



**João Maria Leal da Costa Malato Correia**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Avaliação Energética dos Sistemas de Refrigeração na  
Indústria Vinícola  
Caso de uma Aplicação na Adega da Ervideira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Miguel Cavique Santos, Professor Auxiliar,  
Escola Naval

Co-orientador: Professor Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogais: Doutor José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado, Faculdade de Ciências  
e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
Doutor Miguel Cavique Santos, Professor Auxiliar, Escola Naval



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2016**



# **Avaliação Energética dos Sistemas de Refrigeração na Indústria Vinícola**

## **Caso de uma Aplicação na Adega da Ervideira**

Copyright © João Maria Leal da Costa Malato Correia, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



**João Maria Leal da Costa Malato Correia**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Avaliação Energética dos Sistemas de Refrigeração na Indústria Vinícola  
Caso de uma Aplicação na Adega da Ervideira**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Setembro 2016



*Aos meus pais*



# Agradecimentos

O desenvolvimento desta dissertação foi possível devido à indispensável ajuda e suporte de muitas pessoas a quem eu agradeço, em especial:

Ao Professor Doutor Miguel Cavique Santos pela ajuda e suporte

Ao Professor Doutor António Mourão por toda a ajuda e por tornar este projeto possível

Ao diretor de produção da Ervideira Nélon Rolo pela ajuda, paciência e compreensão

À minha Avó e aos meus Tios, em especial ao Duarte e Manuel pela ajuda e por possibilitarem a realização deste projeto

Ao Professor Doutor Fernando Martins, à Rita, ao Bernardo Barros, José Andrade, meu irmão Pedro, pela ajuda e pelas referências.

Aos meus amigos pela paciência e compreensão e especialmente aos meus Pais.



# Resumo

A crescente necessidade de melhorar os equipamentos e processos na indústria conduz frequentemente ao estudo, desenvolvimento e inovação. A indústria vinícola não é exceção e nos últimos anos tem-se verificado um aumento generalizado do desenvolvimento e melhoria significativa dos processos de produção. A fermentação alcoólica, uma das etapas mais importantes da produção de vinho tem sido alvo de grandes estudos devido às reações químicas envolventes de libertação de energia.

O objetivo da presente dissertação é a avaliação energética dos sistemas de refrigeração da adega Ervideira. Discutiu-se os processos da produção de vinho para um entendimento dos parâmetros envolvidos. Apresentou-se uma metodologia para a quantificação do calor libertado na fermentação essencial para se determinar quais as necessidades de refrigeração da adega, discutiu-se quais as vantagens e problemas dos sistemas de refrigeração de um modo global e com particularidade do caso em estudo, calculou-se os efeitos da condução, convecção e radiação na transmissão de calor para os reservatórios de mostos e vinhos e somou-se todas as parcelas de calor. Verificou-se que a fermentação tem um enorme peso na libertação de calor nos vinhos tintos e menos nos vinhos brancos, em grande parte devido à diferença das temperaturas dos mostos, no entanto a convecção, a condução e a radiação têm um peso muito grande nos mostos brancos. Na etapa de maturação dos vinhos, apesar de não haver reações exotérmicas, deve-se manter o vinho a uma temperatura abaixo dos 20°C e o respetivo período ocorre na maior parte dos casos durante um ano, pelo que as temperaturas quentes do verão são prejudiciais ao seu bom desenvolvimento. Verificou-se que os efeitos das condições ambientais fazem elevar muito as necessidades energéticas representando uma enorme despesa para a empresa. As medidas de melhoria que se apresentam vêm deste modo reduzir o consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, melhorar o rendimento dos sistemas, para além de criar condições mais favoráveis para uma melhor qualidade do vinho. A medida estudada mais eficaz é o isolamento das cubas com espuma de poliuretano, que no total das necessidades energéticas entre os reservatórios de fermentação e maturação representa uma redução da despesa anual com energia elétrica em cerca de 10 %.



# Abstract

The growing need of improvement of the equipment and processes in industry drive frequently to studies, development and innovation. The wine industry is no exception and for the past years we have seen a generalized increase in development and great improvements of production processes. The alcoholic fermentation, one of the most important stages of wine production is a target of vast studies due to chemical reactions in releasing of energy.

The aim of this thesis is an energetic evaluation of the Ervideira cellar cooling systems. The wine production processes are discussed to an understanding of the parameters involved. A methodology is presented for quantifying the heat released in fermentation, fundamental to determine the cellar cooling needs. The advantages and disadvantages of cooling systems in a holistic way and particularly of the case study are discussed. The effects of conduction, convection and radiation in the heat transfer to the musts and wines were calculated and added up all heated portions. In accordance with the study, was verified that fermentation has a huge importance in releasing heat on red musts and less in white musts, due to the temperature difference between those two, nevertheless the effect of convection, conduction and radiation have a superior importance in white musts. Although there is not exothermal reactions in the wine maturation stage the wine should be preserved under 20°C and the respective period occurs during a year in most cases, whereby the hot summer temperatures are harmful for a well development. The ambient external conditions are the main cause of the high expense in electricity for the company. The presented improvement measures are a way of decreasing this consumption and hence improve the system yield, plus to give better conditions to improve the wine quality. The most effective improvement measure is the tank insulation with polyurethane foam that in total represents a 10 % decreasing in total annual energy expenses.



# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Índice de Figuras .....	xI
Índice de Tabelas.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Breve Contextualização Sobre a Indústria do Vinho .....	2
1.3 Breve Caracterização da Empresa Objeto de Estudo.....	2
1.4 Objetivos .....	3
1.5 Estrutura da Dissertação .....	3
2 Produção Vinícola.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Produção da uva, colheita e transporte.....	5
2.2.1 Composição do cacho, da uva e do sumo .....	6
2.3 Chegada das uvas e Operações de Pré-fermentação.....	7
2.4 Processo e operações de fermentação .....	9
2.4.1 Onde ocorre o processo de fermentação .....	9
2.4.2 Vinificação de tintos .....	10
2.4.3 Vinificação de mostos brancos.....	11
2.5 Operações pós-fermentação.....	11
2.6 Maturação.....	12
2.7 Operações de pré-engarrafamento e engarrafamento .....	12
2.8 Resumo de características organoléticas.....	13
3 Parâmetros Energéticos da Fermentação .....	15
3.1 Introdução.....	15
3.2 Variação de entalpia e variação da energia livre de Gibbs .....	15
3.3 A molécula de ATP (Adenosina Trifosfato).....	16
3.4 A origem da glicose no mosto.....	17
3.5 Bioquímica do processo de fermentação.....	17

3.6	Crescimento das leveduras e evolução do calor produzido.....	20
3.7	Correspondência de fatores correntemente .....	21
3.8	Resultados práticos da variação de entalpia durante a fermentação .....	23
3.9	Relações entre a libertação de Etanol, CO <sub>2</sub> e Energia .....	24
3.10	Produção global de calor na área de produção da adega .....	34
4	Caracterização do Sistema de Refrigeração.....	37
4.1	Introdução.....	37
4.2	Equipamentos de refrigeração.....	37
4.3	Sistemas e equipamentos de refrigeração em adegas .....	39
4.3.1	Esquema do sistema de distribuição numa adega.....	39
4.3.2	Os sistemas hidráulicos .....	41
4.4	Instalação de refrigeração na adega da Ervideira .....	42
4.4.1	Chiller instalado.....	42
4.4.2	Caracterização do sistema hidráulico .....	45
4.4.3	Análise da topologia de distribuição implementada.....	48
4.4.4	Controlo de temperaturas nas cubas.....	49
4.5	Sistema de ar condicionado na câmara frigorífica .....	49
4.6	Conclusões e discussão sobre o sistema .....	50
5	Balanco de Energia.....	51
5.1	Introdução.....	51
5.2	Abordagem teórica ao balanço de energia nas cubas de fermentação.....	52
5.2.1	Análise de dados climáticos .....	52
5.2.2	Características dos reservatórios de fermentação na Adega da Ervideira .....	54
5.2.3	Estrutura de cálculos .....	56
5.2.4	Cálculos do fluxo de calor por condução .....	66
5.2.5	Cálculos dos efeitos da radiação .....	69
5.3	Resultados do balanço de energia nas cubas de fermentação .....	71
5.3.1	Balanco de energia de todas as parcelas .....	76
5.4	Balanco de energia nas cubas de maturação.....	82
5.4.1	Cálculos de transmissão de calor por convecção e radiação .....	82
5.4.2	Resultados do balanço de energia das várias parcelas .....	84
5.5	Balanco de energia global de fermentação e maturação .....	87
5.6	Fecho do modelo.....	90
6	Medidas de Melhoria .....	91

6.1	Introdução.....	91
6.2	Medidas de melhoria .....	91
6.2.1	Cubas de fermentação .....	91
6.2.2	Área de produção e chapa de cobertura.....	92
6.2.3	Sistema de refrigeração .....	92
6.3	Discussão qualitativa das medidas de melhoria .....	92
6.3.1	Cubas de fermentação .....	92
6.3.2	Área de produção e chapa de cobertura.....	94
6.3.3	Sistema de refrigeração .....	95
6.3.4	Resumo de soluções.....	96
6.4	Discussão quantitativa .....	98
6.4.1	Isolamento das cubas de fermentação .....	98
6.4.2	Aplicação de vinha virgem no lado este da adega .....	104
6.4.3	Aplicação de espuma de poliuretano no inferior da chapa de cobertura .....	105
6.5	Conclusões quanto às medidas de melhoria.....	108
7	Conclusões.....	109
7.1	Considerações finais.....	109
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	110
	Referências.....	111
	Anexo A .....	114
	Anexo B .....	115
	Anexo C .....	116



# Índice de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura e arquitetura de uma célula eucariótica [12] .....	10
Figura 3.1 – Molécula de Adenosina Trifosfato (ATP) [11] .....	16
Figura 3.2 – Evolução da glicose na fermentação alcoólica, variação de entalpia em cada reação [22]. .....	18
Figura 3.3 – Gráfico figurativo de uma reação exotérmica.....	20
Figura 3.4 – Gráfico da evolução do calor produzido ao longo do tempo [22] .....	21
Figura 3.5 – Evolução da massa volúmica do mosto de uma casta branca .....	25
Figura 3.6 - Evolução da massa volúmica de uma casta tinta.....	26
Figura 3.7 – Evolução do açúcar com base na massa volúmica de uma casta branca.....	26
Figura 3.8 - Evolução do açúcar com base na massa volúmica de uma casta tinta.....	27
Figura 3.9 – Evolução do etanol para uma casta branca .....	27
Figura 3.10 - Evolução do etanol para uma casta tinta.....	28
Figura 3.11 – Variação da evolução de açúcar fermentado obtidos experimentalmente e por correlação.....	29
Figura 3.12 – Açúcar fermentado para uma casta branca .....	30
Figura 3.13 – Açúcar fermentado para uma casta tinta.....	30
Figura 3.14 – Evolução do calor para casta branca .....	31
Figura 3.15 – Evolução do calor para casta tinta .....	31
Figura 3.16 – Variação do calor produzido numa casta branca .....	32
Figura 3.17 – Variação do calor produzido numa casta tinta.....	32
Figura 3.18 – Evolução da libertação de CO <sub>2</sub> libertado para a casta branca .....	33
Figura 3.19 - Evolução da libertação de CO <sub>2</sub> libertado para a casta tinta.....	34
Figura 3.20 – Produção de calor total na área de produção da adega .....	35
Figura 4.1 – Esquema de uma instalação de um ciclo frigorífico .....	38
Figura 4.2 – Ciclo frigorífico de compressão ideal .....	38
Figura 4.3 – Equipamento de refrigeração e sistema de distribuição .....	40
Figura 4.4 – Circuito de água em série.....	41
Figura 4.5 – Circuito de água em paralelo.....	42
Figura 4.6 – Chiller instalado.....	44
Figura 4.7 – Chiller instalado.....	45
Figura 4.8 – Sectores de distribuição na adega da Ervideira .....	46
Figura 4.9 – Chiller, depósitos de inércia e denominação das bombas .....	47
Figura 4.10 -Representação do setor 1 e respetivas cubas associadas .....	47
Figura 4.11 - Representação do setor 2 e respetivas cubas associadas.....	48
Figura 4.12 - Representação do setor 3 e respetivas cubas associadas.....	48
Figura 5.1 - Gráfico do perfil de temperaturas entre os dias 2 e 5 de setembro em Évora .....	52
Figura 5.2 – Gráfico da variação da resposta térmica de uma cuba de refrigeração .....	54
Figura 5.3 - Esquema cuba vertical .....	55
Figura 5.4 – Esquema de Vinificadores de disposição horizontal .....	55

Figura 5.5 – Esquema de Lagares aberto ao exterior.....	55
Figura 5.6 – Fotografia de cuba vertical.....	55
Figura 5.7 – Fotografia de Lagar.....	55
Figura 5.8 - Fotografia de Vinificadores de disposição horizontal .....	55
Figura 5.9 - - Esquema de uma cuba exemplar com correntes de convecção.....	57
Figura 5.10 – Esquema de um vinificador e representação dos coeficientes de convecção.....	57
Figura 5.11 – Esquema de parede simples e parede com permutador de calor .....	66
Figura 5.12 – Calor transferido nos vinificadores .....	67
Figura 5.13 – Calor transferido nas cubas verticais .....	67
Figura 5.14 – Lado Este da Adega da Ervideira (vista de lado).....	69
Figura 5.15 – Programa em Visual Basic .....	73
Figura 5.16 – Exemplo de folha de cálculo utilizada na determinação de coeficientes de convecção em cubas normais .....	73
Figura 5.17 - Exemplo de folha de cálculo utilizada na determinação de coeficientes de convecção em vinificadores .....	73
Figura 5.18 – Variação da potência gerada por efeitos de convecção e condução .....	74
Figura 5.19 - Variação de potência por efeitos de radiação direta incidente nos vinificadores.	75
Figura 5.20 – Variação da potência da radiação proveniente da chapa de cobertura .....	75
Figura 5.21 – Resultado da variação da potência global requerida para o ano de 2015.....	76
Figura 5.22 – Variação da potência ao longo do dia 15 de setembro.....	77
Figura 5.23 – Comparação percentual entre as várias fontes de energia .....	78
Figura 5.24 – Importância das fontes de calor nos tintos.....	79
Figura 5.25 – Importância das fontes de calor nos brancos .....	79
Figura 5.26 - Variação da potência frigorífica requerida desde o dia 11 de agosto ao dia 12 de outubro .....	81
Figura 5.27 – Coeficientes de convecção nas paredes de uma cuba de maturação.....	83
Figura 5.28 – Gráfico da potência gerada por convecção e condução desde 9/05/2015 a 23/10/2015 .....	85
Figura 5.29 – Gráfico da potência gerada por radiação desde 1/05/2015 a 31/10/2015 .....	85
Figura 5.30 - Gráfico da potência total transmitida desde 1/05/2015 a 31/10/2015 .....	86
Figura 5.31 – Importância energética das parcelas na transmissão de calor nas cubas de maturação .....	86
Figura 5.32 – Necessidades frigoríficas globais do chiller.....	87
Figura 5.33 – Importância percentual da energia gerada entre a maturação e fermentação ...	89
Figura 5.34 – Importância percentual das cargas térmicas entre a maturação e fermentação nos meses de fermentação .....	89
Figura 6.1 – Cubas de vinho com isolamento e revestimento em chapa de alumínio [33] .....	93
Figura 6.2 – Espuma de poliestireno com revestimento em alumínio [48] .....	93
Figura 6.3 – Funcionamento de um injetor [50] .....	95
Figura 6.4 - Princípio de funcionamento de nebulizadores no condensador do chiller [51] .....	96
Figura 6.5 – Gráfico da variação da potência frigorífica requerida com a aplicação de isolamento.....	104
Figura 6.6 - Esquema do isolamento na chapa .....	105

# Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Tabela das reações do processo de fermentação .....	19
Tabela 3.2 – Densidade, temperatura e açucares de três castas brancas da Adega da Ervideira .....	22
Tabela 3.3 - Densidade, temperatura e açucares de três castas tintas da Adega da Ervideira ..	23
Tabela 3.4 – Calor libertado por cada cuba a 90% de capacidade.....	24
Tabela 3.5 – Correlações entre etanol E, concentração de açúcar Z, massa volúmica d e volume de CO <sub>2</sub> V <sub>CO2</sub> [30].....	25
Tabela 4.1 – Tabela de características do Chiller instalado .....	43
Tabela 4.2 - Dados úteis referentes a cada bomba e sector da adega .....	46
Tabela 5.1 - Características dimensionais dos reservatórios de fermentação da adega da Ervideira .....	56
Tabela 5.2 – Tabela de designações dos coeficientes de convecção e localizações nos reservatórios .....	58
Tabela 5.3 – Tabela para determinar as constantes a usar com a equação do número de Nusselt [42] .....	59
Tabela 5.4 – Resumo dos dados utilizados no cálculo dos coeficientes de convecção .....	60
Tabela 5.5 – Dimensões características usadas no cálculo dos coeficientes de convecção .....	61
Tabela 5.6 - Dados utilizados no cálculo dos coeficientes de convecção interior na dissipação de calor.....	62
Tabela 5.7 – Tabela de dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção no exterior .....	64
Tabela 5.8 – Propriedades do ar utilizadas .....	65
Tabela 5.9 – Dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção no exterior na dissipação de calor .....	65
Tabela 5.10 – Propriedades do ar utilizadas .....	65
Tabela 5.11 – Tabela de dados utilizados no cálculo do fluxo de calor .....	68
Tabela 5.12 – Fatores de forma utilizados para cada cuba.....	71
Tabela 5.13 – Coeficientes de convecção médios para a situação de Tamb acima da T de fermentação.....	72
Tabela 5.14 – Coeficientes de convecção médios para a situação de dissipação de calor.....	72
Tabela 5.15 - Carga térmica do dia 15 de setembro .....	77
Tabela 5.16 – Comparação de resultados finais de potência .....	78
Tabela 5.17 – Discriminação das cargas energéticas e correspondência com as necessidades frigoríficas.....	80
Tabela 5.18 – Propriedades da água para 20 °C .....	82
Tabela 5.19 – Propriedades do ar para 27 °C.....	83
Tabela 5.20 – Coeficientes de convecção para as cubas de maturação .....	83
Tabela 5.21 – Fatores de forma dos topos e da lateral dos reservatórios.....	84
Tabela 5.22 – Cargas térmicas do dia 15 de setembro .....	88

Tabela 5.23 – Comparação entre a energia ativa descrita nas faturas da adega com a análise realizada .....	90
Tabela 6.1 – Resumo de soluções e razões a implementar .....	97
Tabela 6.2 – Temperaturas usadas após o processo de iteração para a situação de temperatura ambiente acima da desejada na fermentação .....	99
Tabela 6.3 – Tabela dos coeficientes de convecção usados para a situação de temperatura ambiente acima da desejada na fermentação .....	99
Tabela 6.4 - Temperaturas usadas após o processo de iteração para a situação de temperatura ambiente inferior á desejada na fermentação .....	100
Tabela 6.5 - Tabela dos coeficientes de convecção usados para a situação de temperatura ambiente inferior á desejada na fermentação .....	100
Tabela 6.6 – Dados relativos ao cálculo do fluxo de calor das cubas e respetivos coeficientes de convecção.....	101
Tabela 6.7 – Tabela de comparação de resultados da aplicação de isolamento nas cubas .....	102
Tabela 6.8 – Tabela dos coeficientes de convecção usados para as cubas de maturação .....	102
Tabela 6.9 – Tabela de comparação de resultados da aplicação de isolamento nas cubas .....	103
Tabela 6.10 – Carga térmica total e consumo elétrico do chiller com a aplicação de isolamento térmico .....	103
Tabela 6.11 – Variação da temperatura do isolamento no dia 15 de Setembro .....	107

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

O número de produtores de vinho aumenta e conseqüentemente a concorrência é mais exigente. O mercado consumidor é cada vez mais rigoroso, a qualidade é um fator chave em paralelo com o preço e cabe aos produtores arranjar estratégias que visem atingir esses resultados. A produção é complexa e tendo consciência da dificuldade em atingir essas metas muitos têm sido os esforços de desenvolvimento e investigação no sentido de melhorar os processos envolvidos em toda a cadeia. Nos últimos anos o seu desenvolvimento tem sido aprimorado e melhorado a um ritmo acelerado.

O mercado, cada vez mais vasto, exige preços mais competitivos e existe a necessidade de perder margem de lucro ou diminuir os custos. Naturalmente, diminuir os custos deve ser a estratégia adotada nestas circunstâncias e apesar de cada processo ao longo da cadeia de produção ter um custo associado extremamente importante o processo de fermentação requer cuidados especiais pois não só é crucial no desenvolvimento do produto final como representa custos com alguma relevância. Estes custos estão associados essencialmente ao controlo da temperatura de fermentação dos sumos de uva. O controlo das temperaturas nas diferentes fases do processo de vinificação, é de enorme importância para a qualidade do produto final. Um importante trabalho de um enólogo é avaliar temperaturas, de modo a obter determinadas características. Estas características podem ser os aromas, a limpidez, sabores frutados ou a madeira, níveis de taninos, entre outros, que definem e distinguem os produtores ou até as gamas da própria marca.

Qualquer produtor procura assim, ter controlo sobre as temperaturas no processo. Naturalmente, este controlo envolve que os produtores necessitem de adquirir sistemas de refrigeração de acordo com as suas necessidades. Por vezes a potência destes equipamentos é elevada e o seu horário de funcionamento bastante preenchido, diariamente. Isto representa custos energéticos significativos. No geral, a utilização de energia associada à refrigeração representa cerca de 50% a 70% da energia total utilizada numa adega. Pelo que, tem um grande significado no preço final do produto. Toda a conceção e projeto de uma adega tem em conta fatores energéticos, no sentido de tentar manter temperaturas baixas no seu interior, especialmente nos meses mais quentes do ano. Ao longo do seu tempo de vida, os equipamentos vão se deteriorando, tornando-se essencial a manutenção e verificação do bom estado das instalações, para reduzir custos pontuais não previstos. Da mesma forma é necessário realizar auditorias energéticas para manter os custos de energia estáveis, prevenir avarias nos equipamentos e propor soluções ou intervenções novas, economicamente viáveis.

## 1.2 Breve Contextualização Sobre a Indústria do Vinho

O vinho é um produto cuja história remonta ao século X a.C. Pensa-se que as primeiras vinhas tenham nascido entre as regiões da Arménia e Portugal. Tiveram um enorme desenvolvimento durante os tempos da romanização da península ibérica após a conquista dos romanos. O cultivo da vinha foi aumentando fruto do enorme consumo e exportações de vinho português e hoje em dia a indústria do vinho tem um papel fundamental na economia portuguesa. Portugal exporta quase metade da sua produção e ocupa um lugar de destaque entre todos os países produtores, não só pela diversidade das suas castas, ótimas condições de produção que favorecem a qualidade dos seus vinhos e sobretudo uma excelente relação preço-qualidade. De acordo com os dados do IVV é o 11º país na lista de maiores produtores, tem vindo a aumentar a sua produção desde 2011 e as exportações representam 1,5 % do total das exportações de bens em Portugal.

## 1.3 Breve Caracterização da Empresa Objeto de Estudo

A adega da Ervideira situa-se aproximadamente a 3 km da Vendinha e a 10 km de Reguengos de Monsaraz, distrito de Évora. Tem cerca de 160 hectares de vinha e produz perto de 800 000 litros de vinho. 50 hectares fazem parte da propriedade onde se situa a adega enquanto que 110 hectares se situam numa segunda propriedade a 65 km.

A adega possui uma câmara frigorífica, com dimensões de 13,9×6,9×5,4 m, perfazendo um volume interno de 517,9 m<sup>3</sup>. Esta câmara é refrigerada por ar condicionado. Dentro da câmara encontram-se 13 cubas com uma capacidade total de 95 m<sup>3</sup>. No exterior da câmara, a adega possui 53 cubas, das quais 46 são refrigeradas por uma máquina de arrefecimento denominada de *Chiller*. Das 46, apenas 30 são utilizadas para fermentação, perfazendo aproximadamente um volume total de 385 m<sup>3</sup>. As restantes cubas são utilizadas para a maturação do vinho.

## 1.4 Objetivos

Pretende-se interligar a indústria vinícola com o conhecimento técnico-científico da engenharia mecânica, nomeadamente, nas áreas de termodinâmica e transmissão de calor e dar um contributo significativo para o seu desenvolvimento técnico e cultural.

Nesta dissertação pretende-se caracterizar os processos vinícolas e os sistemas de refrigeração envolvidos, realizar uma análise energética e apresentar medidas de melhoria que beneficiem a empresa tanto na qualidade do produto final como na redução da fatura de eletricidade anual.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação é constituída por 7 capítulos nomeadamente introdução, produção vinícola, parâmetros energéticos da fermentação, caracterização do sistema de refrigeração, balanço de energia, medidas de melhoria e conclusões. No capítulo da produção vinícola irá fazer-se uma breve contextualização e descrição dos processos envolvidos na produção de vinhos que servirá como suporte base para entender a análise energética realizada posteriormente, especialmente as condicionantes e parâmetros envolvidos que condicionam e limitam a avaliação. No terceiro capítulo apresenta-se os parâmetros envolvidos no processo da fermentação, reações químicas e uma metodologia de cálculo para o calor libertado pelas reações exotérmicas envolvidas no processo. O quarto capítulo descreve os sistemas de refrigeração que se implementam em adegas e discute-se especificamente os implementados na adega da Ervideira, suas vantagens e problemas associados. No capítulo do balanço de energia é realizada uma abordagem à análise energética com especial foque nas perdas energéticas por transmissão de calor nos reservatórios de fermentação e maturação e são apresentados os resultados energéticos globais das cubas presentes na área de produção da adega. O capítulo das medidas de melhoria visa apresentar uma análise qualitativa de várias medidas e uma análise quantitativa das soluções que se consideraram mais vantajosas em vários aspetos. Por fim, apresentam-se as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros no capítulo sete.



# 2 Produção Vinícola

## 2.1 Introdução

Este capítulo aborda as questões fundamentais dos processos envolvidos na cadeia de produção de vinho, desde a criação das uvas até ao produto final, para que se possa compreender o estudo energético e a sua conjuntura.

Este capítulo abordará também questões relativas às características organoléticas do vinho e os fatores mais importantes que as influenciam.

## 2.2 Produção da uva, colheita e transporte

O primeiro passo na produção de um vinho começa na criação das uvas. Dentro do conjunto de processos até ao produto final, este é o mais importante. É na produção das uvas que se desenvolvem os reagentes que irão dar origem aos produtos desejáveis. Se a criação e o tratamento das uvas seguir dentro dos parâmetros requeridos irá obter-se com maior probabilidade produtos com qualidades pretendidas.

Existem diversas disposições da vinha no terreno dependente das condições do solo, climatéricas, operacionais ou do tipo de casta. Cada disposição tem um determinado impacto dependente muitas vezes da estratégia do produtor. Determinadas disposições permitem ter maior produção. A densidade de plantação que diz respeito ao número de plantas por hectare deve ser maior se o solo for fértil ou menor se o solo for pobre, condiciona a absorção da radiação solar pela folhagem, do vigor da planta e da exploração do solo pelas raízes. A orientação das linhas deve estar no sentido Norte-Sul pois desta forma tem-se mais ganho de energia da radiação e, portanto, mais conversão dessa energia em foto assimilados (açúcares, etc.) por fotossíntese [1].

No processo de crescimento anual das uvas realizam-se algumas operações no maneiio da copa como a poda ou a desfolha, que permitem alguns benefícios como abrir a copa para expor as folhas e os cachos à luz solar e ao ar, reduzindo o risco de doenças ou facilitar os tratamentos fitossanitários. A superfície exfoliar exposta diz respeito à área da superfície de uma vinha exposta à luz solar e é uma medida utilizada no cálculo da quantidade de água a regar [1].

A fase de maturação das uvas é o período onde se forma grande parte das características desejáveis de um vinho [2]. Após o aparecimento dos bagos e o seu crescimento, fase denominada

de crescimento herbáceo, onde os bagos ainda se comportam como outros órgãos verdes realizando a fotossíntese segue-se a fase do “Pintor”. Nesta fase as películas das uvas ganham cor mais intensa e formam-se os compostos fenólicos e outros responsáveis pelo aroma, a polpa enriquece-se de açúcares [1], [2]. O acompanhamento da vinha pelo enólogo é determinante na fase que antecede a vindima, para fixar a data da colheita. Influi nesta decisão a necessidade de maior maturação dos bagos em contraponto com o risco de aparecimento de doenças, o apodrecimento das uvas, a dificuldade de prever o clima e a possibilidade de vindimar com rapidez. Este balanço leva a uma tendência para vindimar demasiado cedo, uma vez que o enólogo arrisca perder toda a produção e o resultado de um ano de trabalho, mas para se produzir vinhos com qualidade é necessário ter uvas de qualidade assumindo-se algum risco para obtenção de maiores benefícios finais [1], [2].

Na vindima, a colheita pode ser realizada à mão ou à máquina e ambas têm os seus benefícios e os seus prejuízos. A colheita manual permite que o operador de forma consciente faça uma primeira seleção dos cachos, não só recolhendo apenas os cachos de melhor qualidade como deitando fora parte de cachos que não se encontram em bom estado. No entanto esta operação é demorada e dispendiosa. A vindima à máquina permite colher as uvas num tempo mais curto, o custo é inferior e permite que se faça a vindima à noite. A colheita durante a noite permite também que as uvas cheguem à adega a temperaturas inferiores diminuindo o risco de doenças bem como a fermentação não controlada. No entanto, perde-se a seleção dos cachos de melhor qualidade [1], [2]. O esmagamento das uvas por vindima mecânica é praticamente inevitável. Na Ervideira a vindima é feita à máquina, durante a noite.

O transporte deve ser realizado com grande cuidado pois o esmagamento da uva provoca o início de reações enzimáticas e dissolução de compostos das partes sólidas como os taninos, originando fermentação não controlada. Por esta razão, idealmente, o transporte deve ser realizado em reservatórios com uma altura de uva inferior a 50 cm [2]. As temperaturas devem ser baixas de modo a evitar-se a fermentação e, por conseguinte, aconselha-se a vindima a horas de temperaturas baixas ou então a refrigeração das uvas durante o transporte. Na Adega da Ervideira o transporte de grande parte da colheita é realizado por camião frigorífico, uma vez que as vinhas se encontram a alguns quilómetros da adega e no caso do transporte normal comprometeria a qualidade das uvas desde o princípio, devido à duração da viagem.

### 2.2.1 Composição do cacho, da uva e do sumo

O cacho consiste no engaço (3 a 6% do peso do cacho) e nos bagos. O bago consiste na película (15% do peso do cacho), polpa (75%) e grainhas (3%) [3]. A composição da película é 78 a 80% de água sendo o restante ácidos, taninos, minerais, compostos azotados, ceras e aromas (algumas  $\mu\text{g}$ ) [3]. A polpa contém água (75 a 80%), 10 a 25% de açúcares e outros compostos em pequenas

quantidades [3]. No caso das grainhas, 25 a 40% é água, 34 a 36% são açúcares, 4 a 10% de taninos, minerais, compostos azotados e lípidos (13 a 20%) [3].

As substâncias presentes na polpa do bago não variam na maioria dos casos, sendo praticamente iguais em todas as variedades e em qualquer cultura. O mesmo já não acontece para o caso das películas cujas substâncias presentes alteram muito de variedade para variedade e de cultura para cultura.

Por esta razão, com vista a se obter determinadas características no produto final, os produtores de vinho tendem a ter em consideração as películas de onde provêm os aromas, taninos e ácidos presentes no vinho [3].

O mosto da uva extraído após os processos de esmagamento e desengace é composto maioritariamente por carboidratos e água. Consiste aproximadamente em 79% de água, 20% de carboidratos, 1% de ácidos orgânicos e vestígios de compostos fenólicos e azotados, vitaminas e minerais [4]. Os açúcares, compostos fenólicos e os ácidos orgânicos é que dão o sabor ao vinho enquanto os compostos azotados, vitaminas e minerais são essenciais para o crescimento das leveduras durante a fermentação [4].

Já os carboidratos no mosto são maioritariamente glucose e frutose, dois monossacarídeos com a mesma fórmula química ( $C_6H_{12}O_6$ ), mas com uma estrutura diferente o que determina as suas propriedades físico-químicas [5]. Estão presentes no sumo aproximadamente com a mesma concentração [6],[4].

O sumo de uva pode conter entre 125-250 g/l de açúcares, dependendo da casta da uva e das condições ambientais [7]. Excetua-se o caso de as uvas estarem afetadas com *Botrytis Cinerea*, fungo que provoca bolor nas uvas. Este pode ter um papel positivo na medida em que pode aumentar a concentração de açúcar até aos 400 g/l, processo designado por podridão nobre. No entanto, pode ter um efeito negativo obtendo-se podridão ácida [7],[3]. Na maioria dos casos está associado à intensa humidade nos bagos e temperaturas entre 15 °C e 28 °C durante o tempo de maturação. As condições ambientais dizem respeito ao microclima do bago, o que corresponde às condições de luminosidade, de temperatura e humidade [3].

## 2.3 Chegada das uvas e Operações de Pré-fermentação

Como já referido, na chegada das uvas à adega pode-se realizar uma seleção dos cachos e bagos, permitindo remover os de má qualidade e em alguns casos escolher os destinados à produção de vinhos de excelência. Esta seleção é feita, geralmente por um tapete rolante horizontal onde as uvas vão sendo transportadas e os operadores vão fazendo a recolha manualmente. Após este processo, as uvas são depositadas num tegão, que é um reservatório de secção triangular com um parafuso sem-fim que transporta as uvas para o desengaçador e esmagador. No desengaçador

separa-se as bagas do engaço, ou seja retira-se a matéria sólida do cacho como os caules, folhas e paus. No seguimento, o esmagamento provoca o rompimento das películas, libertação do sumo da polpa, dispersão das leveduras indígenas e enzimas no mosto e o arejamento, após o qual são encaminhadas para os reservatórios de fermentação ou prensas. No caso das castas tintas, vão diretamente para os reservatórios, enquanto no caso das castas brancas o primeiro sumo é extraído diretamente pelo desengaçador e esmagador para os reservatórios de fermentação e o material restante é encaminhado para a prensa onde se faz a prensagem de toda a matéria, e permite extrair o sumo restante.

Por vezes, antes de se dar início à fermentação, a principal operação a realizar é aplicar uma dose de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) que é conhecido por anidrido sulfuroso. Este é o principal conservador dos vinhos, pois protege o sumo e o vinho de oxidações indesejáveis originadas por enzimas presentes nas uvas, inibe todos as ações de microrganismos dependente da dose aplicada, tem um grande poder dissolvente de compostos corantes das películas e permite conservar os aromas e o próprio vinho [2], [3]. Quando é aplicado antes da fermentação controlada, este inibe as leveduras já presentes nas uvas permitindo que apenas as espécies mais resistentes se desenvolvam, como as *Saccharomyces*. O atraso da fermentação que o sulfuroso provoca nos mostos permite que as borras sedimentem ao longo de um ou dois dias. Por vezes, também permite uma diminuição da temperatura devido à inibição do trabalho das leveduras [2], [3].

Quando as uvas chegam à adega a temperaturas altas, cerca de 30 °C, há necessidade de refrigerar rapidamente. Nestes casos poderão utilizar-se permutadores de calor ou mesmo gelo seco, que é dióxido de carbono sublimado, para arrefecimento das uvas durante o transporte ou mesmo nas massas. O gelo seco passa diretamente do estado sólido para o estado gasoso e consegue-se um bom arrefecimento [2], [8].

É comum fazer-se a correção dos mostos adicionando certas quantidades de açúcares, mostos concentrados, desacidificantes, que diminuem a acidez dos mostos ou acidificantes, que aumentam a acidez dos mostos, respeitando a regulamentação e as normas estabelecidas pela CEE [2].

No caso dos mostos tintos ou rosados, antes do início da fermentação ou mesmo durante a fermentação o responsável pela produção pode decidir realizar um processo denominado de maceração pré-fermentativa [3]. Neste processo o sumo é posto em contacto com as partes sólidas, que são as películas, polpas e grainhas permitindo-se extrair substâncias que são responsáveis pela cor, aroma e sabor nos vinhos tintos. No caso dos mostos brancos após o processo de prensagem, é necessário realizar um processo de clarificação que consiste em separar as partes sólidas como borras, restos de películas, pó e outros resíduos da parte líquida. Este processo pode ser realizado por meio de decantação a temperaturas baixas cerca de 5 °C, filtração, centrifugação ou flotação. [3]. Este último utiliza uma bomba de ar que introduz um fluxo de ar na base da cuba fazendo com que as bolhas elevem toda a matéria para a parte superior da cuba, ficando em suspensão, sendo depois necessário retirar o mosto pela parte inferior.

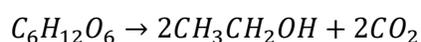
No caso da adega Ervideira a chegada das uvas dependem de vários fatores. Embora a maturação das uvas prevaleça sobre outros fatores, a área de plantação estende-se ao longo de vários hectares, pelo que tem de haver uma estratégia de vindima que não tem só a ver com a maturação das uvas, mas sim com a capacidade da adega em dar resposta à produção de vinho devido à capacidade limitada de produção. Deve-se conjugar o facto de haver apenas uma máquina de vindimar que naturalmente tem limitações na velocidade de colheita.

Por vezes acontece um reservatório não ficar totalmente cheio com a descarga de uma vindima, dá-se o início da fermentação e após um ou dois dias, entra no mesmo uma nova descarga fruto de nova colheita que já estaria em boas condições de amadurecimento. Estes casos que se verificam frequentemente poderão provocar dificuldades na leitura e análise dos dados relativos ao controlo da fermentação. Casos como aumento da densidade do mosto de um dia para o outro é um exemplo desta situação.

## 2.4 Processo e operações de fermentação

A fermentação pode iniciar-se logo após a colheita, como já foi referido anteriormente, devido às leveduras indígenas, já presentes nas uvas. Diminuir a temperatura e evitar o esmagamento durante a vindima e no transporte diminui o risco do início das atividades enzimáticas. A fermentação controlada deve iniciar-se no interior dos reservatórios após decisão do produtor ou enólogo responsável.

O processo de fermentação é um processo bioquímico complexo que envolve um conjunto de reações. É descrito pela seguinte equação, anunciada pela primeira vez por Gay-Lussac no princípio do século XIX [2]:



De forma simples, o açúcar é degradado pelas leveduras formando etanol, dióxido de carbono e libertando calor. O processo será descrito em pormenor no capítulo 3.

A inoculação de leveduras cultivadas no mosto permite dar início à fermentação controlada. Ocorre no momento ou após o enchimento dos reservatórios e depende se o produtor deseja realizar maceração pré-fermentativa. É importante a homogeneização das leveduras no mosto, logo, idealmente deve ser adicionada no momento de enchimento.

### 2.4.1 Onde ocorre o processo de fermentação

O processo de fermentação, ocorre nas células dos microrganismos que estão presentes nas uvas, chamados de leveduras. As leveduras são organismos unicelulares e as suas células são células vegetativas ou fúngicas [9].

As células têm vários componentes sendo que cada um deles desempenha um papel específico. Na Figura 2.1, pode-se observar a estrutura e constituição de uma célula eucariótica.

Numa rápida análise, é na mitocôndria que se dá a formação das moléculas de ATP, indispensável para o processo de fermentação [10], essenciais para fornecerem a energia necessária às primeiras reações do processo de fermentação.

Todas as reações do processo ocorrem no citoplasma da célula, que na imagem está caracterizado como “citoesqueleto” [11].

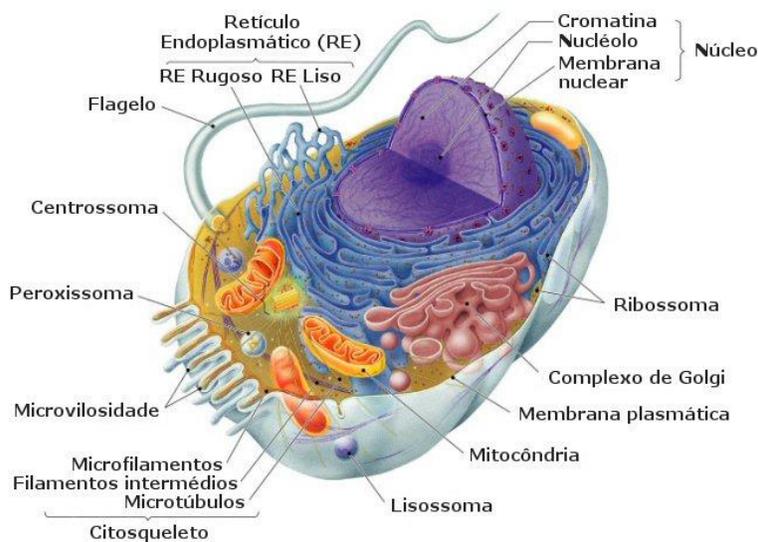


Figura 2.1 – Estrutura e arquitetura de uma célula eucariótica [12]

## 2.4.2 Vinificação de tintos

No sentido de extrair características, a vinificação de tintos realiza-se em contacto com as partes sólidas, películas, polpa e grainhas. Estas características, são maioritariamente os compostos fenólicos e os compostos aromáticos.

Durante a fermentação, para aumentar a extração destes compostos realiza-se ações como repisa ou remontagens. Ambas desempenham as mesmas funções, a repisa pode ser feita com recurso aos pés humanos ou á máquina, permite exercer uma pressão suave sobre a matéria sólida envolvendo a parte líquida diminuindo o risco de crescimento de bactérias na películas exposta ao ar, que tradicionalmente é usada em lagares, pois têm uma superfície grande exposta ao ar ambiente. As remontagens são realizadas por meio de bombas elétricas aspirando o mosto pela parte inferior da cuba e depositando sobre as massas que se encontram em suspensão na parte superior. A envolvência entre as partes sólida e líquida proporciona a extração dos compostos desejados, mas deve ser realizada com o máximo cuidado e durante um tempo determinado. Algumas cubas como é o caso dos vinificadores rotativos horizontais permitem fazer esta mistura através de rotações sobre o seu eixo, outras como o caso dos ganimedes que armazenam gás dióxido de carbono no seu interior e libertam quando necessário provocando essa mistura [1], [2].

A temperatura de fermentação permite controlar o desenvolvimento biológico das leveduras tendo um papel de enorme importância na extração dos compostos desejáveis na maceração [2], [13], [14]. As leveduras têm um desempenho ótimo a temperaturas próximas dos 30 °C e a extração da cor e de outras características realiza-se em melhores condições a temperaturas entre cerca de 20 a 30 °C [14]. O que significa que quanto mais alta a temperatura maior será a velocidade da fermentação alcoólica e de libertação de extratos corantes das películas. Na adega da Ervideira, a fermentação de tintos situa-se idealmente a 24/25 °C. Na generalidade dos casos a fermentação dos vinhos tintos ocorre até ao consumo total dos açúcares presentes no mosto.

Na produção de espumantes ou vinhos rosados os mostos podem ser extraídos da cuba de fermentação quando atingem determinadas características que o produtor considera desejáveis, alcançando o final da fermentação noutros reservatórios ou mesmo no interior da garrafa como é um dos casos típicos de produção de espumantes [3]. O mesmo reservatório pode voltar a ser atestado com uma nova colheita provocando dificuldade na leitura dos dados relativos ao controlo da fermentação. É comum ver aumentos da densidade ao longo dos registos dos dados de análise.

### 2.4.3 Vinificação de mostos brancos

A vinificação de mostos brancos ao contrário dos tintos fermentam sem contacto com as partes sólidas. As temperaturas envolvidas são inferiores, cerca de 15 °C, para preservarem os aromas e o carácter frutado [3], [14]. A estas temperaturas evita-se que os compostos mais voláteis, como é o caso de alguns compostos aromáticos, evaporem. Por vezes alguns mostos são fermentados em barricas de carvalho favorecendo o vinho com aromas a madeira.

## 2.5 Operações pós-fermentação

No caso dos vinhos tintos, após a fermentação, pode-se realizar uma operação denominada de fermentação malolática. É uma transformação bioquímica anaeróbia que converte o ácido málico presente no vinho em ácido láctico que é o mesmo ácido presente nas maçãs. É realizada por determinadas bactérias permitindo desacidificar os vinhos e dar mais suavidade ao paladar. Idealmente a temperatura deve situar-se entre 18 e 20 °C. Abaixo dos 18 °C, pode-se provocar um atraso de alguns meses no processo. Na prática, pode ocorrer ainda durante a fermentação alcoólica se as condições de temperatura, de PH e dióxido de enxofre forem favoráveis. Na maior parte dos casos, é estimulada por inoculação de bactérias após a trasfega para os reservatórios de maturação.

É importante o acompanhamento desta etapa analisando estes fatores no arranque da fermentação já que durante o seu desenvolvimento não há necessidade de um acompanhamento tão rigoroso [2], [3].

Após a fermentação alcoólica o vinho, ainda “verde”, com características herbáceas é extraído para o reservatório de maturação. As massas, borras e toda a matéria sólida dos vinhos tintos são prensadas onde se extrai o restante vinho seguindo depois para as cubas de maturação.

No caso dos vinhos brancos não é necessário usar a prensa uma vez que a fermentação se realiza sem contacto com a matéria sólida.

## 2.6 Maturação

A maturação é uma fase de evolução dos vinhos que ocorre depois da fermentação malolática. Verificam-se reações muito diversas entre os polifenóis, resultando na estabilidade da cor e diminuição da adstringência. A duração é muito relativa, mas na generalidade, entre um a dois anos. Poderá ser realizada em depósitos de aço inoxidável ou em barricas de carvalho. A maturação em barricas permite dar ao vinho determinados compostos fenólicos desejáveis ao paladar. A temperatura ideal para este processo não deve ultrapassar os 20 °C [2], [3]. Acima desta temperatura, o vinho fica suscetível a uma maior contaminação, favorecendo o aparecimento de doenças [2].

## 2.7 Operações de pré-engarrafamento e engarrafamento

As operações antes do engarrafamento são essencialmente a colagem e a filtração. A colagem é o processo de introdução de substâncias proteicas no vinho que ao precipitarem arrastam as partículas que provocam turvação. É usado para clarificar e tornar o vinho mais límpido, remover excesso de determinados compostos e melhorar as características organolépticas. Os colóides presentes no vinho com carga elétrica negativa, como é o caso dos taninos e das partículas que provocam turvação, são envolvidos superficialmente pelos iões de carga elétrica positiva fazendo com que o seu peso aumente e seja provocada a precipitação que ao realizarem o movimento descendente arrastam outras partículas exercendo um efeito de filtração [2], [15].

Existem alguns tipos de colas, sendo as gelatinas, albumina do ovo, caseína e carvão ativado as mais usadas.

A filtração é utilizada também para separar partículas em suspensão, contribuindo para a limpidez e para a estabilidade microbiológica.

A diferença entre os processos é que a colagem garante uma estabilidade da turvação durante mais tempo enquanto a filtração uma estabilidade maior ao nível microbiológico [2], [16].

A operação de engarrafamento inicia-se por enxaguamento das garrafas, extremamente importante para retirar e eliminar quaisquer vestígios que existam no seu interior, é agarrada por uma pinça que ao ser virada ao contrário permite a entrada e saída de água. De seguida dá-se o enchimento de forma constante e com o mínimo de perturbações possível para evitar a formação de espuma e alterações organoléticas. A rolhagem é feita apertando a rolha de forma lenta até atingir um diâmetro de 16 mm e é introduzida rapidamente no gargalo [2], [15].

## 2.8 Resumo de características organoléticas

As características organoléticas são sobretudo os compostos fenólicos e os compostos aromáticos na medida em que sensibiliza o paladar e o olfato respetivamente. Os compostos fenólicos são divididos em não flavonoides e em flavonoides. Os principais fenóis são as antocianinas, responsáveis pela cor vermelha, os taninos, associados à adstringência os polifenóis, associados ao gosto amargo e as substâncias ácidas [2], [3]. Os taninos que têm um papel muito importante na transmissão de sensações de amargor e secura na boca podem dividir-se em taninos condensados que vêm das uvas, especialmente das grainhas e em hidrolisáveis que são os que vêm da madeira das barricas [3]. No que diz respeito à composição aromática, estas dividem-se na forma odorante e forma não odorante. A primeira são compostos voláteis e a segunda precursores de aroma não voláteis como os açúcares. Na forma odorante existem determinados compostos extremamente voláteis como os aromas florais e vegetais. Os compostos de forma não odorante funcionam como armazenadores de aromas externos e portanto podem ter aromas muito diversificados [2], [3].



# 3 Parâmetros Energéticos da Fermentação

## 3.1 Introdução

Para podermos determinar quais as necessidades energéticas de refrigeração do mosto durante a fermentação é necessário entender como é gerada a energia que resulta no aumento da temperatura do sistema.

Neste capítulo irá discutir-se a geração de energia através das reações químicas envolvidas, descrevendo-se o processo de fermentação.

## 3.2 Variação de entalpia e variação da energia livre de Gibbs

Muitas reações químicas envolvem trocas de energia sob a forma de calor com o meio exterior em que se encontram [17].

A energia transferida entre a reação e o meio exterior é designada de calor da reação.

Quando as reações se realizam a pressão constante esta designação passa a ser a variação de entalpia ( $\Delta H$ ). Quando é positiva a reação absorveu energia e quando é negativa liberta energia [17].

A variação de entalpia pode ser dada por [11]:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (3.1)$$

Onde  $\Delta G$  é a variação da energia livre de Gibbs e  $\Delta S$  é a variação de entropia. A energia livre de Gibbs é um indicador da espontaneidade da reação. Se for negativa significa que a reação é espontânea, se for positiva irá ocorrer no sentido inverso [18].

### 3.3 A molécula de ATP (Adenosina Trifosfato)

Para esta compreensão será necessário começar por descrever a forma básica da energia biológica, a molécula de adenosina trifosfato, mais à frente representada por ATP e cuja fórmula química é:  $C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$ .

Através da Figura 3.1, podemos observar a constituição desta molécula:

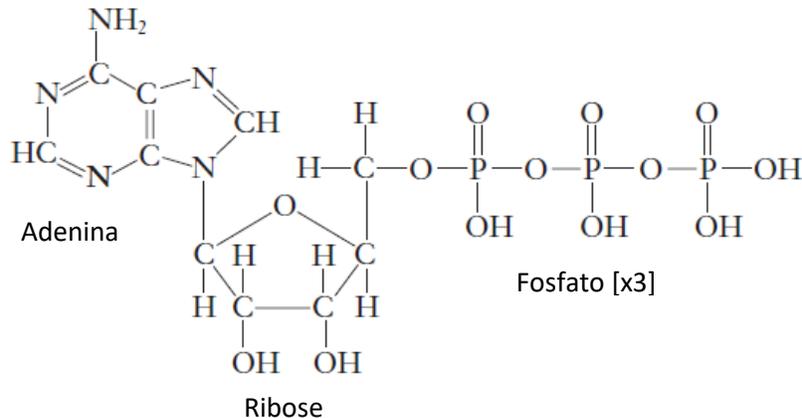
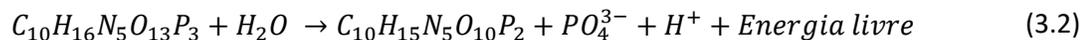
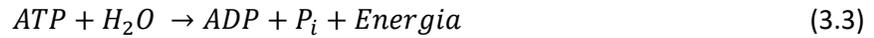


Figura 3.1 – Molécula de Adenosina Trifosfato (ATP) [11]

É constituída por adenina (base azotada), ribose (um açúcar) e três grupos fosfatos. É referenciada como moeda de troca de energia na natureza pois possui uma grande capacidade de armazenamento de energia. Está presente em todas as células eucarióticas (animais ou vegetais). A energia está presente particularmente nas ligações entre os grupos fosfatos, porque os eletrões estão num estado de elevada energia. Quando esta molécula reage com a molécula de água, ocorrerá uma quebra de uma das ligações entre os fosfatos dando origem a adenosina difosfato (ADP), um fosfato, um protão de hidrogénio e energia (eletrões passam de um estado excitado para um estado mais estável de energia), sendo uma reação exotérmica. Na equação seguinte, podemos observar o esquema desta reação [11]:



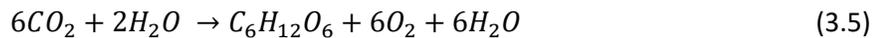
Esta reação que ocorre em simultâneo com outras, permite fornecer energia às reações que se seguem devido à energia livre que se forma, garantindo toda a sequência do processo. Não obstante, cede ainda um fosfato para a reação que esteja a acontecer em simultâneo. Por exemplo, na glicólise, a hidrólise da adenosina trifosfato (ATP) acontece em simultâneo com a fosforilação de glucose dando origem a Glicose-6-fosfato e adenosina difosfato (ADP), o que significa que houve um fosfato que foi cedido da molécula ATP para a glucose. Observe-se nas equações seguintes as duas reações em simultâneo [11]:



Sabe-se também que a energia envolvida na hidrólise da molécula ATP, ou seja, a variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) é aproximadamente -32,2 kJ/mol, sendo uma reação exotérmica. Por outro lado, a reação da glicose é endotérmica pois necessita de energia para ocorrer. A variação da energia livre para este caso é  $\Delta G=+13,8$  kJ/mol. Deste balanço resulta um excedente energético de -18,4 kJ/mol [11]. Esta energia pode ser dissipada sob a forma de calor qualquer que seja o sistema biológico em que se encontre.

### 3.4 A origem da glicose no mosto

As plantas absorvem  $CO_2$  e libertam o oxigénio para a atmosfera, através de um processo chamado fotossíntese. É um processo de oxidação-redução onde há transferência de eletrões entre duas espécies, átomos, moléculas ou iões [19]. As plantas aproveitam a energia proveniente da luz solar para fornecer às moléculas de ADP e Fosfato e assim formar ATP e NADPH (Dinucleótido de Adenina Nicotinamida), que são fontes de energia [20]. Estas são usadas para produzir glicose [20]. Observe-se a equação (3.5) que descreve o processo da fotossíntese.



Note-se que esta equação é uma simplificação do processo, a glicose não é o primeiro produto gerado na fotossíntese [11]. A fotossíntese ocorre no cloroplasto, que é um organelo que se encontra nas células eucarióticas das plantas. Este usa a energia proveniente da luz para produzir ATP e fixar carbono [20].

### 3.5 Bioquímica do processo de fermentação

Na presença de glicose e com as condições favoráveis, as leveduras produzem álcool e dióxido de carbono. É produzido calor, pois a fermentação é um processo exotérmico. A fermentação do vinho acontece na ausência de oxigénio e é um processo que se divide na glicólise e na redução do piruvato. A glicólise é o conjunto de reações que degradam a glicose no ácido pirúvico. A redução do piruvato é o conjunto de reações que conduzem aos produtos da fermentação, neste caso, álcool e dióxido de carbono.

No final, os produtos da glicólise vão ser, duas moléculas de NADH, duas moléculas de piruvato e duas moléculas de ATP (formam-se quatro, mas duas são gastas durante o processo) [21], [22]. A redução do piruvato ou ácido pirúvico ( $C_3H_4O_3$ ), em condições anaeróbias, faz-se pela ação do NADH, formado durante a glicólise. Durante o processo, as moléculas de piruvato vão libertar duas moléculas de  $CO_2$ , passando a Acetaldeído ( $C_2OH_4$ ) e posteriormente reagem com as moléculas de NADH que vai fazer com que se forme etanol ( $C_2OH_6$ ) [21], [22]. Na Figura 3.2 pode-se observar este processo com mais detalhe.

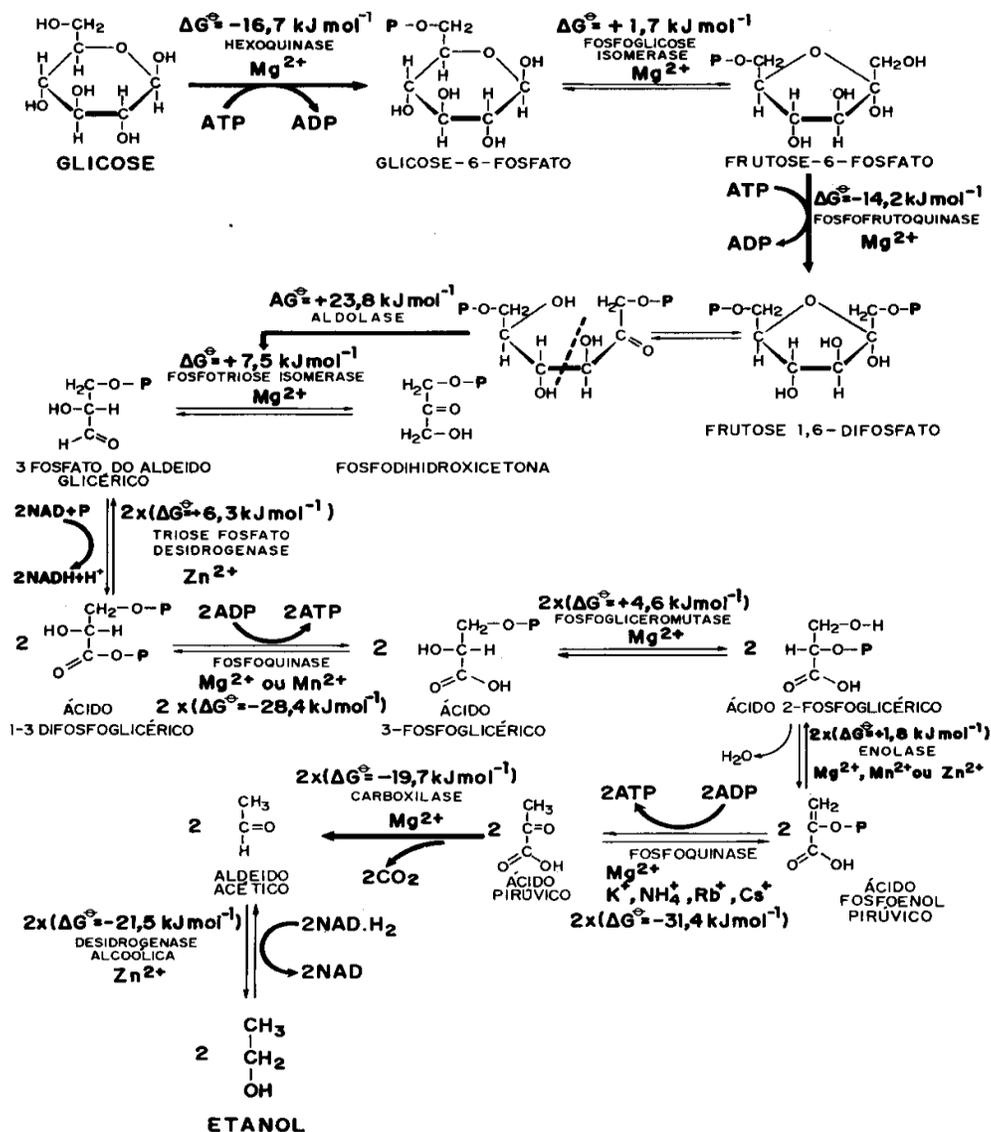


Figura 3.2 – Evolução da glicose na fermentação alcoólica, variação de entalpia em cada reação [22].

Observe-se que este processo é constituído por várias reações. Como já explicado anteriormente, uma reação necessita de energia para despoletar e dar origem a novas substâncias. Essa energia pode ser fornecida com recurso à transformação da molécula de ATP em ADP.

Na Tabela 3.1 mostra-se as reações e a variação de energia livre para cada uma delas, bem como as enzimas [2], [22] e [23].

Tabela 3.1 – Tabela das reações do processo de fermentação

Nº	Reação	$\Delta G$ [kJ/mol]
1	Glucose + ATP → Glucose-6-Fosfato + ADP	-16,7
2	Glucose-6-Fosfato → Frutose-6-Fosfato	+1,7
3	Frutose-6-Fosfato + ATP → Frutose 1,6-bisfosfato + ADP	-14,2
4	Frutose 1,6-bisfosfato → Di-hidroxiacetona-fosfato + Gliceraldeído-3-fosfato	+23,8
5	Di-hidroxiacetona-fosfato → Gliceraldeído-3-fosfato	+7,5
6	Gliceraldeído-3-fosfato + NAD <sup>+</sup> + Pi → 1,3-Bisfosfoglicerato + NADH + H <sup>+</sup>	+12,6
7	1,3-Bisfosfoglicerato + ADP → 3-Fosfoglicerato + ATP	-56,8
8	3-Fosfoglicerato → 2-Fosfoglicerato	+9,2
9	2-Fosfoglicerato → Fosfoenolpiruvato	-
10	Fosfoenolpiruvato + ADP → Ácido pirúvico + ATP	-62,8
11	Ácido pirúvico → Acetaldeído + CO <sub>2</sub>	-39,4
12	Acetaldeído + NADH + 2H <sup>+</sup> → Etanol + NAD <sup>+</sup>	-43

Numa curta análise do processo observa-se que em todas as reações existe consumo ou libertação de energia, estando representado em cada a variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ). São também identificadas as enzimas celulares que atuam em cada reação. São substâncias orgânicas podendo ser de natureza proteica [24]. Estas enzimas têm funções catalisadoras atuando na velocidade da reação. Sem elas as reações dificilmente aconteceriam. Observe-se a primeira reação, a glicose dá origem a glicose-6-fosfato através da enzima hexocinase com o cofator (substâncias orgânicas necessárias ao funcionamento das enzimas) magnésio ( $Mg^{2+}$ ) e ainda consumindo um ATP [25].

A Figura 3.3 representa um gráfico que simula uma reação exotérmica e pode-se observar a energia libertada pela reação que na Figura 3.2 é representado como uma variação de energia livre de sinal negativo.

Como se viu anteriormente a energia livre de Gibbs é indicador do desenvolvimento da reação e não da quantidade de energia gerada sob a forma de calor.

Para se quantificar o calor libertado é necessário conhecer o valor da variação de entalpia de cada uma das reações envolvidas no processo e fazer o balanço entre todas. Se esse balanço for negativo então houve libertação de energia sob a forma de calor.

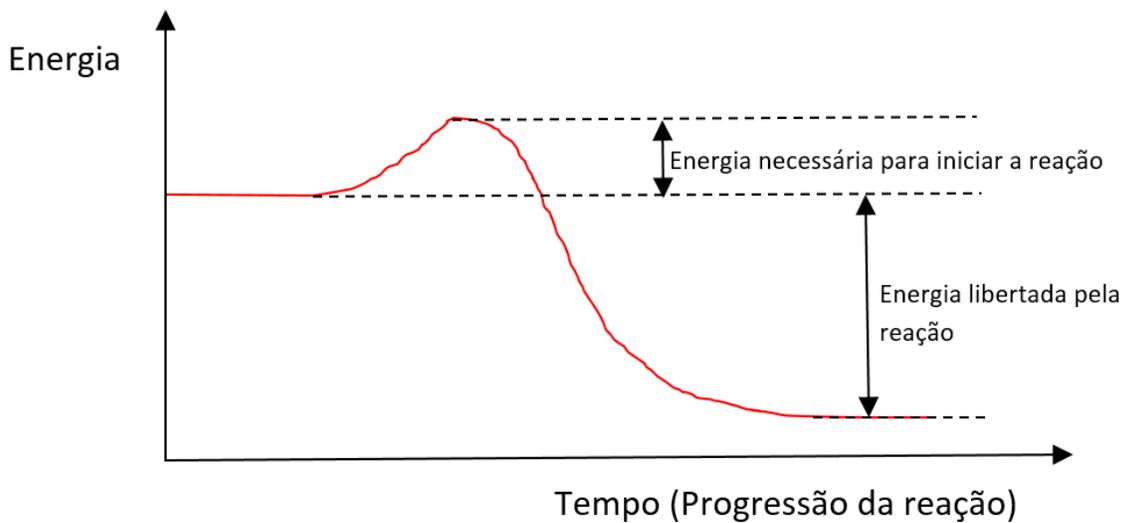


Figura 3.3 – Gráfico figurativo de uma reação exotérmica

Na literatura em geral o valor da entalpia é cerca de - 511 kJ/kg de glucose [26]. Por S. Yonsel et al. num estudo usando calorimetria o valor varia entre - 450 e - 550 kJ/kg de glucose [26], um valor muito idêntico a - 527 kJ/kg de glucose referente ao estudo realizado por Dubrunfaut em 1856 [26]. Boulton, em 1979 definiu o valor de -651.28 kJ/kg de açúcares [27], [28]. Já Von Stockar et al. em 2005 definiu o valor de cerca de -100 kJ/mol equivalente a -555,075 kJ/kg de glucose para a entalpia e -240 a 340 kJ/mol de glucose para o valor da energia livre de Gibbs [23]. Esta diferença deve-se à grande importância que tem o termo  $T \times \Delta S$  na equação  $\Delta H = \Delta G + T \times \Delta S$ . Neste caso 2/3 da força motriz para este processo é entrópica [23]. Na secção “Beverages” do livro “2006 ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI)” o valor da variação de entalpia para os açúcares no mosto pode variar entre 83,7 e 100,5 kJ/mol sendo o valor de 99,6 kJ/mol geralmente utilizado [29].

### 3.6 Crescimento das leveduras e evolução do calor produzido

Como já se discutiu em capítulos anteriores, as leveduras são microrganismos unicelulares que se alimentam dos açúcares presentes no mosto para produzirem etanol. Na Figura 3.4 o autor Pedro L. O. Volpe [22] faz uma representação de um gráfico onde se pode observar a evolução do calor produzido ao longo do tempo.

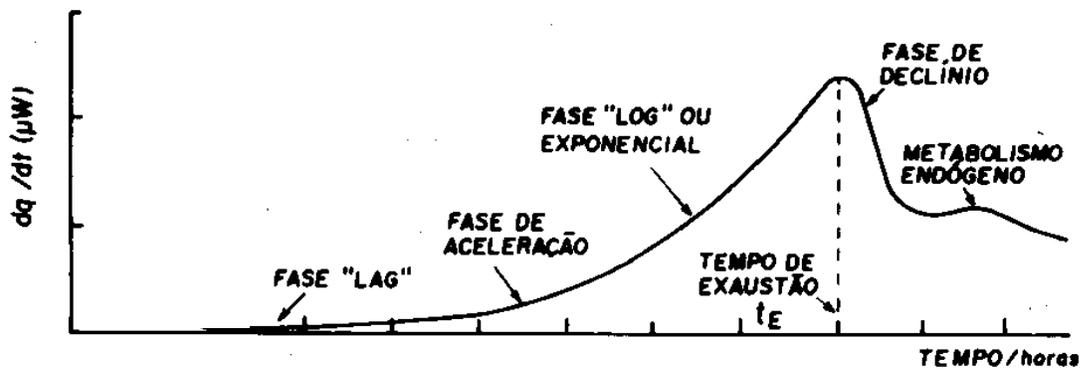


Figura 3.4 – Gráfico da evolução do calor produzido ao longo do tempo [22]

O autor discrimina várias fases do processo. Durante a fase “Lag”, não há crescimento de leveduras, pelo que não há produção de calor. Nesta fase, as leveduras estabelecem o estado enzimático para o catabolismo (parte do processo do metabolismo). Na fase de aceleração dá-se início da produção de calor, mas é na fase “Log” que o crescimento é exponencial resultando num grande aumento de produção de calor e conseqüentemente de etanol e outros produtos [22],[3]. Na fase de exaustão, a alta concentração de etanol dificulta o crescimento das leveduras limitando a velocidade [22]. Após este, dá-se a “fase de declínio” onde o número de células que surgem se torna progressivamente inferior ao das que morrem [22]. Por último o “metabolismo endógeno” é referente ao metabolismo das células que ainda restam.

### 3.7 Correspondência de fatores correntemente

Habitualmente, na prática, existem métodos de cálculo do teor de álcool e açúcar em função da massa volúmica do mosto a 20 °C. O “Teor alcoólico provável % v/v a 20 °C”, que representa o teor alcoólico que se poderá obter no final da fermentação é dado dividindo o teor de açúcares em (g/l) por um fator que indica a quantidade de açúcar que é necessária para se atingir um grau de álcool. A CEE fixou o valor desse fator em 16,83, ou seja, para 16,83 gramas de açúcar fermentados é obtido um grau de álcool. Naturalmente este valor varia com as condições de fermentação, em particular com a temperatura [2].

Na Tabela 3.2 pode-se observar a densidade, temperatura e a massa de açúcares do mosto de três castas brancas distintas da Adega da Ervideira desde a chegada do mosto ao final da fermentação.

Tabela 3.2 – Densidade, temperatura e açúcares de três castas brancas da Adega da Ervideira

Castas	Densidade do mosto [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura [°C]	Açúcares [g/L]	Duração da fermentação [dias]
<b>Arinto</b>	1088	18	208 *	44
	1072	14	167 *	
	1043	12	143 *	
	996	10	9.4 **	
<b>Antão Vaz</b>	1101	16	240.6 *	18
	1093	12	220.6 *	
	1052	14	116.1 *	
	994	14	3.8 **	
<b>Roupeiro</b>	1087	15	205.5 *	25
	1070	16	161.9 *	
	1041	13	87.8 *	
	995	19	5.1 **	
	992	21	0.9 **	

\* Valores estimados por correspondência em tabela usando o fator de 16,83 g/grau

\*\* Valores estimados experimentalmente

Na Tabela 3.3 pode-se observar os mesmos parâmetros da tabela 3.2 mas para três castas tintas.

Para o caso dos mostos brancos, a massa de açúcar antes do mosto começar a fermentar varia entre 205 a 240 g/l, enquanto no caso dos tintos a variação é mais pequena, entre 215 a 220 g/l. No final da fermentação, os vinhos brancos têm sempre menos que 4 g/l e os tintos menos que 2 g/l em teor de açúcar. Fazendo uma análise, destes valores resultam que se consegue converter em etanol entre 98,05 a 99,2 % do total dos açúcares presentes no mosto. Note-se que estes são valores obtidos junto da Adega Ervideira, não obstante podem variar consoante os produtores.

Tabela 3.3 - Densidade, temperatura e açúcares de três castas tintas da Adega da Ervideira

Castas	Densidade do mosto [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura [°C]	Açúcares [g/L]	Duração da fermentação [dias]
Trincadeira	1091	21	215,5 *	11
	1084	21.5	198 *	
	1037	23	77,5 *	
	996	25	1,8 **	
Alicante Bouschet	1093	21	220,6 *	13
	1085	22	200,5 *	
	1033	24	60,5 *	
	998	26	16,5 **	
Aragonez	1092	24	218,1 *	9
	1071	23	161,5 *	
	1042	25	90,4 *	
	996	26	9,3 **	

\* Valores estimados por correspondência em tabela usando o fator de 16,83 g/grau

\*\* Valores estimados experimentalmente

### 3.8 Resultados práticos da variação de entalpia durante a fermentação

Como se viu anteriormente, a variação de entalpia é negativa, havendo libertação de energia dissipada sob a forma de calor. Interessa agora analisar qual é o resultado prático dessa ocorrência. Para este estudo irá ter-se em conta o valor de 550 kJ/kg de glucose dado por S. Yonsel et al. [26]. Considerando os seguintes valores médios:

- Massa volúmica do mosto = 1090 kg/m<sup>3</sup>;
- Massa de açúcares = 220 kg/m<sup>3</sup>.
- Percentagem de degradação dos açúcares = 98.5 %

Considerando que todos os açúcares presentes no mosto são frutose e glucose que têm a mesma fórmula química  $C_6H_{12}O_6$  e que a sua degradação em etanol se comporta de igual maneira.

A massa de uma amostra de  $1m^3$  de mosto será  $\rho \times V = m \Leftrightarrow 1m^3 \times 1090 \frac{kg}{m^3} = 1090 kg$ .

Da mesma maneira, a massa de açúcares presentes na mesma amostra será 220 kg e assim tendo em conta a percentagem de degradação de açúcar:

$$0,985 \times 220 = 216,7 \text{ kg de açúcar}$$

Assim 1 m<sup>3</sup> de mosto produz  $216,7 \times 550 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 119\,185 \text{ kJ}$  de energia libertada.

Na Tabela 3.4 podem-se observar o volume de diferentes cubas presentes na adega da Ervideira e o calor libertado por efeitos de fermentação de cada uma.

Tabela 3.4 – Calor libertado por cada cuba a 90% de capacidade

Volume das cubas de fermentação [m <sup>3</sup> ]	Volume das cubas de fermentação a 90 % de capacidade [m <sup>3</sup> ]	Massa de açúcares [kg]	Calor libertado [kJ]
2,5	2,25	487,575	268166,25
5	4,5	975,15	536332,5
10	9	1950,3	1072665
15	13,5	2925,45	1608997,5
25	22,5	4875,75	2681662,5

### 3.9 Relações entre a libertação de Etanol, CO<sub>2</sub> e Energia

Como já referido anteriormente, o metabolismo das leveduras depende maioritariamente da disponibilidade de açúcar no meio mas também da disponibilidade de azoto, do Ph e da temperatura. A temperaturas cerca de 10 °C o metabolismo é lento, por conseguinte a conversão do açúcar em etanol é mais demorada, porém, a temperaturas entre 25 °C e 30 °C a conversão é rápida, podendo converter-se a quase totalidade do açúcar em dois ou três dias.

Existem correlações que relacionam os fatores integrantes no processo de fermentação, de modo a poder monitorizar o processo em tempo real.

Para o estudo em concreto é necessário conhecer a relação direta entre o consumo do açúcar e a libertação de calor e dióxido de carbono. Essas relações podem ter abordagens mais detalhadas [27], contudo pode ser aplicado um modelo numérico mais simples [30].

É o caso das correlações de El Haloui *et al.*[30] que se apresenta na Tabela 3.5, que relacionam o etanol produzido, o CO<sub>2</sub>, a massa volúmica do mosto, a disponibilidade de açúcares e o açúcar inicial (Z<sub>0</sub>). Estas foram encontradas com base em medições experimentais em laboratório.

Tabela 3.5 – Correlações entre etanol E, concentração de açúcar Z, massa volúmica d e volume de CO<sub>2</sub> V<sub>CO2</sub> [30]

Nº	CORRELAÇÕES
1	$E = 1,85.V_{CO_2} + 2,7$
2	$Z = -3,92.V_{CO_2} + 0,858.Z_0 + 11,7$
3	$E = -983.d + 0,385.Z_0 + 986,2$
4	$Z = 2088,7.d - 2070,7$

A medição do teor inicial de açúcares e a massa volúmica em cada momento permite determinar o teor alcoólico e de açúcares do mosto fermentado. Por esta razão, os enólogos verificam com frequência a massa volúmica dos mostos. Esta atividade realiza-se igualmente na Adega da Ervideira. Como referido na secção 3.6 a verificação da densidade e da temperatura que se realiza duas vezes por dia na adega permite determinar o valor de açúcares através de correspondência em tabelas e assim encontrar o valor de álcool que é provável obter no final da fermentação.

Foi possível obter junto da adega da Ervideira os seguintes dados relativos à evolução da massa volúmica ao longo do tempo de uma casta branca (Figura 3.5) e de uma casta tinta (Figura 3.6).

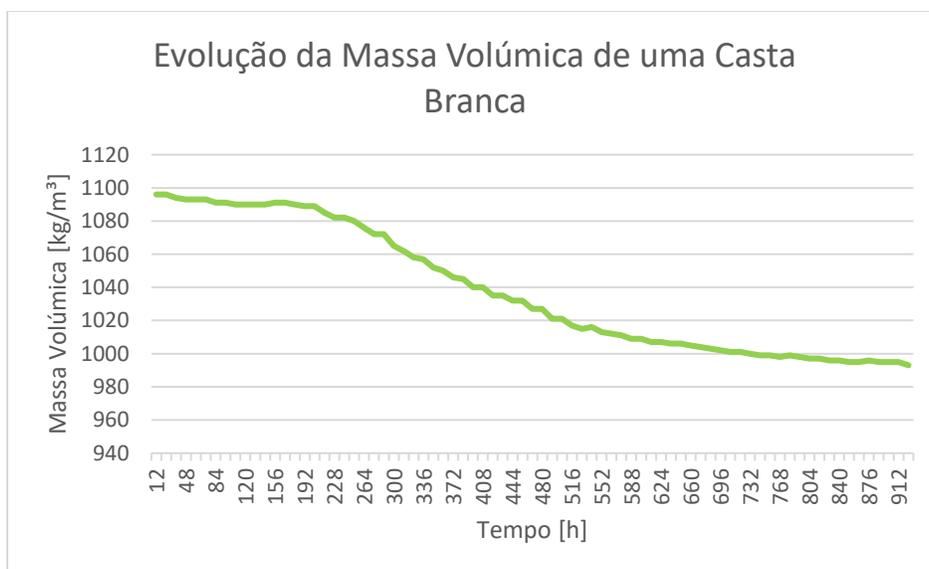


Figura 3.5 – Evolução da massa volúmica do mosto de uma casta branca

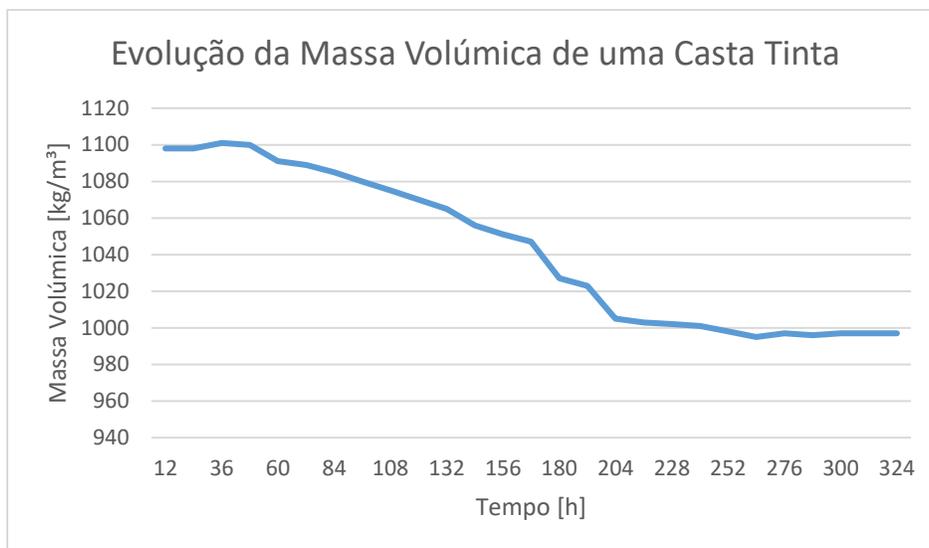


Figura 3.6 - Evolução da massa volúmica de uma casta tinta

Repare-se que a duração de fermentação não é a mesma dos brancos para os tintos, como já referido anteriormente devido à diferença de temperatura.

Através da correlação número 4 dada por El Haloui *et al.* [30] podemos estimar a evolução do açúcar para a mesma evolução da massa volúmica, veja-se nas Figura 3.7 e Figura 3.8.

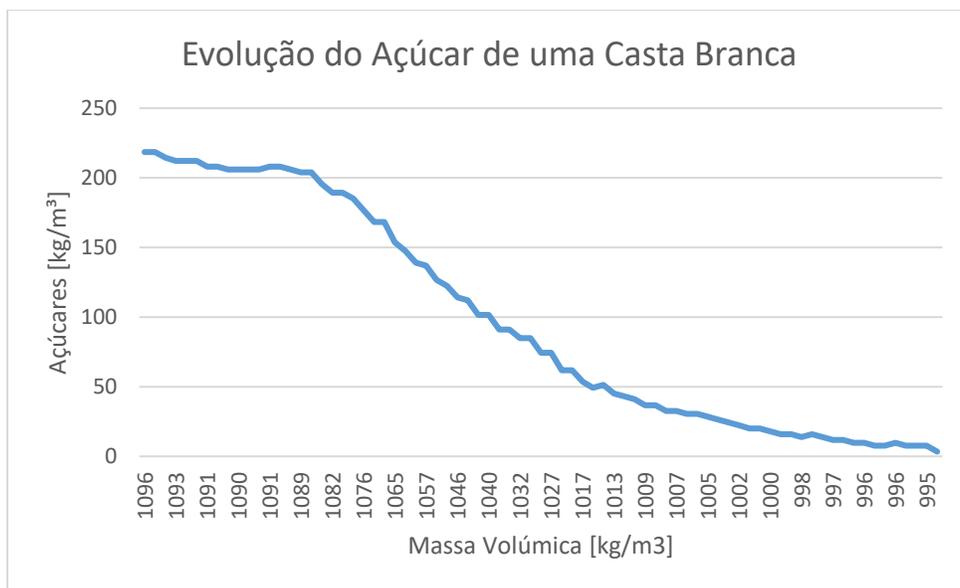


Figura 3.7 – Evolução do açúcar com base na massa volúmica de uma casta branca

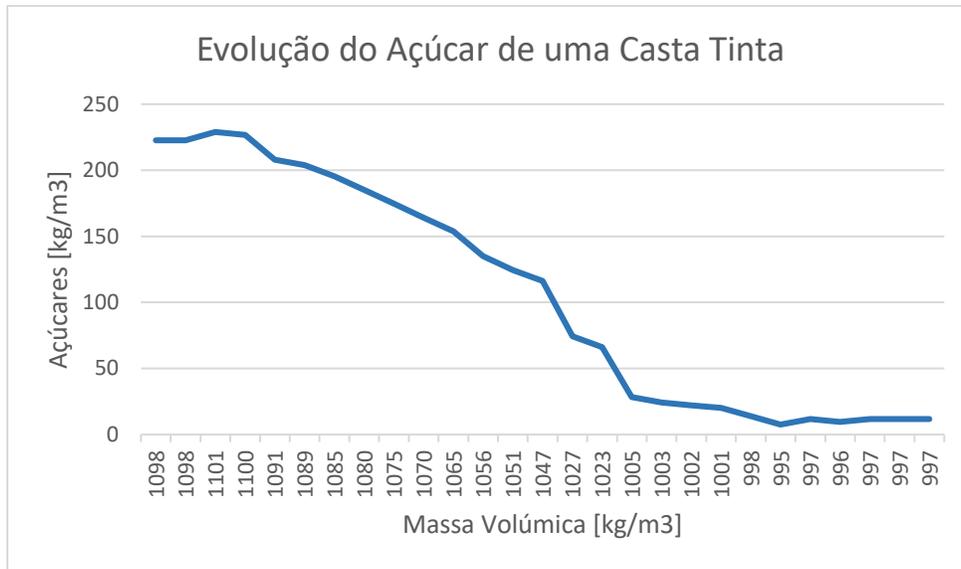


Figura 3.8 - Evolução do açúcar com base na massa volúmica de uma casta tinta

Através da correlação número 3, tendo a massa volúmica pode-se construir o gráfico da evolução do etanol (Figura 3.9 e Figura 3.10).

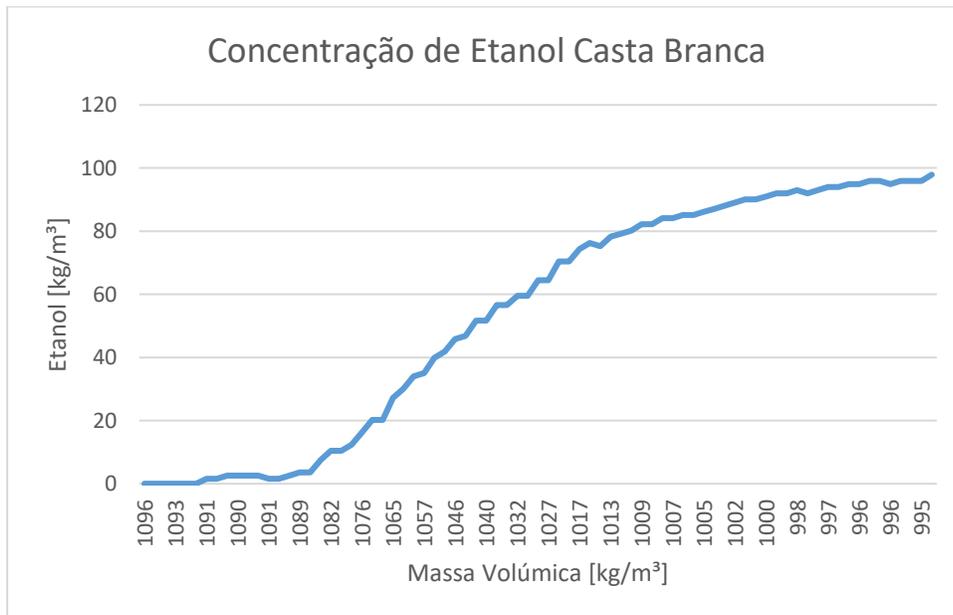


Figura 3.9 – Evolução do etanol para uma casta branca

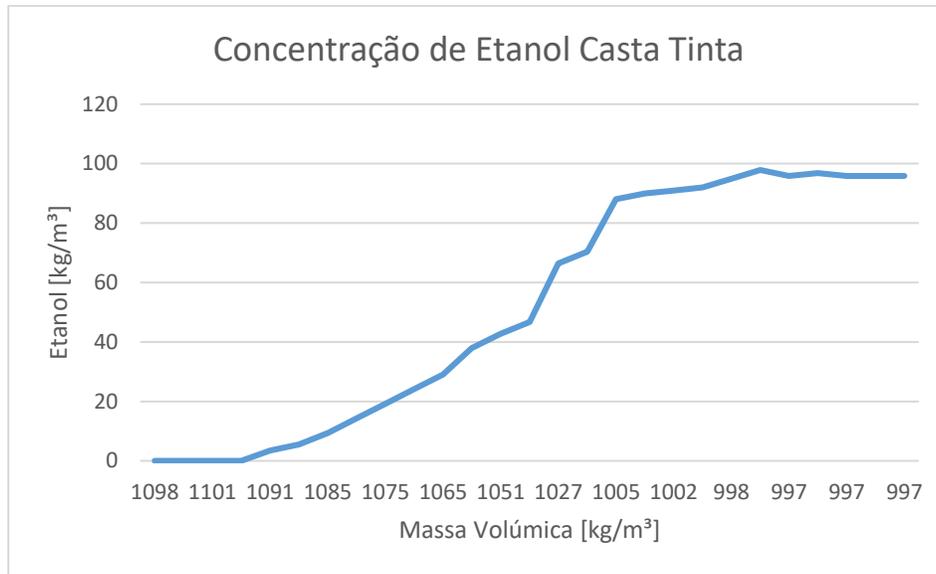


Figura 3.10 - Evolução do etanol para uma casta tinta

Um modelo empírico encontrado por A. López e P. Secanell [31] permitiu estimar a taxa de calor libertado durante a fermentação. O modelo teve como base as correlações dadas por El Haloui *et al.* [30] apresentadas anteriormente.

Tal como se pode prever o calor está diretamente relacionado com a taxa de consumo de açúcar ao longo do tempo, pelo que se pode escrever:

$$\frac{dQ}{dt} = \Delta H \frac{dZ}{dt} \quad (3.6)$$

Sendo que “Z” representa a concentração de açúcar consumido.

O mesmo modelo apresenta as seguintes correlações:

$$V_{CO_2} = - \frac{d - 4,03 \times 10^{-4} \cdot Z_0 - 0,9972}{1,87 \times 10^{-3}} \quad (3.7)$$

e

$$Z = 3,92 \cdot V_{CO_2} + 0,1463 \cdot Z_0 - 11,7 \quad (3.8)$$

De onde se obtém a seguinte correlação:

$$Z = 0,99109 \cdot Z_0 - 2096,3 \cdot d + 2078 \quad (3.9)$$

Onde  $Z_0$  representa a concentração de açúcar inicial presente no mosto (g/L);  $d$  representa a densidade relativa do mosto e  $V_{CO_2}$  o volume de  $CO_2$  libertado durante a fermentação (L/L).

De forma a validar estas correlações, foi comparado a evolução do açúcar medido experimentalmente com o açúcar que se obtém através da equação (3.9). As tabelas da evolução do açúcar fermentado e da massa volúmica foram obtidas pelo livro de António D. Cardoso [2] para uma casta branca da colheita de 2006.

Veja-se o gráfico seguinte (Figura 3.11) onde se representa as duas curvas.

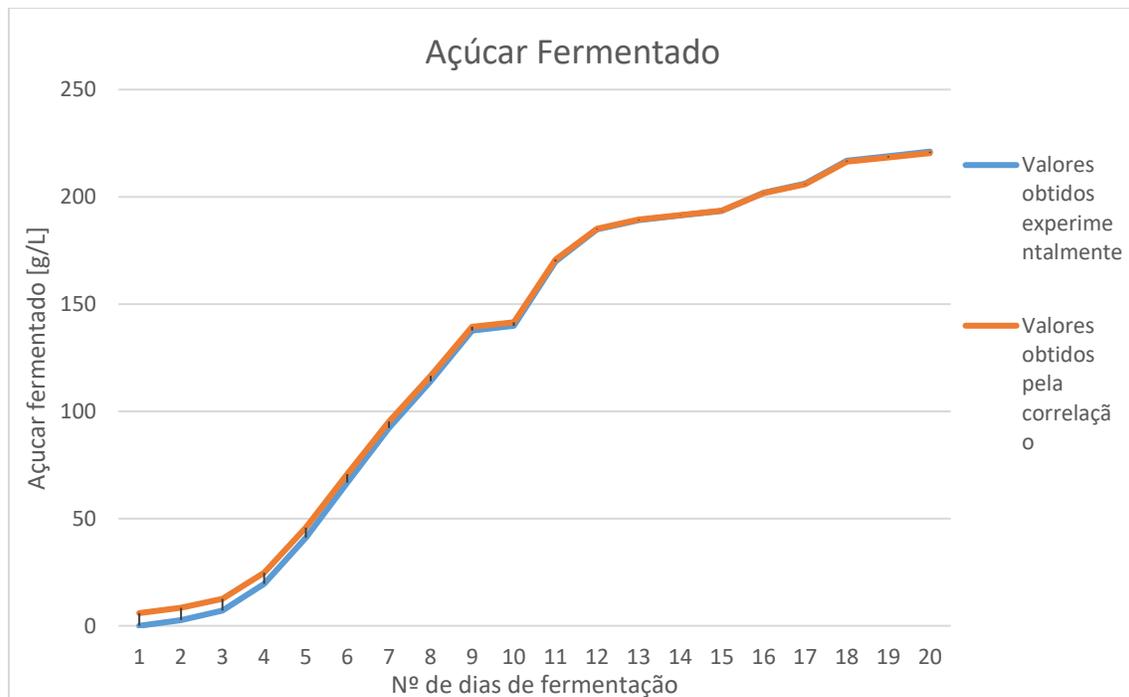


Figura 3.11 – Variação da evolução de açúcar fermentado obtidos experimentalmente e por correlação

Verifica-se que ambas as curvas são muito semelhantes, por conseguinte irá utilizar-se as relações apresentadas anteriormente.

A partir da equação 3.9 e tendo a variação da massa volúmica do mosto pode-se obter a curva da evolução do consumo de açúcares (Figura 3.12 e Figura 3.13) durante a fermentação. Assim apresenta-se graficamente a evolução do açúcar fermentado:

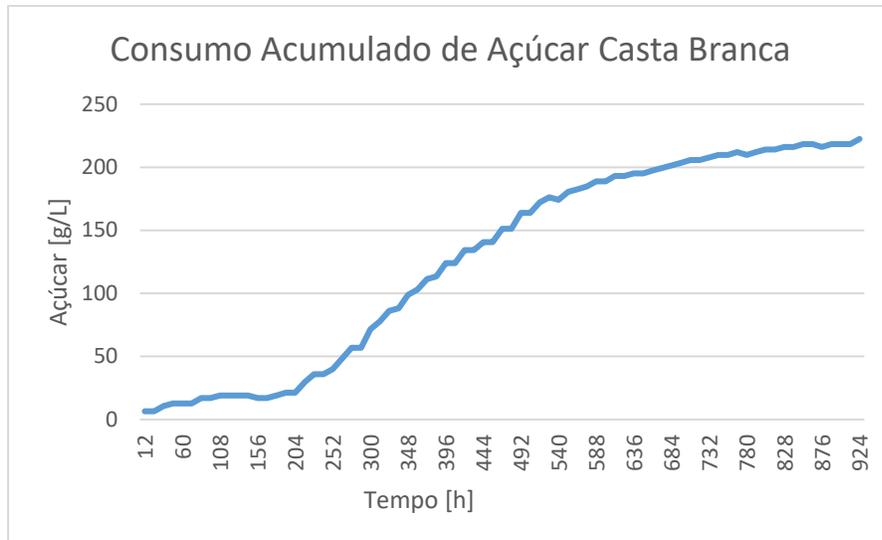


Figura 3.12 – Açúcar fermentado para uma casta branca

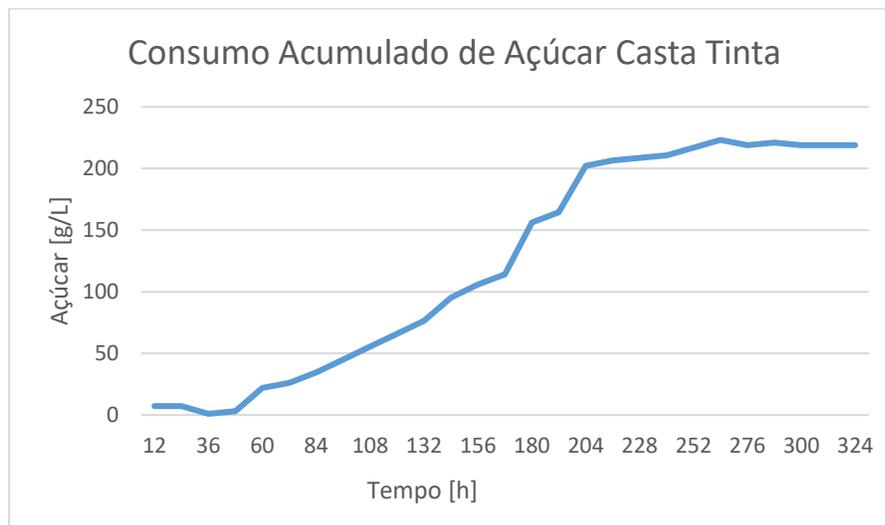


Figura 3.13 – Açúcar fermentado para uma casta tinta

Se se considerar que o valor da entalpia é de 550 kJ/kg dado por S. Yonsel *et al.* [26] correspondente a 0,55 kJ/g, tem-se:

$$Q = 0,55 \times Z$$

A evolução do calor libertado é dada pela equação (3.10):

$$Q_e = 0,5451 \cdot Z_0 - 1152,965 \cdot d + 1142,9 \quad (3.10)$$

De onde se podem representar os gráficos das Figura 3.14 e Figura 3.15.

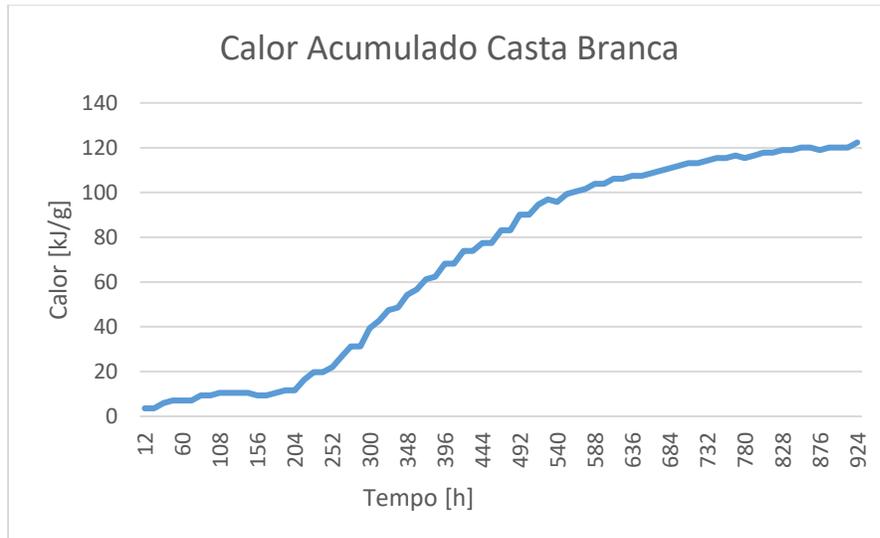


Figura 3.14 – Evolução do calor para casta branca

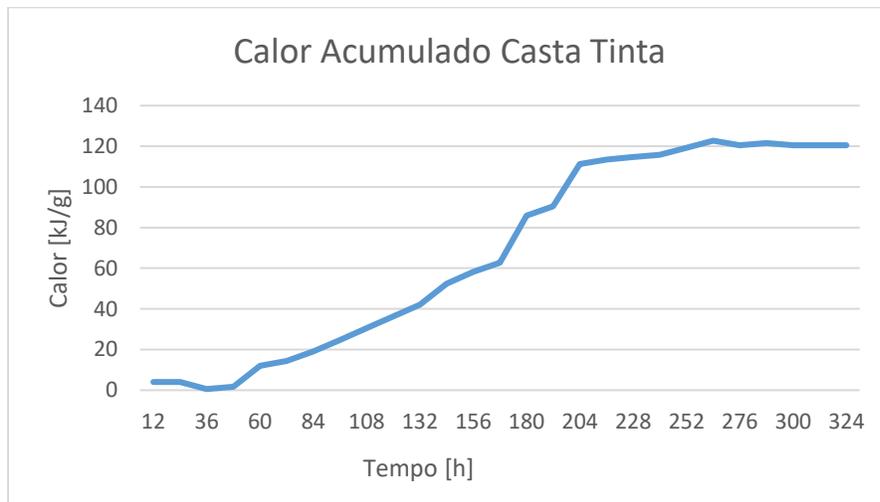


Figura 3.15 – Evolução do calor para casta tinta

Assim a curva da libertação de calor será dada por:

$$\frac{dQ}{dt} = 0,55 \frac{dZ}{dt} \quad (3.11)$$

Onde Q vem em kJ/L de volume de mosto e Z em g/L, sendo que para se obter as curvas da geração de calor é necessário multiplicar a variação de entalpia de 0,55 kJ/g de açúcar pela variação de açúcar ao longo do tempo determinada por método numérico pela diferença hora a hora, obtido com base na evolução dada nas Figura 3.12 e Figura 3.13 obtidas pela equação (3.9).

E graficamente para as duas castas anteriores fica:

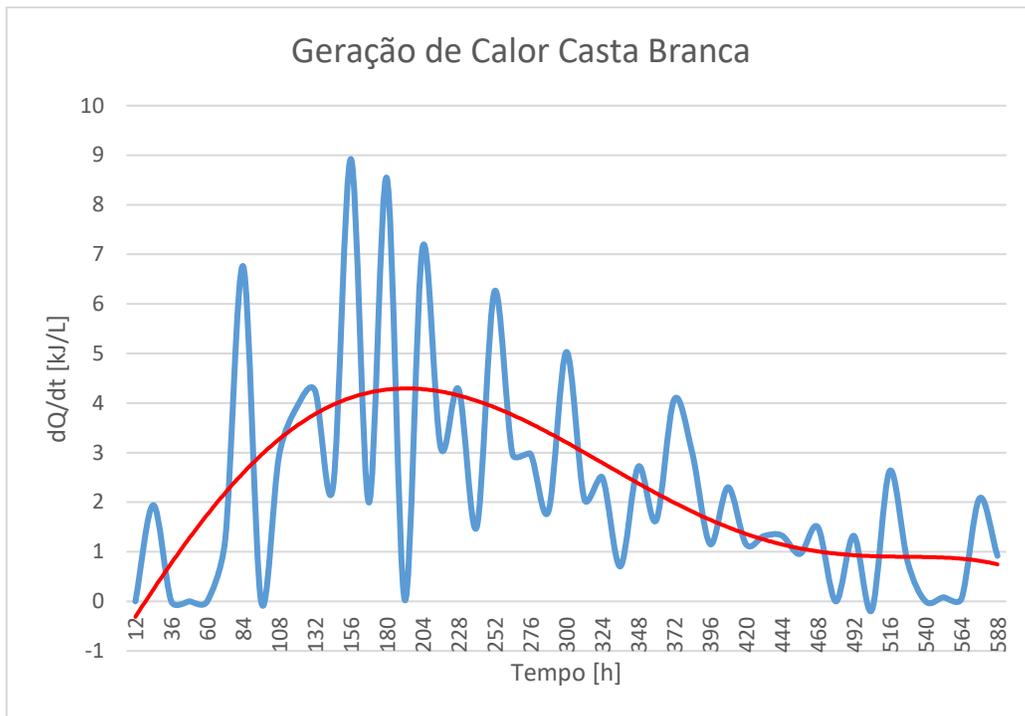


Figura 3.16 – Variação do calor produzido numa casta branca

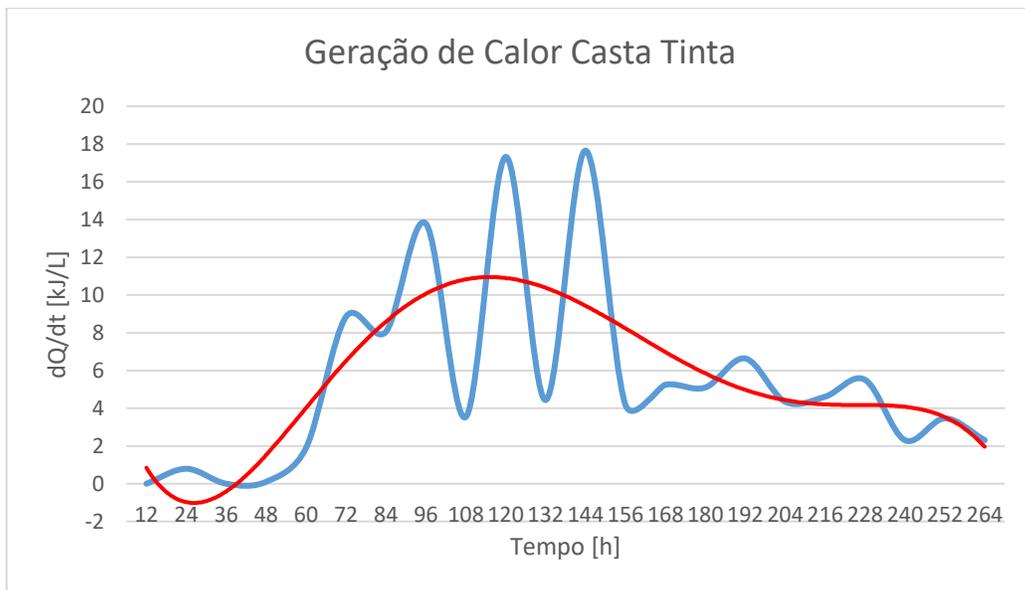


Figura 3.17 – Variação do calor produzido numa casta tinta

As curvas a encarnado representam a tendência da produção de calor. São aproximadas por equações polinomiais, a primeira de grau 5 e a segunda de grau 6.

Verificou-se que a casta branca gerou no total da fermentação 112 000 kJ/m<sup>3</sup> de calor enquanto a casta tinta um total de 120 000 kJ/m<sup>3</sup>, valores não muito distantes dos apresentados na secção 3.8, onde se apresentou o valor teórico de 119 185 kJ/m<sup>3</sup>. Verificou-se para outras castas que este valor varia entre 105 000 e 125 000 kJ/m<sup>3</sup>. Note-se que a produção de calor é mais elevada para a casta tinta que para a casta branca devido à duração da fermentação. Como tem de fermentar uma quantidade de açúcar semelhante, mas num espaço mais curto de tempo o pico de energia alcança valores bastante superiores.

Os saltos que se verificam no gráfico resultam essencialmente da variação da temperatura do mosto da noite para o dia, permitindo que as leveduras aumentem o seu metabolismo paralelamente à temperatura. Por vezes verificam-se casos singulares em que a densidade do mosto aumenta, o que é devido ao facto de esse reservatório receber um mosto mais recente em termos de colheita. O nível de açúcares aumenta e resulta no aumento da densidade, não permitindo que a análise do açúcar presente no mosto seja feita com precisão.

Pela correlação de El Haloui número (4), pode-se também fazer uma estimativa da produção de CO<sub>2</sub>:

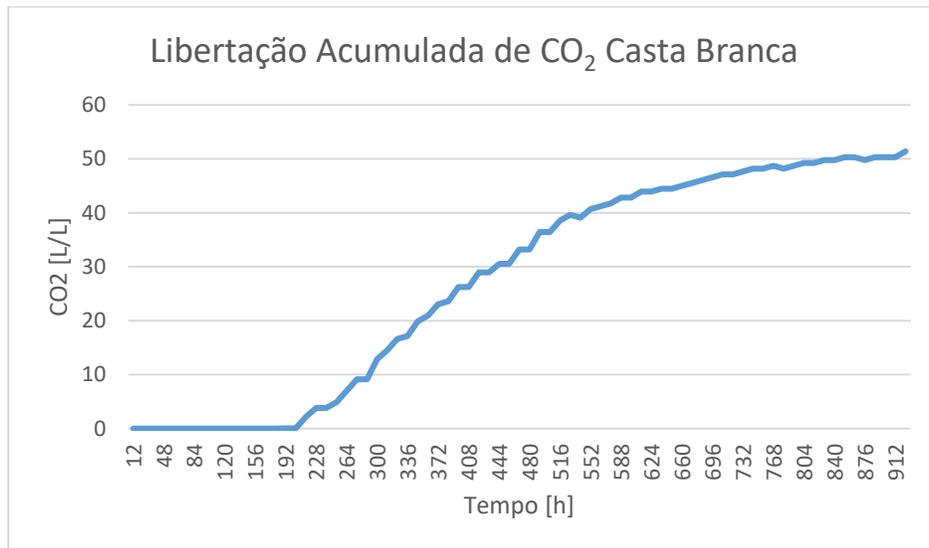


Figura 3.18 – Evolução da libertação de CO<sub>2</sub> libertado para a casta branca

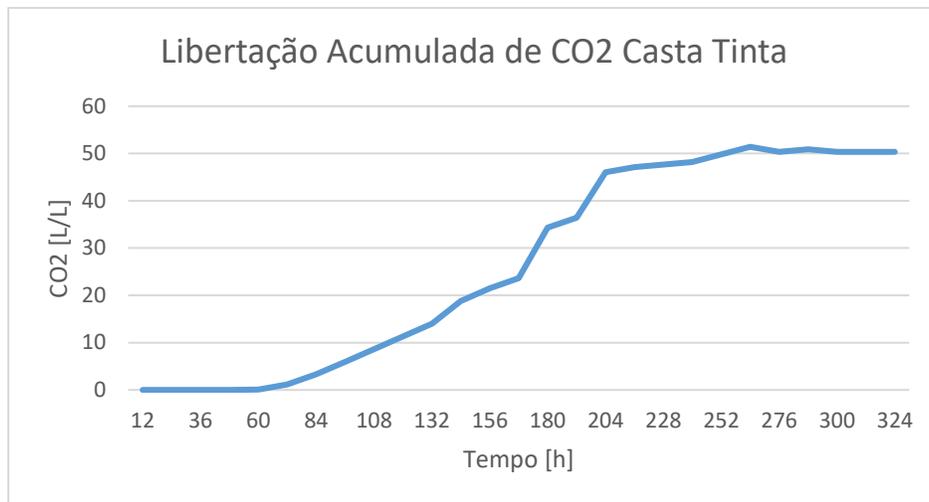


Figura 3.19 - Evolução da libertação de  $CO_2$  libertado para a casta tinta

Pode-se observar pelos gráficos que existe um período inicial para o qual não existe libertação de  $CO_2$  para a atmosfera. Isto acontece porque antes o  $CO_2$  vai sendo diluído no mosto e essa libertação só se dá após a fase de saturação [27].

### 3.10 Produção global de calor na área de produção da adega

Uma vez que já foi descrito a metodologia de cálculo utilizado para determinação do calor libertado em 3.8 é agora necessário fazer uma avaliação global para a adega no seu todo.

A carga de produção e de fermentação varia diariamente em resultado de não ser possível vindimar os 160 hectares todos na mesma altura, a capacidade de produção da adega ser limitada e a maturação das uvas evoluir de maneira diferente. O que significa que há dias em que as cubas estão totalmente atestadas e outros em que estão vazias.

Junto da adega da Ervideira foi possível obter os dados da evolução da densidade e temperatura para o ano de 2015, datas de medições e a carga de cada cuba. Com base nessas medições o calor total que se representa na figura 3.21 é o resultado da soma do calor libertado em todas as cubas ao longo dos meses de fermentação do ano de 2015 contabilizando vinhos tintos e brancos.

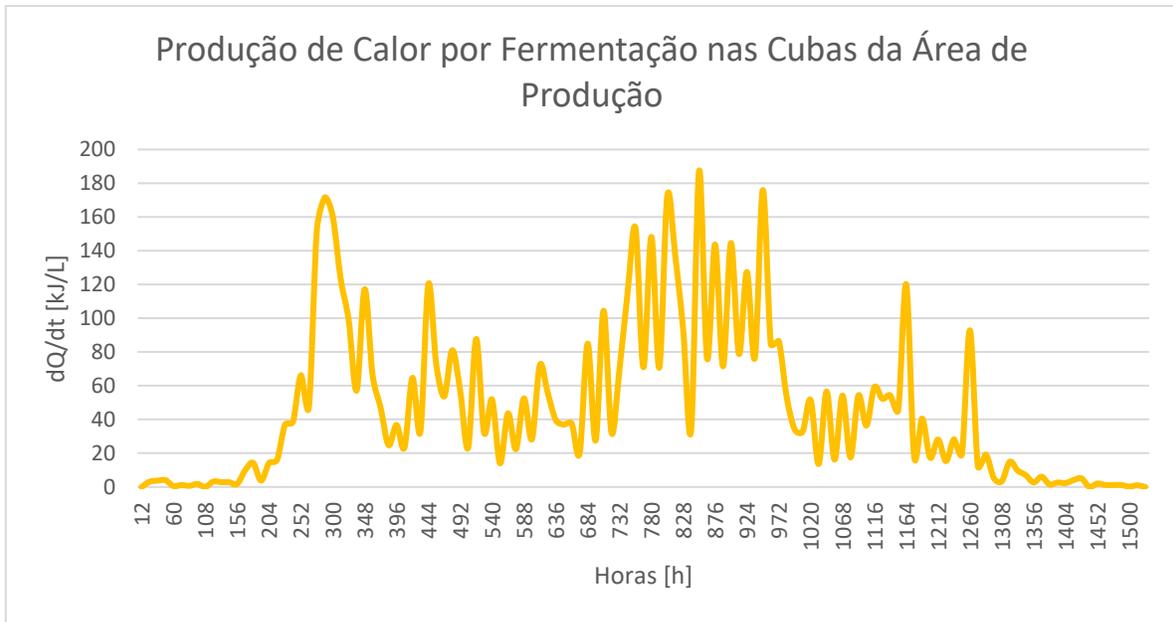


Figura 3.20 – Produção de calor total na área de produção da adega



# 4 Caracterização do Sistema de Refrigeração

## 4.1 Introdução

A produção de vinho envolve um conjunto de processos complexos de muitas variáveis. Como já referido no capítulo 2 do processo vinícola, uma das variáveis envolvidas em alguns desses processos é a variação da temperatura. Na fermentação alcoólica é crucial o controlo da temperatura dos mostos para se obter um produto final com qualidade. Por conseguinte, é necessário que as adegas disponham de equipamentos de refrigeração ou até de aquecimento. Ter equipamentos que disponham das duas opções é uma solução que por norma sai dispendiosa, portanto na generalidade as adegas possuem apenas sistemas de refrigeração, até porque representa a maior necessidade.

Neste capítulo irá discutir-se quais os equipamentos que se utilizam na indústria vinícola, quais os que a adega da Ervideira possui e irá proceder-se a uma discussão qualitativa dos sistemas.

## 4.2 Equipamentos de refrigeração

Na generalidade dos casos os equipamentos possuem os seguintes elementos para poder realizar trabalho de refrigeração [32]:

- Evaporador: Elemento que proporciona a transmissão de calor de um meio a refrigerar para outro;
- Compressor: Elemento que comprime o fluido permitindo a circulação;
- Condensador: Permite a transmissão de calor de um meio para o exterior;
- Válvula de Expansão: Elemento onde se dá uma diminuição da pressão do fluido.

Estes elementos são dispostos de modo a formarem a instalação esquemática que se observa na Figura 4.1 de um ciclo frigorífico simples por compressão [33].

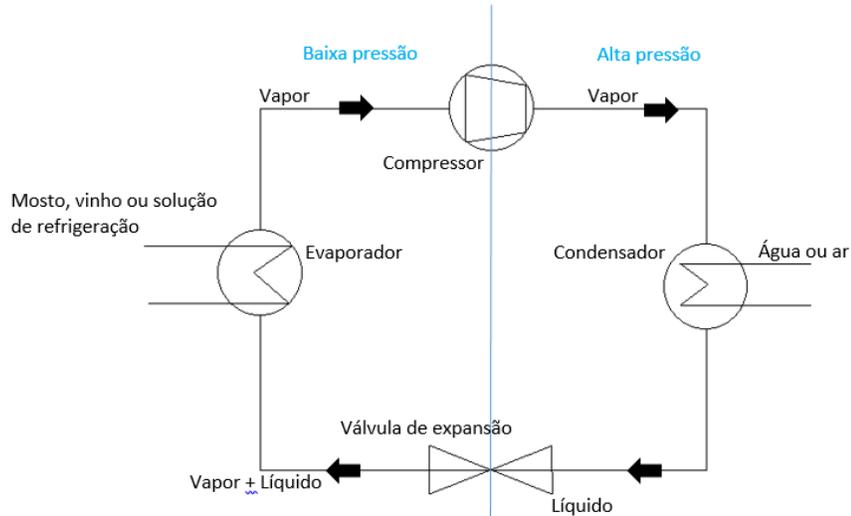


Figura 4.1 – Esquema de uma instalação de um ciclo frigorífico

Através deste esquema observa-se que o compressor é a máquina que faz circular o fluido frigorígeno, que se movimenta ao longo de um ciclo fechado, aumentando a pressão do fluido. À esquerda do compressor o fluido está em baixa pressão devido à sucção e à direita em alta pressão. O vapor comprimido é encaminhado para o condensador onde estando a uma temperatura alta liberta energia por troca de calor com ar ou água. De seguida, o líquido sofre uma diminuição de pressão ao passar por uma válvula de expansão. Essa diminuição de pressão reduz a temperatura permitindo no evaporador trocar calor com o mosto, vinho ou solução secundária de refrigeração. No evaporador resulta a evaporação pretendendo-se que haja um sobreaquecimento do refrigerante como modo de controlo do sistema [32], [33].

Este tipo de equipamentos utiliza um ciclo de compressão que idealmente é representado na Figura 4.2.

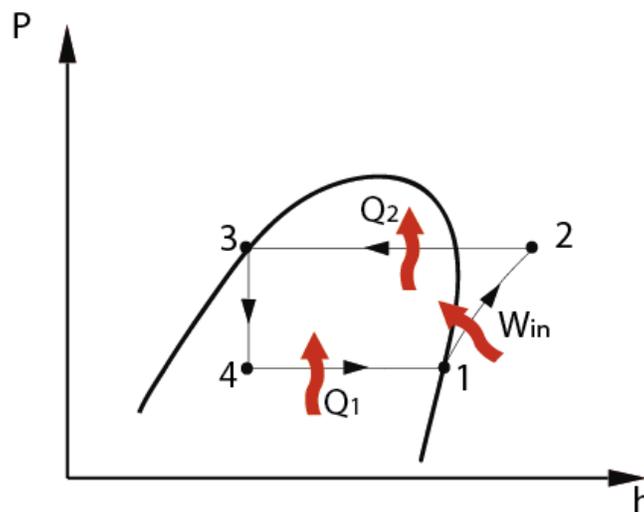


Figura 4.2 – Ciclo frigorífico de compressão ideal

Ao se analisar este gráfico verificamos que a curva de 1 para 2 encontra-se o compressor a fornecer trabalho ao sistema, de 2 para 3 encontra-se o condensador, de 3 para 4 a válvula de expansão e finalmente, de 4 para 1, o evaporador [32].

## 4.3 Sistemas e equipamentos de refrigeração em adegas

A utilização de dióxido de enxofre, poderá em situações críticas de temperaturas elevadas ser utilizado para diminuir a temperatura do mosto ou das massas. Em adegas com pouca disponibilidade de equipamentos de refrigeração sofisticados, após uma colheita diurna a temperaturas altas, a utilização de dióxido de enxofre irá provocar o atraso do início da fermentação permitindo que a temperatura do mosto desça para uma temperatura próxima do interior da adega [2]. Note-se que se a adega for aberta ao exterior esta técnica poderá não ser tão eficaz. No entanto outras técnicas poderão ser aplicadas, como a irrigação de paredes, do chão, do teto, provoca uma diminuição da temperatura interior [2]. Isto resulta da variação negativa de entalpia na mudança de fase da água irrigada. Molhar as paredes dos reservatórios poderá vir a ser benéfico mas existirá uma troca de energia para o interior do depósito se a água estiver a temperaturas mais altas que a parede exterior do reservatório. Esta troca de energia é maior se a cuba for de aço. No caso de uma adega aberta ao exterior, com ventilação e humidade apropriadas a evaporação da água nas paredes das cubas irá refrigerar o mosto se o balanço de energia entre a troca térmica por condução para o interior da cuba for inferior à energia que é absorvida pela passagem de fase [2]. A utilização de dióxido de carbono sublimado a adicionar tanto no transporte das uvas como nas próprias massas é uma alternativa para as adegas de pequena dimensão [2].

Para as adegas de maiores dimensões existem no mercado diversos equipamentos de refrigeração de mostos e massas. Permutadores de calor são o principal meio de refrigeração. Existem permutadores de calor tubulares e por placas que podem ser móveis e apresentam uma elevada eficácia na remoção do calor do mosto. No entanto, verifica-se que em termos de vinificação têm o inconveniente de arejar em demasia os mostos e provocar uma maior trituração de massas [2]. Os permutadores fixos podem ser colocados ao redor da cuba e as placas de arrefecimento no seu interior, ambos ligados ao circuito de água fria.

### 4.3.1 Esquema do sistema de distribuição numa adega

De seguida apresenta-se um esquema típico de um sistema de refrigeração. Este é o mais utilizado na indústria vinícola [33]. Observe-se a Figura 4.3.

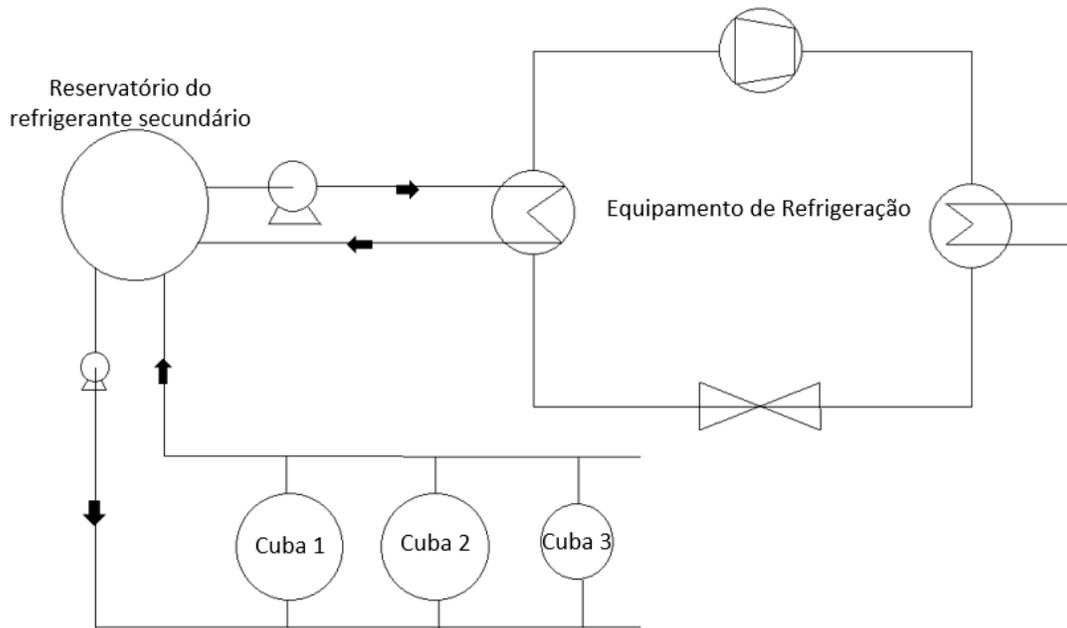


Figura 4.3 – Equipamento de refrigeração e sistema de distribuição

Observe-se como se interliga o equipamento de refrigeração apresentado em 4.2 com o sistema de distribuição da adega.

O sistema de distribuição encontra-se na parte esquerda da figura 4.3. O mosto pode ser refrigerado diretamente no evaporador do equipamento ou, alternativamente, através de um fluido secundário refrigerado pelo evaporador. Observa-se um depósito pulmão ou de inércia denominado na figura como “reservatório de refrigerante secundário” que pode conter água, água com sal, etanol ou propileno glicol. Estas substâncias têm um ponto de fusão inferior ao da água pelo que podem atingir temperaturas abaixo de 0 °C. O refrigerante secundário é refrigerado pelo evaporador no equipamento de frio e é distribuído por um sistema de bombagem que permite passar pelo permutador fixo ao redor das cubas. A temperatura da água geralmente varia entre 4 a 13°C [34]. O depósito de inércia permite compensar e equilibrar o fornecimento nas horas de necessidades mais elevadas de refrigeração, possibilita a variação de caudal entre o circuito primário no chiller e o circuito secundário, a variação de volume do líquido devido à variação da temperatura protegendo as tubagens contra aumentos de pressão e ainda a regulação dos tempos de arranque e paragem dos compressores, evitando arranques e paragens sucessivas protegendo-os contra possíveis danos [33]–[35]. Sendo água, ou outra substância como referido acima que circula por toda a adega, comporta um baixo nível de risco caso ocorram fugas [29], [33].

Outra forma de refrigerar é por ar condicionado num local isolado, como uma câmara frigorífica por exemplo. O equipamento de refrigeração é o mesmo representado na figura 4.1. Nesta situação o ar de dentro da câmara é refrigerado passando diretamente pelo evaporador.

### 4.3.2 Os sistemas hidráulicos

O sistema apresentado anteriormente (Figura 4.3) é denominado de sistema hidráulico e tem uma grande importância do ponto de vista energético. Estes sistemas e os equipamentos devem ser projetados de acordo com as necessidades da instalação. Cada componente tem efeitos noutros componentes como por exemplo a escolha da temperatura da água afeta o caudal de volume ou a topologia da rede de tubagens que está interligado com a escolha das bombas. [34] É importante o enorme cuidado na seleção de serpentinas dos permutadores, do *layout* do sistema de distribuição, das dimensões das tubagens e das bombas. Pela transmissão de calor sabe-se que a velocidade da água que passa na serpentina do permutador é muito importante para uma boa eficiência. Em regime laminar a transmissão de calor é muito inferior do que em regime turbulento.

O sistema de distribuição e a dimensão das tubagens deve depender das características base quanto à localização e configuração das cubas, e necessidades de refrigeração, tendo em conta as perdas de carga distribuídas e localizadas [34], [36].

#### Circuitos de tubagens

Os circuitos de tubagens podem ser em série ou em paralelo sendo que existem várias configurações para cada uma delas. Os sistemas em série (figura 4.4) tem as vantagens de ter custos reduzidos nas tubagens e um consumo baixo de energia, no entanto os circuitos não podem ser controlados separadamente e a temperatura da água vai variando ao passar pelas cubas [34]. Os circuitos em paralelo (figura 4.5) são os mais usados porque permitem uma temperatura igual em todas as cubas, no entanto o caudal volúmico que passa pelas cubas pode não estar equilibrado devido à diferença de comprimentos das tubagens de fornecimento e retorno [34]. Para se reduzir o desequilíbrio do caudal podem-se aplicar várias técnicas de dimensionamento como aumentar a perda de carga para os circuitos mais próximos do chiller, diminuir a queda de pressão em toda a instalação (o caudal tende a equilibrar-se em todos os circuitos quando as perdas de carga tendem para zero), usar equipamentos de controlo de caudal como válvulas com grandes perdas de carga [34].

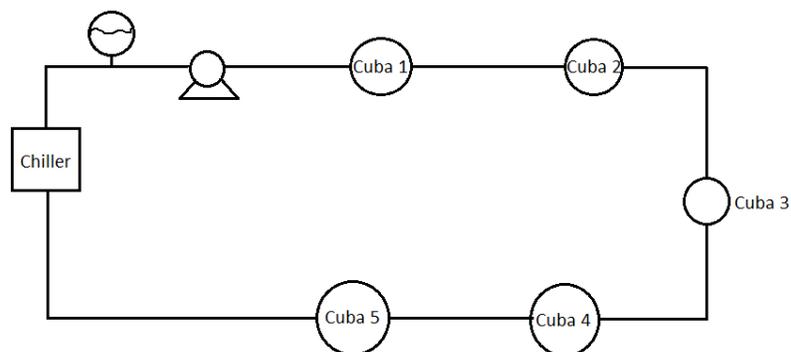


Figura 4.4 – Circuito de água em série

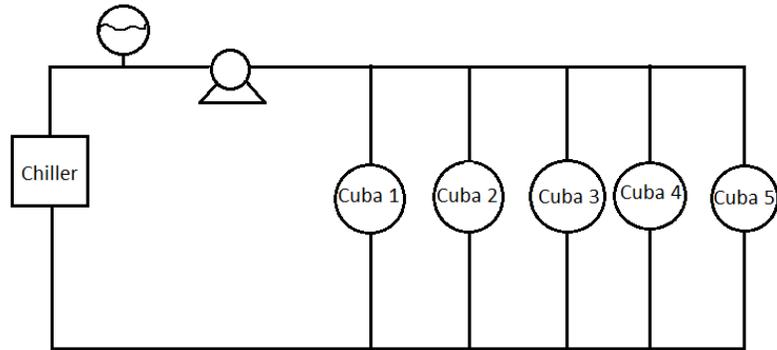


Figura 4.5 – Circuito de água em paralelo

## 4.4 Instalação de refrigeração na adega da Ervideira

A adega da Ervideira possui uma instalação muito semelhante aos sistemas discutidos anteriormente. As cubas que se encontram na área de produção são refrigeradas por *chiller*. Serve para a refrigeração de cubas de fermentação bem como de maturação.

### 4.4.1 *Chiller* instalado

O *chiller* arrefece a água que por sua vez é distribuída pelos permutadores que se encontram ao redor das cubas. As características do equipamento podem ser vistas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela de características do Chiller instalado

<b>Capacidade Frigorífica (kW)</b>	149
<b>Consumo elétrico (kW) (sem bomba circuladora)</b>	57,9
<b>Potência total do compressor (kW)</b>	53,9
<b>Potência total do ventilador (kW)</b>	3,10
<b>Potência da bomba circuladora (kW)</b>	2
<b>Capacidade Calorífica (kW)</b>	161,2
<b>Consumo elétrico (kW) (sem bomba circuladora)</b>	44,2
<b>Potência total do compressor (kW)</b>	40,7
<b>Potência total do ventilador (kW)</b>	3,50
<b>Potência da bomba circuladora (kW)</b>	2
<b>Fluido Frigorigéneo</b>	R410a
<b>Eficiência no ciclo de frio (kW/kW)</b>	2,58
<b>Eficiência no ciclo de aquecimento (kW/kW)</b>	3,65

O desempenho de um ciclo frigorífico é dado por um número adimensional que se denomina de *COP* (*Coefficient of Performance*). É dado pela relação entre o valor da potência térmica disponibilizada ao sistema (energia útil) pela potência de energia elétrica que é necessário para a execução do trabalho (usada pelo compressor) [32], [37], [38]. Na prática é o output energético do ciclo a dividir pelo input [32]. O desempenho de uma máquina frigorífica é dado pela equação (4.12) enquanto o desempenho de uma bomba de calor é dado pela equação (4.13):

$$COP_{MF} = \frac{Q_F}{W} = \frac{Q_F}{Q_Q - Q_F} \quad (4.12)$$

$$COP_{BC} = \frac{Q_Q}{W} = \frac{Q_Q}{Q_Q - Q_F} \quad (4.13)$$

Onde  $Q_F$  é o calor que entra no ciclo transferido do meio que se quer refrigerar,  $Q_Q$  é o calor transferido do ciclo para o meio quente e  $W$  é o trabalho que o sistema recebe para realizar a troca de energia da fonte fria para a fonte quente. Na prática o COP é dado por:

$$COP_{MF} = \frac{q_e}{w_c} \quad (4.14)$$

$$COP_{BC} = \frac{q_c}{w_c} \quad (4.15)$$

Onde  $q_e$  e  $q_c$  correspondem à troca de calor no evaporador e condensador respetivamente e  $w_c$  o trabalho desempenhado pelo compressor [32].

As eficiências nos ciclos de frio e de aquecimento, apresentados na tabela 4.1 não são mais do que a relação entre a potência frigorífica e a calorífica pelo consumo elétrico, respetivamente.

Pode-se definir o *EER* (Energy Efficiency Ratio) que é também uma medida de eficiência energética de equipamentos, sendo dada pelo output de energia frigorífica a dividir pelo input de energia elétrica dos compressores, ventiladores e bomba circuladora de água, incluindo também a perda de carga no evaporador:

$$EER = \frac{Q_F}{W_{in}} \quad (4.16)$$

O *chiller* é constituído por quatro compressores *scroll* sendo o controlo da capacidade de cada um assegurado por um microprocessador que, em função da temperatura de retorno da água, é acionada uma determinada posição da válvula deslizante determinando a capacidade frigorífica de cada. Inclui um evaporador, um condensador de troca de energia a ar e dois ventiladores axiais acionados por motor elétrico de oito polos, trifásicos. O sistema inclui ainda dois circuitos frigoríficos independentes separados internamente, permitindo o funcionamento em caso de avaria ou necessidade de paragem de um circuito.

É automatizado por controlo de temperaturas tendo a possibilidade de se controlar a temperatura a que a água sai do evaporador.

Nas Figura 4.6 e Figura 4.7 pode-se observar o *chiller* instalado na adega, na primeira observa-se duas tubagens, sendo que uma delas é de água gelada a sair do evaporador e outra, água que já foi usada na refrigeração, ligam o evaporador ao depósito pulmão. A grelha que se observa é o condensador, que troca energia com o ar exterior.



Figura 4.6 – Chiller instalado



*Figura 4.7 – Chiller instalado*

#### 4.4.2 Caracterização do sistema hidráulico

Como já foi referido, o chiller está associado a um sistema de distribuição que transporta água refrigerada. O chiller está ligado ao depósito pulmão que possui 10 tubagens ligadas, duas de entrada e saída de água refrigerada pelo chiller e a refrigerar, quatro estão ligadas às bombas que permitem a saída de água refrigerada para circular pela adega e as outras quatro de retorno da mesma. Cada circuito associado a cada bomba é em paralelo tal como se demonstra na figura 4.5. Está dividido em quatro sectores associados a quatro bombas. Na Tabela 4.2 observa-se algumas características relevantes para o sistema.

Na prática a bomba número 1 que direciona a água para o permutador não entra em funcionamento, este tem o inconveniente de arejar em demasia os mostos e de provocar o aumento da trituração das partes sólidas [2]. As bombas dois, três e quatro são bombas centrífugas de 2.2 kW à potência máxima para a frequência de 50 Hz sem variador de velocidade.

Tabela 4.2 - Dados úteis referentes a cada bomba e sector da adega

Nº da Bomba	Sector de utilização	Cubas associadas	Volume máximo das cubas [m³]	Volume a 90% de capacidade [m³]	Comprimento aproximado das tubagens (carga e descarga) [m]	Nº de válvulas de duas vias
1	Permutador	-	-	-	-	-
2	Sector 1, Fermentação Tintos	F4, F5, F6, F7, F8, F9; F1, F2, F3; G1, G2, G3; F10, F11, F12, F13, F14; 16 e 17	245	220,5	120 (60+60)	19
3	Sector 2, Fermentação Brancos e Maturação	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 34	95	85,5	100 (50+50)	13
4	Sector 3, Maturação	18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33	405	364,5	80 (40+40)	13

Na Figura 4.8 apresenta-se um esquema da planta atual da adega e os diferentes sectores associados a estas bombas.

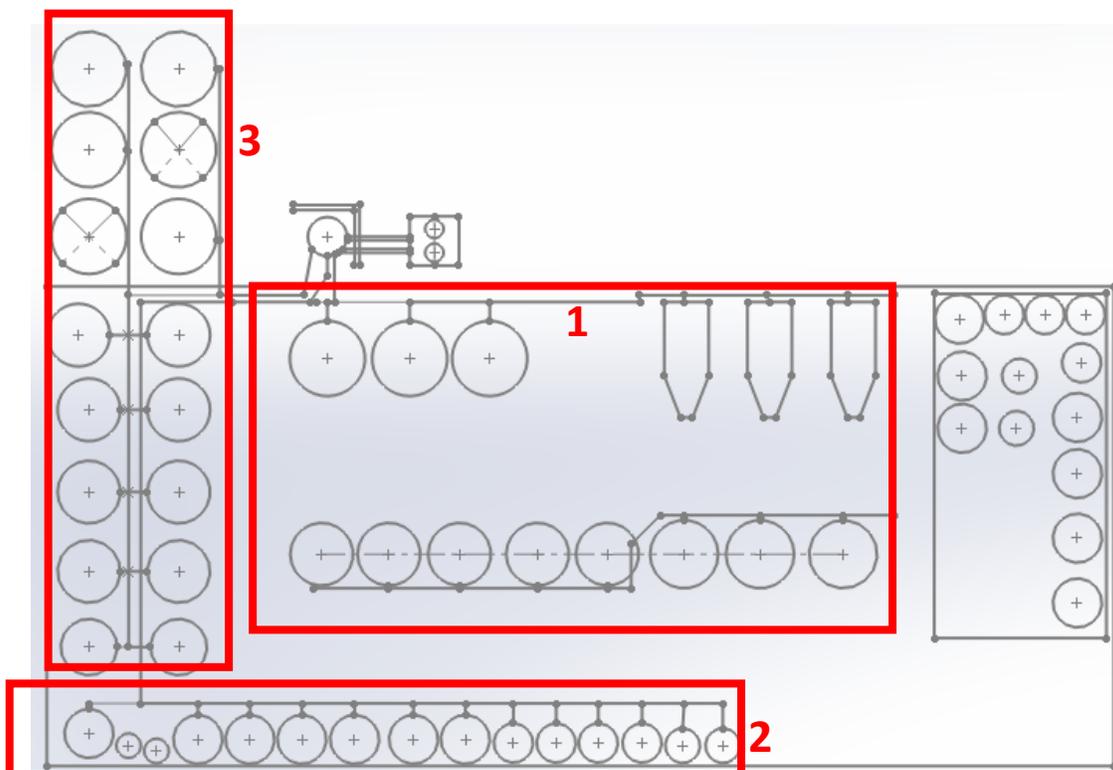


Figura 4.8 – Sectores de distribuição na adega da Ervideira

A Figura 4.9 representa o esquema do circuito primário e o depósito de inércia e respectivas bombas para os diferentes setores retratados na tabela 4.2.

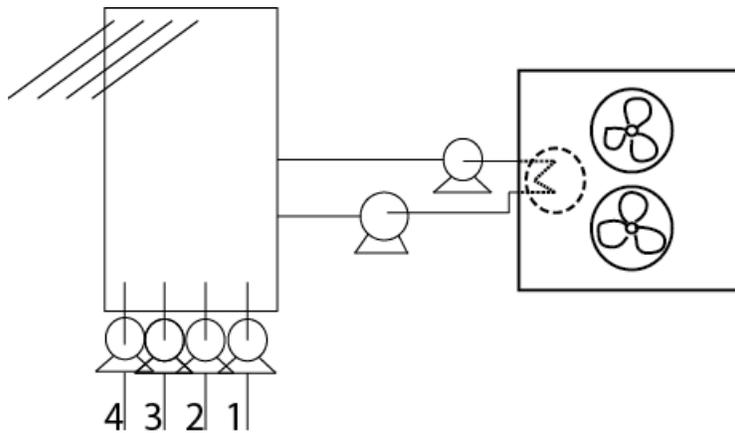


Figura 4.9 – Chiller, depósitos de inércia e denominação das bombas

As Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 são a representação dos setores e cubas associadas. De notar que são sistemas em paralelo, embora não esteja representado a conduta de retorno.

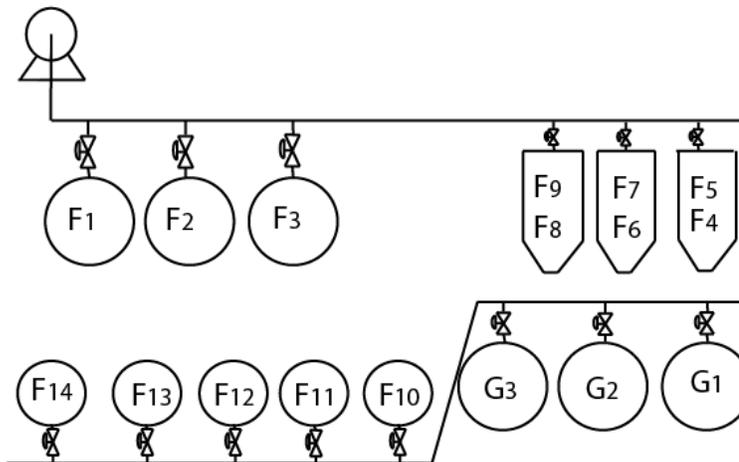


Figura 4.10 -Representação do setor 1 e respectivas cubas associadas

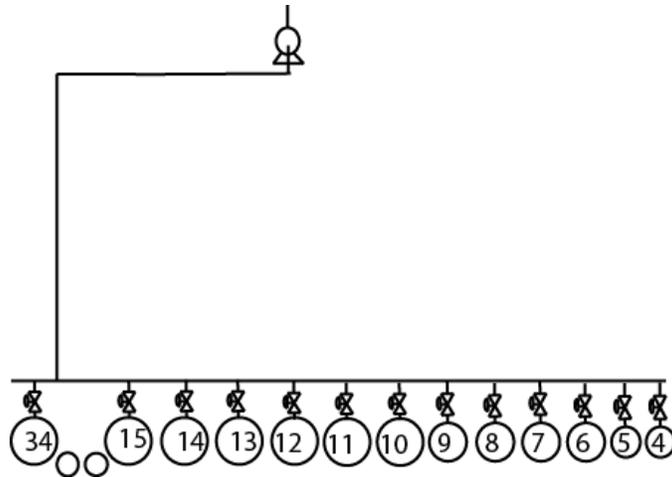


Figura 4.11 - Representação do setor 2 e respectivas cubas associadas

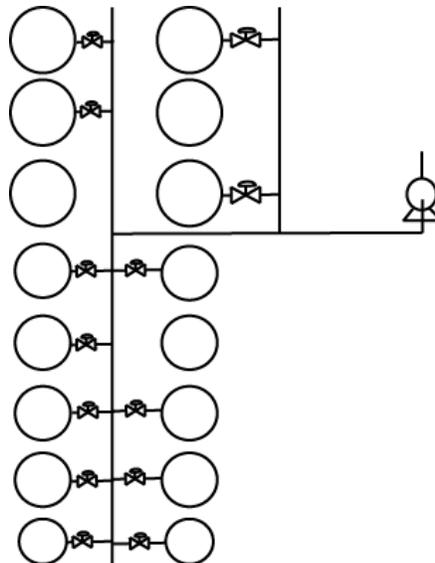


Figura 4.12 - Representação do setor 3 e respectivas cubas associadas

#### 4.4.3 Análise da topologia de distribuição implementada

Como já referido o sistema implementado é em paralelo o que tem a vantagem de a temperatura ser a mesma para todas as cubas, mas, no entanto, o caudal é diferente. A desvantagem da diferença do caudal pode ser atenuada no caso em que se verifica a abertura das válvulas em tempos diferentes uma vez que o controlo de temperaturas é independente. O sistema melhora a sua eficiência quanto menos válvulas estiverem abertas e piora quanto maior o número de válvulas abertas.

O sistema é constituído por três setores de bombagem para permitir independência entre os circuitos já que as necessidades de refrigeração diferem de setor para setor, diminuir o comprimento das tubagens reduzindo as perdas de carga e a necessidade de utilização de uma bomba de elevada potência.

A inoperação de alguns componentes como as bombas de distribuição ou fugas nas tubagens principais levam à impossibilidade de refrigeração das cubas arriscando a qualidade do produto final.

#### 4.4.4 Controlo de temperaturas nas cubas

O controlo de temperaturas é feito através de um sistema de gestão centralizado que permite definir as temperaturas de estabilização para cada cuba através de um *display*. Cada cuba de fermentação tem um termómetro digital que faz e envia a leitura para o sistema sendo possível ler a temperatura a cada momento e as válvulas que se encontram abertas e fechadas.

Quando a temperatura do mosto atinge a temperatura de estabilização é acionado um alarme. Após um grau Celcius acima desta temperatura o sistema de refrigeração é ligado. Como já discutido anteriormente o sistema de refrigeração consiste na condução de água a temperatura inferior à do mosto em redor da cuba. Cada uma possui uma válvula de duas vias de atuador elétrico de caudal fixo que abre quando a temperatura referida é atingida permitindo a circulação da água. A válvula torna a fechar quando o mosto atinge a temperatura de estabilização. No caso em que todas as válvulas se encontram fechadas as bombas desligam automaticamente, não permitindo que funcionem no “vazio”.

Nestas condições o intervalo de temperatura é de apenas 1 °C, sendo que a temperatura do mosto deverá oscilar nesta gama.

### 4.5 Sistema de ar condicionado na câmara frigorífica

A câmara frigorífica é refrigerada por ar condicionado, cujo equipamento de produção de frio é semelhante ao demonstrado em 4.2. Os condensadores encontram-se no exterior da adega em conjunto com o compressor. Os evaporadores encontram-se dentro da câmara permitindo uma refrigeração direta com o ar interior.

As características da instalação são as seguintes:

- Grupo compressor condensador Bitzer de 12 kW à potência máxima;
- 2 Evaporadores Centauro de três ventiladores com uma potência total de 2.88 kW;
- Fluido Frigorígeno: R22;
- Capacidade de refrigeração e evaporação: 28.5 kW;
- Capacidade de condensação: 39.1 kW;
- Caudal mássico: 610 kg/h.

## 4.6 Conclusões e discussão sobre o sistema

Relativamente ao *Chiller* um aumento da temperatura de retorno da água entre 9 e 11 °C em vez de um aumento entre 5 e 7 °C reduz a quantidade de água a circular e a potência das bombas aumentando a sua eficiência [34].

Os permutadores das cubas têm um baixo nível de transmissão de calor, cerca de 10 a 30 W/(m<sup>2</sup>.K), quando comparados com permutadores tubulares cujos valores variam entre 400 a 700 W/(m<sup>2</sup>.K), o que implica gastos energéticos muito superiores [29]. Estão localizadas na parte superior da cuba para permitir um melhor aproveitamento das correntes de convecção no seu interior uma vez que o mosto está estático. No caso em que a cuba não está atestada a pelo menos 80% poderão verificar-se perdas de eficiência na transmissão de calor já que o mosto pode não ter a altura suficiente para contactar com a superfície total do permutador.

O sistema hidráulico face ao sistema por ar condicionado na câmara de refrigeração tem a vantagem de permitir um controlo independente da temperatura das cubas, mas a sua eficiência é reduzida face às perdas de carga e energéticas nas tubagens e nas paredes dos reservatórios.

# 5 Balanço de Energia

## 5.1 Introdução

Em capítulos anteriores foi referido a localização e as condições estruturais da Adega da Ervideira. Face a uma análise qualitativa dessas condições verifica-se que as condições climáticas da região podem ter um forte impacto na produção do vinho. Estando aberta ao exterior a temperatura no interior da adega segue aproximadamente o mesmo perfil climático da região.

No capítulo da fermentação ficou claro que existe a necessidade de fazer uso de equipamentos de refrigeração para tentar manter a temperatura do mosto o mais estável possível. Sendo que este trabalho visa aplicar medidas de melhoria no sentido de diminuir o uso dos referidos equipamentos e baixar desta forma os gastos com energia elétrica, é importante fazer um balanço de energia e quantificar as necessidades em termos de potência requeridas.

É compreensível que existirá trocas de calor entre o meio ambiente e os reservatórios de maturação e fermentação. Essas trocas de energia poderão fazer subir a temperatura do mosto nas horas em que a temperatura exterior é alta bem como diminuir quando é mais baixa.

A análise dessas trocas de calor permitirá entender o nível de importância que terão na produção do vinho, no que diz respeito à alteração das suas características e no uso dos equipamentos de refrigeração.

Este estudo compreende a análise da transmissão de calor do meio ambiente pelas paredes dos reservatórios por efeitos de convecção, condução e radiação.

Neste capítulo irá debater-se este assunto. A primeira parte consiste em dar a entender a importância que a transmissão de calor poderá vir a ter no aumento da temperatura do sistema e observa-se os dados que foram usados. Posteriormente é apresentada uma estrutura de cálculos na qual se apresenta a metodologia de cálculos para as perdas por convecção, condução e radiação. O subcapítulo da convecção divide-se em cinco secções, cálculos dos coeficientes interiores para as situações de temperatura exterior mais alta que a temperatura de fermentação e temperatura exterior inferior, após o qual é apresentado os cálculos para os coeficientes de convecção no exterior para as duas situações anteriores. Descreve-se a metodologia adotada no cálculo da transmissão de calor por efeitos de condução e por fim a radiação. O último subcapítulo apresenta os resultados para os cálculos anteriores.

## 5.2 Abordagem teórica ao balanço de energia nas cubas de fermentação

### 5.2.1 Análise de dados climáticos

Os cálculos realizados tiveram como suporte os dados do perfil climático para a região de Évora (INETI, 2006) relativamente à temperatura e radiação.

Observe-se pelo gráfico da Figura 5.1 o perfil de temperaturas entre os dias 2 e 5 de setembro. Embora este perfil não seja sinusoidal, geralmente faz-se uma aproximação com um erro associado de dois ramos sinusoides ou de uma só senoide.



Figura 5.1 - Gráfico do perfil de temperaturas entre os dias 2 e 5 de setembro em Évora

Com base nestes dados foi possível estimar um perfil sinusoidal para a temperatura exterior tendo como referência as seguintes temperaturas médias para os meses de Agosto, Setembro e Outubro.

- A média da temperatura mais alta em Évora é de 29,7 °C.
- A média da temperatura mais baixa em Évora é de 15,55 °C.

Este perfil é dado por:

$$T_{\infty} = 23 + 7 \times \text{sen}(0.2618 \times t) \quad (5.17)$$

Face a este perfil sinusoidal da temperatura é possível calcular a resposta térmica de um reservatório de fermentação através da seguinte expressão [39]:

$$T = T_1 + \frac{\Delta T}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2}} \times \text{sen}(\omega \cdot t + \Psi) + \left[ T_0 - T_1 - \frac{\Delta T}{\sqrt{1 + (\omega \cdot \tau)^2}} \cdot \text{sen}(\Psi) \right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.18)$$

Solução forçada
Solução livre amortecida

Onde  $\tau$  é chamada *constante de tempo* do sistema (porque tem as dimensões de tempo) e é dada por [40]:

$$\tau = \frac{\rho \cdot C \cdot V}{h \cdot A} \quad (5.19)$$

Sendo:

$\rho$  – Massa volúmica do sistema a analisar

$C$  – Calor específico do sistema

$V$  – Volume do sistema

$h$  – coeficiente de convecção

$A$  – Área exposta à temperatura ambiente

$T$  – Temperatura

$T_1$  – Valor médio da temperatura ambiente

$T_0$  – Temperatura inicial do corpo (em  $t = 0$ )

$\Delta T$  – Amplitude de oscilação da temperatura ambiente

$\omega$  – Frequência da excitação térmica

$\varphi, \Psi$  – Ângulos de fase da excitação e da resposta

A frequência da excitação térmica é dada por  $\omega = \frac{2\pi \text{ rad}}{24 \text{ h}} = 0,2618 \text{ rad/h}$ .

Para uma cuba com as dimensões de 2,9 m de altura, diâmetro de 2,546 m e volume de  $15 \text{ m}^3$ . Sabendo que a massa volúmica do mosto é em média  $1090 \text{ kg/m}^3$  (dados obtidos junto da adega da Ervideira), que o calor específico é de  $3,66 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  [41] e assumindo um coeficiente de convecção médio de  $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  temos:

$$\tau = 164589 \text{ s} = 45,72 \text{ h}$$

$$\text{tg}(\Psi) = -11,97 \Leftrightarrow \Psi = -1,49 \quad (5.20)$$

Então a resposta do sistema fica:

$$\Leftrightarrow T(t) = 23 + 0,583 \times \text{sen}(0,2618 \times t - 1,49) + 0,58 \times e^{-\frac{t}{45,72}} \quad (5.21)$$

Na Figura 5.2 pode-se observar o gráfico onde é representada a variação da resposta térmica de uma cuba de fermentação e o perfil sinusoidal da temperatura.

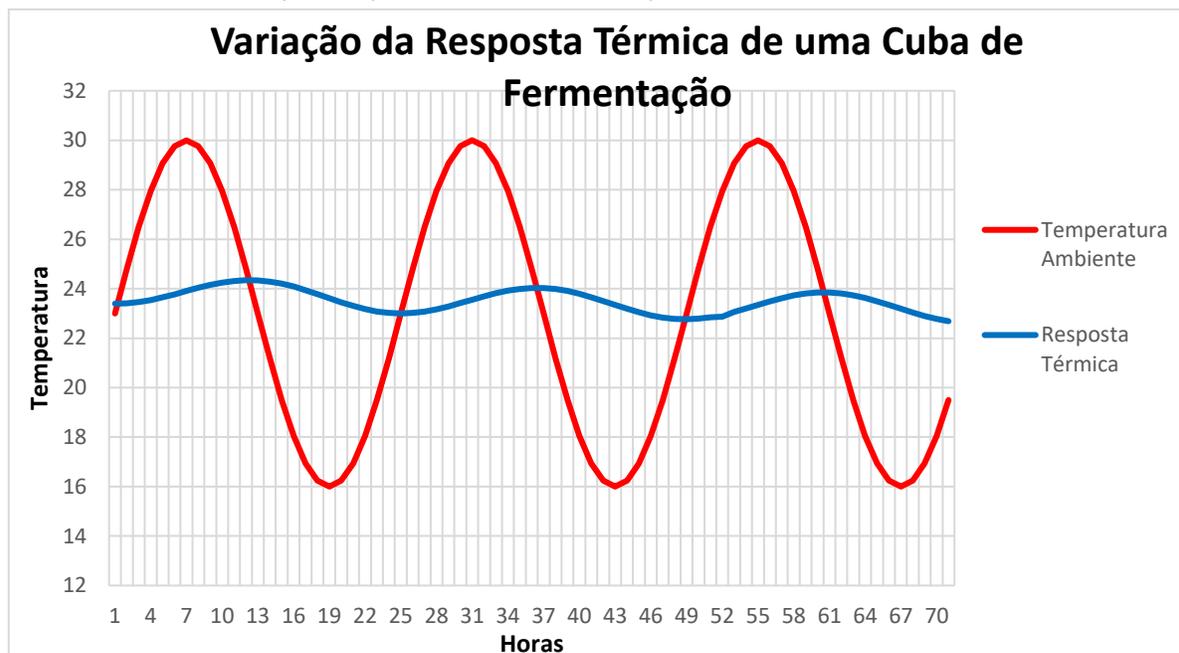


Figura 5.2 – Gráfico da variação da resposta térmica de uma cuba de refrigeração

Pelo gráfico pode-se observar que a resposta térmica é atenuada em resultado da quantidade de massa no interior da cuba tendo apenas  $1,2^{\circ}\text{C}$  de amplitude térmica e a sua temperatura média é de  $23,5^{\circ}\text{C}$ .

Observe-se ainda que a temperatura máxima do sistema ocorre 6 horas depois da temperatura máxima ambiente.

Pode-se a partir desta análise da resposta térmica compreender a importância que a temperatura exterior tem no aumento da temperatura do mosto. Para os mostos tintos a importância das condições exteriores será inferior do que para os brancos uma vez que a temperatura ideal para os primeiros é de  $23$  a  $24^{\circ}\text{C}$  e  $15^{\circ}\text{C}$  para os segundos.

## 5.2.2 Características dos reservatórios de fermentação na Adega da Ervideira

Existe três configurações diferentes de cubas na Adega da Ervideira, que se apresentam nas Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5.

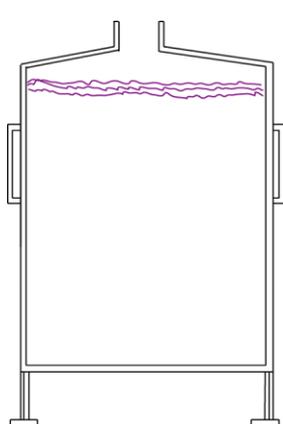


Figura 5.3 - Esquema cuba vertical

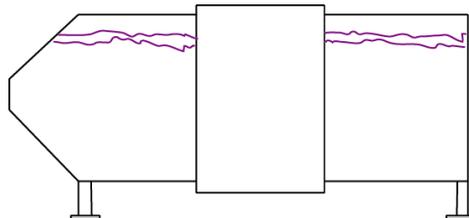


Figura 5.4 – Esquema de Vinificadores de disposição horizontal

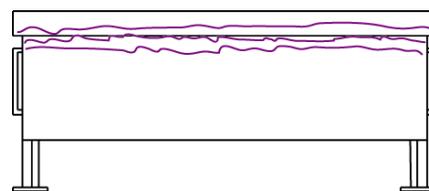


Figura 5.5 – Esquema de Lagares aberto ao exterior

As Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 são fotografias das diferentes cubas na Adega da Ervideira.



Figura 5.6 – Fotografia de cuba vertical



Figura 5.8 - Fotografia de Vinificadores de disposição horizontal



Figura 5.7 – Fotografia de Lagar

Nestas fotografias pode-se verificar o modelo de construção das cubas. A parede das cubas verticais e dos lagares é simples sem isolamento, no entanto possuem uma camisa de refrigeração por onde passa água. Por conseguinte toda essa superfície possui uma parede exterior que delimita a passagem da água ao circular pela camisa. Já os vinificadores tem isolamento composto por lâ de rocha a cobrir a camisa de refrigeração. Pode-se verificar também que há trocas de calor pelo fundo uma vez que as cubas estão assentes no chão por pés e têm contacto com o ar exterior.

As características dimensionais de todos os reservatórios da adega estão representadas no quadro da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características dimensionais dos reservatórios de fermentação da adega da Ervideira

Volume [m <sup>3</sup> ]	Designação Atribuída	Quantidade de cubas existentes	Diâmetro [m]	Altura do mosto a 80% de enchimento [m]	Altura da camisa [m]	Espessura da parede simples [mm]	Espessura da parede da camisa [mm]
25 (Cuba Vertical)	25cv	3	2,765	3,33	0,98	2	1,5
15 (Cuba Vertical)	15cv	5	2,546	2,357	0,98	2	1,5
10 (Cuba Vertical)	10cv	5	1,99	2,57	0,98	2	1,5
5 (Cuba Vertical)	5cv	4	1,59	2,014	0,98	2	1,5
2,5 (Cuba Vertical)	2,5cv	2	1,41	1,280	0,69	2	1,5
10 (Lagares)	10l	3	3,05	1,095	0,98	2	1,5
10 (Vinificadores)	10v	5	1,6	1,203	1	3	-

### 5.2.3 Estrutura de cálculos

Para calcular o fluxo de calor nas paredes foi necessário em primeiro lugar calcular os coeficientes de convecção no interior e exterior das cubas. Como tal foi assumido temperaturas na parede do lado exterior e interior muito semelhantes à temperatura do mosto no seu interior. A temperatura de fermentação ideal difere dos vinhos brancos para os vinhos tintos e por esta razão os coeficientes de convecção são diferentes devido à diferença na temperatura da parede. Após os cálculos dos coeficientes de convecção em diferentes localizações foi aplicada a lei de Fourier para determinar o fluxo de calor pela parede. Posteriormente aplicando a mesma lei foi possível determinar com mais exatidão as temperaturas na parede interior e exterior fazendo uma sucessão de iteradas. Tendo as temperaturas exatas nas paredes determinou-se novamente os coeficientes de convecção e o fluxo de calor.

Os cálculos foram realizados para temperaturas médias no exterior constantes como se irá mostrar mais à frente.

Para que se possa compreender melhor a abordagem ao problema foi desenhado um esquema que se mostra na Figura 5.9.

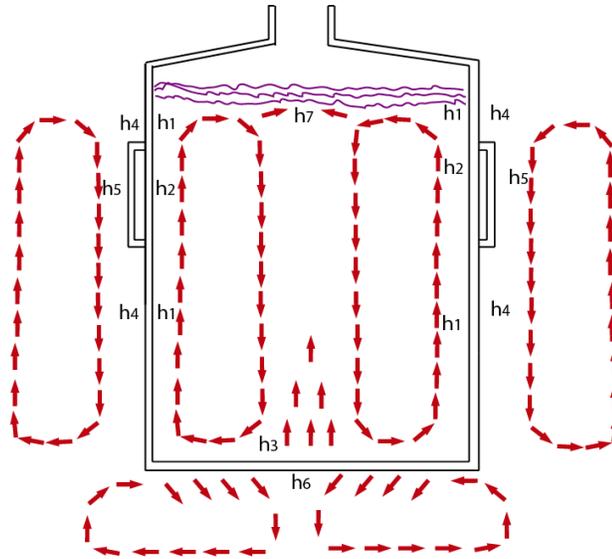


Figura 5.9 - - Esquema de uma cuba exemplar com correntes de convecção

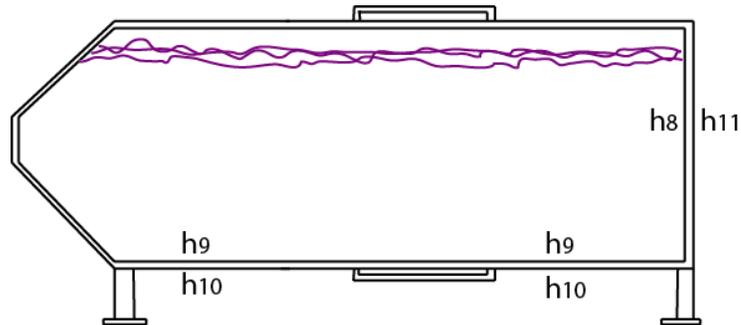


Figura 5.10 – Esquema de um vinificador e representação dos coeficientes de convecção

Note-se que os “h’s” representados nestas figuras (Figura 5.9 e Figura 5.10) são os coeficientes de convecção em diferentes localizações das cubas que foi necessário calcular pela variação das condições envolventes. Na figura 9 as setas representam as correntes de convecção para o caso em que a temperatura do mosto no interior é inferior à temperatura ambiente exterior. A abordagem de cálculos para os lagares foi a mesma que para as cubas verticais. Apenas os vinificadores de disposição horizontal tiveram uma abordagem diferente.

Na Tabela 5.2 está descrito as designações utilizadas ao longo do texto para descrever as localizações a que cada coeficiente de convecção diz respeito.

Tabela 5.2 – Tabela de designações dos coeficientes de convecção e localizações nos reservatórios

$h_1$	Parede lateral simples (lado interior da cuba vertical ou lagar)
$h_2$	Parede da camisa (lado interior da cuba vertical ou lagar)
$h_3$	Fundo da cuba (lado interior da cuba vertical ou lagar)
$h_4$	Parede lateral simples (lado exterior da cuba vertical ou lagar)
$h_5$	Parede da camisa (lado exterior da cuba vertical ou lagar)
$h_6$	Fundo da cuba (lado exterior da cuba vertical ou lagar)
$h_7$	Topo da cuba (cuba vertical ou lagar)
$h_8$	Fundo da cuba (lado interior do vinificador)
$h_9$	Parede lateral cilíndrica (lado interior do vinificador)
$h_{10}$	Parede lateral cilíndrica (lado exterior do vinificador)
$h_{11}$	Fundo plano vertical (lado exterior do vinificador)

### 5.2.3.1 Cálculo dos coeficientes de convecção no interior dos reservatórios na situação de temperatura exterior mais alta que a de fermentação

Para o cálculo dos coeficientes de convecção no interior da cuba considerou-se convecção natural. Verificou-se que para todo o tipo de cubas existentes na adega se poderia considerar para efeitos de cálculo placas planas. O critério adotado foi o seguinte [42]:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_x^{\frac{1}{4}}} \quad (5.22)$$

Onde D é o diâmetro e L o comprimento medido na vertical e  $Gr_L$  é um parâmetro adimensional designado por número de Grashof dado por [43]:

$$Gr_x = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times x^3}{\nu^3} \quad (5.23)$$

Em que g é a constante gravitacional,  $\beta$  o coeficiente volumétrico de expansão que pode ser encontrado em tabelas de fluidos,  $T_s$  a temperatura na parede ou na superfície e  $T_\infty$  é a temperatura ambiente e  $\nu$  é a viscosidade cinemática dada por  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ .

Dado que aproximadamente 80% do mosto é constituído por água considerou-se os parâmetros  $\beta$  e  $\nu$  como sendo os da água.

Os coeficientes médios de convecção foram encontrados pela seguinte expressão:

$$\overline{Nu}_f = C \times (Gr_f Pr_f)^m \quad (5.24)$$

Onde  $Gr_f Pr_f$  é o chamado número de Rayleigh que é o produto do número de Grashof pelo número de Prandtl [42] avaliados à temperatura de filme.

A temperatura de filme para os mostos brancos é de 15,56 °C e para os mostos tintos é de 23,25 °C.

As propriedades utilizadas para estas temperaturas são respetivamente [42]:

	<b>k</b>	$\frac{g \times \beta \times \rho^2 \times C_p}{\mu \times k}$
	0,595	10800000000
e	<b>k</b>	$\frac{g \times \beta \times \rho^2 \times C_p}{\mu \times k}$
	0,60785	16332014388

Para a água o número de Rayleigh pode ser dado por [42]:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \times \beta \times \rho^2 \times C_p}{\mu \times k} \times \Delta T \times x^3 \quad (5.25)$$

Sendo L a altura da cuba e  $\Delta T$  a diferença térmica entre a parede interior e o interior da cuba.

Tendo o número de Rayleigh o número de Nusselt é calculado consultando a Tabela 5.3 para determinar as constantes C e m.

Tabela 5.3 – Tabela para determinar as constantes a usar com a equação do número de Nusselt [42]

Geometria	$Gr_f \cdot Pr_f$	C	m
Planos e cilindros verticais	$10^4 - 10^9$	0,59	$\frac{1}{4}$
	$10^9 - 10^{13}$	0,1	$\frac{1}{3}$
Cilindros horizontais	$10^4 - 10^9$	0,53	$\frac{1}{4}$
	$10^9 - 10^{12}$	0,13	$\frac{1}{3}$
Superfície superior de uma placa aquecida ou superfície inferior de placa resfriada	$2 \times 10^4 - 8 \times 10^6$	0,54	$\frac{1}{4}$
	$8 \times 10^6 - 10^{11}$	0,15	$\frac{1}{3}$
Superfície inferior de uma placa aquecida ou superfície superior de placa resfriada	$10^5 - 10^{11}$	0,27	$\frac{1}{4}$

Finalmente, tendo o número de Nusselt, os coeficientes de convecção ( $h_1, h_2$  e  $h_3$ ) podem ser determinados pela expressão:

$$\overline{Nu}_f = \frac{h \times x}{k} \Leftrightarrow h = \frac{\overline{Nu}_f \times k}{x} \quad (5.26)$$

A diferença nos cálculos dos  $h$ 's é a dimensão característica que se pode verificar na Tabela 5.5 para as diferentes localizações no interior da cuba.

Na Tabela 5.4 pode-se ver o conjunto de dados utilizados no cálculo dos coeficientes de convecção para o interior utilizando no caso dos mostos tintos uma temperatura ambiente constante de 28,5 °C e para o caso dos mostos brancos e rosados uma temperatura de 26 °C:

Tabela 5.4 – Resumo dos dados utilizados no cálculo dos coeficientes de convecção

Dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção interiores												
Designação das Cubas	Temperatura da parede do lado interior da cuba [°C]						Temperatura do mosto pretendida [°C]		Propriedades do Fluido interior			
	<i>Mb&amp;r</i>			<i>Mt</i>			<i>Mb&amp;r</i>	<i>Mt</i>	<i>Mb&amp;r</i>		<i>Mt</i>	
	<i>Ps</i>	<i>Fc</i>	<i>Pc</i>	<i>Ps</i>	<i>Fc</i>	<i>Pc</i>	-	-	k [W/m °C]	$\vartheta$	k [W/m °C]	$\vartheta$
25cv	-	-	-	23,45	23,45	23,6	-	23	-	-	0,60785	1,63 × 10 <sup>10</sup>
15cv	-	-	-	23,45	23,45	23,6	-	23	-	-	0,60785	1,63 × 10 <sup>10</sup>
10cv	16,273	16,273	16,5	-	-	-	15	-	0,595	1,08 × 10 <sup>10</sup>	-	-
5cv	16,273	16,273	16,5	-	-	-	15	-	0,595	1,08 × 10 <sup>10</sup>	-	-
2,5cv	16,273	16,273	16,5	23,45	23,45	23,6	15	23	0,595	1,08 × 10 <sup>10</sup>	0,60785	1,63 × 10 <sup>10</sup>
10l	-	-	-	23,45	23,45	23,6	-	23	-	-	0,60785	1,63 × 10 <sup>10</sup>
10v	-	-	-	23,1649	23,1649	-	-	23	-	-	0,60785	1,63 × 10 <sup>10</sup>

Tabela 5.5 – Dimensões características usadas no cálculo dos coeficientes de convecção

Designação das cubas	Dados utilizados		
	Dimensão Característica ( $x$ )		
	$P_s$	$F_c (0,9 \times D)$	$P_c$
25cv	2,351	2,4885	0,98
15cv	1,377	2,2914	0,98
10cv	1,592	1,791	0,98
5cv	1,035	1,431	0,98
2,5cv	0,591	1,269	0,69
10l	0,115	2,745	0,98
10v	1,203	1,203	1

#### Nomenclatura para as Tabela 5.4 e Tabela 5.5

$P_s$  – Parede simples;  $F_c$  – Fundo da cuba;  $P_c$  – Parede da camisa;  
 $Mb\&r$  – Mostos Brancos e Rosés;  $Mt$  – Mostos Tintos;  $k$  – Condutividade Térmica;  
 $x$  – Dimensão Característica;  $\vartheta = \frac{g \times \beta \times \rho^2 \times c_p}{\mu \times k}$

Note-se que como já referido anteriormente, as temperaturas de fermentação ideais diferem dos vinhos brancos e rosés para os vinhos tintos. Resulta na diferença das temperaturas das paredes interiores que naturalmente faz variar os coeficientes de convecção de uma situação para a outra. Determinadas cubas são usadas para fermentação de mostos brancos e rosés devido às suas características e outras para fermentação apenas de mostos tintos. Essa diferenciação pode ser vista na Tabela 5.1, por conseguinte algumas células encontram-se vazias.

Há também que notar que foram consideradas temperaturas médias das paredes constantes resultando em coeficientes médios de convecção constantes ao longo do perfil de temperatura. Os erros poderão ir até 17 % pelo facto de se ter calculado desta forma. No caso de se querer diminuir o erro a alternativa seria calcular as temperaturas nas paredes interiores para cada intervalo de tempo e consoante o perfil climático.

#### 5.2.3.2 Cálculo dos coeficientes de convecção no interior dos reservatórios na situação de temperatura exterior abaixo da de fermentação

O facto da Adega da Ervideira ser aberta ao exterior também permite, para além da rápida dispersão do dióxido de carbono libertado na fermentação a dissipação de calor quando a temperatura exterior é inferior à temperatura a que o mosto deve ser fermentado. Esta situação deve ser analisada para que se possa fazer um balanço energético e tirar conclusões sobre os benefícios e perdas do estado atual da adega.

A análise dos dados climáticos para a região de Évora permitiu verificar que se pode desprezar a dissipação de calor nos reservatórios de fermentação de mostos brancos e rosés uma vez que as temperaturas mínimas nos meses de agosto, setembro e outubro não descem muito abaixo da temperatura a que o mosto se deve manter sendo que a alteração na temperatura não é significativa. No entanto para os mostos tintos esta análise deve ser feita, pois sabe-se que as temperaturas baixas durante a noite permitem a dissipação de parte do calor.

Os cálculos para esta situação seguiram a mesma estrutura, que para o caso dos coeficientes de convecção no interior quando a temperatura exterior é superior à de fermentação.

Em resumo, começa por se assumir temperaturas de parede muito próximas da temperatura interior. Consulta-se as propriedades para a temperatura média de filme. Tendo estes dados pode-se calcular o número de Rayleigh. Após isto pode-se consultar na tabela das constantes qual o valor de “C” e de “m” que se adequam ao problema. Calcula-se o número de Nusselt que nos permite retirar o coeficiente de convecção.

Na Tabela 5.6 pode-se ver os dados utilizados para cálculo dos coeficientes de convecção.

*Tabela 5.6 - Dados utilizados no cálculo dos coeficientes de convecção interior na dissipação de calor*

Dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção interiores						
	Temperatura da parede interior [°C]			Temperatura pretendida do mosto	Propriedades do Fluido interior	
	<i>Mt</i>			<i>Mt</i>	<i>Mt</i>	
Designação das Cubas	<i>Ps</i>	<i>Fc</i>	<i>Pc</i>	-	k [W/m °C]	$\vartheta$
25cv	22,508	22,508	22,508	23	0,6092	$1,69 \times 10^{10}$
15cv	22,508	22,508	22,508	23	0,6092	$1,69 \times 10^{10}$
10cv	-	-	-	-	-	-
5cv	-	-	-	-	-	-
2,5cv	22,508	22,508	22,508	23	0,6092	$1,69 \times 10^{10}$
10l	22,508	22,508	22,508	23	0,6092	$1,69 \times 10^{10}$
10v	22,83	22,83	-	23	0,6092	$1,69 \times 10^{10}$

### 5.2.3.3 Cálculo dos coeficientes de convecção no exterior dos reservatórios na situação de temperatura exterior mais alta que a de fermentação

Para estes cálculos foi considerado convecção forçada pelas paredes laterais dos reservatórios nas cubas verticais e lagares tanto para parede simples como para a parede da camisa, no entanto para o fundo e para o topo foi considerada convecção natural. Para os vinificadores de disposição horizontal foi considerada convecção natural tanto para a parede lateral como para o fundo.

No que diz respeito ao cálculo dos coeficientes de convecção para a parede lateral simples, foi considerado uma determinada velocidade do vento média para a região, com base nos arquivos de dados desde o ano de 2007 até ao presente do site de meteorologia “Windguru”.

Consultou-se as tabelas das propriedades dos fluidos para se encontrar as propriedades do ar a uma temperatura média. Calculou-se o número de Reynolds pela equação:

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (5.27)$$

Usando essas propriedades, a fim de se determinar a natureza do escoamento e poder aplicar a equação de determinação do número de Nusselt que melhor se adequa à situação. A equação usada foi a seguinte:

$$Nu_d = \frac{hL}{k_f} = 0,3 + \frac{0,62 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (5.28)$$

Que pode ser aplicada para valores de Re entre  $10^2$  e  $10^7$ .

Tendo isto, facilmente pela equação seguinte se calcula os coeficientes de convecção ( $h_4$  e  $h_5$ ):

$$Nu_d = \frac{hL}{k_f} \Leftrightarrow h = \frac{Nu_d \times k_f}{L} \quad (5.29)$$

Sendo  $Re$  e  $Pr$  respetivamente o número de Reynolds e o número de Prandtl encontrados anteriormente e  $k_f$  a condutividade térmica do ar.

De acordo com o Livro do Holman [42], os coeficientes médios de convecção natural para uma placa horizontal podem ser calculados através da fórmula:

$$Nu_f = C \times (Ra)^m \quad (5.30)$$

Para o fundo plano foi calculado o número de *Rayleigh* para as propriedades encontradas anteriormente.

Consultou-se na Tabela 5.3 os dados das constantes “C” e “m”. Na situação em questão, os dados são os da superfície inferior de placa resfriada.

Tendo o número de Nusselt, a dimensão característica, que no caso de uma placa plana circular é  $(0,9 \times \text{Diâmetro})$  [43] e a condutividade térmica (k) calcula-se o coeficiente de convecção ( $h_6$ ).

O cálculo do  $h_7$  referente ao topo dos reservatórios assume convecção natural e calcula-se pelo número de Rayleigh usando as propriedades do ar e a dimensão característica para placa plana circular e usando a expressão do número de Nusselt com as constantes “C” e “m” para superfície superior de placa plana resfriada.

No caso dos vinificadores de disposição horizontal, os cálculos realizados seguiram a mesma estrutura para convecção natural sendo que as constantes “C” e “m” consultadas na Tabela 5.3 são para a situação de cilindros horizontais. Portanto o  $h_{10}$  é calculado desta forma. Já o  $h_{11}$  é calculado usando as constantes “C” e “m” para placa plana vertical e seguindo a mesma metodologia.

Na Tabela 5.7 e Tabela 5.8 é mostrado os dados utilizados para os cálculos dos coeficientes ( $h_4, h_5, h_6, h_7, h_{10}$  e  $h_{11}$ ):

Tabela 5.7 – Tabela de dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção no exterior

	Dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção no exterior					
	Temperatura da parede do lado exterior da cuba [°C]		Velocidade do escoamento [m/s]		Temperatura do mosto pretendida [°C]	
	<i>Mb&amp;r</i>	<i>Mt</i>	<i>Mb&amp;r</i>	<i>Mt</i>	<i>Mb&amp;r</i>	<i>Mt</i>
Designação das Cubas	<i>Fc</i>	<i>Fc</i>				
25cv	-	23,47	2,9	2,9	-	23
15cv	-	23,47	2,9	2,9	-	23
10cv	16,294	-	2,9	2,9	15	-
5cv	16,294	-	2,9	2,9	15	-
2,5cv	16,294	23,47	2,9	2,9	15	23
10l	-	23,47	2,9	2,9	-	23
10v	-	23,17	-	-	-	23

Tabela 5.8 – Propriedades do ar utilizadas

	Propriedades do ar utilizadas				
	$\rho$	$\mu$	$\nu$	$k$	$Pr$
<b><i>Mt</i></b> ( $T_{ar}=27^{\circ}C$ )	1,1774	0,000018462	0,00001569	0,02624	0,708

#### 5.2.3.4 Cálculo dos coeficientes de convecção no exterior dos reservatórios na situação de temperatura exterior inferior à de fermentação

Na situação em que a temperatura ambiente exterior é inferior, que com base nos dados do perfil climático naturalmente se dá à noite, como já referido anteriormente é necessário fazer o balanço de energia e por conseguinte os coeficientes de convecção no exterior devem ser calculados. Estes cálculos seguem a mesma metodologia para a situação em que a temperatura é superior. Note-se que serão apenas realizados para os reservatórios que fermentam mostos tintos. Na tabela seguinte é mostrado os dados que foram utilizados nestes cálculos:

Tabela 5.9 – Dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção no exterior na dissipação de calor

	Dados utilizados nos cálculos dos coeficientes de convecção no exterior		
	Temperatura da parede do lado exterior da cuba [ $^{\circ}C$ ]	Velocidade do escoamento [m/s]	Temperatura do mosto pretendida [ $^{\circ}C$ ]
	<b><i>Mt</i></b>	<b><i>Mt</i></b>	<b><i>Mt</i></b>
Designação das Cubas	<b><i>Fc</i></b>		
<b>25cv</b>	22,5	2,22	23
<b>15cv</b>	22,5	2,22	23
<b>2,5cv</b>	22,5	2,22	23
<b>10l</b>	22,5	2,22	23
<b>10v</b>	22,85	2,22	23

Tabela 5.10 – Propriedades do ar utilizadas

	Propriedades do ar utilizadas				
	$\rho$	$\mu$	$\nu$	$k$	$Pr$
<b><i>Mb&amp;r</i></b> ( $T_{ar}=19^{\circ}C$ )	1,2151	0,000018066	0,0000149892	0,025605	0,71024

## 5.2.4 Cálculos do fluxo de calor por condução

A transmissão de calor final é dada pelo fluxo de calor que atravessa as paredes dos reservatórios considerando os coeficientes de convecção no exterior e no interior.

Este fluxo pode ser dado pela Lei de Fourier, cuja expressão é:

$$\frac{q}{A} = -k \times \frac{\delta T}{\delta x} \quad (5.31)$$

Onde  $\frac{q}{A}$  é o calor por unidade de área que atravessa um determinado material,  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre o exterior e o interior do reservatório,  $\Delta x$  a espessura do material por onde é transmitido o calor e  $k$  a condutividade térmica que para o aço AISI 316 (material dos reservatórios) é  $16W/m.K$  [44].

Como exemplo demonstra-se de seguida o modelo utilizado na Figura 5.11.

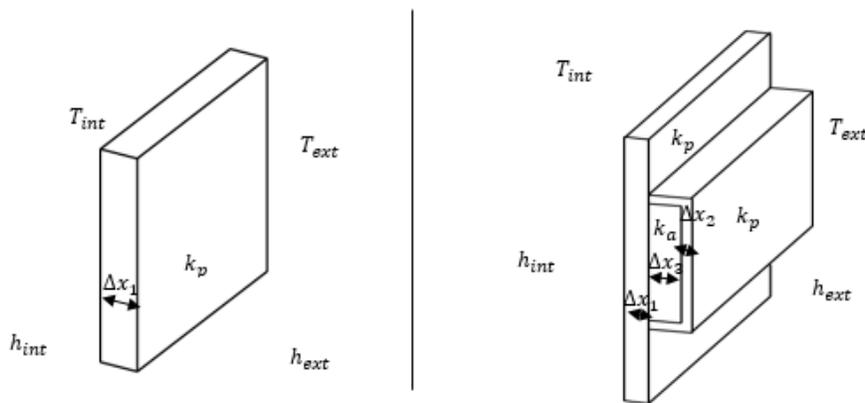


Figura 5.11 – Esquema de parede simples e parede com permutador de calor

Sendo  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  e  $\Delta x_4$  as espessuras da parede simples, parede da camisa, do canal por onde passa a água refrigerada e a espessura da parede dos vinificadores, respetivamente e  $k_a$  representa a condutividade térmica da água. Usando a lei de Fourier [42], o fluxo de calor que atravessa a parede simples esquematizada na figura 12 é dado por:

$$\frac{q}{A} = k \times \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_{ext}} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (5.32)$$

Sendo que o resultado final é dado em função da área.

Esta foi a metodologia seguida para o fluxo de calor que atravessa as paredes, no entanto o calor que é transferido pelo topo do reservatório é dado pela lei de Newton de arrefecimento:

$$q = h \times A \times \Delta T \quad (5.33)$$

Em que “h” é o coeficiente de convecção, “A” a área exposta em contacto com o ar e “ $\Delta T$ ” a variação de temperatura entre o mosto e o ar ambiente.

As Figura 5.13 e Figura 5.12 representam imagens esquemáticas em que se caracteriza o calor que é transferido nas cubas verticais, lagares e vinificadores.

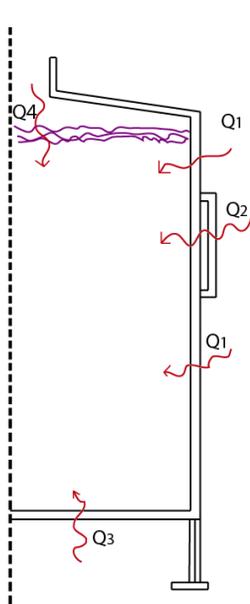


Figura 5.13 – Calor transferido nas cubas verticais

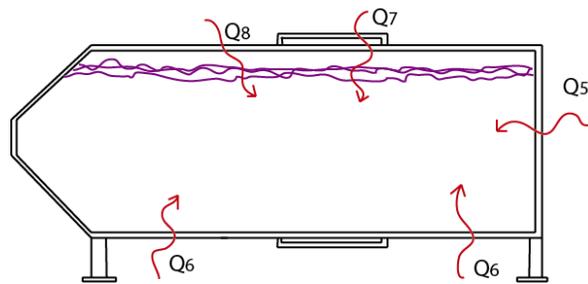


Figura 5.12 – Calor transferido nos vinificadores

De seguida mostra-se a Tabela 5.11 de dados utilizados:

Tabela 5.11 – Tabela de dados utilizados no cálculo do fluxo de calor

	Coeficient e de convecção interior	Coeficiente de convecção exterior	Temperatura interior		Temperatura exterior	Fórmula final do fluxo de calor
	$h_{int}$	$h_{ext}$	$Mb&r$	$Mt$		$\frac{q}{A} =$
$Q_1$	$h_1$	$h_4$	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_4} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_1}}$
$Q_2$	$h_2$	$h_5$	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_5} + \frac{\Delta x_2}{k_p} + \frac{\Delta x_3}{k_a} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_2}}$
$Q_3$	$h_3$	$h_6$	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_6} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_3}}$
$Q_4^*$	-	$h_7$	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$h_7 \times (T_{ext} - T_{int})$
$Q_5$	$h_8$	$h_{10}$	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_{10}} + \frac{\Delta x_4}{k_p} + \frac{1}{h_8}}$
$Q_6$	$h_9$	$h_{10}$	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_{10}} + \frac{\Delta x_4}{k_p} + \frac{1}{h_9}}$
$Q_7$	-	-	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\approx 0^{**}$
$Q_8$	-	-	15 °C	23 °C	Perfil climático (dados do INETI)	$\approx 0^{***}$

\* O calor  $Q_4$  foi calculado apenas para mostos brancos uma vez que o mosto está diretamente em contacto com o ar ambiente.

\*\* É considerado nulo uma vez que os mostos tintos têm uma camada de películas, caules e folhas que lhes confere isolamento. Essa camada pode atingir 20 cm.

\*\*\* É considerado nulo pois a camisa de refrigeração dos vinificadores possui isolamento térmico de lã de rocha.

## 5.2.5 Cálculos dos efeitos da radiação

Já foi descrito os efeitos da condução e convecção nas secções anteriores. Aqui irá ser descrito os efeitos da transmissão de calor sob a forma de radiação.

A zona de produção da adega é protegida por uma cobertura em chapa de aço esmaltada de cor branca na parte inferior e superior sem qualquer isolamento. Corresponde a uma área aproximada de 686 m<sup>2</sup>. A radiação que a chapa emite pode ter efeitos significativos na transmissão de calor para as cubas.

No entanto como a adega está virada a Norte o seu lado Este que é aberto ao exterior está exposto à radiação solar nascente durante a manhã. Determinadas cubas, em particular os vinificadores de disposição horizontal têm a sua superfície denominada de fundo plano exposta à radiação.

As cubas são fabricadas em aço inoxidável polido que tem uma emissividade aproximada de 0,16 [45], [46].

Calcular-se-á os efeitos da radiação no calor transmitido às cubas através do seguinte modelo (ver Anexos B e C).

Observe-se parte do desenho de vista lateral da Adega na Figura 5.14.

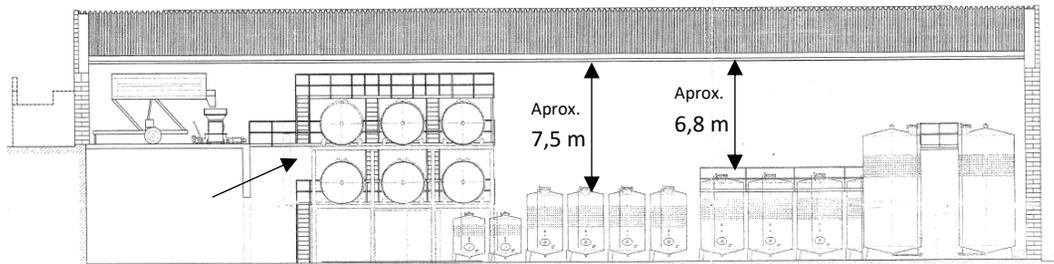


Figura 5.14 – Lado Este da Adega da Ervideira (vista de lado)

Calculou-se o fator de forma associado à relação de áreas entre as cubas e o teto.

Considerou-se dois cilindros concêntricos, sendo que o interior representa a parte lateral da cuba e o exterior um cilindro com medidas representativas da cobertura radiante.

Se se considerar o raio do cilindro maior como 10 m, o raio do cilindro interior igual ao de uma cuba de 10 m<sup>3</sup> que é 0,995 m e o seu comprimento de 1,61 m, então pelo gráfico da figura 8-15 (b) da 10ª edição do Livro “Heat Transfer” de J.P. Holman [42], tem-se:

$$\frac{L}{r_2} = \frac{1,61}{10} = 0,161 \text{ e } \frac{r_1}{r_2} = \frac{0,995}{10} = 0,0995$$

Para estas relações o fator de forma é 0. Se se diminuir o  $r_2$  para 5 m então tem-se:

$$\frac{L}{r_2} = \frac{1,61}{5} = 0,322 \text{ e } \frac{r_1}{r_2} = \frac{0,995}{5} = 0,199$$

E o fator de forma fica aproximadamente 0,05.

Relativamente à temperatura da chapa, pode ser calculada pela seguinte expressão [40]:

$$\alpha \cdot E_n = \sigma \cdot (T_c^4 - T_a^4) + (h_s + h_i) \cdot (T_c - T_a) \quad (5.34)$$

Onde  $\alpha$  é a absorvidade,  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann,  $T_c$  é a temperatura da chapa,  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $h_s$  é o coeficiente de convecção para a parte superior e  $h_i$  é o coeficiente de convecção para a parte inferior da chapa.

Considerando os seguintes dados:

$$E_n = \text{radiação global horizontal} + \text{radiação difusa horizontal} = 850 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 0,85 \text{ [47]}$$

$$T_a = 305 \text{ K}$$

$$h_s = 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_i = 0,05 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Os coeficientes de convecção que se apresentaram anteriormente foram calculados para uma placa horizontal com 27,245 m de dimensão característica, sendo a média da largura e comprimento da chapa de cobertura [39]. Note-se que esta dimensão característica resulta num coeficiente de convecção baixo relativamente ao superior e conseqüentemente num maior aumento da temperatura da chapa.

Nesta situação a temperatura da chapa calculada pela equação (5.18) fica  $T_c = 85,92 \text{ }^\circ\text{C}$ . Assim tem-se, pela lei de Stefan-Boltzmann [42]:

$$q = \alpha_t \times F_f \times A_l \times \sigma \times T_c^4 \quad (5.35)$$

Sendo  $\alpha_t$  a absorvidade do material das cubas, igual à emissividade,  $F_f$  o fator de forma,  $A_l$  a área lateral de uma cuba de  $10 \text{ m}^3$ ,  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann e  $T^4$  a temperatura em Kelvin da chapa. Utilizou-se os seguintes dados para o cálculo do valor do calor absorvido:

$$\alpha = 0,16 \text{ [47]}$$

$$T_c = 358,92 \text{ K}$$

$$F_f = 0,05 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$A_l = 16,08 \text{ m}^2$$

Nestas condições o calor absorvido é:

$$q = 121 \text{ W}$$

Verifica-se que o valor obtido é significativo, pelo que se calculou a temperatura da chapa da cobertura com base na equação (5.18) com base nos dados da temperatura ambiente e da radiação solar com base nos dados do INETI 2006. Calculou-se também os fatores de forma para cada cuba e o calor transferido.

Na Tabela 5.12 apresenta-se os dados dos fatores de forma utilizados.

*Tabela 5.12 – Fatores de forma utilizados para cada cuba*

<b>Designação das Cubas</b>	<b>25cv</b>	<b>15cv</b>	<b>10cv</b>	<b>5cv</b>	<b>2,5cv</b>	<b>10l</b>
<b>Fatores de forma superfície lateral</b>	0,15	0,11	0,05	0,04	0,02	0,06

Observe-se que as cubas com maior superfície exposta à radiação têm um fator de forma mais elevado.

### **Transmissão de calor por radiação direta proveniente do lado Este da Adega**

Relativamente ao calor transferido por radiação direta na parede circular dos vinificadores, como pode ser visto na figura 15 destacado por uma seta, é calculado da seguinte forma:

$$E_n = \sigma \times T^4 = \text{radiação global horizontal} + \text{radiação difusa horizontal} \quad (5.36)$$

$$\frac{q}{A_{abs}} = \alpha_t \times E_n \quad (5.37)$$

Tendo-se considerado uma absorvidade de 0,5 [45], [46] uma vez que o aço não é polido e tem algum grau de rugosidade e os dados da radiação do INETI de 2006 para a região de Évora.

## **5.3 Resultados do balanço de energia nas cubas de fermentação**

A apresentação de resultados terá a mesma ordem que os cálculos apresentados nas secções anteriores.

Os resultados obtidos para os coeficientes de convecção na situação em que a temperatura ambiente está acima da temperatura desejada de fermentação podem ser vistos na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Coeficientes de convecção médios para a situação de  $T_{amb}$  acima da  $T$  de fermentação

		Coeficientes de Convecção pela designação atribuída nas figuras 5.9 e 5.10 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]										
Designação das cubas		$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$h_9$	$h_{10}$	$h_{11}$
<b>25cv</b>		108,6	117,95	177,27	7,9	19	3,1	-	-	-	-	-
<b>15cv</b>		109,2	118	177,27	12,7	17,8	3,1	-	-	-	-	-
<b>10cv</b>		134,1	139,2	218,43	9,1	14,7	3,8	0,8	-	-	-	-
<b>5cv</b>		134,7	139,2	218,43	11,8	12,4	3,8	0,8	-	-	-	-
<b>2,5cv</b>	$M_t$	110,1	118,4	177,27	18,8	16,1	3,1	-	-	-	-	-
	$M_{b\&r}$	135,4	139,7	218,43	18,8	16,1	3,8	0,9	-	-	-	-
<b>10I</b>		180	118	177,27	175,5*	20,6	3,1	-	-	-	-	-
<b>10V</b>		-	-	-	-	-	-	-	111,5	111,5	3,6	2

\* Este valor é bastante superior aos outros uma vez que a sua dimensão característica é um valor bastante pequeno (0,115 m)

Na Tabela 5.14 apresentam-se os coeficientes de convecção médios para a situação em que a temperatura ambiente é inferior que a de fermentação.

Tabela 5.14 – Coeficientes de convecção médios para a situação de dissipação de calor

		Coeficientes de Convecção pela designação atribuída nas figuras 5.9 e 5.10 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]										
Designação das cubas		$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$h_9$	$h_{10}$	$h_{11}$
<b>25cv</b>		113,4	115	185,1	6,6	15,7	3,2	-	-	-	-	-
<b>15cv</b>		114	115	185,1	10,5	14,7	3,2	-	-	-	-	-
<b>2,5cv</b>	$M_t$	115	115	185,1	15,695	13,4	3,2	-	-	-	-	-
	$M_{b\&r}$	186	115	185,1	144,63	17	3,2	-	-	-	-	-
<b>10V</b>		-	-	-	-	-	-	-	112,6	112,6	2,8	2,8

Os resultados do fluxo de calor obtidos com base nestes coeficientes de convecção foram calculados implementando um algoritmo em linguagem “Visual Basic” no *Microsoft Excel* para o perfil climático da cidade de Évora (Figura 5.15) com recurso às folhas de cálculo que se exemplifica nas Figura 5.16 e Figura 5.17. Utilizou-se também o software *Matlab* para se interligar os resultados da energia proveniente da fermentação com o fluxo de calor por convecção e radiação.

```

Sub cargas_térmicas()
Set folha_destino = Worksheets("Cargas térmicaas totais")
With folha_destino
For i = 6 To 2213
T = .Range("D" & i).Value
If .Range("D" & i).Value > 24 Then
Q = ((T - Temp_int) / (1 / h_int1 + s2 / K + 1 / h_ext1)) * 2 * Pi * r * alt +
((T - Temp_int) / (1 / h_int2 + s2 / K + 1 / h_ext2)) * Pi * r2 +
((T - Temp_int) / (1 / h_int4 + s3 / K + s4 / Ka + s2 / K + 1 / h_ext4)) * 2 * Pi * r * alt2
.Range("u" & i) = Q
End If
If .Range("D" & i).Value < 22 Then
Q = ((Temp_int - T) / (1 / hd_int1 + s2 / K + 1 / hd_ext1)) * 2 * Pi * r * alt +
((Temp_int - T) / (1 / hd_int2 + s2 / K + 1 / hd_ext3)) * Pi * r2 +
((Temp_int - T) / (1 / hd_int3 + s3 / K + s4 / Ka + s2 / K + 1 / hd_ext2)) * 2 * Pi * r * alt2
.Range("u" & i) = -Q
End If
Next
End With
End Sub

```

Figura 5.15 – Programa em Visual Basic

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
3	Nº da cuba	Volume	Quantidade de cubas	Dímetro	Altura	Altura da camisa	Lateral sem camisa	raio	Temperatura ambiente na área de produção (Tamb)	Temperatura no interior da cuba (Tint)	Temperatura na parede interior (Tp)	Temperatura na parede exterior	Nº da Cubas escolhida	Altura para efeitos de cálculos	Raio da Cubas	Dímetro da cuba	Altura da camisa	Altura		
4	1	25	3	2,7650	3,3308	0,98	2,3508	1,3825	26	15	16,213	16,293572	2	0,194965478	1,525	3,05	0,98	1,095		3,1416
5	2	30	3	3,0900	1,095	0,98	0,15	1,525			Temperatura de filme (Tf)									
6	3	10	5	1,9300	2,5721	0,98	1,5321	0,395			15,6385									
7	4	15	5	2,5460	2,3571	0,98	1,3771	1,273												
8	5	2,5	2	1,4100	1,2603	0,63	0,5303	0,705												
9	6	5	4	1,5300	2,045	0,98	1,0345	0,795												
10	7	10	5		1,6		1													
11		Geometria	Gr Pr	C	m															
12	1,6076	Vertical	104 = 103	0,53	0,25															
13	0,535	Vertical	103 = 103	0,31	0,33															
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21		Geometria	Gr Pr	C	m															
22		8'10'6 - 10'11		0,15	0,3333															
23																				
24		Inclinação das bases das cubas																		
25		Gravidade	Radianos																	
26			83	1,4486233																
27																				

Figura 5.16 – Exemplo de folha de cálculo utilizada na determinação de coeficientes de convecção em cubas normais

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
5	<b>Convecção exterior</b>										
6	p	Cp	μ	v	k	Pr				GrPr	C
7		1,1774	1,0057	0,000018462	0,00001569	0,02624	0,708			10^4-10^9	0,53
8										10^9-10^12	0,13
9											
10	Ra		Nu	h [W/m.°C]	h_ext6					Lateral	
11		2053835399		165,2463583	3,604376095					C	m
12		2,05E+09								0,13	0,333333
13											
14											
15	<b>Convecção interior</b>										
16	p	Cp	μ	v	k	Pr	$\frac{g \times \beta \times \rho^* \times C_p}{\mu \times k}$			Lateral	
17		996,5683	4,179	0,000917626	0,6092	6,2966	16939028777			C	m
18							1,69E+10			0,13	0,333333
19											
20											
21	Ra		Nu	h [W/m.°C]	h_int5					Lateral	
22		4862588037		220,2415111	111,5304477					C	m
23		4,86E+09					4,86E+09			111,5304	h_int6

Figura 5.17 - Exemplo de folha de cálculo utilizada na determinação de coeficientes de convecção em vinificadores

De seguida apresenta-se na Figura 5.18 o gráfico da potência requerida de refrigeração resultante da transmissão de calor por efeitos de convecção e condução desde o dia 11 de Agosto a 13 de Outubro.

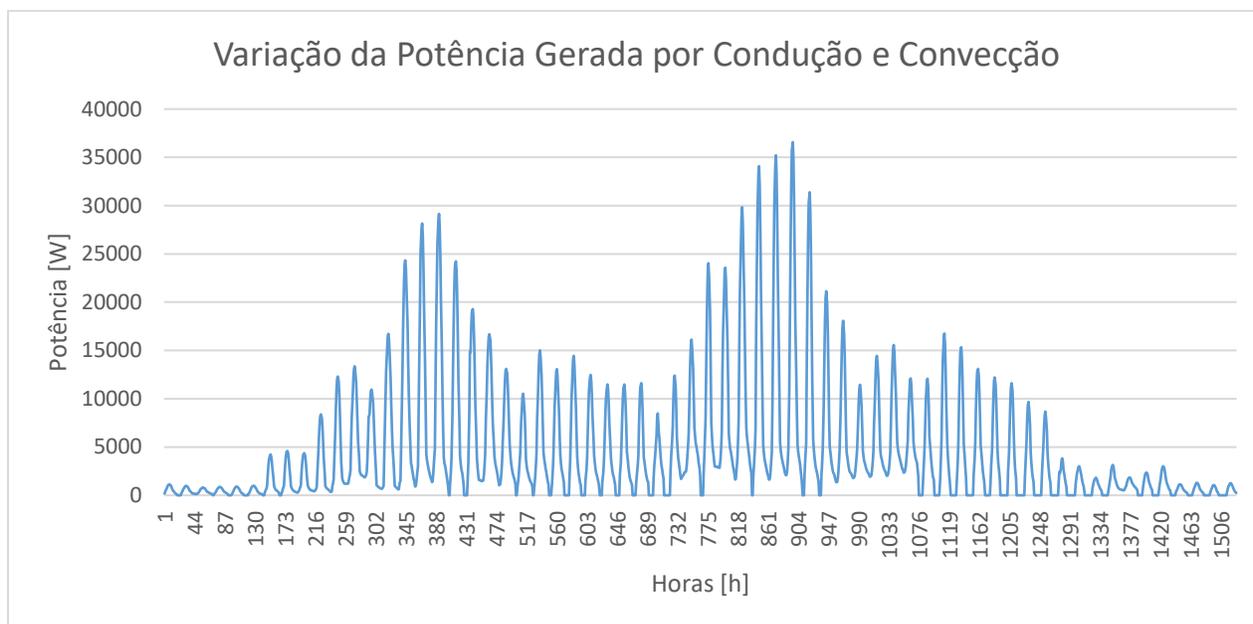


Figura 5.18 – Variação da potência gerada por efeitos de convecção e condução

Verifica-se ao longo de todo o gráfico picos e quedas de potência que resultam da grande diferença de energia da noite para o dia devido à variação da temperatura. Os dois picos de carga mais elevada resultam do culminar do aumento de temperatura ambiente nesses dias bem como do aumento da carga de produção. No início e no final a carga de produção é baixa pois não existe tanta uva a ser descarregada.

A Figura 5.19 mostra o gráfico da variação de potência por efeitos de radiação direta incidente nos vinificadores.

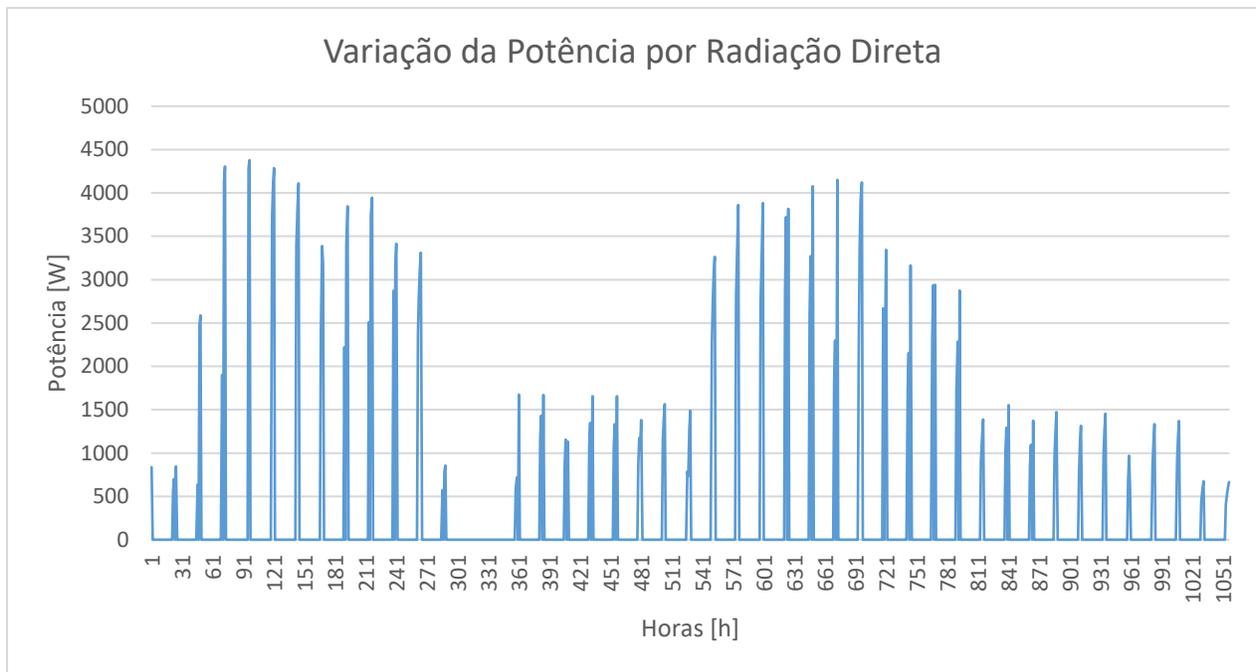


Figura 5.19 - Variação de potência por efeitos de radiação direta incidente nos vinificadores

Observe-se que os picos representam a potência da radiação desde as 7h da manhã até às 11h30.

Por último apresenta-se o gráfico da potência da radiação proveniente da chapa (Figura 5.20).

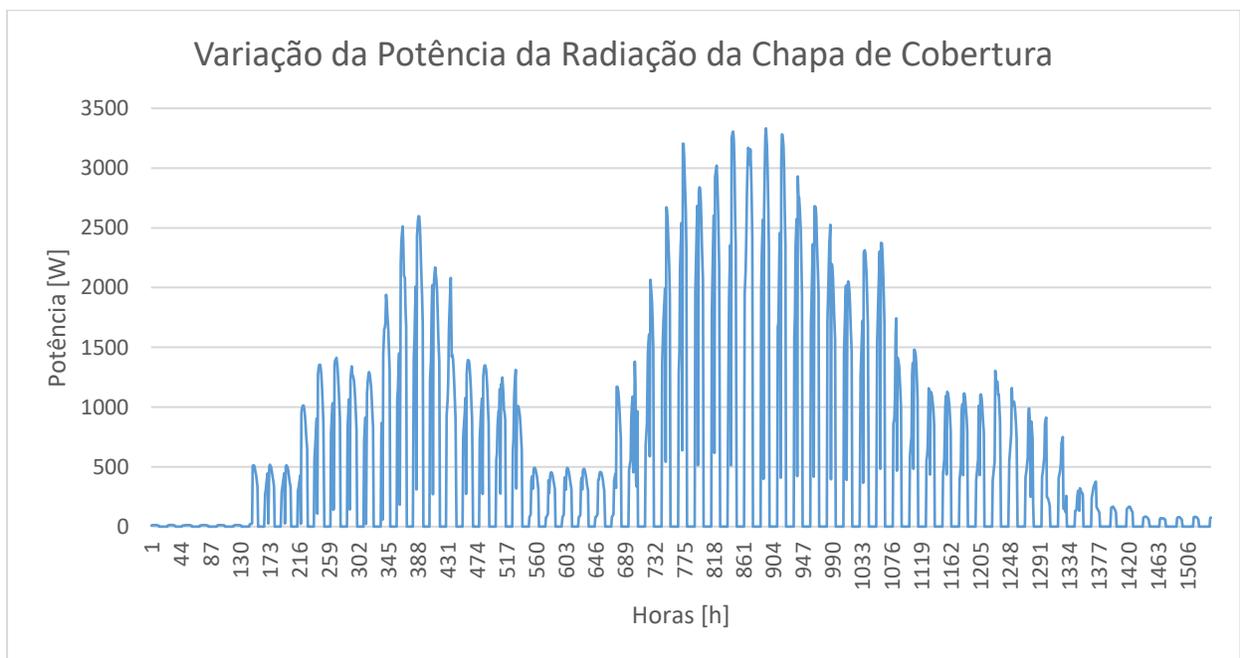


Figura 5.20 – Variação da potência da radiação proveniente da chapa de cobertura

Este gráfico assemelha-se aos anteriores pois a carga de produção é a mesma. Verifica-se uma vez mais os picos que resultam da radiação ser máxima durante o dia e nula durante a noite.

### 5.3.1 Balanço de energia de todas as parcelas

A soma da energia associando todas as parcelas resulta no seguinte gráfico da Figura 5.21.

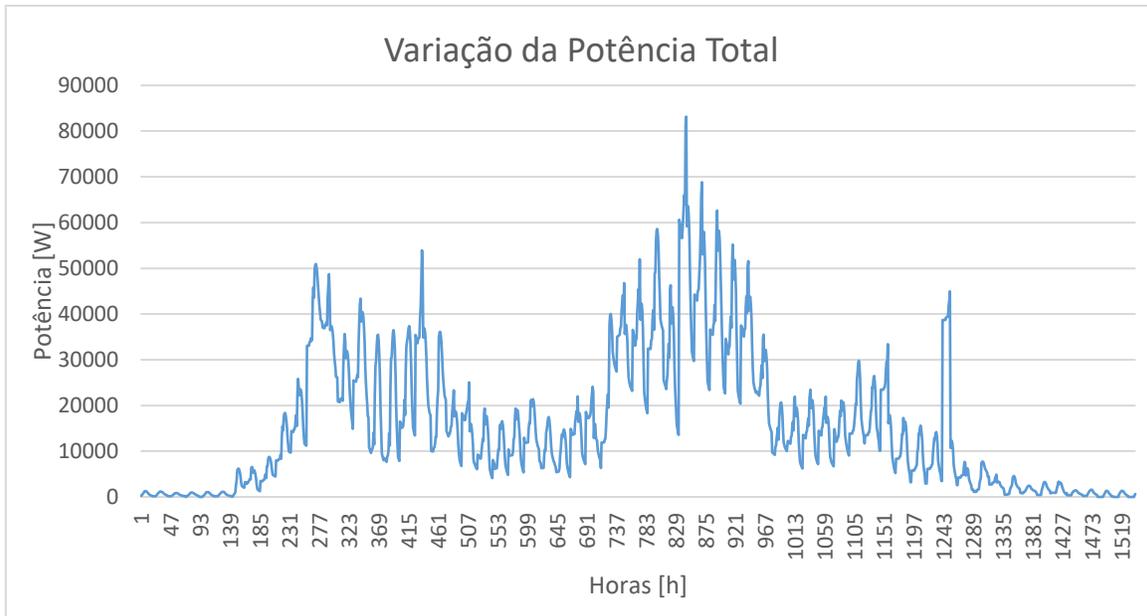


Figura 5.21 – Resultado da variação da potência global requerida para o ano de 2015

De notar a semelhança do gráfico da Figura 5.21 com os gráficos das Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20. A carga mais alta no valor de 83164,96 W ocorre para o dia 15 de setembro às 12 h. Veja-se a carga térmica ao longo desse dia na Tabela 5.15 e na Figura 5.22.

Tabela 5.15 - Carga térmica do dia 15 de setembro

Horas [h]	Temperatura	Radiação [W/m <sup>2</sup> ]	Potência Global (W)
1	19,6	0	60636
2	18,9	0	60022
3	18,3	0	59496
4	17,6	0	58882
5	17	0	56603
6	17	0	57909
7	17,6	112	60511
8	19	393	63631
9	21,3	596	66076
10	24	780	64001
11	26,9	894	81382
12	<b>29,5</b>	<b>948</b>	<b>83165</b>
13	31,7	924	59125
14	33,1	887	62932
15	33,4	763	63562
16	32,7	603	61207
17	31,1	385	56495
18	28,8	145	47772
19	26,4	0	41113
20	24,5	0	35841
21	23	0	31678
22	21,8	0	30894
23	20,8	0	30241
24	20	0	29718

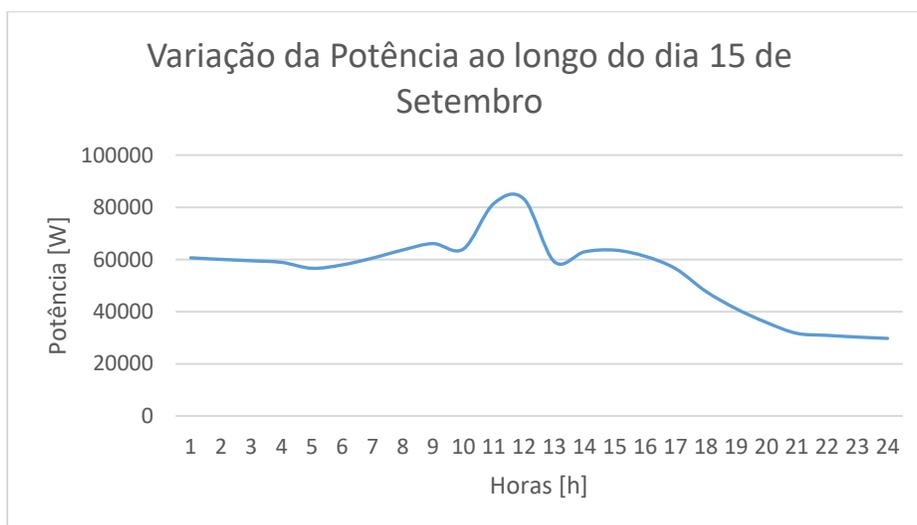


Figura 5.22 – Variação da potência ao longo do dia 15 de setembro

Verifica-se que o pico de energia se dá para quando a radiação é máxima e a temperatura muito perto do máximo. Verificou-se igualmente que algumas cubas foram vazadas e resulta numa ligeira inconsistência do perfil de potência entre as 12h e as 15h.

De seguida, pode-se verificar os resultados finais na Tabela 5.16 e analisar a importância das origens da geração de calor.

Tabela 5.16 – Comparação de resultados finais de potência

Origem da energia	Fluxo de calor por convecção e condução	Processo de fermentação	Radiação de incidência direta	Radiação proveniente da chapa de cobertura	Total de carga térmica positiva	Dissipação de calor por convecção e condução
Potência [W]	7136118	16095076	272649	796293	24300136	-2377183
Potência [kW]	7136,118	16095,076	272,649	796,293	24300,136	-2377,183
Relação percentual [%]	29,37	66,23	1,12	3,28	100	9,78

Observe-se o gráfico da Figura 5.23.

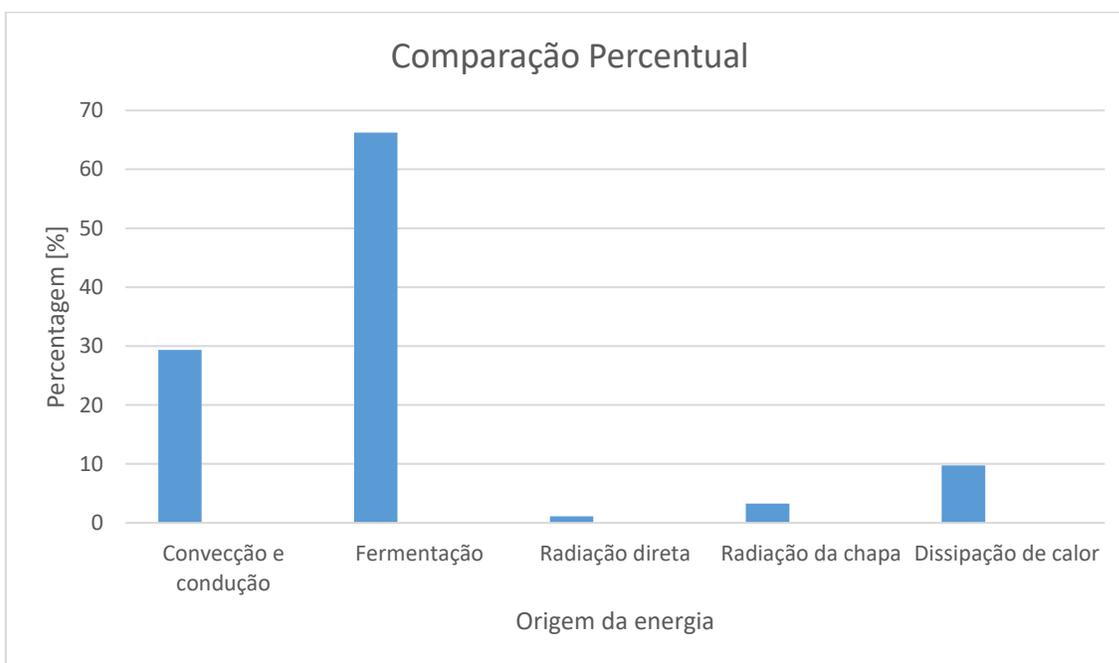


Figura 5.23 – Comparação percentual entre as várias fontes de energia

Verifica-se que o processo de fermentação é o principal fator da geração de calor na adega da Ervideira representando mais de 66% do total da energia gerada. Em segundo lugar a convecção e condução que representam quase 30%, a radiação proveniente da chapa de cobertura representando 3.28 % e por fim a radiação que incide diretamente nos vinificadores (1.12 %).

Observe-se os gráficos seguintes (Figura 5.24 e Figura 5.25) onde se apresenta a importância de cada fonte de calor para uma cuba vertical de fermentação de tintos e outra de vinhos brancos.

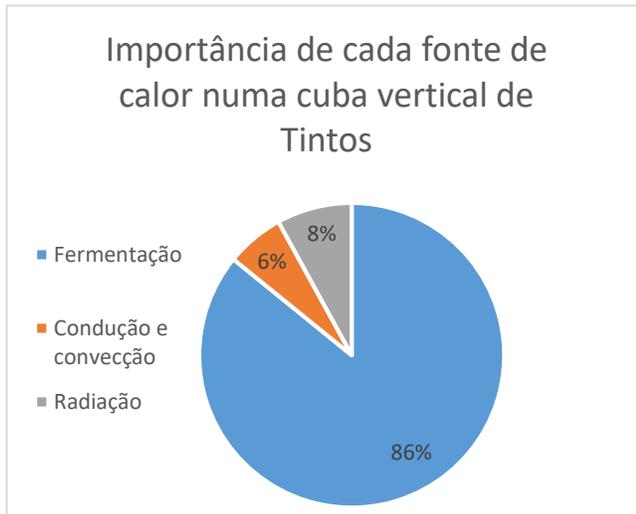


Figura 5.24 – Importância das fontes de calor nos tintos

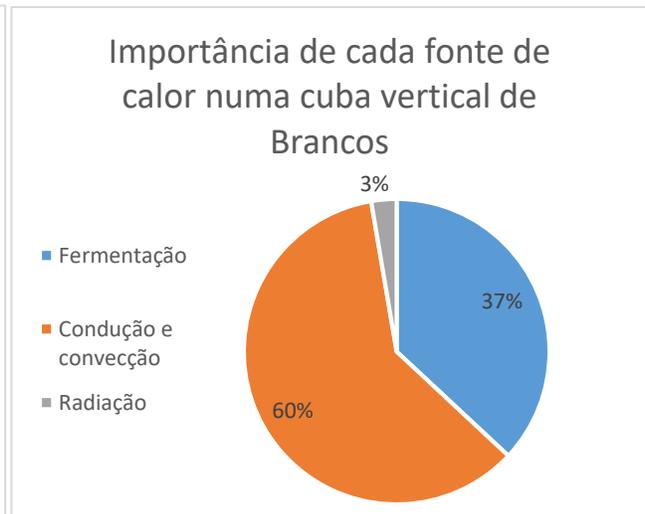


Figura 5.25 – Importância das fontes de calor nos brancos

As necessidades de refrigeração que terão de ser satisfeitas pelo sistema de climatização são, deste modo, descritas pela seguinte equação.

$$N_r = E_{cc} + E_r + E_{f\&B} + (E_{f\&T} + (-E_{d_{cc}})) \quad (5.38)$$

Ou seja, esta equação diz que as necessidades energéticas serão a soma entre a energia transmitida por condução e convecção ( $E_{cc}$ ), energia transmitida por ambos os efeitos de radiação ( $E_r$ ), energia gerada na fermentação de brancos ( $E_{f\&B}$ ) e o balanço entre a energia gerada na fermentação de tintos e a energia que é dissipada durante as horas de temperaturas baixas ( $E_{f\&T} - E_{d_{cc}}$ ). Para se compreender melhor, observe-se a discriminação da energia gerada durante o dia 16 de setembro. Note-se que todas as cargas são dadas em Watts.

Tabela 5.17 – Discriminação das cargas energéticas e correspondência com as necessidades frigoríficas

Horas	Tempe- ratura	$E_{cc}$	$E_r$	$E_{f\&B}$	$E_{f\&T}$	$E_{dcc}$	$(E_{f\&T}$ $+ E_{dcc})$	$N_r$
1	19,5	2940,6	0	3404,4	37929,3	-6563,5	31365,8	37710,8
2	19	2613,8	0	3404,4	37929,3	-7501,1	30428,2	36446,4
3	18,5	2287,1	0	3404,4	37929,3	-8438,7	29490,6	35182,0
4	18	1960,4	0	3404,4	37929,3	-9376,4	28552,9	33917,7
5	17,5	1633,7	0	3404,4	37929,3	-10314	27615,3	32653,3
6	17,5	1633,7	1942,6	3404,4	37929,3	-10314	27615,3	34595,9
7	18	1960,4	2140,9	3404,4	37929,3	-9376,4	28552,9	36058,6
8	19,5	2940,6	4433,8	3404,4	37929,3	-6563,5	31365,8	42144,6
9	21,7	4378,2	6129,8	3404,4	37929,3	-2437,9	35491,4	49403,8
10	24,4	9112,3	6933,4	3404,4	37929,3	0	37929,3	57379,4
11	27,3	17159,1	7292,2	3404,4	37929,3	0	37929,3	65784,9
12	29,9	24373,5	3150,2	3404,4	37929,3	0	37929,3	68857,3
13	32	30200,5	3026,9	2064,3	17709,1	0	17709,1	53000,8
14	33,4	34085,1	3157,2	2064,3	17709,1	0	17709,1	57015,7
15	33,8	35195	2996,3	2064,3	17709,1	0	17709,1	57964,7
16	33,1	33252,7	2745,6	2064,3	17709,1	0	17709,1	55771,7
17	31,5	28813,1	2415,6	2064,3	17709,1	0	17709,1	51002,1
18	29,2	22431,2	0	2064,3	17709,1	0	17709,1	42204,6
19	26,8	15771,7	0	2064,3	17709,1	0	17709,1	35545,2
20	24,9	10499,7	0	2064,3	17709,1	0	17709,1	30273,1
21	23,4	5489	0	2064,3	17709,1	0	17709,1	25262,5
22	22,2	4704,9	0	2064,3	17709,1	0	17709,1	24478,3
23	21,3	4116,8	0	2064,3	17709,1	-3188	14521,2	20702,3
24	20,5	3594	0	2064,3	17709,1	-4688,2	13021	18679,3

Analisando os dados desta tabela observa-se que a energia gerada na fermentação dos vinhos brancos é bastante inferior a energia gerada nos tintos. É devido ao facto de que o processo de fermentação nos mostos brancos é mais demorado do que nos tintos devido às baixas temperaturas, provocando uma menor diminuição da densidade ao longo do tempo. Como o calor é calculado pela variação do açúcar que por sua vez é calculado pela variação da densidade, resulta numa produção de calor inferior. A agregar a este facto, verificou-se também que para esse dia a carga de produção dos vinhos tintos era superior aos vinhos brancos, ou seja, havia mais mosto tinto a fermentar do que mosto branco.

Observa-se também que o balanço ( $E_{f\&T} + E_{d_{CC}}$ ) é sempre positivo para este dia, no entanto verificou-se que em alguns dias a temperatura ambiente durante a noite é tão baixa que resulta numa dissipação de calor que é superior á produção de calor pela fermentação resultando num balaço de sinal negativo. Para este caso a contabilização da energia é nula uma vez que o *chiller* não necessita de arrefecer pois o que acontece é uma diminuição da temperatura no mosto e não aumento. Esta situação verifica-se quando a temperatura no exterior faz baixar bastante a temperatura do mosto provocando um “amuamento” do metabolismo das leveduras que como é referido no capítulo 3, é muito suscetível à variação da temperatura.

Por fim apresenta-se o gráfico na Figura 5.26 da variação da potência frigorífica requerida desde o dia 11 de agosto ao dia 12 de outubro.

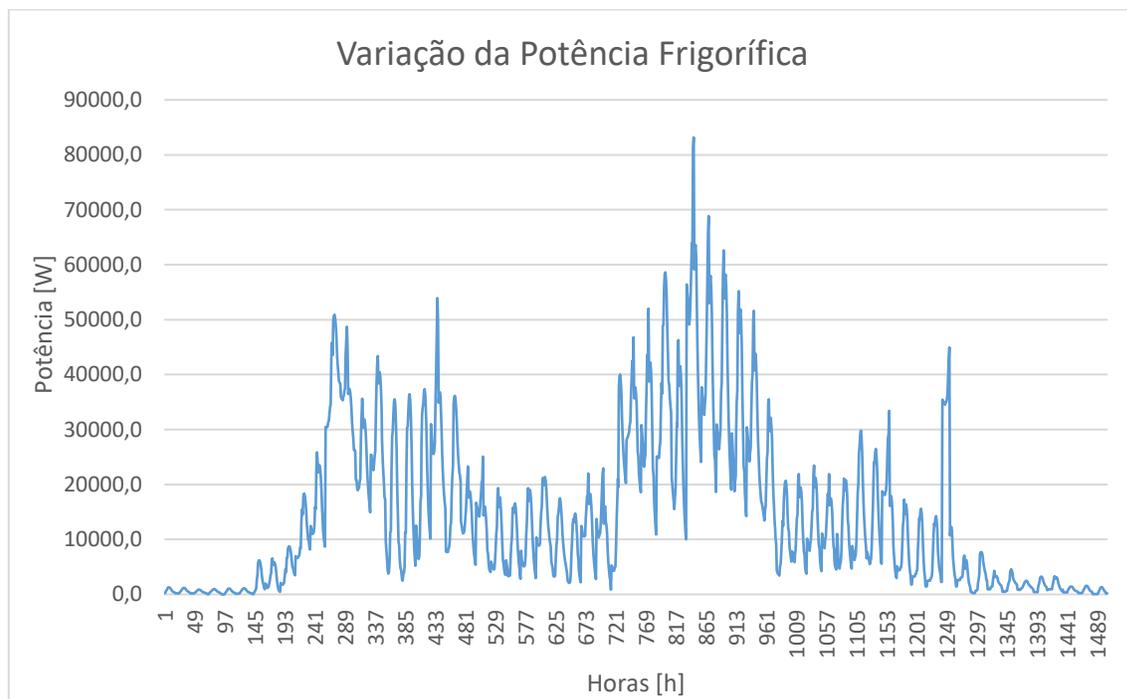


Figura 5.26 - Variação da potência frigorífica requerida desde o dia 11 de agosto ao dia 12 de outubro

Ao se observar este gráfico verifica-se que o pico de potência não se altera relativamente ao gráfico da Figura 5.21 já que esta potência ocorre às 12 horas do dia 15 de Setembro quando a dissipação de energia não tem influência. No entanto, a diferença é verificada durante a noite quando as temperaturas são baixas resultando numa maior diferença entre as cargas térmicas do dia para a noite.

## 5.4 Balanço de energia nas cubas de maturação

É importante entender qual a importância que os reservatórios de maturação têm para o consumo de energia. Como já foi referido no capítulo da produção vinícola, a maturação é uma fase da produção em que os vinhos devem permanecer a temperaturas estáveis a amadurecer após as suas completas fermentações alcoólica e malolática. A temperatura não deve ultrapassar os 20°C e o vinho permanece em reservatórios verticais em aço inoxidável durante aproximadamente um ano, desde a fermentação do ano anterior até ao começo das vindimas do ano seguinte onde se começa a extrair vinho à medida que é necessário a sua utilização para a nova produção. A refrigeração deve começar a ser realizada assim que as temperaturas começam a subir, pelo que se deve ligar o chiller em maio ou junho.

Ao contrário da fermentação a fase de maturação não gera energia das reações que nela vão ocorrendo, pelo que a energia que é transferida para o interior dos reservatórios é através de convecção, condução e radiação. Proceder-se-á aos cálculos das necessidades frigoríficas através destas vias de transmissão de calor.

### 5.4.1 Cálculos de transmissão de calor por convecção e radiação

Em primeiro lugar determinou-se os coeficientes de convecção nas paredes dos reservatórios, do lado interior e do lado exterior e de seguida a condução.

Os coeficientes de convecção foram calculados utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente neste capítulo, convecção forçada para o lado exterior e convecção natural para o interior, fundo e topo. Considerou-se uma temperatura de 20°C para o vinho, a temperatura ambiente de 28 °C e a velocidade do vento de 3 m/s (dados windguru) para o cálculo dos coeficientes médios de convecção.

Utilizou-se as propriedades que se apresentam nas Tabela 5.18 e Tabela 5.19 da água e do ar respetivamente.

Tabela 5.18 – Propriedades da água para 20 °C

	Propriedades da água utilizadas	
	$k$	$\frac{g \times \beta \times g \times \rho^2 \times C_p}{\mu \times k}$
(Tag=20°C)	0,604	$1,46 \times 10^{10}$

Tabela 5.19 – Propriedades do ar para 27 °C

Propriedades do ar utilizadas					
	$\rho$	$\mu$	$\nu$	$k$	$Pr$
(Tar=27°C)	1,1774	0,000018462	0,00001569	0,02624	0,708

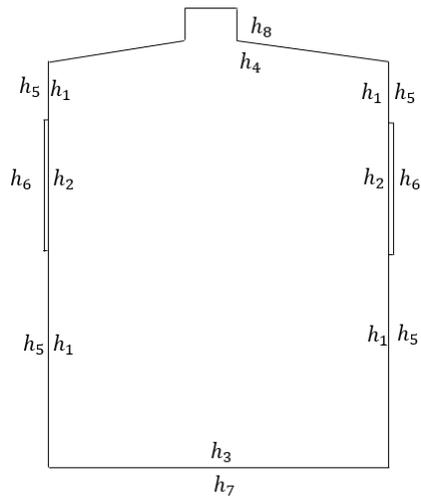


Figura 5.27 – Coeficientes de convecção nas paredes de uma cuba de maturação

Considerou-se convecção natural para o cálculo dos coeficientes de convecção  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_7$  e  $h_8$ , e convecção forçada para os restantes.

Tabela 5.20 – Coeficientes de convecção para as cubas de maturação

Designação das cubas	Coeficientes de Convecção pela designação atribuída nas figuras 5.25 [W/m <sup>2</sup> .°C]							
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$
<b>25cv</b>	103	133	132	19	6	20	4	0,6
<b>15cv</b>	114	131	132	20	9	18	4	0,7
<b>10cv</b>	106	126	132	22	7	15	4	0,7
<b>5cv</b>	111	122	132	24	8	13	4	0,8
<b>2,5cv</b>	123	129	132	25	13	17	4	0,8

O fluxo de energia final foi calculado pela lei de Fourier usando os coeficientes de convecção da Tabela 5.20 e em 5.4.2 mostra-se os resultados.

Após ter sido calculado a temperatura a que a chapa de cobertura alcança com base nos dados da radiação disponíveis do INETI, 2006, o calor transmitido foi calculado utilizando a lei de Stefan-Boltzmann [42]:

$$q = \alpha_t \times F_f \times A_l \times \sigma \times T_c^4 \quad (5.39)$$

Determinou-se os fatores de forma do topo dos depósitos através do gráfico da figura 8-16 do Livro “Heat Transfer” de J. P. Holman da radiação entre dois discos circulares de eixo concêntrico [43]. Considerou-se um raio superior ( $r_2$ ) de 4 m e o raio inferior ( $r_1$ ) o raio de cada cuba exposta à radiação. Os fatores de forma do lado lateral determinaram-se utilizando o gráfico da figura 8-15 (b) da 10ª edição do Livro “Heat Transfer” de J.P. Holman [42]. Considerou-se uma absorptividade ( $\alpha_t$ ) de 0,16. Note-se que neste caso foi calculado o calor proveniente dos topos dos reservatórios uma vez que o enchimento está na capacidade máxima da cuba ao contrário dos reservatórios de fermentação. Na Tabela 5.21 observa-se os fatores de forma e as áreas dos reservatórios que se utilizou para calcular a potência da radiação.

Tabela 5.21 – Fatores de forma dos topos e da lateral dos reservatórios

Designação das Cubas	25cv	15cv	10cv	5cv	2,5cv	10l
Fatores de forma superfície lateral	0,15	0,11	0,05	0,04	0,02	- *
Fatores de forma do topo	0,38	0,32	0,26	0,23	0,21	- *
Área lateral [m <sup>2</sup> ]	28,9	18,9	16,1	10,1	5,7	- *
Área dos topos [m <sup>2</sup> ]	6	5,1	3,1	2	1,6	- *

\* Não são utilizados para a maturação tal como os vinificadores

## 5.4.2 Resultados do balanço de energia das várias parcelas

A potência gerada por efeitos da convecção e condução são apresentados no gráfico da Figura 5.28, note-se que o eixo horizontal corresponde as horas embora seja representado as datas.

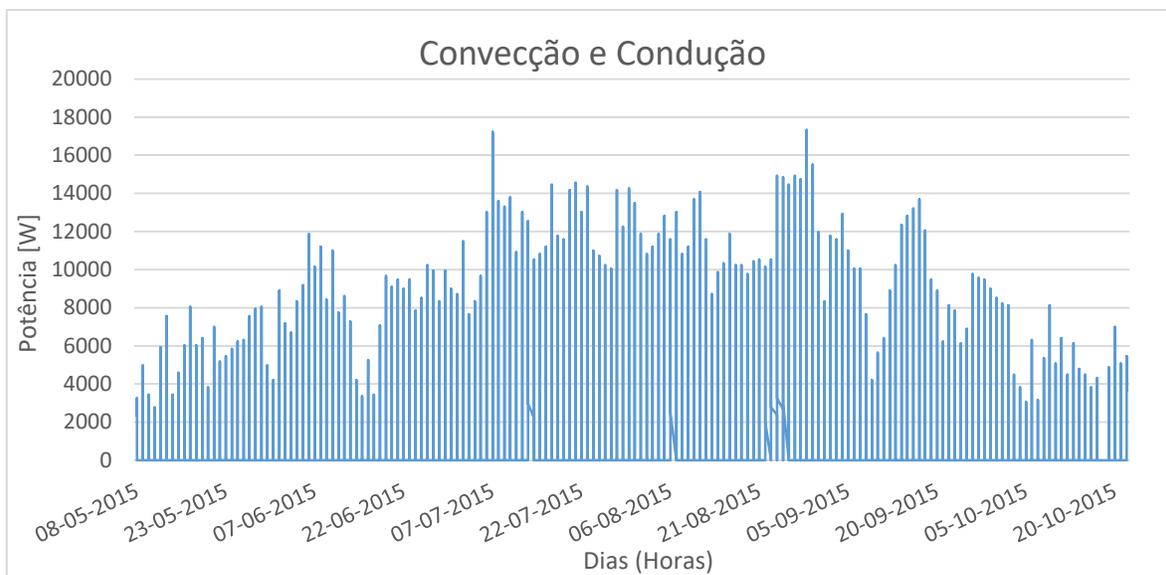


Figura 5.28 – Gráfico da potência gerada por convecção e condução desde 9/05/2015 a 23/10/2015

A energia total transmitida por efeitos de condução e convecção é 53014 kWh. O pico de potência ocorreu no dia 29/08 às 15h quando se encontrava uma temperatura de 38,1 °C, tendo sido de 80,133 kW.

A potência transmitida por radiação da chapa de cobertura é apresentada no gráfico da Figura 5.29 e representa um total de 21171 kW.

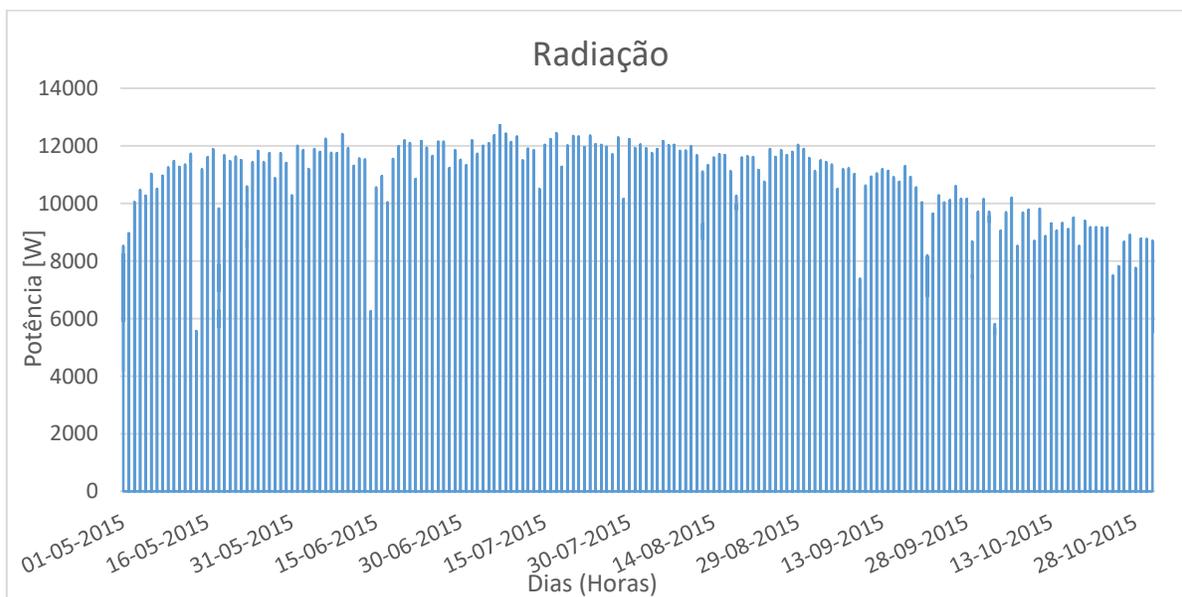


Figura 5.29 – Gráfico da potência gerada por radiação desde 1/05/2015 a 31/10/2015

A potência total transmitida somando ambas as parcelas de condução, convecção e radiação é apresentada no gráfico da Figura 5.30.

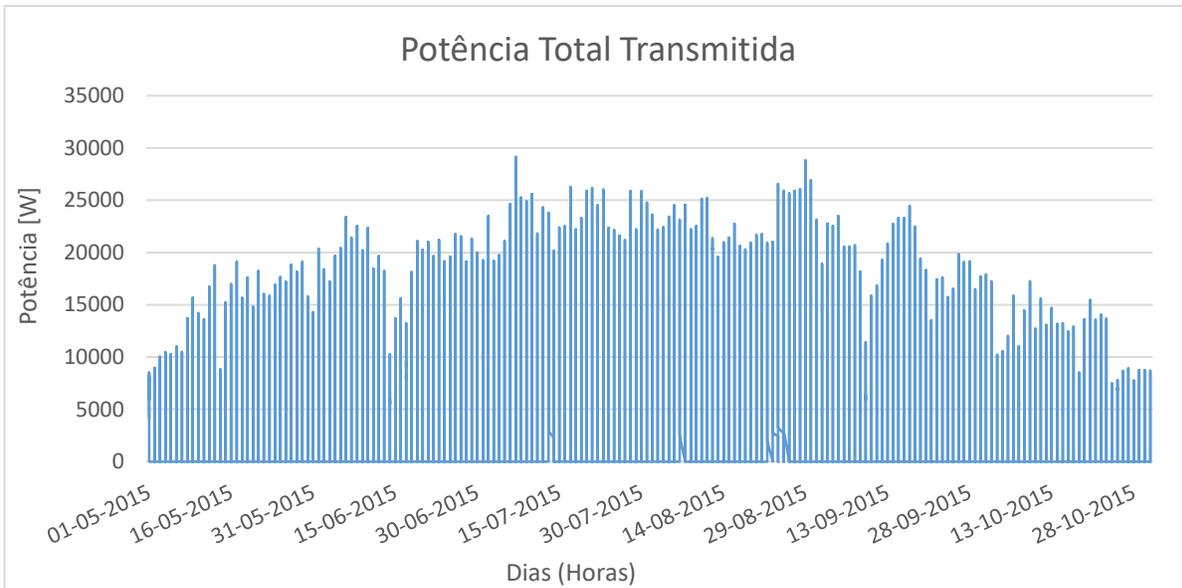


Figura 5.30 - Gráfico da potência total transmitida desde 1/05/2015 a 31/10/2015

Verifica-se que a potência máxima ocorre no dia 7 de Julho às 15 horas sendo de 91614 W. Na figura 5.29 pode-se observar a diferença em termos de percentagem que cada parcela representa na transmissão de calor total nos reservatórios de maturação. A condução e convecção representa um total de 53101 kWh enquanto a radiação representa 21171 kWh, num total de 74185 kWh.

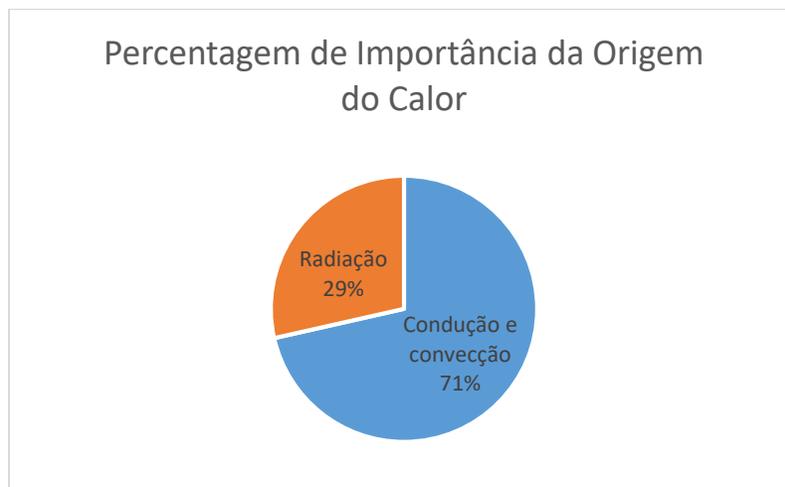


Figura 5.31 – Importância energética das parcelas na transmissão de calor nas cubas de maturação

## 5.5 Balanço de energia global de fermentação e maturação

A análise realizada anteriormente permite quantificar a carga frigorífica necessária para as cubas de fermentação e maturação nos meses mais quentes do ano. A soma das cargas está representada no gráfico da Figura 5.32.

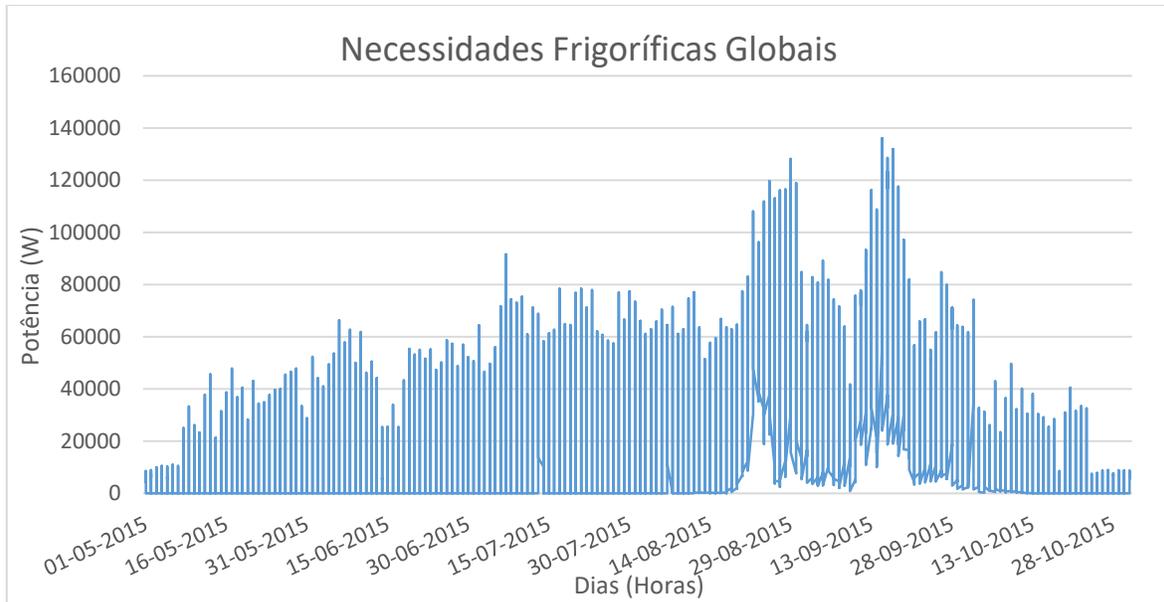


Figura 5.32 – Necessidades frigoríficas globais do chiller

Ao analisar o gráfico observa-se que os picos de potência ocorrem na mesma altura da fermentação entre meados de agosto e finais de setembro. A potência é máxima para as 12 h do dia 15 de setembro, precisamente o mesmo dia em que ocorre o pico de potência da fermentação, sendo de 136 088 W. Tendo o chiller uma potência frigorífica de 149 kW conclui-se que é capaz de satisfazer as necessidades.

Apresenta-se a carga térmica para o dia 15 de setembro na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Cargas térmicas do dia 15 de setembro

Hora	Temperatura ambiente [°C]	Radiação [W/m <sup>2</sup> ]	Maturação [W]	Fermentação [W]	Total [W]
1	19,6	0	0	56382	56382
2	18,9	0	0	54892	54892
3	18,3	0	0	53615	53615
4	17,6	0	0	52126	52126
5	17	0	0	49096	49096
6	17	0	0	50402	50402
7	17,6	112	5043	53754	58797
8	19	393	6668	58626	65294
9	21,3	596	8018	63949	71967
10	24	780	27055	64001	91056
11	26,9	894	40847	81382	122229
12	<b>29,5</b>	<b>948</b>	<b>52923</b>	<b>83165</b>	<b>136088</b>
13	31,7	924	62699	59125	121824
14	33,1	887	68777	62932	131709
15	33,4	763	69347	63562	132909
16	32,7	603	65188	61207	126395
17	31,1	385	56670	56495	113165
18	28,8	145	44949	47772	92721
19	26,4	0	28334	41113	69447
20	24,5	0	19923	35841	55763
21	23	0	13282	31678	44960
22	21,8	0	0	28644	28644
23	20,8	0	0	26115	26115
24	20	0	0	24092	24092

Para que se possa comparar as cargas térmicas entre as cubas de fermentação e as de maturação apresenta-se um gráfico tipo queijo que se mostra na Figura 5.33.

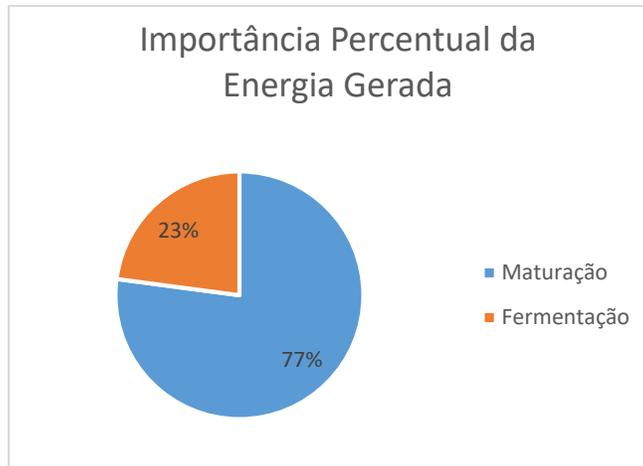


Figura 5.33 – Importância percentual da energia gerada entre a maturação e fermentação

Ao analisar estes resultados verifica-se que a maturação representa em termos de cargas térmicas um valor de 74185 kWh superior a 22036 kWh correspondente à fermentação, num total de 96221 kWh. Pode-se explicar esta diferença pelo facto da necessidade de refrigeração dos reservatórios de maturação ocorrer dois a três meses antes da altura da fermentação, quando as temperaturas ambientes já justificam ligar o chiller, sendo que permanece em funcionamento até finais de outubro quando as temperaturas já estão mais baixas. Em comparação, a fermentação realiza-se durante aproximadamente dois meses em carga parcial. Se se fizer a comparação apenas nos meses de fermentação entre 11 de agosto e 13 de outubro (Figura 5.34) essa diferença diminui bastante. Note-se que a importância da radiação nos reservatórios de maturação é superior do que para os reservatórios de fermentação uma vez que os de maturação estão atestados até ao topo e a área de superfície é superior.

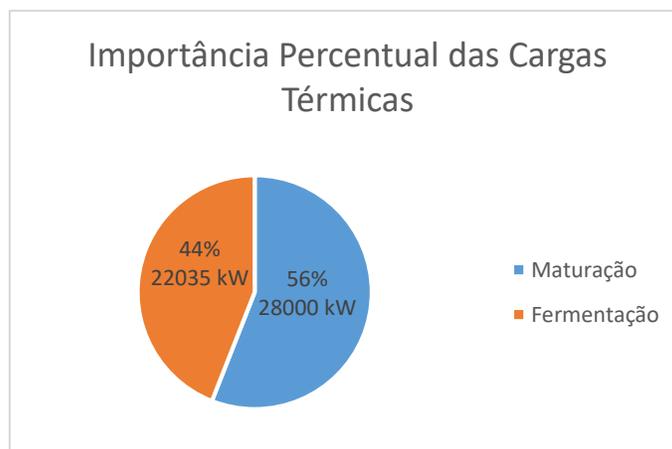


Figura 5.34 – Importância percentual das cargas térmicas entre a maturação e fermentação nos meses de fermentação

## 5.6 Fecho do modelo

A análise realizada neste capítulo permitiu quantificar a carga frigorífica necessária na área de produção da adega representando um total de 96221 kWh nos meses quentes do ano. A energia elétrica consumida é determinada com base no *EER* de 2,58 tendo-se obtido um valor de 37295 kWh. A potência frigorífica máxima que ocorreu às 12 h no dia 15 de setembro contabilizando um total de 136,088 kWh representa 52,75 kWh de energia elétrica consumida. A capacidade de refrigeração do chiller é de 149 kW sendo capaz de satisfazer as necessidades.

De acordo com Nordestgaard, 2011 [33], a refrigeração representa entre 50 a 70 % do consumo energético de uma adega. Nos meses de verão da adega da Ervideira o consumo energético corresponde a cerca de 60 a 70 % do consumo total anual devido às inúmeras atividades que se desenrolam nesta altura. Se se observar as faturas de energia elétrica da adega verifica-se que são consumidos aproximadamente 80787 kWh nessa altura, pelo que o chiller (37295 kWh) corresponde a cerca de 46 % do consumo de energia elétrica. Se juntarmos a este valor o consumo elétrico das bombas 2, 3 e 4 que dizem respeito ao sistema hidráulico, a percentagem poderá ascender a 54 %, contabilizando as horas de funcionamento com base nas necessidades calculadas. De notar que a adega possui ainda a câmara frigorífica que está em funcionamento durante os meses quentes do ano e que pode representar uma grande parcela do consumo elétrico anual. Existem outros equipamentos de elevado consumo como é o caso das bombas de remontagens e de regas, máquinas de lavagem das cubas, sistema de engarrafamento, motores de rotação dos reservatórios vinificadores, tegão de receção das uvas, máquina desengaçadora e duas prensas para além de equipamentos de escritório e cozinha, entre outros.

Tabela 5.23 – Comparação entre a energia ativa descrita nas faturas da adega com a análise realizada

Fatura Adega Ervideira			Análise Energética		
Equipamento	Energia Activa [kWh]	Preço médio do kW	Necessidades Frigoríficas [kWh]	Energia Consumida [kWh]	% da Energia Activa registada nas faturas
Chiller	-	0,13 €	96221	37295	46
Bomba 2	-	0,13 €	-	1148	1,4
Bomba 3	-	0,13 €	-	2591	3,2
Bomba 4	-	0,13 €	-	2591	3,2
<b>Total</b>	80787	0,13 €	-	43625	≈54

Tendo terminado a análise energética, poderá agora fazer-se uma análise qualitativa e quantitativa das medidas de melhoria que se poderão aplicar, no sentido de diminuir o consumo de energia na refrigeração dos mostos e vinhos.

# 6 Medidas de Melhoria

## 6.1 Introdução

Neste capítulo irá ser apresentado medidas que visem a melhoria do sistema de refrigeração da área de produção da adega. Será feita uma análise quantitativa e qualitativa de uma solução proposta e a análise qualitativa de outras três soluções. É necessário que as medidas propostas tenham como objetivo a diminuição das necessidades de refrigeração baixando deste modo o consumo de energia elétrica, mas também a conjugação com os fatores inerentes à qualidade da produção de vinho. É, portanto, necessário conhecer a cadeia de produção para que se possa proceder a uma correta análise das medidas propostas.

Face aos resultados que se obtiveram no capítulo 5 do balanço de energia verifica-se que a grande maioria do calor gerado no período da fermentação provém maioritariamente das reações envolventes no processo. Neste trabalho foi assumido que não há medidas a aplicar para reduzir essa libertação de calor, no entanto verifica-se que o segundo fator mais importante é a energia que é transferida por efeitos de convecção e condução pelas paredes dos reservatórios. Em terceiro lugar com uma percentagem mais diminuída estão os efeitos da radiação.

## 6.2 Medidas de melhoria

Apresenta-se um conjunto de medidas que serão discutidas ao longo deste capítulo e que têm em vista a redução das necessidades energéticas.

### 6.2.1 Cubas de fermentação

Relativamente às cubas de fermentação apresenta-se algumas medidas que podem ser analisadas:

- Isolamento das cubas de fermentação por lã de rocha, poliuretano expandido, celulose projetada e revestimento em chapa de alumínio;
- Isolamento das paredes por espuma de poliestireno ou polietileno com película de alumínio refletora;
- Molhar com água as paredes das cubas;
- Realizar as lavagens das cubas de preferência durante o dia;
- Fazer as remontagens quando as válvulas de passagem da água se encontram abertas.

## 6.2.2 Área de produção e chapa de cobertura

Na área que é destinada à produção existem algumas medidas propostas:

- Fechar a área de produção com parede em alvenaria;
- Fechar a área de produção por chapa sanduiche;
- Aplicação de vinha virgem no lado Este da adega;
- Isolamento da chapa de cobertura com espuma de poliuretano;
- Aplicação de nebulizadores;
- Substituição da iluminação existente por sistemas com leds.

## 6.2.3 Sistema de refrigeração

Ao longo do desenvolvimento do trabalho observou-se que podem ser aplicadas algumas medidas de melhoria no sistema de refrigeração, pelo que se apresentam de seguida:

- Substituição do isolamento das tubagens por espuma de poliestireno ou poliuretano com película de alumínio;
- Substituição ou reparação de válvulas e tubagens;
- Isolamento por espuma de poliestireno com película de alumínio do depósito de inércia;
- Colocação de um segundo depósito de inércia para receção da água a refrigerar;
- Aplicação de bicos nebulizadores no exterior do condensador do *chiller*;
- Colocação de bombas de caudal variável no sistema hidráulico.

## 6.3 Discussão qualitativa das medidas de melhoria

As medidas apresentadas em 6.2 serão alvo de uma discussão em termos qualitativos para uma análise geral da sua importância na redução das necessidades energéticas e quanto aos parâmetros de qualidade da produção.

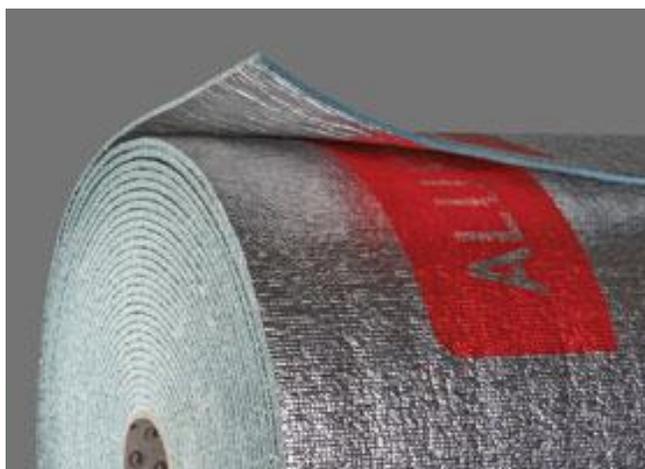
### 6.3.1 Cubas de fermentação

O isolamento das cubas de refrigeração é uma medida que reduz eficazmente as perdas energéticas por condução e convecção uma vez que funciona como uma resistência à transmissão de calor. Existem vários materiais que desempenham uma boa função em termos de isolamento como é o caso da lã de rocha, espuma de poliuretano e celulose projetada. Como se referiu anteriormente, sendo o material das cubas de fermentação em aço inoxidável polido a componente da radiação é, em grande parte refletida pelo que a colocação apenas de isolamento desta natureza necessariamente irá aumentar essa componente. A colocação de isolamento requer este tipo de análise pelo que idealmente se deverá recorrer a um segundo material com boas características refletoras nomeadamente chapa de alumínio.

A Figura 6.1 é um exemplo demonstrativo. Alternativamente poderá recorrer-se à colocação de espuma de poliestireno com película de alumínio como se pode ver na Figura 6.2. Estas soluções para além de reduzirem a transmissão de calor para o interior da cuba e reduzir a energia utilizada no equipamento de frio permite homogeneizar a temperatura reduzindo as oscilações repentinas e melhorando as condições de produção. A primeira solução, embora possa ser mais dispendiosa permite a lavagem exterior das cubas enquanto a segunda poderá causar problemas pela dificuldade de remoção do mosto ou outras sujidades da espuma de isolamento pelo que deverá ter a possibilidade de se remover e voltar a colocar para lavagens quando necessário.



*Figura 6.1 – Cubas de vinho com isolamento e revestimento em chapa de alumínio [33]*



*Figura 6.2 – Espuma de poliestireno com revestimento em alumínio [48]*

A irrigação das cubas de refrigeração se as condições ambientais forem favoráveis permite remover grande parte da energia na evaporação e assim baixar a temperatura do interior da cuba. A variação da entalpia na passagem da fase líquida para a fase gasosa é de aproximadamente 43,9 kJ/mol [49] pelo que parte desta energia é transmitida do interior da cuba. Adegas abertas ao exterior como é o caso da adega da Ervideira favorecem melhores condições de evaporação de modo que esta medida tem maiores resultados. Durante o dia as temperaturas são mais altas e a humidade mais baixa pelo que se deve preferir estas condições para realizar as lavagens dos depósitos pelo exterior, desta forma diminui-se as necessidades de refrigeração pelos equipamentos.

As remontagens, processo utilizado para envolver as partes sólidas às partes líquidas referido no capítulo 2, devem ser realizadas de preferência quando a válvula de passagem de água fria está aberta. A turbulência do mosto no interior do depósito provoca um aumento do coeficiente de convecção no seu interior permitindo uma melhoria na transmissão de calor do mosto para a água fria no permutador, aumentando a eficiência do sistema. [29]

### 6.3.2 Área de produção e chapa de cobertura

Grande parte das adegas são fechadas tentando manter o seu interior menos exposto às oscilações da temperatura exterior. Desta forma se as temperaturas no interior da área de produção tiverem uma menor amplitude a transmissão de calor é reduzida diminuindo as necessidades frigoríficas. Esta medida implica um investimento considerável uma vez que a área de parede que é necessário construir é cerca de 400 m<sup>2</sup> além de colocação de isolamento da chapa de cobertura visto que a temperatura no interior tenderia a aumentar por efeitos da radiação.

Verificou-se que a radiação que provem do lado Este da adega é considerável pelo que a aplicação de vinha virgem vertical poderá ser uma boa solução para reduzir em grande parte a radiação direta. A vinha ficará sustente numa rede metálica instalada verticalmente, apoiada na estrutura da adega. Uma desvantagem desta medida é que só será efetivamente eficaz quando a vinha crescer e ficar com uma densidade tal que impeça a radiação de entrar, o que pode demorar mais de dois anos.

O isolamento da chapa de cobertura com espuma de poliuretano projetada é uma medida fácil de aplicar e que poderá vir a reduzir a maior parte dos efeitos da radiação que foram calculados no capítulo do balanço de energia. Para além de ter o efeito direto na redução da componente de radiação incidente nas cubas, poderá também reduzir a temperatura no interior da adega pois a radiação que é dissipada no ar ambiente perde importância.

Os nebulizadores têm como função evaporar água através de injetores a uma determinada pressão e temperatura. A mudança de fase da água do estado líquido para o estado gasoso é um processo endotérmico, logo absorve calor do ar onde se encontra, resfriando-o. Este processo baseia-se no princípio da humificação adiabática, que se aumentar a humidade relativa a temperatura de bolbo húmido mantém-se constante, mas a temperatura de bolbo seco vai diminuir [32]. A aplicação deste tipo de equipamento pode vir a reduzir a temperatura em alguns graus e

essa diminuição reduz o calor transmitido para o interior das cubas nas horas de temperaturas mais altas reduzindo a utilização do *chiller*. Na Figura 6.3 pode-se verificar o funcionamento de um injetor.



Figura 6.3 – Funcionamento de um injetor [50]

A colocação deste equipamento seria a uma altura razoável, acima das cubas de fermentação. O único inconveniente desta utilização é o elevado gasto de água.

A iluminação da nave em lâmpadas fluorescentes economizadoras, pode ser substituída por iluminação de leds. Geralmente estas lâmpadas suportam melhor uma frequência grande de ligar e desligar, têm um tempo de vida cerca de 50 vezes mais do que lâmpadas fluorescentes (dependendo do modelo), consomem cerca de 20% menos e atingem o pico de luminosidade instantaneamente não necessitando de aquecimento. Apesar do investimento ser grande compensa ao longo do tempo.

### 6.3.3 Sistema de refrigeração

No que diz respeito ao sistema de refrigeração são propostas algumas medidas que poderão reduzir a utilização do sistema de frio e potenciar uma maior eficiência energética.

Uma vez que as tubagens se encontram já um pouco deterioradas recomenda-se a sua substituição por isolamento de espuma de poliestireno com película de alumínio. Reduzirá os efeitos de radiação nas tubagens e irá melhorar as perdas por convecção e condução.

O sistema deve ter manutenção frequente para verificação das boas condições de funcionamento. A substituição de tubagens e das válvulas quando estas já não se encontrarem nas melhores condições vem reduzir as perdas de carga e fugas e reduzir o risco de paragens devido a avarias.

O depósito de inércia que é discutido no capítulo da caracterização do sistema está exposto à temperatura ambiente e à radiação direta do sol que vem de cima. A temperatura da água no seu interior está, na altura do seu funcionamento, abaixo da temperatura ambiente e com alguma turbulência devido à carga e descarga no seu interior. As perdas energéticas que ocorrem através das suas paredes, nomeadamente por convecção, condução e radiação poderão ser diminuídas em grande parte pela colocação de isolamento de espuma de poliestireno com película de alumínio.

Uma medida que pode ser discutida num futuro trabalho é a colocação de um segundo depósito de inércia na receção da água que vem do final da linha de distribuição ao longo dos depósitos. A água que chega da distribuição está a uma temperatura mais alta que a água refrigerada, pelo que o contacto entre as duas e a sua agitação pode dificultar a estratificação da

água refrigerada com a água que retorna do sistema reduzindo a eficiência do sistema. Esta medida poderá vir a ter efeitos benéficos de acordo com Nordestgaard (2011) [33].

A aplicação de nebulizadores no exterior do condensador visa resfriar o ar ambiente que troca energia no condensador permitindo a condensação da água que se encontra no seu interior e melhorando a eficiência da troca. Esta aplicação tem o inconveniente do gasto de água. Na Figura 6.4 está o princípio de funcionamento desta aplicação.

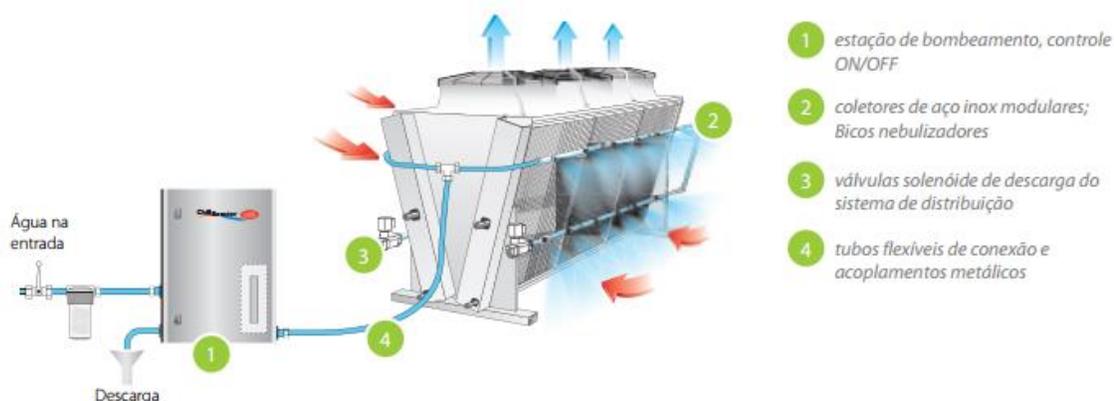


Figura 6.4 - Princípio de funcionamento de nebulizadores no condensador do chiller [51]

A colocação de bombas de caudal variável ou de variadores de velocidade nas bombas existentes pode ter grandes benefícios para todo o sistema de refrigeração. O controlador deteta a diferença de pressão que ocorre ao longo do sistema devido a perdas de carga nas curvas e paredes das tubagens, nas válvulas e nas serpentinas dos permutadores, e converte a frequência da rede para outra frequência controlando assim a velocidade do motor da bomba. Resulta na redução da potência do motor que é equivalente ao cubo da redução da velocidade [34]. Os variadores de velocidade para além de reduzirem a energia utilizada apresentam outros benefícios como arranque suave, paragem controlada sem golpes de ariete, redução do risco de avarias mecânicas e um melhor equilíbrio no controlo do caudal que é importante para a eficiência da transmissão de calor nos permutadores [34].

### 6.3.4 Resumo de soluções

Para que se possa compreender as soluções apresentadas anteriormente de forma clara é apresentado um quadro (Tabela 6.1) onde se expõe as razões da escolha das soluções a quantificar. A coluna mais à esquerda representa as soluções apresentadas anteriormente, nas colunas seguintes a redução presumível que se obtém, o custo do investimento/energia elétrica utilizada e o balanço final serão apresentadas com base numa escala de pouco favorável (+) a muito favorável (+++++) à implementação, consoante a opinião do autor face ao estudo realizado.

Quanto maior ou menor o número de sinais positivos (+) mais favorável ou desfavorável à sua implementação, respetivamente.

*Tabela 6.1 – Resumo de soluções e razões a implementar*

<b>Soluções</b>	<b>Redução do consumo</b>	<b>Custo do investimento/energia elétrica utilizada</b>	<b>Balanço Final</b>
<b>Isolamento das cubas e forro em chapa de alumínio</b>	+++++	++	++++
<b>Isolamento das cubas com espuma de poliuretano com revestimento em folha de alumínio</b>	+++++	++++	+++++
<b>Irrigação das cubas</b>	++	+++	++
<b>Realizar as remontagens quando as válvulas se encontram abertas</b>	++	++	++
<b>Fecho da adega ao exterior</b>	+++	+	++
<b>Aplicação de vinha virgem no lado Este</b>	+++	++++	++++
<b>Isolamento da chapa de cobertura</b>	+	++	++
<b>Bicos nebulizadores na área de produção</b>	++	++	++
<b>Iluminação em leds</b>	+++	+	++
<b>Isolamento das tubagens</b>	+++	++++	++++
<b>Manutenção frequente do sistema</b>	+++	++	+++
<b>Isolamento do depósito pulmão</b>	+++	++++	++++
<b>Depósito de receção da água de retorno</b>	++	+	++
<b>Bicos nebulizadores no chiller</b>	++	++	++
<b>Bombas de caudal variável ou variadores de velocidade</b>	++++	+	+++

NA – Não aplicável

Este quadro permite entender as razões da escolha das medidas que se irão quantificar em 6.4. De notar que existe uma condicionante relativamente ao consumo de água para as medidas, irrigação das cubas, bicos nebulizadores na área de produção e bicos nebulizadores no chiller.

## 6.4 Discussão quantitativa

Após a discussão qualitativa das medidas propostas no início deste capítulo, irá discutir-se em termos quantitativos algumas medidas, nomeadamente a aplicação de isolamento térmico nas cubas de fermentação, a aplicação de vinha virgem no lado Este da adega e o isolamento da chapa de cobertura com espuma de poliuretano. Estas foram as medidas escolhidas porque se perspetivou o maior decréscimo de perdas com um investimento relativamente baixo comparando com outras medidas apresentadas anteriormente. Apresentar-se-á quais os resultados em termos de redução das necessidades de refrigeração dessas aplicações.

### 6.4.1 Isolamento das cubas de fermentação

Para este estudo irá considerar-se a aplicação de 10 mm de isolamento em espuma de poliuretano em rolo revestida com filme de alumínio com uma condutividade térmica de 0,02 W/m.°C. No livro do Holman de transmissão de calor [40] verifica-se que a espuma de poliuretano tem uma condutividade térmica de 0,017 W/m.°C mas após uma pesquisa sobre os materiais existentes no mercado concluiu-se que têm uma condutividade entre 0,017 e 0,03 W/m.°C pelo que se considerou 0,02 W/m.°C. Considerou-se, tal como no capítulo do balanço de energia que os vinhos tintos fermentam a 23 °C, os brancos e os rosés a 15 °C.

A metodologia de cálculo, de seguida apresentada, é a mesma utilizada no capítulo do balanço de energia na análise do fluxo de calor, mas, neste caso com a utilização de isolamento.

#### **Metodologia de cálculo para as cubas de fermentação**

Em primeiro lugar calculou-se os coeficientes de convecção com base numa temperatura de parede arbitrária, calculou-se o fluxo de calor que atravessa as diferentes paredes dos reservatórios com isolamento e ajustou-se o valor das temperaturas nas paredes com recurso a uma sucessão de iteradas. Por fim, tendo as temperaturas aproximadas das paredes para uma temperatura média exterior determinou-se os coeficientes de convecção e por fim o fluxo de calor para as cubas de fermentação de brancos, tintos e por fim das cubas de maturação. Na Tabela 6.2 mostra-se as temperaturas usadas no cálculo dos coeficientes de convecção e na Tabela 6.3 os coeficientes de convecção para a situação da temperatura ambiente acima da de fermentação. Caso esse, em que é transmitido calor para o interior dos reservatórios. As Tabela 6.4 e Tabela 6.5 representam as temperaturas e os coeficientes de convecção, respetivamente, para o caso em que há dissipação de energia do interior das cubas para o meio ambiente.

Tabela 6.2 – Temperaturas usadas após o processo de iteração para a situação de temperatura ambiente acima da desejada na fermentação

Designação das Cubas	Temperatura A	Temperatura B	Temperatura C	Temperatura D
25cv	28,5	23,122	23,116	23,123*
15cv	28,5	23,128	23,132	23,13*
10cv	26	15,235	15,25	15,237*
5cv	26	15,24	15,24	15,244*
2,5cv	28,5(tintos)/26(brancos)	23,114(tintos)/15,22(brancos)	23,116(tintos)/15,224(brancos)	23,116(tintos)/15,222(brancos)*
10I	28,5	23,089	23,133	23,09*
10v	28,5	23,081	-	23,08**

A – Ambiente na área de produção [°C]; B – Na parede interior simples [°C]; C – Na parede interior da camisa [°C];

D – Na parede exterior simples [°C]

\* Temperatura utilizada no fundo plano

\*\* Temperatura utilizada tanto para o fundo plano como para a parede cilíndrica exterior

Tabela 6.3 – Tabela dos coeficientes de convecção usados para a situação de temperatura ambiente acima da desejada na fermentação

		Coeficientes de Convecção pela designação atribuída nas figuras 5.9 e 5.10 do capítulo do balanço de energia [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]										
Designação das cubas		$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$h_9$	$h_{10}$	$h_{11}$
25cv		70,6	83,85	114,7	7,9	19	3,1	-	-	-	-	-
15cv		72,2	73	116,7	12,7	17,8	3,1	-	-	-	-	-
10cv		74,9	76,3	121,3	9	14,7	4	0,76	-	-	-	-
5cv		76,2	76,3	122,8	11,7	12,4	4	0,83	-	-	-	-
2,5cv	$M_t$	85	82,2	112,3	18,8	16,1	3,1	-	-	-	-	-
	$M_{b\&r}$	88,4	85,5	119,1	18,8	16,1	4	0,88	-	-	-	-
10I		120,2	73,3	103,3	175,5	20,6	3,1	-	-	-	-	-
10V		-	-	-	-	-	-	-	87,3	87,3	3,6	2

Tabela 6.4 - Temperaturas usadas após o processo de iteração para a situação de temperatura ambiente inferior á desejada na fermentação

Designação das Cubas	Temperatura A	Temperatura B	Temperatura C	Temperatura D
25cv	17	22,875	22,5	22,874*
15cv	17	22,867	22,5	22,865*
2,5cv	17	22,88	22,5	22,878*
10I	17	22,906	22,5	22,904*
10v	17	22,848	-	22,845**

A – Ambiente na área de produção [°C]; B – Na parede interior simples [°C]; C – Na parede interior da camisa [°C];

D – Na parede exterior simples [°C]

\* Temperatura utilizada no fundo plano

\*\* Temperatura utilizada tanto para o fundo plano como para a parede cilíndrica exterior

Tabela 6.5 - Tabela dos coeficientes de convecção usados para a situação de temperatura ambiente inferior á desejada na fermentação

		Coeficientes de Convecção pela designação atribuída nas figuras 5.9 e 5.10 do capítulo do balanço de energia [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]										
Designação das cubas		$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$	$h_9$	$h_{10}$	$h_{11}$
25cv		72,1	115	117,2	6,6	15,7	3,3	-	-	-	-	-
15cv		74,1	115	119,8	10,5	14,7	3,3	-	-	-	-	-
2,5cv	$M_t$	87	115,4	115,6	15,7	13,4	3,3	-	-	-	-	-
10I		123,3	115	106,7	144,6	17	3,3	-	-	-	-	-
10V		-	-	-	-	-	-	-	109,2	109,2	2,8	2,8

O fluxo de calor final é dado pela lei de Fourier:

$$Q = -k \times A \times \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6.40)$$

Sendo que se aplica uma camada adicional de isolante, onde a espessura se representa por  $\Delta x_5$  que são 10 mm e o coeficiente de condutividade térmica por  $k_{isol}$  que é 0,02 W/m.°C.

A Tabela 6.6 é um quadro que resume a metodologia de cálculo do fluxo de calor e os respetivos coeficientes de convecção utilizados.

Tabela 6.6 – Dados relativos ao cálculo do fluxo de calor das cubas e respectivos coeficientes de convecção

	Coeficiente de convecção interior	Coeficiente de convecção exterior	Temperatura interior [°C]		Temperatura exterior	Fórmula final do fluxo de calor
	$h_{int}$	$h_{ext}$	<i>Mb&amp;r</i>	<i>Mt</i>		$\frac{q}{A} =$
$Q_1$	$h_1$	$h_4$	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_4} + \frac{\Delta x_5}{k_{isol}} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_1}}$
$Q_2$	$h_2$	$h_5$	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_5} + \frac{\Delta x_5}{k_{isol}} + \frac{\Delta x_2}{k_p} + \frac{\Delta x_3}{k_a} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_2}}$
$Q_3$	$h_3$	$h_6$	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_6} + \frac{\Delta x_5}{k_{isol}} + \frac{\Delta x_1}{k_p} + \frac{1}{h_3}}$
$Q_4^*$	-	$h_7$	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$h_7 \times (T_{ext} - T_{int})$
$Q_5$	$h_8$	$h_{10}$	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_{10}} + \frac{\Delta x_5}{k_{isol}} + \frac{\Delta x_4}{k_p} + \frac{1}{h_8}}$
$Q_6$	$h_9$	$h_{10}$	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\frac{(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{h_{10}} + \frac{\Delta x_5}{k_{isol}} + \frac{\Delta x_4}{k_p} + \frac{1}{h_9}}$
$Q_7$	-	-	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\approx 0^{**}$
$Q_8$	-	-	15	23	Perfil climático (dados do INETI)	$\approx 0^{***}$

\* O calor  $Q_4$  foi calculado apenas para mostos brancos uma vez que o mosto está diretamente em contacto com o ar ambiente

\*\* É considerado nulo uma vez que os mostos tintos têm uma camada de películas, caules e folhas que lhes confere isolamento. Essa camada pode atingir 20 cm.

\*\*\* É considerado nulo pois a camisa de refrigeração dos vinificadores possui isolamento térmico de lã de rocha.

## Resultados da fermentação

Os resultados podem ser analisados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Tabela de comparação de resultados da aplicação de isolamento nas cubas

	<b>Carga térmica transmitida às cubas por condução e convecção [kWh]</b>	<b>Carga térmica total dissipada [kWh]</b>
<b>Sem isolamento</b>	7136	-2377
<b>Com isolamento</b>	1620	-493
<b>Diferença percentual (%)</b>	77,3	79,2

Como se observa na Tabela 6.7 a aplicação de isolante reduz a transmissão de calor por efeitos de condução e convecção em mais de 77 % enquanto reduz também mais de 79 % da dissipação de energia representando uma economia de energia frigorífica de 5516 kWh.

### Metodologia de cálculo para as cubas de maturação

Para as cubas de maturação os coeficientes de convecção foram calculados utilizando a mesma metodologia descrita na secção anterior, embora se tenha considerado que a temperatura interior se deve manter nos 20 °C. Não é necessário calcular a dissipação de energia uma vez que a descida de temperatura não é prejudicial aos vinhos. Neste caso o calor é transmitido por toda a área de superfície das cubas por serem atestadas na capacidade máxima.

Na Tabela 6.8 apresenta-se os coeficientes de convecção utilizados

Tabela 6.8 – Tabela dos coeficientes de convecção usados para as cubas de maturação

<b>Designação das cubas</b>	<b>Coeficientes de Convecção pela designação atribuída na figura 5.25 do capítulo do balanço de energia [<math>W/m^2 \cdot ^\circ C</math>]</b>							
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$h_8$
<b>25cv</b>	73,7	60	99,7	16,3	6	19,6	2,7	0,5
<b>15cv</b>	75,6	60	99,7	16,8	9,1	18,3	2,7	0,6
<b>10cv</b>	74,3	60	99,7	18,5	6,6	15,1	2,7	0,6
<b>5cv</b>	75,3	60	99,7	20,3	8,1	12,7	2,7	0,7
<b>2,5cv</b>	76,9	60	99,7	21,3	12,5	16,5	2,7	0,7

## Resultados na maturação

Os resultados podem ser analisados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Tabela de comparação de resultados da aplicação de isolamento nas cubas

	<b>Carga térmica total transmitida às cubas [kWh]</b>
<b>Sem isolamento</b>	53014
<b>Com isolamento</b>	11461
<b>Diferença percentual (%)</b>	78,4

Como se observa na tabela a aplicação de isolante reduz a transmissão de calor por efeitos de condução e convecção em cerca de 78 %, representando uma economia de energia frigorífica de 41553 kWh.

### 6.4.1.1 Resultados finais do conjunto das cubas de fermentação e maturação

Finalmente apresenta-se os resultados finais que se obtêm com a aplicação de isolamento das cubas de fermentação e maturação. Na Tabela 6.10 pode-se verificar os resultados da carga térmica total incluindo o calor proveniente da radiação e fermentação alcoólica bem como a economia de energia frigorífica e elétrica, esta última com base no *EER* de 2,58.

Tabela 6.10 – Carga térmica total e consumo elétrico do chiller com a aplicação de isolamento térmico

	<b>Carga térmica total [kWh]</b>		<b>Total [kWh]</b>	<b>Consumo elétrico Total [kWh]</b>
	Fermentação	Maturação		
<b>Sem isolamento</b>	22036	74185	96221	37295
<b>Com isolamento</b>	16261	32632	48893	18951
<b>Economia de energia frigorífica</b>	5775	41553	47328	18344

Com base nas faturas de energia elétrica da adega o preço médio do kWh é de 0,13€ e considerando um consumo de energia elétrica de 18344 kWh representa uma economia anual aproximada a 2385 €. A despesa do ano de 2015 em energia elétrica foi de cerca de 23500€ pelo que esta economia de energia representa uma poupança de cerca de 10 %.

Observe-se ainda o gráfico da Figura 6.5 que mostra a variação das necessidades frigoríficas ao longo dos meses da fermentação após a aplicação desta medida. Verifica-se que o pico continua a ser para o dia 15 de setembro representando uma potência de 84,9 kW para as 12 h.

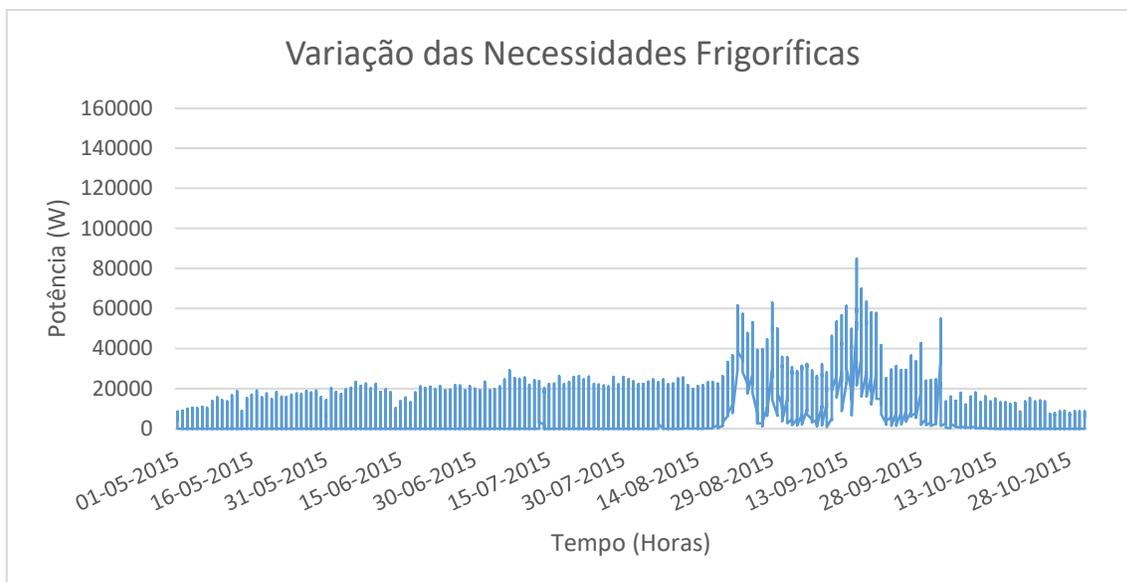


Figura 6.5 – Gráfico da variação da potência frigorífica requerida com a aplicação de isolamento

Fazendo a comparação do gráfico da Figura 6.5 com o gráfico da Figura 5.32 do capítulo do balanço de energia, que se encontram á mesma escala, é possível observar-se a diferença que esta medida causou na redução da energia transmitida.

#### 6.4.2 Aplicação de vinha virgem no lado este da adega

Apesar da vinha ter um período de crescimento que pode ascender a dois anos para ganhar um nível de densidade que cubra toda a radiação incidente, neste estudo irá considerar-se os resultados de uma densidade de 95 % de cobertura vegetal, pelo que os efeitos durante o tempo de crescimento serão desprezados.

Com base nos dados sobre a radiação global e difusa horizontal, disponíveis através do INETI (2006) para a região de Évora os resultados são obtidos reduzindo em 95% a soma dos dois tipos de radiação. Os cálculos foram obtidos com recurso do *Microsoft Excel*.

Esta medida diminuiu em 95 % a energia transmitida por radiação direta, de 273 kWh para 14 kWh, representando uma economia de energia frigorífica de 259 kWh e de energia elétrica de 100 kWh.

Embora esta componente da radiação apenas represente 0,3 % da energia total transmitida ao sistema, poderá ter efeitos benéficos na diminuição da temperatura do interior da adega.

### 6.4.3 Aplicação de espuma de poliuretano no inferior da chapa de cobertura

A escolha da aplicação no lado inferior da chapa é motivada pela redução do seu desgaste devido às condições climáticas adversas. Deste modo, preserva-se a sua máxima duração reduzindo a frequência de manutenção do isolamento. Esta espuma pode ser diretamente aplicada por meio de injetores próprios, é armazenada no estado líquido e quando é aplicada, o contacto com o ar concede-lhe um aumento substancial de volume.

Foi considerada uma espuma com uma condutividade térmica de 0,017 W/m.°C [40] e uma espessura de 120 mm.

Para o cálculo dos resultados da aplicação desta medida, em primeiro lugar determinou-se a temperatura da parte inferior da espuma de poliuretano (superfície inferior B, na Figura 6.6) através do cálculo do fluxo de calor pela aplicação da lei de Fourier (Equação 6.1). A temperatura da chapa na superfície superior (superfície superior de A, na Figura 6.6) já foi determinada no capítulo do balanço de energia. Com base na temperatura da superfície inferior de B determinou-se quais os efeitos da radiação nesta nova aplicação.



Figura 6.6 - Esquema do isolamento na chapa

Em baixo na equação 6.2 verifica-se a aplicação da lei de Fourier para este caso:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_A - T_{int}}{\frac{S_A}{k_A} + \frac{S_B}{k_B} + \frac{1}{h_i}} \quad (6.2)$$

A legenda da equação 6.1 é a seguinte:

$Q$  - Fluxo de calor

$A$  - Área da superfície

$T_A$  - Temperatura da chapa

$T_{int}$  - Temperatura ambiente interior, considerada igual à exterior

$S_A$  - Espessura da chapa

$S_B$  - Espessura do isolamento

$k_A$  – Condutividade térmica da chapa

$k_B$  – Condutividade térmica do isolamento

$h_i$  – Coeficiente de convecção inferior

Tal como se pode verificar no capítulo do balanço de energia o coeficiente de convecção na superfície inferior da chapa é  $0,05 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$  devido às grandes dimensões da chapa. Assim o fluxo de calor é dado por:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_A - T_{int}}{\frac{0,0012}{16} + \frac{0,12}{0,017} + \frac{1}{0,05}} \quad (6.3)$$

O resultado do fluxo de calor permite que se descubra a temperatura na superfície inferior do isolamento pela seguinte equação:

$$T_{Binf} = T_A - \frac{Q}{A} \times \left( \frac{0,0012}{16} + \frac{0,12}{0,017} \right) \quad (6.4)$$

Os resultados foram obtidos com o auxílio do software *Microsoft Excel* para cada hora desde Maio a Outubro representando um total aproximadamente de 19213 kWh para as cubas de fermentação e maturação. Sem a aplicação do isolamento o total da energia transferida é de 21967 kWh o que representa um decréscimo de 12 % no calor transferido por efeitos de radiação da chapa de cobertura. A economia anual de energia elétrica é estimada em 1067 kWh e uma poupança de apenas 139 €, considerando o preço médio do kWh de 0,13€.

A redução da temperatura da chapa é mostrada na Tabela 6.11 para o dia 15 de Setembro.

Tabela 6.11 – Variação da temperatura do isolamento no dia 15 de Setembro

<b>Horas</b>	<b>Temperatura da chapa sem isolamento [°C]</b>	<b>Temperatura da superfície inferior do isolamento [°C]</b>
<b>1</b>	19,6	19,6
<b>2</b>	18,9	18,9
<b>3</b>	18,3	18,3
<b>4</b>	17,6	17,6
<b>5</b>	17	17
<b>6</b>	18,8	18,3
<b>7</b>	30,9	27,4
<b>8</b>	39,5	34,2
<b>9</b>	46,9	40,2
<b>10</b>	54,0	46,2
<b>11</b>	57,0	49,2
<b>12</b>	60,4	52,4
<b>13</b>	60,7	53,1
<b>14</b>	58,7	52,0
<b>15</b>	53,4	48,2
<b>16</b>	41,6	39,3
<b>17</b>	33,1	32,5
<b>18</b>	28,8	28,8
<b>19</b>	26,4	26,4
<b>20</b>	24,5	24,5
<b>21</b>	23	23
<b>22</b>	21,8	21,8
<b>23</b>	20,8	20,8
<b>24</b>	20	20

Estes resultados mostram que esta medida poderá não ser viável face ao custo do investimento. Para se atingir um maior decréscimo da energia irradiada deve-se aumentar a espessura do isolamento para dimensões que se tornam incontroláveis.

## 6.5 Conclusões quanto às medidas de melhoria

Com base na análise das medidas de melhoria conclui-se que a medida que apresenta uma maior economia de energia e conseqüentemente do preço da fatura é o isolamento das cubas. Esta medida para além de representar uma economia de 2385 € apenas através do decréscimo da energia ativa é benéfica para a produção dos vinhos uma vez que diminui consideravelmente a amplitude e oscilações térmicas dos mostos e vinhos. Quanto mais estável a temperatura melhor será a sua produção.

Além das medidas apresentadas, poderá considerar-se a implementação de algumas medidas discutidas qualitativamente como é o caso da aplicação de variadores de velocidade nas bombas de distribuição da água no sistema hidráulico, poderá ter efeitos muito significativos dado o seu tempo de funcionamento.

# 7 Conclusões

## 7.1 Considerações finais

O estudo dos processos envolvidos na produção vinícola permitiu reunir os parâmetros necessários para uma avaliação energética coerente. Os resultados obtidos da geração de calor na fermentação utilizando a metodologia apresentada por El Haloui foram ao encontro dos resultados teóricos apresentados na secção 3.8 e demonstrou-se a importância da análise deste parâmetro na avaliação das necessidades energéticas.

Verificou-se que o processo de fermentação tem um grande peso nas necessidades frigoríficas globais da adega, representando uma despesa substancial em termos de energia elétrica. No entanto uma vez que a carga é parcial e distribuída ao longo do tempo o pico de potência não chega a ultrapassar a potência máxima frigorífica do chiller. Esta conclusão pode variar com a quantidade de uvas produzidas de ano para ano e com o número de cubas a fermentar ao mesmo tempo. A avaliação das condições ambientais na transmissão de calor para as cubas permitiu determinar a carga térmica transmitida às cubas de fermentação e maturação e verificou-se que a maturação representa o maior consumo de energia devido ao período de tempo respetivo ser bastante superior ao período da fermentação. Os reservatórios de maturação encontram-se completamente atestados durante cerca de um ano e os de fermentação apenas durante alguns dias. A transmissão de calor por condução e convecção tem efeitos superiores nos vinhos brancos do que para os vinhos tintos donde a fermentação tem um peso maior. As necessidades de refrigeração na zona de produção representam cerca de 46 % do total da energia despendida nos meses quentes do ano desde Maio a Outubro. Incluindo uma estimativa da utilização das bombas de distribuição de água essa percentagem pode crescer até aos 54 %.

Existem várias medidas que poderão beneficiar a empresa, entre elas destacam-se a aplicação de isolamento térmico em poliuretano nas cubas de fermentação e maturação, aplicação de isolante na chapa de cobertura e de vinha virgem no lado este para reduzir a radiação direta nas cubas. No entanto a medida mais eficaz é a aplicação de isolamento em espuma de poliuretano nas cubas. Esta medida representa uma redução de energia ativa de 18344 kWh que corresponde a uma diminuição de quase 50 % e de 2385 € em termos de poupança.

Os resultados obtidos neste trabalho poderão ter um erro associado em comparação com os resultados práticos. Este erro poderá ocorrer devido à diferença de temperatura ambiente uma vez que foram utilizados dados das temperaturas da cidade de Évora e não da localização exata da adega.

Com a variação da carga dos reservatórios estes resultados poderão ser bastante diferentes, quanto maior a produção e utilização dos depósitos maior serão as perdas e maior serão os ganhos com a aplicação das medidas de melhoria enquanto se a produção diminuir naturalmente ocorrerá o inverso.

Este trabalho poderá ainda servir como guia para avaliações energéticas futuras em adegas abertas ao exterior. Poderá complementar uma análise das necessidades de refrigeração para a escolha dos equipamentos de refrigeração mais adequados. Com a apresentação de gráficos e tabelas da potência transmitida por radiação, condução e convecção é possível entender a importância de cada parcela e será importante quando se tiver que optar por uma adega aberta ou fechada.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Futuramente sugere-se a realização dos seguintes trabalhos:

- Estudo do sistema hidráulico no que diz respeito a perdas de carga nas tubagens e perdas energéticas. Avaliação da distribuição da rede e de soluções alternativas bem como a aplicação de variadores de velocidade nas bombas de distribuição.
- Estudo da temperatura adequada de refrigeração da água no chiller para um rendimento máximo. Esta temperatura varia com as condições ambientais e com a temperatura da água de retorno.
- Avaliação das perdas energéticas no depósito pulmão e propostas de alterações para um sistema com menos perdas.
- Estudar em termos energéticos a diferença entre uma adega fechada e uma aberta nas mesmas condições e concluir quanto às vantagens e desvantagens de cada opção.
- Avaliar a libertação de calor pelo artigo "The Prediction Of Fermentation Behaviour By a Kinetic Model", (1978) de Roger Boulton e comparar com os resultados obtidos pelo modelo em 3.9.

# Referências

- [1] M. Andrade, “Enologia, Noções de Viticultura Prática,” 2016.
- [2] A. D. Cardoso, *O Vinho, da Uva à Garrafa*, Âncora Edi. 2007.
- [3] M. Andrade, *Enologia Composição e Vinificações*. 2016.
- [4] H. Wansbrough, “Chemistry in winemaking,” pp. 1–12.
- [5] J. Tronchoni, A. Gamero, F. N. Arroyo-López, E. Barrio, and A. Querol, “International Journal of Food Microbiology Differences in the glucose and fructose consumption profiles in diverse *Saccharomyces* wine species and their hybrids during grape juice fermentation,” *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 134, no. 3, pp. 237–243, 2009.
- [6] G. Amerine, M. A.; Thoukis, “The Glucose-Fructose Ratio of California Grapes.” 1958.
- [7] G. M. Fleet, *Wine Microbiology and Biotechnology*. 1993.
- [8] A. L. S. Silva, “Gelo Seco,” *InfoEscola*. [Online]. Available: <http://www.infoescola.com/compostos-quimicos/gelo-seco/>. [Accessed: 15-Aug-2016].
- [9] “Fungos (leveduras) - *Saccharomyces*.” [Online]. Available: <http://www.quali.pt/microbiologia/582-fungos-leveduras-saccharomyces>. [Accessed: 29-Apr-2016].
- [10] “Mitochondria.” [Online]. Available: <http://biology.tutorvista.com/animal-and-plant-cells/mitochondria.html>. [Accessed: 27-Apr-2016].
- [11] N. G. Hopkins, William; P. A. Huner, *Introduction to Plant Physiology*. 2008.
- [12] “Célula Eucariótica.” [Online]. Available: <http://simbiotica.org/celula.htm>. [Accessed: 29-Apr-2016].
- [13] J. M. Sablayrolles, “Control of alcoholic fermentation in winemaking : Current situation and prospect,” *Food Res. Int.*, vol. 42, no. 4, pp. 418–424, 2009.
- [14] A. E. Miller, “An Introduction on Low Temperature Fermentation in Wine Production,” 2016.
- [15] M. Andrade, “Enologia Estabilização e Engarrafamento,” 2016.
- [16] J. Carvalheira, “Filtração dos Vinhos.”
- [17] M. da C. Dantas and M. D. Ramalho, “Calor da reacção,” in *Jogo de Partículas Física e Química 11º Ano*, TEXTO, Ed. Lisboa, 2009.
- [18] G. Cooper, “Metabolic Energy,” in *The Cell: A Molecular Approach*, 2nd editio., (MA), Sunderland, 2000.
- [19] L. Spohrer, Christopher; Breitenbuecher, Christina; Brar, “Oxidation-Reduction Reactions.” [Online]. Available: [http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Analytical\\_Chemistry/Electrochemistry/Redox\\_Chemistry/Oxidation-Reduction\\_Reactions](http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Redox_Chemistry/Oxidation-Reduction_Reactions).
- [20] T. Lui, “Photosynthesis overview.” [Online]. Available: [http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Biological\\_Chemistry/Photosynthesis/Photosynthesis\\_overview](http://chemwiki.ucdavis.edu/Core/Biological_Chemistry/Photosynthesis/Photosynthesis_overview).
- [21] O. Matias and P. Martins, *Biologia 10*. Areal Editores.
- [22] P. L. O. Volpe, “Química nova, 20(5) (1997),” vol. 20, no. 5, 1997.
- [23] U. Von Stockar, T. Maskow, J. Liu, I. W. Marison, R. Pati, and C. U. M, “Thermodynamics of microbial growth and metabolism : An analysis of the current situation,” vol. 121, pp. 517–

- 533, 2006.
- [24] K. M. Dombek and L. Ingram, "Ethanol Production during Batch Fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* : Changes in Glycolytic Enzymes and Internal pH," vol. 53, no. 6, pp. 1286–1291, 1987.
- [25] S. L. Berg JM, Tymoczko JL, "Glycolysis Is an Energy-Conversion Pathway in Many Organisms," in *Biochemistry*, 5th editio., New York: W H Freeman, 2002.
- [26] S. Yonsel, G. Ç. Bülbül-, M. Köni, and L. Dagasan, "Monitoring of Yeast Metabolism with Calorimetry," vol. i, no. 4, pp. 395–408, 2007.
- [27] M. I. Zenteno, J. R. Pérez-correa, C. A. Gelmi, and E. Agosin, "Modeling temperature gradients in wine fermentation tanks," *J. Food Eng.*, vol. 99, no. 1, pp. 40–48, 2010.
- [28] R. Boulton, "The Prediction of Fermentation Behavior by a Kinetic Model," *Am. J. Vitic. Enol.*, 1979.
- [29] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Beverages," in *2006 ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI)*, ASHRAE, 2006.
- [30] N. El Haloui, D. Picque, and G. Corrieu, "Alcoholic Fermentation in Winemaking : On-Line Measurement of Density and Carbon Dioxide Evolution," vol. 8, pp. 17–30, 1988.
- [31] A. López and P. Secanell, "A simple mathematical empirical model for estimating the rate of heat generation during fermentation in white-wine making Mod61e mathématique empirique simple pour l' 6valuation du taux de production de chaleur au cours de la fermentation de raisins blan," no. 5, pp. 276–280, 1992.
- [32] P. P. de Oliveira, *Fundamentos de Termodinâmica Aplicada*. LIDEL - Edições Técnicas, Lda, 2012.
- [33] S. Nordestgaard, "Improving Winery Refrigeration Efficiency," 2011.
- [34] American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Hydronic heating and cooling system design," in *2008 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI)*, I. ASHRAE, Ed. 2008.
- [35] R. B. Sadio, "Comparação Técnica da Conceção / Solução de Projetos de Climatização para um Hotel Rural," INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, 2014.
- [36] S. de B. Araújo, "Apontamentos de Máquinas Hidráulicas," 1997.
- [37] DAIKIN, "Qual o significado de COP e EER?" [Online]. Available: <http://www.daikin.pt/support-and-manuals/faq/general/faq11.jsp>. [Accessed: 20-Aug-2016].
- [38] B. M. A. Bernier, "Closed-Loop Ground-Coupled Heat Pump Systems," *ASHRAE J.*, no. September, 2006.
- [39] J. L. de Carvalho, "Transmissão de Calor Regime periódico."
- [40] J. P. Holman, *Heat Transfer*, Tenth Edit. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [41] A. Madrid Vicente and A. López Gómez, *Las instalaciones frigoríficas en las bodegas*. 1992.
- [42] J. P. Holman, *Heat Transfer*, Tenth Edit. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [43] J. P. Holman, "Heat Transfer," Tenth Edit., J. P. Holman and J. Lloyd, Eds. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- [44] I. Group, "F I C H A S TÉCNICAS DE AÇO INOXIDÁVEL F I C H A DE CARACTERÍSTICAS." Irestal Group.
- [45] I. Mikron Instrument Company, "TABLE OF EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES."
- [46] *Adendo : Tabelas de Emissividade*. pp. 68–70.
- [47] *Adendo : Tabelas de Emissividade*. p. 68–70.
- [48] "EPOLI." [Online]. Available: <http://www.epoli.pt/produtos-e-servicos/foam-isolamento/>. [Accessed: 30-Aug-2016].
- [49] J. R. V. Fogaça, "Variação da Entalpia nas Mudanças de Estado Físico." [Online]. Available:

<http://alunosonline.uol.com.br/quimica/variacao-entalpia-nas-mudancas-estado-fisico.html>. [Accessed: 30-Aug-2016].

- [50] Blanco, "Bajar la temperatura hasta 10° con nebulizadores de agua." [Online]. Available: <http://hblanco.com/bajar-la-temperatura-hasta-10o-con-nebulizadores-de-agua/>. [Accessed: 31-Aug-2016].
- [51] "CAREL." [Online]. Available: <http://www.carel.com/>. [Accessed: 31-Aug-2016].

# Anexo A

<b>Summary Performance Report For 30RQS160</b>	
Project: Herdade Ervideira	02-16-2012
Prepared By:	02:15



## AquaSnap™ Air to Water Heat Pump



### Unit Information

Tag Name:	30RQS160
Model Number:	30RQS-160
Quantity:	1
Manufacturing Source:	Montluel, France
Refrigerant:	R410A
Shipping Weight:	1067 kg
Operating Weight:	1117 kg
Unit Length:	2050 mm
Unit Width:	2258 mm
Unit Height:	1321 mm

### Fluid Heat Exchanger Information

Fluid Type:	Fresh Water
Fouling Factor:	0,0000 (sqm-K)/kW
<b>Heating Mode</b>	
Leaving Temperature:	35,0 °C
Entering Temperature:	29,6 °C
Fluid Flow:	7,17 L/s
Pressure Drop:	64,9 kPa
<b>Cooling Mode</b>	
Leaving Temperature:	7,0 °C
Entering Temperature:	12,0 °C
Fluid Flow:	7,17 L/s
Pressure Drop:	73,8 kPa

### Air Heat Exchanger Information

Altitude:	0 m
Number of Fans:	2
Total Condenser Fan Air Flow at 20°C:	10568 L/s
<b>Heating Mode</b>	
Entering Air Temperature (dry bulb):	7,0 °C
Entering Air Temperature (wet bulb):	6,0 °C
Entering Air Temperature (dew point):	5,0 °C
Relative Humidity:	87,0 %
<b>Cooling Mode</b>	
Entering Air Temperature:	35,0 °C

### Integrated Pump Information

Static Head at Pump:	149,0 kPa
Static Head External to Heat Pump:	75,2 kPa

### Performance Information

#### Heating Mode

Heating Capacity (instantaneous):	161,2 kW
Heating Capacity (integrated):	161,2 kW
Total Compressor Power:	40,7 kW
Total Fan Motor Power:	3,50 kW
Pump Power:	2,00 kW
Total Unit Power (without pump):	44,2 kW
Total Unit Power (with pump):	46,2 kW
Efficiency (without pump) (instantaneous):	3,65 kW/kW

#### Cooling Mode

Cooling Capacity:	150,3 kW
Total Compressor Power:	53,9 kW
Total Fan Motor Power:	3,10 kW
Pump Power:	2,00 kW
Total Unit Power (without pump):	57,0 kW
Total Unit Power (with pump):	59,0 kW
Efficiency (without pump):	2,64 kW/kW
IPLV:	4,39 kW/kW
A-Weighted Sound Power Level:	90 dbA

### Accessories and Installed Options

- Opt. 116F Fixed Speed Single Pump LP
- Opt. 264 Water Exchanger Screwed Connection

### Electrical Information

Unit Voltage:	400-3-50	V-Ph-Hz
Standby Power:	3,1	kW
Minimum Voltage:	360	Volts
Maximum Voltage:	440	Volts
Power Factor:	0,78	

Amps (Un)	Electrical Circuit 1	Electrical Circuit 2
Max Unit Current Draw (RLA)	135,9	---
Max Start Up Current (ICF)	279,5	---
Nominal Unit Current Draw (A)	115,9	---

Maximum current draw of cooling and heating mode.



# Anexo C

Área: 1 - 20  
 2 - 5  
 2 - 2,5  
 6,5 - 10,5 1/2 40

**CORTE A-B**

**CORTE C-D**

INSTA: NA DIREÇÃO "Y" ACESSO E RESERVA DOS INSTRUMENTOS HORIZONTAIS E VERTICAIS C/ RIGID. DE PSA)

**QUADROS ELECTRICOS**  
 Q2  
 1. TAB. 1/100  
 2. TAB. 1/100  
 3. TAB. 1/100  
 4. TAB. 1/100  
 5. TAB. 1/100  
 6. TAB. 1/100  
 7. TAB. 1/100  
 8. TAB. 1/100  
 9. TAB. 1/100  
 10. TAB. 1/100  
 TOTAL: P=1000

Q3  
 1. TAB. 1/100  
 2. TAB. 1/100  
 3. TAB. 1/100  
 4. TAB. 1/100  
 5. TAB. 1/100  
 6. TAB. 1/100  
 7. TAB. 1/100  
 8. TAB. 1/100  
 9. TAB. 1/100  
 10. TAB. 1/100  
 TOTAL: P=1000

Q4  
 1. TAB. 1/100  
 2. TAB. 1/100  
 3. TAB. 1/100  
 4. TAB. 1/100  
 5. TAB. 1/100  
 6. TAB. 1/100  
 7. TAB. 1/100  
 8. TAB. 1/100  
 9. TAB. 1/100  
 10. TAB. 1/100  
 TOTAL: P=1000

**PROJECTO DA ADEGA "HERDADINHA"**  
 CONHECIDO POR: **VIEIRINOX**  
 REVISTA: VIEIRINOX S.A.  
 LOCAL: VIEIRINOX S.A.  
 DATA: 1980

PROJECTO DE ADEGA  
 INSTALACAO E  
 INSTALACAO DE O:

R. JULIÃO P. 9  
 S. 100  
 S. 100