY and SONS, 6<sup>a</sup> edition.
- [14] Danfoss. Sc12g universal compressor r134a.
- [15] Walther Pohlmann. *Formulaire du frigoriste*. Paris : Dunod, 1967.