

Optimização energética da etapa de ebulição do mosto, mantendo a estabilidade coloidal da cerveja

por

Bruno M. G. Ribeiro

Tese de mestrado

Desenvolvida no âmbito da disciplina de

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial

Submetida a

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)

Departamento de Engenharia Química (DEQ)

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 Porto

e

Unicer – Bebidas de Portugal, SGPS, SA

Via Norte – Leça do Balio, Matosinhos

4466-955 S. Mamede de Infesta

em

16 de Março de 2009

*“For the things
we have to learn before we can do
them,
we learn by doing them.”*

-Aristóteles

Agradecimentos

Foram muitos os que contribuíram para a realização e sucesso deste trabalho.

Ao Professor Doutor Adélio Miguel Magalhães Mendes, do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia do Porto, um agradecimento especial, pela confiança e incentivo. Agradeço ainda os conhecimentos científicos transmitidos e os pequenos desafios que foram sendo propostos e que em muito enriqueceram este trabalho.

À Eng. Maria Manuel Morais Monteiro Dantas, da Unicer, fico muito grato pela orientação prestada na execução deste projecto. Agradeço ainda a simpatia bem como a liberdade proporcionada para a realização de ensaios nas salas de fabrico de mosto, Nordon e Ziemann-Meura, e ainda nas linhas de filtração de cerveja, Orion e Schenk.

À Eng. Joana Isabel Gomes Queirós e Dr. Filipe Moura Rodrigues Nogueira agradeço o apoio prestado na integração na Unicer e ainda os comentários feitos.

À Eng. Ana Isabel Ribeiro e ao Dr. Pedro Rodrigues agradeço a permissão e liberdade concedida para uso das instalações e equipamentos do laboratório, necessários à realização de análises de qualidade de extrema importância para o progresso e sucesso deste trabalho.

Aos técnicos, fabricação do mosto e adegas, agracio a disponibilidade e dedicação demonstrada. A sua preciosa ajuda foi um contributo muito importante para o sucesso alcançado. Aos técnicos de laboratório, agradeço a ajuda e formação prestada em alguns métodos de análise de cervejas.

Um agradecimento muito especial à minha família, pela paciência e encorajamento nas horas mais difíceis.

Optimização energética da etapa de ebulição do mosto, mantendo a estabilidade coloidal da cerveja

© Bruno M. G. Ribeiro. Todos os direitos reservados.

O autor permite que o DEQ-FEUP e a Unicer distribuam copias deste documento, integralmente ou em partes, em papel ou formato electrónico ou outro meio conhecido ou posteriormente criado.

O autor:

Bruno Miguel Gomes Ribeiro

Os orientadores:

Eng. Maria Manuel Morais Monteiro Dantas
Unicer – Bebidas de Portugal, SGPS, SA

Prof. DTR. Adélio Miguel Magalhães Mendes
Departamento de Engenharia Química
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A ebulição é uma das últimas etapas da fabricação do mosto cervejeiro e uma das que mais energia requer para que se atinjam os seus objectivos. É uma etapa muito pouco compreendida e de extrema importância na estabilização bioquímica do mosto e estabilidade coloidal da cerveja.

Realizaram-se ensaios conducentes à optimização energética da etapa de ebulição, nas salas Nordon e Ziemann-Meura. De entre os ensaios realizados optou-se pela integração do conceito *Dynamic Boiling* por se verificar que requer menores consumos de vapor e por respeitar as restrições impostas à qualidade da cerveja. A caracterização dos perfis de ebulição depende do algoritmo de controlo e do sistema de ebulição, é como se segue:

- Sala Nordon (velocidade de recirculação do mosto a 100% em todos os patamares)
 - Fase I: 15 minutos a 104°C
 - Fase II: 45 minutos a 101°C
 - Fase III: 10 minutos a 104°C
- Sala Ziemann-Meura
 - Fase I: 15 minutos a 3,1 bar com velocidade de recirculação a 55%
 - Fase II: 30 minutos a 2,5 bar com velocidade de recirculação a 30%
 - Fase III: 15 minutos a 3,1 bar com velocidade de recirculação a 55%

No primeiro patamar promove-se a degradação térmica da *S-metilmethionina (SMM)* em *dimetilsulfito (DMS)*, garante-se a isomerização dos componentes do lúpulo e esterilização do mosto. A segunda fase permite reduções significativas nos consumos específicos de vapor. Garante-se ainda o borbulhento necessário à remoção dos compostos voláteis indesejáveis. Por fim aumenta-se a temperatura para tirar partido do aumento da área de transferência de massa, durante a bombagem do mosto para o decantador, pretende-se facilitar a remoção de compostos voláteis indesejáveis.

As reduções de consumos específicos de vapor são de 43,2% na sala Nordon, o que equivale a 258 734 (€/ano). Na sala Ziemann as avaliações demonstram reduções de 38,8% nas taxas de evaporação, por seu lado na sala Meura foi possível reduzir as mesmas taxas em 33,2%. As reduções das taxas de evaporação nestas salas permitem poupanças de 63 700 (€/ano).

Na sala Nordon, ebulições realizadas com redução da velocidade de recirculação do mosto em 50% na fase II, indicam reduções nos consumos específicos de vapor de 50,6% e respeito dos parâmetros de qualidade no produto final. Estas reduções de consumos de vapor indicam poupanças de cerca de 300 000 (€/ano), pelo que é um perfil a ser explorado.

Paralelamente foi efectuada a optimização dos consumos de água, na fase de enxaguamento, nos filtros trap nas linhas de filtração de cerveja, Orion e Schenk. Para os trap's I e II da linha Orion, conseguiram-se reduções de consumos de água de 42,5%. Na linha Schenk, nos trap's I e II conseguiram-se reduções de 55,6% e no trap III 80,7%. Em termos monetários estas reduções representam 7 484 (€/ano).

Palavras-chave: Fabricação de mosto, ebulição, optimização energética, cerveja.

Abstract

Ebullition is one of the last stages of production of brewer wort and one that requires more energy to reach its goals. It is one of the least understood phases, but of extreme importance for biochemical stabilization of wort as well as the colloidal stability of the beer.

In the Nordon and Ziemann-Meura rooms tests have been executed to lead to energetic optimization of the ebullition stage. The *Dynamic Boiling* concept has been chosen from those tests, once it requires less steam consumption and also because it respects the imposed restrictions on beer quality. The characterization of the ebullition profiles depends on the control algorithm and the ebullition system as it follows:

- Nordon Room (wort recirculation speed at 100% at all levels)
 - Phase I: 15 minutes at 104°C
 - Phase II: 45 minutes at 101°C
 - Phase III: 10 minutes at 104°C
- Ziemann-Meura Room
 - Phase I: 15 minutes at 3,1 bar with recirculation speed at 55%
 - Phase II: 30 minutes at 2,5 bar with recirculation speed at 30%
 - Phase III: 15 minutes at 3,1 bar with recirculation speed at 55%

On the first level there is a thermal degradation of *S-methyl-methionine (SMM)* in *dimethyl-sulphide (DMS)*, the isomerisation of the hop components is granted and the wort is sterilized. The second phase allows significant reductions in the specific steam consumption. The bubbling, which is necessary for the removal of undesirable volatile compounds, is granted, too. Finally the temperature is raised to take advantage of the mass transfer area increase during wort pumping to the decanter. The intention is to facilitate the removal of undesirable volatile compounds.

The reduction of specific steam consumption is of 43,2% in the Nordon room, which is equivalent to 258 734 (€/year). In the Ziemann room the evaluations show a reduction of 38,8% of the evaporation rate. On the other hand, it was possible to reduce the same rates in 33,2% in the Meura room. The reduction of the evaporation rates in these rooms allow a saving of 63 700 (€/year).

In the Nordon room the ebullitions executed with reduction of the wort recirculation speed by 50%, in phase II, indicate reductions of specific steam consumption of 50,6% and respect the quality parameters of the final product. Those steam consumption reductions indicate savings of about 300 000 (€/year) and that is why it is a profile which is worth exploring.

At the same time, in the rinsing phase, optimization of water consumption has been performed on the trap filters on the Orion and Schenk beer filtration lines. For the traps I and II of the Orion line, water consumption reduction of 42,5% were achieved. On the Schenk line, on traps I and II, the reductions were of 55,6% and on trap III of 80,7%. In monetary terms these reductions represent 7 484 (€/year).

Keywords: Wort production, boiling, energy optimization, beer.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e apresentação do projecto	1
1.2. Contributos do trabalho	1
1.3. Organização da tese	2
2. Estado da arte	3
2.1. Um pouco de história	3
2.2. O processo industrial de produção de cerveja	3
2.2.1. Matérias-primas	3
2.2.2. Fase de fabrico do mosto	3
2.2.3. Fase de adegas	4
2.3. Etapa de ebulição	5
2.3.1. Principais objectivos da ebulição	5
2.3.2. Considerações energéticas	5
2.3.3. Principais alterações bioquímicas que ocorrem durante a ebulição	5
2.3.4. Factores que afectam a ebulição	7
2.3.5. Influência da configuração do sistema de ebulição	7
3. Descrição da técnica	8
3.1. Levantamento de dados	8
3.2. Definição dos parâmetros em estudo	8
3.3. Organização e denominação dos ensaios	8
3.4. Condições de realização dos ensaios	9
3.5. Acompanhamento e avaliação da performance dos ensaios	9
3.5.1. Abaixamento dos consumos específicos de vapor	10
3.5.2. Taxas de evaporação	10
3.5.3. Taxas de isomerização	10
4. Optimização da etapa de ebulição na sala Nordon	11
4.1. Sistema de ebulição	11
4.2. Ensaio realizados	11
4.3. Impactos no fabrico do mosto	13
4.3.1. Consumos específicos de vapor	13
4.3.2. Taxas de evaporação	14
4.3.3. Taxas de isomerização	16
4.4. Impactos na qualidade da cerveja	17
4.4.1. Resultados de qualidade e controlo organolético	17
4.4.2. Álcoois/ésteres	19
4.4.3. Estabilidade coloidal	20
4.5. Impactos económicos	21
4.6. Oportunidades de melhoria	22
4.6.1. Implementação de um sistema de recuperação e armazenamento de energia	23
4.6.1.1. Cenário I	23
4.6.1.2. Cenário II	24
4.6.1.3. Cenário III	25
4.6.1.4. Dimensionamento dos equipamentos	26

4.6.1.5.	Comparação entre cenários	26
4.6.2.	Controlo	27
4.6.2.1.	Alteração do algoritmo de controlo básico	27
4.6.2.2.	Implementação de um sistema de controlo aumentado	28
5.	Optimização da etapa de ebulição nas salas Ziemann e Meura	30
5.1.	Levantamento de dados	30
5.2.	Ensaio realizados	31
5.3.	Impactos no fabrico do mosto	32
5.3.1.	Taxas de evaporação	32
5.3.2.	Taxas de isomerização	33
5.4.	Impactos na qualidade da cerveja	33
5.4.1.	Resultados de qualidade e controlo organolético	33
5.4.2.	Álcoois/ésteres	34
5.4.3.	Estabilidade coloidal	34
5.5.	Impactos económicos	35
5.6.	Oportunidades de melhoria	35
6.	Optimização dos consumos de água no enxaguamento dos filtros trap	36
6.1.	Definição das variáveis em estudo e restrições do sistema	37
6.2.	Linha Orion	37
6.2.1.	Trap's I/II	37
6.3.	Linha Schenk	38
6.3.1.	Trap's I/II	38
6.3.2.	Trap's III	38
6.4.	Impactos económicos	39
6.5.	Oportunidades de melhoria	39
7.	Conclusões	41
7.1.	Optimização da etapa de ebulição na sala Nordon	41
7.2.	Optimização da etapa de ebulição nas salas Ziemann e Meura	41
7.3.	Optimização dos consumos de água no enxaguamento dos filtros trap	42
7.4.	Sugestões para trabalho futuro	42
8.	Bibliografia	43

Anexo A – Principais alterações bioquímicas que ocorrem no mosto na etapa de ebulição

Anexo B – Parâmetros monitorizados ao longo de cada etapa

Anexo C – Especificações para as análises de qualidade

Anexo D – Modelo matemático da caldeira de ebulição

Anexo E – Análise estatística: Branco vs EC1

Anexo F – Dimensionamento dos equipamentos do sistema de armazenamento e recuperação de energia

Anexo G – Avaliação do potencial de poupanças mássicas e energéticas do actual sistema de ebulição da sala Nordon

Anexo H – Proposta de alteração do algoritmo de controlo básico

Anexo I – Necessidades de vapor no perfil EC1

Anexo J – Erros nos perfis de ebulição

Anexo L – Proposta de alteração dos programas de enxaguamento dos filtros trap

Lista de figuras

Figura 1 – Circuito de produção do mosto, da sala Nordon. As linhas a preto representam correntes de mosto e as linhas a vermelho o circuito do vapor necessário para provocar as elevações de temperaturas desejadas.

Figura 2 – Principais alterações bioquímicas que ocorrem durante a fase de ebulição do mosto cervejeiro, análise gráfica.

Figura 3 – Representação esquemática do sistema de ebulição da sala Nordon.

Figura 4 – Consumos específicos de vapor e taxas de evaporação registadas para fabricos consecutivos. Barras a claro são perfil branco e barras escuro perfil EC1.

Figura 5 – Representação do efeito de emissões gasosas que ocorrem directamente para o interior da esteira próxima. Envolvência da nave industrial da sala de fabrico Nordon.

Figura 6 – Resultados das análises de estabilidade coloidal realizadas no equipamento Analyser 2000PPT. Análise gráfica. O rectângulo a verde delimita a zona de maior estabilidade coloidal.

Figura 7 – Proposta de implementação de um sistema de armazenamento de energia, cenário I. As linhas a laranja representam correntes de mosto, as linhas a vermelho representam correntes de energia (água quente) e as linhas a azul representam os vapores libertados durante a fase de ebulição.

Figura 8 – Proposta de implementação de um sistema de armazenamento de energia, cenário II.

Figura 9 – Proposta de implementação de um sistema de armazenamento de energia, cenário III.

Figura 10 – Pirâmide do controlo de processos.

Figura 11 – Proposta para a implementação de um sistema de controlo inteligente, onde X_n representa variáveis que influenciam a ebulição e possíveis de ser medidas, por exemplo as condições ambientais. Modelo Multiple Input Single Output (MISO).

Figura 12 – Representação esquemática das caldeiras de ebulição da sala Ziemann-Meura.

Figura 13 – Resultados das análises de estabilidade coloidal realizadas no equipamento Analyser 2000PPT. Análise gráfica. O rectângulo a verde delimita a zona de maior estabilidade coloidal.

Figura 14 – Representação esquemática das linhas de filtração Orion e Schenk. Posição relativa dos vários filtros trap.

Lista de tabelas

Tabela 1 – Situação actual dos parâmetros de controlo do mosto Pilsen, na sala Nordon.

Tabela 2 – Definição dos diferentes limites que constituíram o ponto de partida e dos ensaios posteriormente realizados, para a optimização da etapa de ebulição do sistema de ebulição da sala Nordon.

Tabela 3 – Consumos específicos de vapor, abaixamentos e intervalo de confiança a 95% para a média normal dos consumos de vapor com variância desconhecida. O número de amostras refere-se ao número de fabricos.

Tabela 4 – Taxas de evaporação, abaixamentos e intervalo de confiança a 95% para a média normal das taxas de evaporação com variância desconhecida. O número de amostras refere-se ao número de fabricos.

Tabela 5 – Taxas de isomerização, aumentos conseguidos e intervalo de confiança a 95% para a média normal das taxas de isomerização com variância desconhecida. O número de amostras refere-se ao número de fabricos.

Tabela 6 – Resultados de controlo de qualidade, dos ensaios realizados na sala Nordon.

Tabela 7 – Resultados de controlo de qualidade, dos parâmetros coloração, turvações e controle organolético.

Tabela 8 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de acetaldéido, DMS e álcoois.

Tabela 9 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de ésteres e razão álcoois / ésteres.

Tabela 10 – Impacto económico, dos perfis testados, na etapa de ebulição, na sala Nordon.

Tabela 11 – Dimensionamento dos equipamentos para o sistema de recuperação e armazenamento de energia.

Tabela 12 – Rendimentos, relativo e global, e recuperações anuais previstas, para cada cenário, devido à implementação de um sistema de recuperação e armazenamento de energia.

Tabela 13 – Situação actual dos parâmetros de controlo do mosto Pilsen, nas salas Ziemann e Meura.

Tabela 14 – Definição dos diferentes ensaios que constituíram o ponto de partida para a optimização da etapa de ebulição do sistema de ebulição da sala Ziemann-Meura. A contagem do tempo, no controlador, é decrescente.

Tabela 15 – Taxas de evaporação, abaixamentos das taxas de evaporação e intervalo de confiança a 95%, para a média das taxas de evaporação, na sala Ziemann.

Tabela 16 – Taxas de evaporação, abaixamentos das taxas de evaporação e intervalo de confiança a 95%, para a média das taxas de evaporação, na sala Meura.

Tabela 17 – Taxas de isomerização, aumento das taxas de isomerização e intervalo de confiança a 95%, para a média das taxas de isomerização, na sala Ziemann-Meura.

Tabela 18 – Resultados, de controlo de qualidade, dos ensaios realizados na sala Ziemann-Meura.

Tabela 19 – Resultados de controlo de qualidade, dos parâmetros coloração, turvações e controle organolético.

Tabela 20 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de acetaldáido, DMS e álcoois.

Tabela 21 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de acetaldáido, ésteres de razão álcoois / ésteres.

Tabela 22 – Situação da receita de enxaguamento antes dos ensaios de optimização.

Tabela 23 – Situação da receita de enxaguamento antes e após os ensaios de optimização.

Tabela 24 – Situação da receita de enxaguamento antes dos ensaios de optimização.

Tabela 25 – Proposta para alteração dos programas de enxaguamento dos filtros trap, nas linhas Orion e Schenk.

1. Introdução

1.1. Enquadramento e apresentação do projecto

Este projecto foi desenvolvido no âmbito da disciplina de Projecto de desenvolvimento em ambiente empresarial, do Mestrado Integrado em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Os trabalhos foram realizados nas instalações da Unicer – Bebidas de Portugal, SGPS, SA, no centro de produção de cervejas de Leça do Balio, em Matosinhos.

Os objectivos deste trabalho foram a optimização energética da etapa de ebulição, mantendo a estabilidade coloidal, características físico-químicas e sensoriais da cerveja. Optimizaram-se as etapas de ebulição nas salas Nordon e Ziemann-Meura.

A título de trabalho extraordinário realizaram-se ensaios de optimização dos consumos de água, na fase de enxaguamento, dos filtros trap nas linhas de filtração de cerveja, Orion e Schenk.

Este projecto foi desenvolvido em várias fases. Destacam-se o estudo do processo industrial de produção de cerveja e estudo de bibliografia especializada às quais se seguiram as fases de experimentação e interpretação de resultados.

1.2. Contributos do trabalho

Este projecto permitiu alterar os comportamentos dos colaboradores, no que respeita ao controlo de índices de qualidade e constante monitorização das quantidades de energia necessárias na fase de ebulição.

Isto levou à sua consciencialização para o real valor da energia. Demonstrou-se que é possível produzir o mesmo mosto com índices de qualidade idênticos utilizando menores quantidades de energia. Reduziu-se assim as emissões para a atmosfera de vapor de água, compostos orgânicos voláteis e dióxido de carbono, resultante da queima da fonte de energia primária, o fuel óleo.

As principais inovações devem-se à implementação do conceito *Dynamic Boiling* e alteração do algoritmo de controlo, o que permitiu o abaixamento das taxas de evaporação e ganhos energéticos significativos.

Propôs-se ainda a implementação de um sistema de recuperação e armazenamento de energia bem como a alteração da lógica de controlo básico e implementação de um algoritmo de controlo aumentado.

1.3. Organização da tese

No capítulo 2 faz-se uma exposição do estado da arte do processo tecnológico de fabricação de cerveja. Faz-se ainda uma exposição dos objectivos da etapa de ebulição do mosto, principais alterações bioquímicas que ocorrem e factores que afectam a ebulição.

No Capítulo 3 descreve-se a estratégia adoptada para a realização de ensaios e mostra-se a forma de avaliação do desempenho de cada ensaio.

No capítulo 4 descrevem-se os ensaios realizados na sala Nordon e faz-se a análise dos resultados obtidos. De forma a minimizar os consumos específicos de vapor, propõem-se alterações à actual configuração do sistema de ebulição. Apresentam-se vários cenários possíveis para a implementação destas alterações e uma previsão nos impactos de consumos de vapor. Propõem-se também a alteração da lógica de controlo e implementação de um algoritmo de controlo aumentado.

No capítulo 5 apresentam-se os ensaios realizados nas salas Ziemann e Meura e discutem-se os resultados obtidos. Apresentam-se também algumas oportunidades de melhoria.

No capítulo 6 discutem-se os resultados obtidos na optimização dos consumos de água, na fase de enxaguamento, dos filtros trap das linhas de filtração Orion e Schenk. Propõem-se também a alteração dos programas de enxaguamento de forma a minimizar os consumos de água, mantendo a capacidade de filtração e os tempos de vida dos filtros.

Por último, no capítulo 7, expõem-se as principais conclusões e sugestões para trabalho futuro.

2. Estado da arte

2.1. Um pouco de história

A origem da cerveja perde-se no tempo. Os sumérios, em 7000 anos A.C. já produziam bebidas fermentadas. No entanto só há cerca de 100 anos atrás é que esta bebida passou a ser estudada desconhecendo-se ainda hoje todas as reacções que ocorrem na sua produção. Assim, a acção da arte cervejeira é essencialmente baseada em conhecimentos teóricos e empíricos acumulados ao longo dos séculos [1].

2.2. O processo industrial de produção de cerveja

2.2.1. Matérias-primas

A cerveja é uma bebida fermentada por leveduras seleccionadas do género *Sacharomyces* e obtida a partir de água, malte, lúpulo e outros cereais não maltados [1-3].

O malte é obtido a partir da germinação controlada da cevada. É a principal fonte de enzimas e de amido, sendo também uma fonte de nutrientes que favorece o crescimento da levedura. O milho é o principal cereal não maltado utilizado, que depois de lhe ser extraída a gordura é moído e denominado griz. A utilização destes cereais tem como finalidade diminuir a quantidade de proteínas existentes no mosto. O lúpulo, planta aromática, confere o sabor e aroma de amargo característico. A água usada tem de ser potável e possuir uma composição mineralógica adequada. Da qualidade destas matérias-primas depende a qualidade do produto final [1-3].

2.2.2. Fase de fabrico do mosto

O processo inicia-se com a recepção e ensilagem de matérias-primas como o malte e o griz. Cada um destes materiais é conduzido a silos, onde são armazenados separadamente. Inicia-se então a fabricação do mosto que compreende várias etapas.

A moagem do malte consiste na transformação do grão em farinha para permitir que todos os nutrientes estão acessíveis às enzimas, em especial o amido que se pretende degradar em glicose.

Segue-se a brassagem, é realizada nas caldeiras de caldas, empastagem e sacarificação, como se mostra na figura 1. Aqui promove-se o desdobramento do amido em açúcares, por acção de enzimas, α e β amilases, adiciona-se cloreto de cálcio para estimular a sua acção. Esta fase ocorre em gamas de temperaturas compatíveis e pH ligeiramente ácido. Simultaneamente também ocorre a transformação das proteínas do malte em aminoácidos [1-5].

Depois deste processo esta infusão é enviada ao filtro, onde se separa a fase líquida da fase sólida do mosto. A fase sólida é constituída por fragmentos de cascas do malte, denomina-se drêche, e é rejeitada [1-3,6].

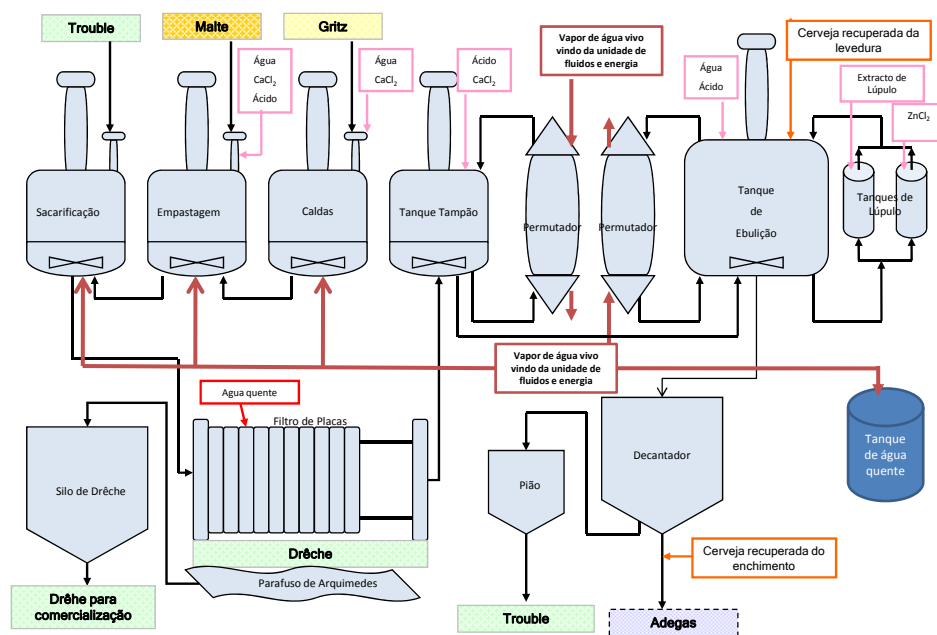


Figura 1- Circuito de produção do mosto, da sala Nordon. As linhas a preto representam correntes de mosto e as linhas a vermelho o circuito do vapor necessário para provocar as elevações de temperaturas desejadas.

A fase líquida segue para a caldeira de ebulição onde se provoca a fervura de forma a estabilizar a composição do mosto [1-3, 7-9]. Aqui adiciona-se cloreto de zinco para estimular o crescimento da levedura na fase seguinte. De seguida o mosto é enviado a um decantador onde repousa, os constituintes mais pesados agregam-se e sedimentam, constitui o *trouble*. Ocorre depois o arrefecimento do mosto. Estas etapas são representadas na figura 1.

2.2.3. Fase de adegas

Ocorre em várias etapas sendo as mais importantes a fermentação, maturação e estabilização a frio, estas fases ocorrem nas cubas de fermentação. Segue-se depois a clarificação.

Na fermentação transformam-se os açúcares do mosto, por acção da levedura, em álcool e dióxido de carbono. Formam-se ainda alguns esteres, ácidos e álcoois superiores que vão conferir propriedades organoléticas à cerveja.

A maturação inicia-se quando se esgotam os açúcares fermentáveis. A levedura consome outros nutrientes presentes, que não o açúcar, possibilitando o refinar do paladar da cerveja.

Segue-se a estabilização a frio. Consiste em promover a agregação de proteínas instáveis, leveduras, resinas e polifenóis de modo a ser mais fácil a sua eliminação, promovendo-se a estabilidade coloidal. Ocorre a temperaturas baixas, com formação de complexos proteínas-polifenóis, responsáveis pela turvação [1-3].

Por último procede-se à clarificação da cerveja. Consiste em fazer passar a cerveja numa centrífuga para retirar a levedura, depois num filtro de terra de diatomáceas para retenção de proteínas e finalmente num filtro de polivinilpolipirrolidona (PVPP) para a extracção de polifenóis. A cerveja filtrada apresenta-se com um aspecto cristalino [1-3, 10-13].

Nesta fase a cerveja segue para tanques onde é armazenada e aguarda o enchimento, podendo ser acondicionada em diferentes tipos de embalagens.

2.3. Etapa de ebulição

2.3.1. Principais objectivos da ebulição

Sendo o objectivo deste projecto a optimização da etapa de ebulição, não poderia deixar de fazer aqui uma análise mais profunda. Assim, o propósito desta fase é estabilizar a composição química e microbiológica, do mosto [1-3,7], recorrendo a:

- Esterilização do mosto e inactivação das enzimas;
- Solubilização e isomerização dos princípios activos do lúpulo;
- Precipitação de proteínas instáveis e outras substâncias, promovendo a estabilidade coloidal;
- Eliminação de substâncias voláteis indesejáveis, por evaporação.

2.3.2. Considerações energéticas

A fase de ebulição requer grandes quantidades de energia e representa cerca de 40% dos gastos energéticos totais de uma cervejeira.

Parte da energia requerida na fase de ebulição é recuperada durante o arrefecimento do mosto, contudo a energia adicional necessária para evaporar o vapor de água durante a fervura é perdida através da chaminé. Existem várias formas de recuperar esta energia perdida por evaporação. A mais eficiente é a redução das taxas de evaporação, actualmente os valores de referência encontram-se entre os 4% e 9%, dependendo da configuração do sistema de ebulição [1-3,7].

2.3.3. Principais alterações bioquímicas que ocorrem durante a ebulição

De forma a perceber as consequências do abaixamento das taxas de evaporação é necessário entender as principais alterações que ocorrem no mosto durante a fase de ebulição. Estas alterações estão sumarizadas na figura 2 e tratadas com maior detalhe no anexo A [7].

O *DMS* produzido durante a ebulição é rapidamente perdido por evaporação. No entanto a sua formação continua entre o fim da ebulição e o arrefecimento do mosto [14]. O *DMS* presente no mosto arrefecido não é perdido, uma parte pode ser produzido durante a fermentação, e persiste no produto final [1-3, 8-13], como se explica no anexo A.

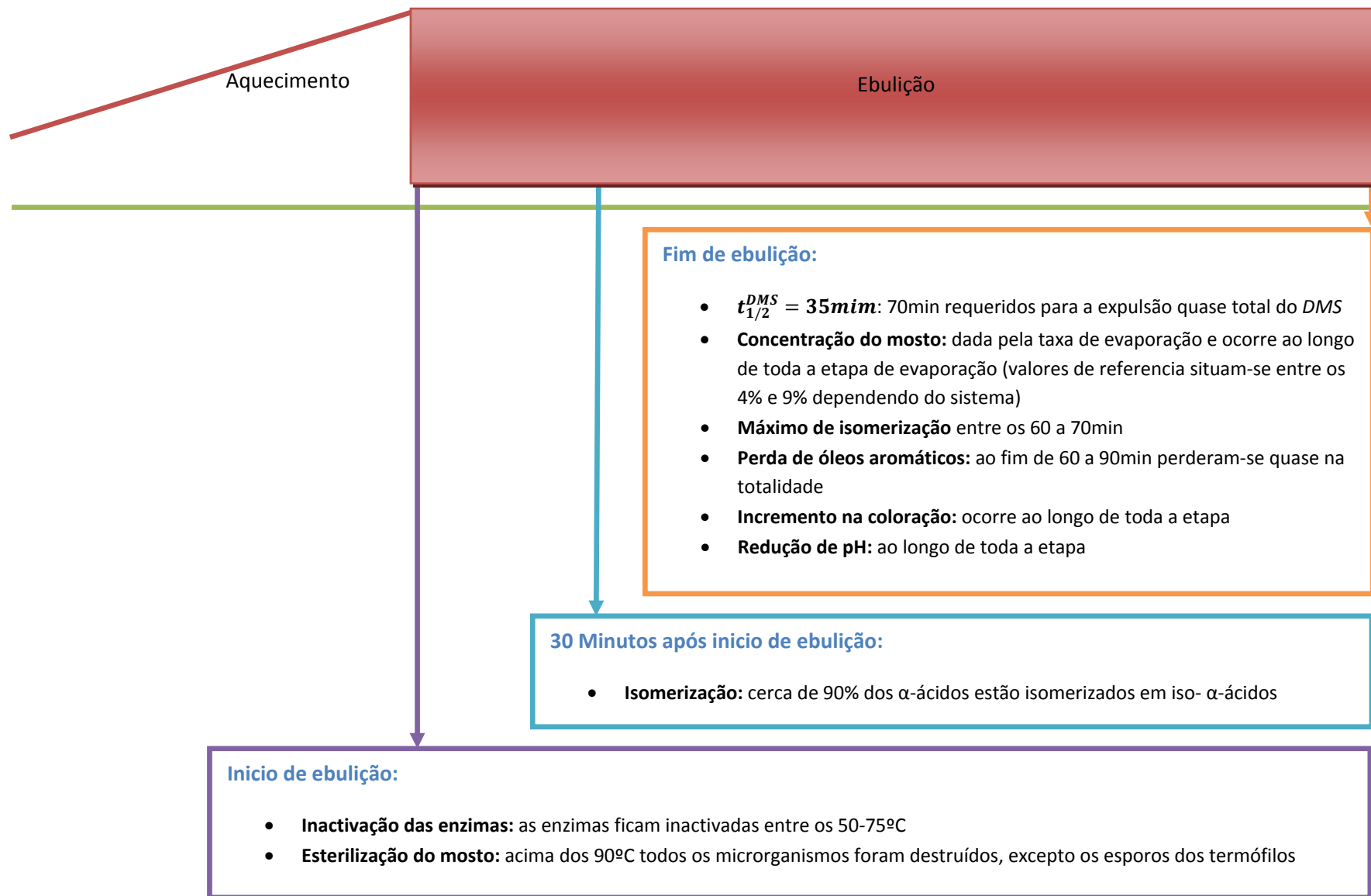


Figura 2 - Principais alterações bioquímicas que ocorrem durante a fase de ebulição do mosto cervejeiro, análise gráfica [7].

2.3.4. Factores que afectam a ebulição

Os engenheiros desenvolveram designs de sistemas de ebulição que maximizam as transferências de calor e minimizam as taxas de formação de *fouling*. Por outro lado os cervejeiros têm critérios geralmente focados na formação de certos compostos e eliminação de outros [1-3,14-20].

As principais características do mosto que afectam a ebulição são de natureza físico-química. São elas a massa molecular, viscosidade, composição em carbonatos e proteínas bem como tipos de substâncias amargas presentes [20].

A ebulição é provocada à custa de transferência de calor entre o vapor e o mosto, geralmente em permutadores tubulares. A pressão do vapor, directamente relacionada com a temperatura, é um factor determinante para uma boa ebulição [20].

2.3.5. Influência da configuração do sistema de ebulição

As modernas caldeiras de vapor são predominantemente permutadores de carcaça e tubos verticais instalados no interior ou exterior de um tanque onde se encontra o mosto. A forma como é efectuada a recirculação do mosto e o número de vezes que este passa no permutador afecta significativamente a qualidade do mosto [1-3,7,14,15].

Nestes permutadores a transferência de calor ocorre através de paredes cilíndricas e das várias resistências térmicas condutivas e convectivas associadas. Normalmente, o fluido circulante no interior dos tubos é o vapor, fluido quente, e na carcaça circula o mosto, fluido a ser aquecido. Desta forma pode-se aplicar a lei de *Newton* para a transferência de calor, que permite calcular o caudal térmico. Por analogia com a lei de *Ohm* ($I = \Delta V/R$), pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{U \times A}} = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{T_{vapor} - T_{mosto}}{R_{total}} \quad (1)$$

A resistência total à transferência de calor pode ser calculada a partir das leis de *Fourier* e *Newton* para a transferência de calor com associação de resistências em série, por analogia com a lei de *Ohm* [20].

$$R_{total} = \frac{1}{h_{vapor} A_{vapor}} + \frac{x_p}{k_p A_{mg}} + \frac{1}{h_{fouling} A_{fouling}} + \frac{1}{h_{mosto} A_{mosto}} \quad (2)$$

Recentemente desenvolverem-se sistemas de condensação de vapores das caldeiras e sistemas de armazenamento de energia. Os sistemas de condensação de vapores permitem aumentar a evaporação de *DMS* de cerca de 80% para 90%. Por seu lado, os sistemas de armazenamento de energia permitem baixar significativamente os consumos energéticos no fabrico de mosto [1-3, 21-24].

Por outro lado, novas técnicas de optimização por integração de processos mostram resultados espectaculares na redução dos consumos energéticos e mássicos. Destas técnicas destaca-se a tecnologia de *Pinch* [25-34].

3. Descrição da técnica

3.1. Levantamento de dados

Numa primeira abordagem, para a execução deste projecto, efectuou-se um estudo do processo de produção de cerveja, de forma a compreender todas as etapas envolvidas e a importância da etapa de ebulição no processo global, como se descreveu na secção anterior. Depois fez-se um estudo exaustivo da etapa de ebulição recorrendo a bibliografia especializada, identificando as variáveis de maior importância. Fez-se o levantamento destas variáveis para o mosto Pilsen, tipo de mosto sujeito a ensaios, como se mostra na tabela 1.

Tabela 1 – Situação actual dos parâmetros de controlo do mosto Pilsen, na sala Nordon.

Temperatura do mosto à saída do permutador	104°C
Tempo de ebulição	70 Minutos
Tempo de início de entrada de glicose	Minuto 10
Tempo de entrada do lúpulo	Dos 0 aos 60 minutos
Tempo de entrada do cloreto de zinco	Dos 63 aos 70 minutos
Velocidade de agitação da bomba durante a ebulição	100%

3.2. Definição dos parâmetros em estudo

Para a realização dos ensaios procurou-se perceber, numa primeira abordagem, qual a influência da temperatura do mosto à saída do permutador e do tempo de ebulição, no produto final e impacto nos consumos energéticos. Estes parâmetros foram estudados isoladamente e em conjunto. Posteriormente, numa fase mais avançada estudou-se o impacto da velocidade de agitação da bomba, i.e., diminui-se a recirculação do mosto ao permutador.

3.3. Organização e denominação dos ensaios

De acordo com a secção anterior, e para facilitar o tratamento dos resultados experimentais bem como a representação destes dados e apresentação de conclusões de forma clara e objectiva, os ensaios encontram-se organizados por limites.

- Limite A – alteração na temperatura;
- Limite B – alteração no tempo;
- Limite C – alteração na temperatura e tempo.

Denominam-se ainda os experimentos da seguinte forma:

- 1ª Letra – indica que se trata de um ensaio;
- 2ª Letra – indica qual o limite em teste (limite A, B ou C);
- 1º Numero – tipo de variação dentro do limite.

3.4. Condições de realização dos ensaios

Cada conjunto de quatro fabricos/ebulições segue para uma cuba de fermentação, assim estes quatro fabricos vão constituir um ensaio/perfil de ebulição em teste. Por cada ensaio realizado são também realizados fabricos em branco, de acordo com as condições actuais, secção 3.1.

Durante a etapa de ebulição garantiu-se que quer nos brancos quer nos ensaios os perfis de ebulição foram os que se pretendiam estudar. Quando se registaram desvios, por falha humana, por falha do autómato ou por avaria de equipamentos, então esta análise comparativa foi cancelada e os resultados adquiridos desprezados.

Os perfis de ebulição em teste e os ensaios em branco seguem para cubas de fermentação independentes e às quais se garantiu que são incutidas as mesmas condições de fermentação, incluindo a mesma levedura. Estes ensaios são directamente comparáveis. Este procedimento garante que se algo correr mal, durante a fermentação, estamos numa das seguintes situações:

- O branco e o ensaio apresentam problemas de fermentação, então não fica provado que os problemas são devido ao ensaio. O ensaio volta a ser testado;
- A fermentação do branco corre bem e na do ensaio registam-se problemas, então descarta-se este ensaio pois o perfil de ebulição testado provoca más fermentações e o ensaio não volta a ser testado.

Cada ensaio é realizado pelo menos duas vezes para garantir um mínimo de reprodutividade. Este tipo de análise comparativa permite despistar eventuais problemas nos ensaios e garantir um mínimo de confiança nos resultados obtidos.

3.5. Acompanhamento e avaliação da performance dos ensaios

Ao longo da realização dos ensaios foram sendo acompanhados diversos parâmetros de relevância, em função da etapa de produção da cerveja, para a monitorização e avaliação do desempenho de cada ensaio. No anexo B expõem-se os parâmetros acompanhados.

A monitorização destas variáveis gera informação. Por comparação dos valores dos ensaios com os brancos e por comparação com os limites de especificação das análises ou com valores presentes na bibliografia permite avaliar o desempenho de cada ensaio. Os valores especificados para cada tipo de análise encontram-se no anexo C.

Nas secções seguintes expõem-se a forma de cálculo de algumas medidas de performance.

3.5.1. Abaixamento dos consumos específicos de vapor

Esta medida de performance é obtida directamente por comparação entre o ensaio e o branco. Faz-se uso do contador de vapor, existente na linha de admissão de vapor ao permutador da caldeira de ebulição.

$$Rec_{vapor} (\%) = \frac{\left(\frac{\text{consumos específicos de vapor}_{branco}}{\text{consumos específicos de vapor}_{ensaio}} \right) - \left(\frac{\text{consumos específicos de vapor}_{branco}}{\text{consumos específicos de vapor}_{ensaio}} \right)}{\left(\frac{\text{consumos específicos de vapor}_{branco}}{\text{consumos específicos de vapor}_{ensaio}} \right)} \times 100 \quad (3)$$

Os consumos específicos de vapor são dados pelo quociente entre as leituras de vapor, na fase de ebulição, e as leituras de mosto, dadas pelo contador existente na etapa de arrefecimento de mosto.

3.5.2. Taxas de evaporação

Para esta avaliação foi necessário medir o extracto no início e no fim da ebulição. Registaram-se também a massa de xarope de glicose adicionada à ebulição, os volumes do fabrico, retorno de cerveja e água de diluição.

$$Taxa_{evap} = 1 - \frac{\left(\frac{\text{Extracto}_{início\ ebulição}}{\text{Extracto}_{fim\ ebulição}} \right) \times \left[\left(\frac{\text{Volume}_{fabrico}}{\text{Volume}_{retorno}} \right) \times 100 \times 0,96 - \left(\frac{\text{Massa}_{xarope}}{\text{glicose}} \right) \times 0,78 \right]}{\left[\left(\frac{\text{Volume}_{fabrico}}{\text{Volume}_{retorno}} \right) \times 100 \times 0,96 \right]} + \frac{\left(\frac{\text{Volume}_{água\ diluição}}{\text{Volume}_{fabrico}} \right)}{\left(\frac{\text{Volume}_{fabrico}}{\text{Volume}_{retorno}} \right)} \quad (4)$$

As taxas de evaporação representam uma medida de performance importante. Quanto maior for esta taxa, maior são as perdas de massa de água por evaporação através da chaminé da caldeira e maiores são as perdas energéticas deste sistema. Por outro lado a evaporação é necessária para eliminar compostos voláteis indesejáveis.

3.5.3. Taxas de isomerização

Aqui foi necessário retirar amostras de mosto frio, nos ensaios realizados, para se analisar previamente o amargor do mosto frio.

$$Taxa_{isomerização} (\%) = \frac{\left(\frac{\text{numero de latas de extracto de lupulo}}{\text{amargor do mosto frio}} \right) \times 0,45}{\left(\frac{\text{amargor do mosto frio}}{\text{amargor do mosto frio}} \right) \times 10^{-6} \times \left(\frac{\text{Volume}_{mosto\ frio}}{\text{Volume}_{mosto\ frio}} \right)} \times 100 \quad (5)$$

As taxas de isomerização representam a capacidade do perfil de ebulição em isomerizar os princípios activos do lúpulo, assim quanto maiores forem estas taxas melhor é o aproveitamento que se faz destes princípios activos. A isomerização das substâncias amargas do lúpulo é um dos objectivos da etapa de ebulição.

4. Optimização da etapa de ebulição na sala Nordon

4.1. Sistema de ebulição

O sistema de ebulição instalado na sala Nordon é constituído por um tanque de ebulição ao qual está acoplado um permutador de carcaça e tubos vertical, localizado no exterior deste tanque, como se mostra na figura 3.

O mosto vindo do permutador entra no tanque através de um sistema de dispersão. A área de transferência de massa é a área da secção recta da caldeira que é aumentada pelo cone de mosto que se forma devido ao sistema de dispersão, constituído por um chapéu na fase terminal, figura 3. Este sistema permite melhorar a libertação, por evaporação, dos compostos voláteis indesejáveis. O modelo matemático deste sistema dinâmico encontra-se no anexo D.

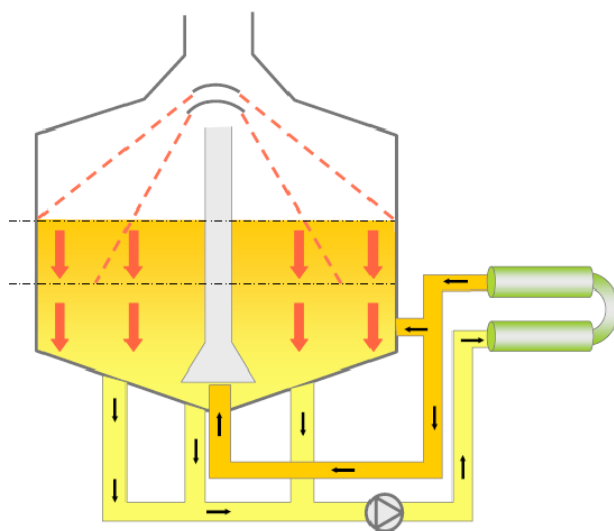


Figura 3 – Representação esquemática do sistema de ebulição da sala Nordon.

4.2. Ensaios realizados

Foi adoptada uma abordagem holística para a optimização deste sistema de ebulição. Foram definidos inicialmente três limites, de acordo com a secção 3.3, que constituíram o ponto de partida para este trabalho. Foram eles os ensaios EA1, EB1 e EC1. Estes perfis foram sempre comparados com o perfil de controlo/Branco, definido na secção 3.1.

Posteriormente, verificou-se que os ensaios EA1 e EB1 não são energeticamente tão vantajosos quanto o ensaio EC1. Assim, determinada a direcção de pesquisa, foram realizados novos ensaios (EC2, EC3 e EC4) de forma a explorar melhor este limite. A caracterização destes ensaios está definida na tabela 2.

Tabela 2 – Definição dos diferentes limites que constituíram o ponto de partida e dos ensaios posteriormente realizados, para a optimização da etapa de ebulição do sistema de ebulição da sala Nordon.

Branco: Temperatura constante e tempo constante (perfil de controlo)	
Brc	70min – 104°C
Limite A: Temperatura variável e tempo constante	
EA1	70min – 103°C
Limite B: Temperatura constante e tempo variável	
EB1	65min – 104°C
Limite C: Temperatura variável e tempo variável	
EC1	15min – 104°C
	45min – 101°C
	10min – 104°C
EC2	15min – 104°C
	40min – 101°C
	10min – 104°C
EC3	15min – 104°C
	45min – 101°C com velocidade de agitação da bomba a 50%
	10min – 104°C
EC4	15min – 104°C
	47min – 101°C
	8min – 104°C

Em relação ao ensaio EC1, o ensaio EC2 consiste em menos 5 minutos de ebulição no patamar intermédio. Com este ensaio pretende-se estudar a influência do tempo.

O ensaio EC3 é idêntico ao EC1 mas baixou-se a velocidade de agitação da bomba em 50%, no patamar intermédio, pretende-se estudar a influência deste parâmetro nos consumos energéticos e qualidade da cerveja final, face ao ensaio EC1. Para todos os outros perfis de ebulição, e em todos os patamares, a velocidade de agitação da bomba é de 100%.

O ensaio EC4 decorre da observação experimental de que a temperatura à saída do permutador demora 8 minutos a passar dos 101°C aos 104°C. Com este ensaio garante-se que quando a etapa de ebulição termina o mosto atingiu aquela temperatura. Pretende-se tirar partido dos enormes caudais de vapor que se consomem nesta fase. Em relação ao ensaio EC1 o tempo de ebulição mantém-se constante.

Ao limite C chama-se de *Dynamic Boiling*, pretende-se tirar partido da possibilidade que o sistema de controlo oferece em se realizar ebulições em 3 fases o que não acontece com o branco, ebulição realizada em apenas uma fase. Altera-se desta forma a filosofia de controlo.

No primeiro patamar, do *Dynamic Boiling*, pretende-se promover a degradação térmica da *S-metilmetionina (SMM)* em *di-metilsulfito (DMS)* de forma intensa, garante-se ainda a isomerização dos componentes do lúpulo e a esterilização do mosto.

Na segunda fase esperam-se abaixamentos significativos nos consumos de vapor, em relação ao branco, e tira-se partido da manutenção da temperatura do mosto acima dos 100°C, garantindo borbulhento. Isto acontece devido à capacidade calorífica do mosto ser cerca de 4 vezes superior à da água.

No envio do mosto ao decantador, este entra pela parte superior deste equipamento e verte pelas paredes. Isto permite um aumento brusco na área da interface mosto/ar facilitando a remoção de compostos voláteis indesejáveis. Na última fase do limite C aumenta-se a temperatura do mosto para se tirar partido desta situação.

Os resultados obtidos nestes ensaios estão tratados nas secções seguintes.

4.3. Impactos no fabrico do mosto

4.3.1. Consumos específicos de vapor

Os abaixamentos dos consumos específicos de vapor são calculados como se mostra na secção 3.5.1. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 3, juntamente com uma análise estatística. Apresentam-se os intervalos de confiança a 95% para os consumos específicos de vapor para cada perfil de temperaturas.

Tabela 3 – Consumos específicos de vapor, abaixamentos e intervalo de confiança a 95% para a média normal dos consumos de vapor com variância desconhecida. O número de amostras refere-se ao número de fabricos validados.

Ensaio	Nº Amostras	Consumos específicos de vapor (kg/hl _{mosto})	Abaixamento dos consumos específicos de vapor (%)	Intervalo de confiança para a média dos consumos específicos de vapor com grau de confiança de 95% (kg/hl _{mosto})
Branco	36	9±2	(referência)	[8,2; 9,6]
EA1	7	5±1	40,6	[3,7; 6,9]
EB1	7	8,2±0,9	7,7	[7,2; 9,3]
EC1	36	5±1	43,2	[4,9; 5,3]
EC2	15	5,1±0,3	43,0	[4,9; 5,3]
EC3	8	4±1	50,6	[3,1; 5,7]
EC4	3	5,4±0,8	38,9	[2,7; 8,2]

Os resultados obtidos mostram que os ensaios EA1, EB1 e EC4 são os energeticamente menos vantajosos. Verifica-se que o limite C apresenta reduções significativas nos consumos específicos de vapor, em relação ao branco. O ensaio EC3 é o mais favorável, apresenta reduções de consumos energéticos consideráveis. Pode concluir-se que a agitação tem grande impacto nos consumos específicos de vapor.

4.3.2. Taxas de evaporação

As taxas de evaporação foram avaliadas como o exposto na secção 3.5.2. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.

Tabela 4 – Taxas de evaporação, abaixamentos e intervalo de confiança a 95% para a média normal das taxas de evaporação com variância desconhecida. O número de amostras refere-se ao número de fabricos validados.

Ensaio	Nº Amostras	Taxas de evaporação (%)	Abaixamento das taxas de evaporação (%)	Intervalo de confiança para a média a 95% (%)
Branco	19	10±3	(referência)	[8,4; 11,4]
EA1	8	8±2	18,2	[5,7; 10,6]
EB1	8	7±2	27,2	[4,9; 9,5]
EC1	20	7±2	32,9	[5,2; 8,0]
EC2	15	7±2	33,6	[5,1; 8,1]
EC3	8	6±3	36,9	[3,5; 9,0]
EC4	8	7±3	34,2	[3,6; 10,0]

Seria de esperar que a taxa de evaporação seguisse a mesma tendência dos abaixamentos de consumos específicos de vapor. Assim, quanto maior forem os abaixamentos dos consumos específicos de vapor, menor é a quantidade de energia que o sistema recebe logo menor será a taxa de evaporação uma vez que esta depende directamente da primeira. Note-se que esta tendência está invertida nos ensaios EA1 e EB1.

Numa análise mais cuidada, verifica-se que em ebulições consecutivas e perfis de ebulição iguais, cada ebulição ocorre aproximadamente de 2 em 2 horas, registam-se grandes variações nas taxas de evaporação. Esta observação encontra-se ilustrada na figura 4. Isto deve-se às condições atmosféricas, tais como pressão, temperatura e humidade relativa bem como a velocidade e direcção do vento.

A humidade relativa é importante na medida e que existe um gradiente de concentração de água na forma de vapor que pode favorecer o transporte de massa para a atmosfera, aumentando as taxas de evaporação.

A velocidade do vento é igualmente importante pois cria um efeito de convecção forçada. A direcção do vento tem influência na dispersão das plumas de vapores. Se não houver resistências a esta dispersão, então há condições para se manterem elevados gradientes de concentração de vapor de água, favorecendo o aumento das taxas de evaporação. Se existirem resistências à dispersão das plumas, por exemplo a proximidade de edifícios altos, então os gradientes de concentração de vapores de água serão menores baixando assim as taxas de evaporação. Estes fenómenos são traduzidos pela lei de transporte de massa de Fick,

$$J = -D_m \frac{dC}{dz} \quad (6)$$

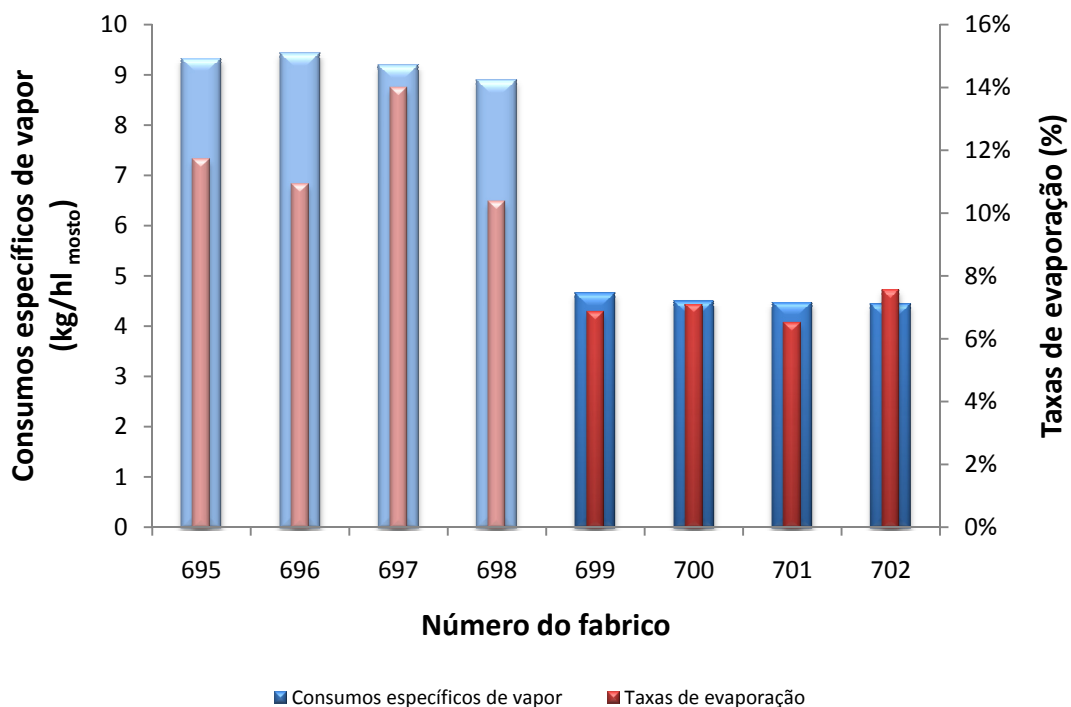


Figura 4 – Consumos específicos de vapor e taxas de evaporação registadas para fabricos consecutivos. Barras a claro são perfil branco e barras escuro perfil EC1.

onde D_m (difusibilidade molecular) é função da pressão e temperatura. Todos estes fenómenos têm importância relevante dadas as condições envolventes às chaminés da sala de fabrico Nordon, como se mostra na figura 5.

Dado que os resultados das taxas de evaporação são facilmente influenciados por fenómenos sobre os quais não se tem controlo, então esta análise perde alguma importância em detrimento do abaixamento dos consumos específicos de vapor, uma vez que estes apresentam maior constância.

A evaporação pode-se relacionar com os consumos de vapor, assim quanto maior for a taxa de evaporação maiores serão os consumos específicos de vapor, como se apresenta na figura 4. Pelas tabelas 3 e 4 verificamos que isto não é uma garantia, é apenas um indicador.

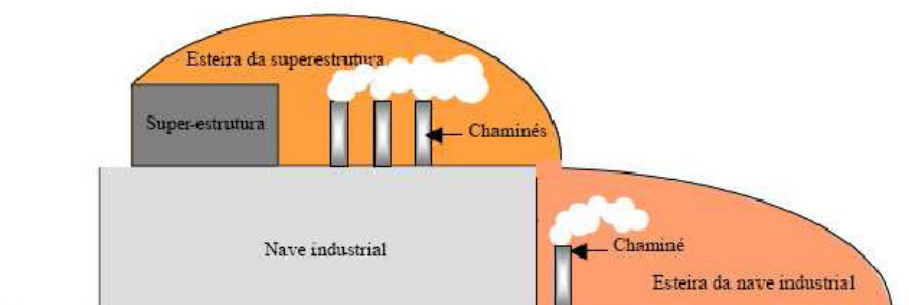


Figura 5 – Representação do efeito de emissões gasosas que ocorrem directamente para o interior da esteira próxima. Envólência da nave industrial da sala de fabrico Nordon.

4.3.3. Taxas de isomerização

As taxas de isomerização são calculadas como se descreveu em 3.5.3. Os resultados apresentam-se na tabela 5.

Tabela 5 – Taxas de isomerização, aumentos conseguidos e intervalo de confiança a 95% para a média normal das taxas de isomerização com variância desconhecida. O número de amostras refere-se ao número de fabricos.

Ensaio	Nº Amostras	Taxas de isomerização (%)	Aumento das taxas de isomerização (%)	Intervalo de confiança para a média a 95% (%)
Branco	36	46±3	(referência)	[44,67; 46,65]
EA1	8	45±5	-0,7	[40,80; 49,90]
EB1	7	44±3	-3,5	[40,47; 47,68]
EC1	45	47±4	2,9	[32,05; 51,38]
EC2	16	42±17	-8,6	[31,35; 52,09]
EC3	12	53±3	16,4	[50,54; 55,73]
EC4	12	46±5	-0,1	[42,01; 49,25]

Destes dados verifica-se que para todos os ensaios, excepto EC1 e EC3, existe abaixamento das taxas de isomerização.

Verifica-se ainda que o ensaio EC3 apresenta aumentos de taxas de isomerização bastante acentuados, em relação aos demais ensaios. Isto pode dever-se ao estado de micromistura do mosto na caldeira de ebulição, causada pelo abaixamento da velocidade de recirculação, como se discute a seguir.

No ensaio EC3, baixar a velocidade de agitação da bomba para metade no patamar intermédio, em relação ao ensaio EC1, significa aumentar o tempo de passagem do mosto para o dobro, neste patamar. Assim, cada elemento de fluido está o dobro do tempo em contacto com a superfície aquecedora do permutador. Por outro lado a recirculação do mosto a esta superfície cai para metade do número de vezes que é reciclada no perfil EC1, logo passa também metade das vezes no chapéu difusor do tanque de ebulição. Resultante, as perdas dos compostos activos do lúpulo por arrastamento na fase evaporada decaem.

O facto de se ter reduzido a agitação, neste patamar, em 50%, permite esta análise mais simplificada, no entanto outras velocidades de recirculação devem ser testadas de forma a adquirir uma linha de tendência mais esclarecedora. Pode concluir-se que este parâmetro tem grande influência nas taxas de isomerização e nas taxas de evaporação.

A bibliografia da especialidade indica que o mosto deve passar no permutador pelo menos três vezes, no entanto não é unânime [1-3]. Em relação às condições experimentais testadas, não se sabe quantas vezes é que o mosto é reciclado ao permutador, em qualquer dos perfis. Apesar dos esforços efectuados na procura desta informação não se dispõem das curvas características das bombas que realizam esta recirculação até ao momento de realização deste texto.

4.4. Impactos na qualidade da cerveja

Os resultados de cada parâmetro devem obedecer a uma gama de valores que faz parte das especificações de cada cerveja. Estas especificações encontram-se nos anexos C.

As análises realizadas foram exaustivas, de acordo com o anexo B, de forma a despistar qualquer anomalia que os perfis de ebulição testados pudessem causar na qualidade do produto final. De seguida serão apresentados e discutidos os resultados das análises efectuadas, apenas os de maior importância.

4.4.1. Resultados de qualidade e controlo organolético

Os resultados obtidos, para os diferentes ensaios, apresentam-se nas tabelas 6 e 7. Aqui interessa que os resultados obtidos, para cada ensaio, sejam pelo menos tão bons quanto os resultados do branco e que satisfaçam as especificações.

Como o discutido na secção 3.5.3, quanto maior for a taxa de isomerização, maior é o aproveitamento dos princípios activos do lúpulo. Geralmente faz-se uma correcção ao amargor da cerveja final por adição de lupulina isomerizada de forma a cumprir as especificações de qualidade.

A estabilidade de espuma é um parâmetro importante na análise da qualidade da cerveja. A espuma, constituída por proteínas de elevado peso molecular, deve ser branca, cremosa e estável, i.e., quando se tira uma cerveja a espuma não deve desaparecer rapidamente. As especificações indicam que a estabilidade de espuma deve ser superior a 250 segundos. Pela tabela 6, verificamos que todos os ensaios apresentam médias superiores à requerida.

Tabela 6 – Resultados de controlo de qualidade, dos ensaios realizados na sala Nordon.

Ensaio	Amargor (UA)	Estabilidade de espuma (s)	Polifenóis totais (mg/l)	Azoto aminado livre (mg/l)	SO ₂ total (mg/l)
Brc	19±1	302±13	111±12	84±15	8±4
EA1	21±2	301±3	103±18	85±6	8±5
EB1	10±1	314±5	110±13	77±16	9,1±0,1
EC1	18±3	289±17	100±14	93±18	7±3
EC2	20,3±0,5	302±17	88±12	93±10	6±2
EC3	19±1	341±19	87±11	103±16	5,5±0,8
EC4	18±3	294±11	95±9	91±17	6±3

Após ebulição o mosto segue para o decantador onde repousa, por perdas de calor as partículas maiores agregam-se e sedimentam formando complexos.

As únicas alterações no processo de fabricação de cerveja foram efectuadas apenas na ebulição, tendo-se tido o cuidado de manter todas as outras etapas idênticas entre ensaios, então pode atribuir-se a diminuição ou aumento destas leituras à ebulição.

Pela tabela 6, verifica-se que os ensaios do limite C provocam diminuições nos níveis de polifenóis, por outro lado parecem provocar aumentos nos níveis de azoto aminado livre. O efeito da agitação, ensaio EC3, provoca um mínimo nas leituras de polifenóis e um máximo nas de azoto aminado livre. Estes parâmetros têm influência nas análises sensoriais.

As leituras de SO₂ devem ser inferiores a 10 (mg/l), em todos os ensaios, as leituras médias respeitam este valor.

Na tabela 7, analisam-se os parâmetros sensoriais. Estes parâmetros são os de maior importância das análises de qualidade efectuadas à cerveja.

Tabela 7 – Resultados de controlo de qualidade, dos parâmetros coloração, turvações e controle organolético.

Ensaio	Coloração (EBC's)	Turvação (EBC's)			Prova (u.a.)
		Total	20°C	0°C	
Brc	6,7±0,3	1,9±0,8	0,5±0,1	0,7±0,1	-0,2±0,1
EA1	6,4±0,4	2±1	0,6±0,1	0,7±0,1	-0,4±0,1
EB1	6,9±0,1	2,8±0,9	1±1	0,8±0,3	-0,2±0,1
EC1	6,9±0,7	2±1	0,5±0,1	0,6±0,1	-0,4±0,2
EC2	6,5±0,5	1,3±0,5	0,5±0,1	0,6±0,1	-0,1±0,1
EC3	7,0±0,6	1,1±0,2	0,6±0,1	0,7±0,5	-0,2±0,2
EC4	7,1±0,3	1,2±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	-0,4±0,1

O parâmetro coloração mede a tonalidade da cor da cerveja, mais clara ou mais escura, e deve assumir valores entre 6 e 8 EBC's. Verifica-se que para todos os ensaios esta gama é respeitada.

A turvação mede o quanto cristalina e límpida a cerveja se apresenta. A análise de turvação total consiste em colocar a cerveja numa estufa a 65°C durante 5 dias findo os quais se retira e se coloca em banho de água a 0°C durante 24 horas. Este procedimento simula o envelhecimento da cerveja. Os valores registados devem ser inferiores a 3,5 EBC's. Verificou-se que todos os ensaios respeitam esta restrição, exceptua-se o ensaio EB1 que apresentou leituras superiores. De entre os ensaios do limite C, verifica-se que o ensaio EC3 foi o que registou valores inferiores.

A turvação a 20°C consiste em fazer as leituras no turbídimetro a uma cerveja sujeita a um banho de água a 20°C durante cerca de 10 minutos. Os valores registados não devem ser superiores a 0,7 EBC's. Verificou-se que na generalidade todos os ensaios cumprem esta restrição, exceptua-se o ensaio EB1.

A turvação a 0°C, por seu lado, baseia-se nas mesmas leituras mas a uma cerveja sujeita a um banho a 0°C durante 24 horas. Os valores lidos não devem ser superiores a 0,9 EBC's. Verificou-se que na maioria dos ensaios realizados este valor é respeitado, exclui-se o ensaio EB1.

Pode concluir-se que o tempo de ebulição, variável em estudo no limite B, influi a elevadas turvações.

A análise de controlo organolético consiste em dar a provar a cerveja a uma equipa de provadores da Unicer habilitada para o efeito. Esta é uma análise de extrema importância tendo esta equipa competência para reprovar uma cerveja e impedi-la de sair para o mercado. As cotações são dadas de -3 a 1 (unidades arbitrárias) sendo que quanto menor for esta nota pior é a cerveja. Nos experimentos realizados as melhores notas foram conseguidas pelos ensaios EA1, EC1 e EC4. O ensaio EC3 teve classificação média semelhante à do perfil de controlo.

4.4.2. Álcoois/ésteres

As tabelas 8 e 9 apresentam os resultados das análises de perfil aromático. Para estes parâmetros apenas o *DMS* apresenta restrições. A cerveja final não deve apresentar valores superiores a 40 (µg/l), que corresponde ao limite a partir do qual se torna possível a sua detecção por humanos. No entanto neste ponto a bibliografia da especialidade é divergente.

Os níveis de *DMS* devem ser tão baixos o quanto possível pois este composto apresenta sabores desagradáveis. Esta análise revelou-se um factor limitativo muito importante nos ensaios realizados. Este componente foi exaustivamente analisado no produto final. A influência da ebulição nos níveis de *DMS* é discutida na secção 2.3.

Tabela 8 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de acetaldaído, DMS e álcoois.

Ensaio	Acetaldaído (mg/l)	DMS (µg/l)	n-propanol (mg/l)	Isobutanol (mg/l)	Álcoois amílicos (mg/l)	Total álcoois (mg/l)
Brc	5±1	27±4	14±2	13±2	76±9	101±13
EA1	6,54±0,03	26±2	14,9±0,6	12,2±0,3	77±6	105±8
EB1	5,4±0,1	27±1	18±2	15±1	85±8	117±12
EC1	7±3	31±5	15±1	13±2	76±8	104±10
EC2	5,6±0,3	31±5	15±2	12±2	78±5	105±9
EC3	6±4	36±4	15±3	13±2	77±3	105±8
EC4	7±2	36±2	15,0±0,7	13±1	60±36	108±7

Tabela 9 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de ésteres e razão álcoois / ésteres.

Ensaio	Acetato etilo (mg/l)	Acetato amílico (mg/l)	Total ésteres (mg/l)	Álcoois / Esteres
Brc	18±2	1,7±0,2	20±2	5,2±0,8
EA1	17±1	1,4±0,2	18±2	5,7±0,1
EB1	14±3	1,1±0,3	15±3	8±1
EC1	20±2	1,8±0,4	22±3	4,8±0,5
EC2	19±1	1,6±0,1	20,6±0,8	5,1±0,7
EC3	18±2	1,8±0,2	20±3	5±1
EC4	22±2	2,0±0,2	24±2	4,6±0,6

Para os ensaios realizados, verificou-se que os níveis de *DMS* são maiores que o branco. Isto acontece porque ao baixar a temperatura ou tempo estamos a introduzir menos energia no sistema. Portanto estamos a limitar a libertação de *DMS* por abaixamento das taxas de evaporação durante a ebulição e a limitar a degradação térmica da *SMM*. O ensaio EC3 foi o que registou maiores abaixamentos das taxas de evaporação, assim é aquele que regista leituras de *DMS* maiores.

Verifica-se ainda que para todos os ensaios as leituras registadas ficam abaixo do limite de 40 (µg/l). O perfil que mais se aproxima desta marca é o EC3, portanto este ensaio assinala que já estamos a trabalhar muito próximo do ponto óptimo, uma vez que esta restrição se torna activa e os consumos específicos de vapor são mínimos, em relação aos outros ensaios. Assim, não se recomenda o uso de velocidades de recicle menores que a testada.

4.4.3. Estabilidade coloidal

A estabilidade coloidal é um parâmetro fundamental de qualidade. Por definição de uma zona de estabilidade, pode-se prever se a cerveja vai ou não ser estável durante o seu período de validade. Assim, fizeram-se três testes, que consistem em acelerar o envelhecimento da cerveja por procura de compostos reactivos. Os compostos de procura são os polifenóis e proteínas de baixo e elevado peso molecular. Os resultados obtidos encontram-se na figura 6.

Em geral, o centro de massa de cada bolha encontra-se no interior da zona de maior estabilidade, exceptua-se o ensaio EA1 e EC3 onde o índice de polifenóis é ligeiramente superior, por outro lado a mesma observação é válida para o perfil branco. Note-se que o índice de polifenóis pode ser manipulado pela quantidade de adsorvente no filtro de PVPP.

A dispersão de resultados acontece ao longo de índice de proteínas de baixo peso molecular. No entanto, para todos os ensaios realizados verifica-se que os resultados obtidos se encontram na zona de maior estabilidade coloidal.

Por comparação dos resultados obtidos para os ensaios com os resultados do branco, pode concluir-se que os ensaios realizados não afectam de forma negativa a estabilidade coloidal.

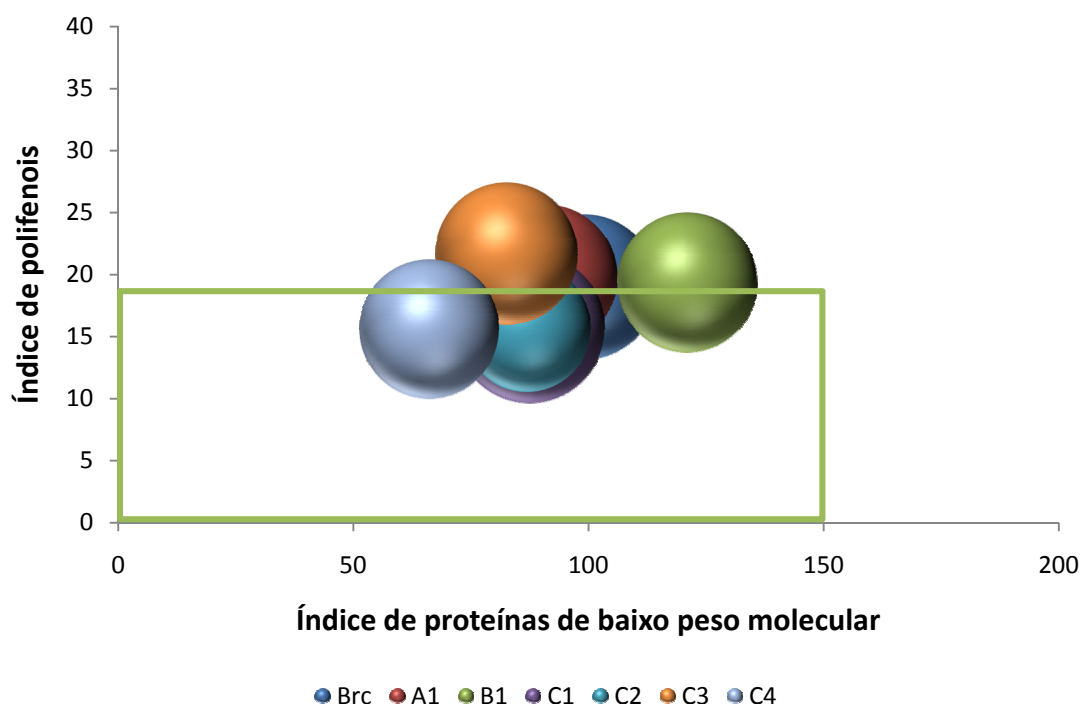


Figura 6 – Resultados das análises de estabilidade coloidal realizadas no equipamento *Analyser 2000PPT*. Análise gráfica. O rectângulo a verde delimita a zona de maior estabilidade coloidal.

4.5. Impactos económicos

Na secção 4.3.1 vimos a influência dos vários perfis de ebulição nos consumos específicos de vapor. Assumindo que o vapor têm um custo de 33,08 (€/ton), a partir dos consumos de vapor e volumes de mosto da cada fabrico retiram-se os custos específicos de vapor na etapa de ebulição, como se mostra na tabela 10. Aqui inclui-se também uma análise estatística do intervalo de confiança a 95%, para a média daqueles custos. Verificou-se que o volume do fabrico na etapa de ebulição é em média de 750 (hl), assim apresenta-se também uma estimativa do custo da fase de ebulição por fabrico.

A partir dos dados apresentados nas secções anteriores, e por desconhecimento do impacto da velocidade da agitação da bomba no número de vezes de recirculação do mosto ao permutador durante a fase de ebulição, foi decidido substituir o perfil de ebulição Branco pelo EC1.

Isto permitiu a aquisição de mais dados, de tal forma que no anexo E se apresenta uma análise estatística, teste de igualdade de médias. Esta análise estatística vem provar uma melhoria efectiva, do ensaio EC1 em relação ao branco, nas variáveis consumos específicos de vapor e taxas de evaporação, que se pretendem minimizar. Prova ainda que as características físico-químicas e sensoriais da cerveja são mantidas com melhoria nos parâmetros turvação a 20°C e a 0°C e controlo organolético.

Tabela 10 – Impacto económico, dos perfis testados, na etapa de ebulição, na sala Nordon.

Ensaio	Nº Amostras	Custos específicos de vapor (€/hl _{mosto})	Abaixamento dos custos específicos de vapor (%)	Intervalo de confiança para a média dos custos específicos de vapor a 95% (%)	Custo da etapa de ebulição para um fabrico com 750 hl de mosto (€)
Branco	40	0,27±0,08	(referência)	[0,24;0,30]	200,5
EA1	8	0,20±0,07	25,1	[0,13;0,27]	150,2
EB1	8	0,28±0,04	-4,8	[0,24;0,32]	210,1
EC1	36	0,16±0,09	39,5	[0,16;0,18]	121,5
EC2	16	0,17±0,01	36,6	[0,16;0,18]	127,1
EC3	8	0,15±0,04	45,6	[0,10;0,19]	109,1
EC4	3	0,18±0,03	32,6	[0,09;0,27]	135,1

O perfil EC1 foi testado primeiramente no mosto Super Bock e posteriormente alargado e implementado nos mostos Cristal, Cheers, Super Bock Green, Super Bock sem álcool e Super Bock Stout, desde 1 de Julho de 2008. Até 31 de Dezembro de 2008, período de 6 meses, foram registadas poupanças de 129 367 (€), comparativamente a igual período de 2007, o que equivale a 258 734 (€/ano).

Da tabela 10, e como o discutido na secção 4.3.1, o perfil EC3 é economicamente o mais vantajoso. Da discussão anterior verificou-se que o perfil EC3 cumpre as restrições impostas aos parâmetros de qualidade, assim este é um ensaio a ser explorado no futuro. Este perfil permite ganhos de cerca de 300 000 (€/ano), por redução dos consumos específicos de vapor.

4.6. Oportunidades de melhoria

Como se viu na secção 2.3.2 a forma mais eficiente de baixar os consumos energéticos na fase de ebulição é por abaixamento das taxas de evaporação. A implementação do perfil de ebulição EC1 vem dar resposta a parte deste problema, contudo a energia adicional necessária para evaporar o vapor de água durante a fervura é perdida através da chaminé. É possível minimizar estas perdas. Devem considerar-se vários aspectos:

- Isolar o sistema de ebulição, tanto o quanto possível, de factores que não podemos controlar, tais como as condições ambientais. Isto permite a estandardização da etapa de ebulição, i.e., todas as ebulições confinadas a um período, onde se verifiquem condições envolventes ao sistema idênticas, devem apresentar consumos específicos de vapor idênticos e taxas de evaporação semelhantes;
- Maximizar a recuperação de massa e energia, que actualmente se perde directamente para a atmosfera por evaporação, de forma a poder ser reutilizável e baixar os consumos energéticos na ebulição;
- Controlar as quantidades de energia necessárias à etapa de ebulição em função da quantidade e mosto presente nesta etapa.

É possível atingir estes objectivos com a implementação de um sistema de recuperação e armazenamento de energia e alteração do algoritmo de controlo, como se discute nas secções seguintes.

4.6.1. Implementação de um sistema de recuperação e armazenamento de energia

Para cumprir os objectivos enunciados atrás propõem-se o uso dos seguintes conceitos:

- I. Low pressure boiling*
- II. Vapor compression*
- III. Energy storage system*

Os pontos *I* e *II* podem ser conseguidos por implementação de um *blower* no topo da chaminé do tanque de ebulição. Este equipamento permite ainda implementar uma nova filosofia na fase de ebulição denominada por *Dynamic Low Pressure Boiling*, esta tecnologia permite produzir mostos com elevada qualidade a taxas de evaporação relativamente baixas, 4,5% a 6%.

Para o ponto *III* é necessária a implementação de dois permutadores de calor. Um de carcaça e tubos para a condensação de vapores e um permutador de placas para o pré-aquecimento do mosto antes da fase de ebulição. É requerida ainda a implementação de um tanque de armazenamento de água quente capaz de apresentar gradação térmica. Estes conceitos podem combinam-se de várias formas.

4.6.1.1. Cenário I

Os vapores gerados durante a fase de ebulição, passam pelo *blower* que controla as taxas de evaporação e permite que esta fase esteja isolada das condições atmosféricas, como se mostra na figura 7.

Estes vapores são conduzidos a um permutador de carcaça e tubos onde condensam, por transferência de calor para uma corrente de água a 75°C vinda da base do tanque de armazenamento de energia. Esta corrente regressa agora ao topo do tanque com uma temperatura de cerca de 99°C.

O mosto vindo do filtro passa para o tanque tampão, é enviado ao permutador para aquecimento. Esta proposta prevê que a rampa de aquecimento se faça com a água quente a cerca de 99°C existente no topo do tanque de armazenamento de energia. Esta água encontra-se próximo da temperatura de ebulição, assim com injeção directa de vapor de água vivo, controlado por um *PID*, recebe o incremento de energia necessário para passar ao mosto calor latente, para além de calor sensível. Tira-se assim partido de pequenas diferenças de temperatura para baixar os consumos de vapor nesta fase. As quantidades de vapor injectadas devem ser purgadas, sob a forma de água quente da base do tanque, para que se mantenha o nível de fluido.

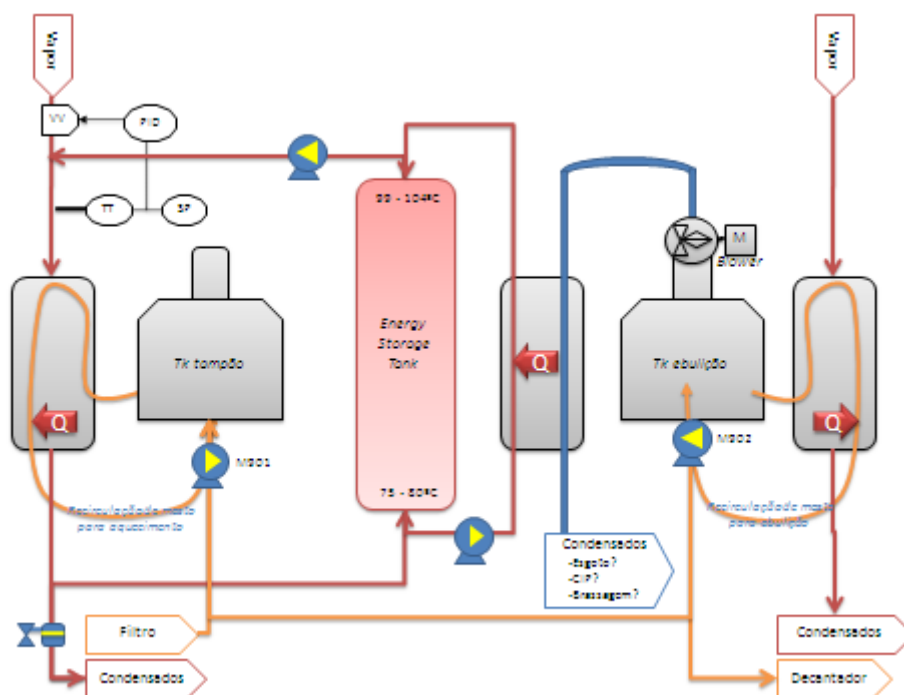


Figura 7 – Proposta de implementação de um sistema de armazenamento de energia, cenário I. As linhas a laranja representam correntes de mosto, as linhas a vermelho representam correntes de energia (água quente) e as linhas a azul representam os vapores libertados durante a fase de ebulição.

4.6.1.2. Cenário II

O modo de funcionamento é semelhante ao do cenário anterior. Considera-se agora que durante a rampa de aquecimento, o mosto em recirculação no tanque tampão passa primeiro no permutador de placas onde se faz um pré-aquecimento, como se mostra na figura 8.

Este mosto pré-aquecido passa depois ao permutador do tanque tampão, onde recebe o incremento de energia necessário, para que se registre a temperatura requerida de 93°C antes de ser transferido para a caldeira de ebulição. A quantidade de vapor gasta nesta fase é, em princípio residual, comparativamente com a situação actual, uma vez que o permutador de placas é capaz de elevar a temperatura da corrente de recirculação até perto dos 99°C.

No entanto convém referir que a temperatura do mosto no seio do tanque tampão não será esta uma vez que a recirculação só começa ao fim de um dado volume de mosto filtrado. Convém ainda referir que a passagem no permutador de carcaça e tubos é necessária e da maior importância durante a fase de arranque do sistema, uma vez que ainda não existe água quente necessária ao pré-aquecimento.

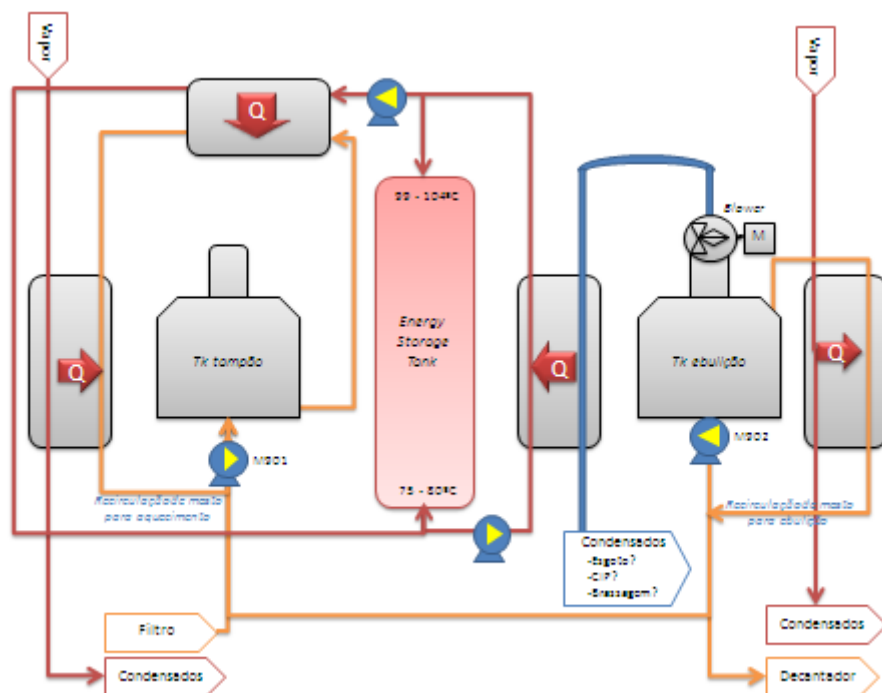


Figura 8 – Proposta de implementação de um sistema de armazenamento de energia, cenário II.

4.6.1.3. Cenário III

Aqui, prevê-se a adaptação do actual tanque tampão em tanque de ebulição. Para isso será necessário colocar um chapéu de dispersão de mosto no tanque tampão e substituir a actual bomba de recirculação do mosto por duas outras idênticas às da caldeira de ebulição.

Em relação à situação actual as ebulições passam a fazer-se alternadamente entre os actuais tanques tampão e de ebulição. Estes dois tanques passam a estar ligados a um *blower* para controlo das taxas de evaporação.

O funcionamento do tanque de armazenamento de energia é idêntico ao dos cenários anteriores. Porém, o mosto vindo do filtro pode sofrer de imediato um pré-aquecimento num permutador de placas, como se mostra na figura 9, o pré-aquecimento como descrito no cenário II também é possível neste cenário. A melhor forma de se realizar este pré-aquecimento deve ser tal que tenha em consideração o impacto na qualidade do produto final.

Neste cenário, o actual permutador do tanque tampão pode ser usado durante a rampa de aquecimento e o permutador do tanque de ebulição durante a fase de ebulição, alternadamente e em cada tanque.

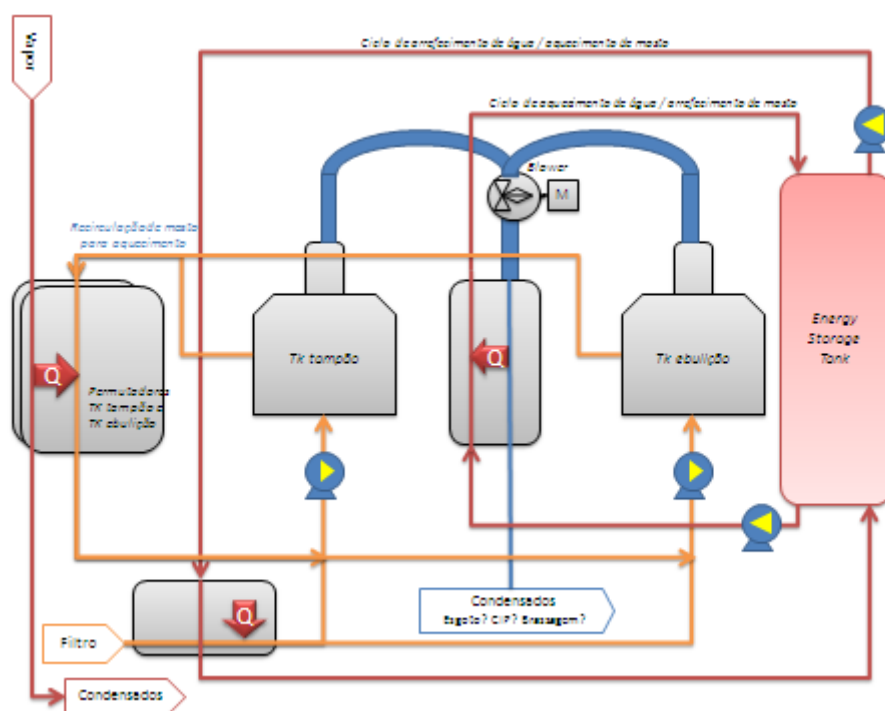


Figura 9 – Proposta de implementação de um sistema de armazenamento de energia, cenário III.

4.6.1.4. Dimensionamento dos equipamentos

Na tabela 11 apresentam-se os principais resultados do dimensionamento dos equipamentos que compõem os cenários atrás apresentados. Estes cálculos apresentam-se no anexo F, juntamente com as hipóteses simplificativas formuladas que permitem este dimensionamento.

Tabela 11 – Dimensionamento dos equipamentos para o sistema de recuperação e armazenamento de energia.

Equipamento	Parâmetro de projecto
Permutador de carcaça e tubos	Área = 740 m ²
Tanque de armazenamento de energia	Volume = 100 m ³
Blower	Caudal = 75 hl/h
Permutadores de placas	Área = 1040 m ²

4.6.1.5. Comparação entre cenários

O potencial máximo de poupanças do sistema de ebulição actual está avaliado em 886 584 (€/ano), anexo G. Para tornar possível a comparação entre cenários, pode-se definir o rendimento relativo de cada cenário com base na rampa de aquecimento e o rendimento global com base no potencial máximo de poupanças que este sistema oferece. Estes cálculos encontram-se no anexo G e os principais resultados apresentam-se na tabela 12.

Tabela 12 – Rendimentos, relativo e global, e recuperações anuais previstas, para cada cenário, devido à implementação de um sistema de recuperação e armazenamento de energia.

Cenário	Rendimento relativo (%)	Rendimento global (%)	Recuperações previstos (€/ano)
I	60	54	481 018
II	68	61,5	545 154
III	76	75	663 951

Atendendo ao sistema de integração energética em análise em cada cenário, bem como a uma abordagem conservativa para as recuperações energéticas previstas, então os valores encontrados, no cálculo dos rendimentos globais, são razoáveis.

Pode calcular-se os períodos de recuperação do investimento inicial. Esta avaliação foi feita com base no valor actual líquido, actualizando para o momento zero as rentabilidades / recuperações anuais previstas. Considerou-se uma taxa de juro de 2,177 %, igual à EURIBOR a um ano, em 17 de Fevereiro de 2009, de acordo com o serviço EUROSTAT do Banco de Portugal. Considerou-se ainda que o valor do investimento inicial é de 1 000 000 (€), para os cenários I e II, de acordo com a informação da *Danfoss*.

Para estes dados, o período de recuperação do investimento inicial, para o cenário I está avaliado em 2 anos e 2 meses e para o cenário II é de 1 ano e 10 meses. Para um horizonte comum de 10 anos, o cenário I permite obter resultados, antes de impostos de 3 810 273 (€) e o cenário II de 4 318 312 (€), estes valores estão reportados ao momento zero.

Dos resultados obtidos retira-se que o cenário II é o mais vantajoso, maiores rentabilidades / recuperações anuais previstas e menor tempo de recuperação do investimento inicial. Em relação ao cenário III esta avaliação não foi efectuada uma vez que não se dispõem do valor do investimento inicial.

4.6.2. Controlo

4.6.2.1. Alteração do algoritmo de controlo básico

Actualmente o controlo da etapa de ebulição da sala Nordon é feito pelo tempo de ebulição e por retroalimentação negativa do sinal da temperatura do mosto. Faz-se actuar um PID na alimentação de vapor ao permutador de forma a levar a temperatura do mosto à saída do permutador para o valor desejado. Este tipo de controlo não exerce nenhuma limitação à quantidade de vapor consumida durante a etapa de ebulição.

Uma filosofia de controlo baseada na quantidade de energia gasta por ebulição em função do volume de mosto é recomendada. Assim, a proposta que se apresenta no anexo H, refere-se à mudança de critérios a controlar. Propõem-se ainda que a ebulição possa ser feita em mais do que três fases, o que poderá ser importante para a implementação da tecnologia *Dynamic Low Pressure Boiling*.

Foi efectuada um levantamento de dados para o perfil EC1 de forma a identificar uma primeira estimativa para os caudais mássicos específicos de vapor em cada fase ($c_{mev}(i)$), variável do

algoritmo de controlo proposto, que permite regrar e baixar os consumos energéticos. Este cálculo encontra-se no anexo I e os valores encontrados são:

- Fase I: 9,77 (kg_{vapor} /hl_{mosto quente} h)
- Fase II: 2,34 (kg_{vapor} /hl_{mosto quente} h)
- Fase III: 7,69 (kg_{vapor} /hl_{mosto quente} h)

O algoritmo proposto permite ainda garantir que o mosto regista as temperaturas pretendidas em cada fase. Por controlo da pressão a montante do *blower* permite regrar, controlar e diminuir as taxas de evaporação produzindo mostos de elevada qualidade e quantidades de DMS baixos.

4.6.2.2. Implementação de um sistema de controlo aumentado

Foi detectado que por vezes o autómato existente não responde convenientemente, deixando que se atinjam temperaturas em 2 ou 3°C maiores que as desejadas, como se mostra no anexo J. Detectaram-se também prolongamentos do tempo de ebulição não autorizados pelo operador. De forma a tornar o sistema de controlo mais robusto que o actual propõem-se a implementação de um sistema de controlo aumentado, ou de supervisão.

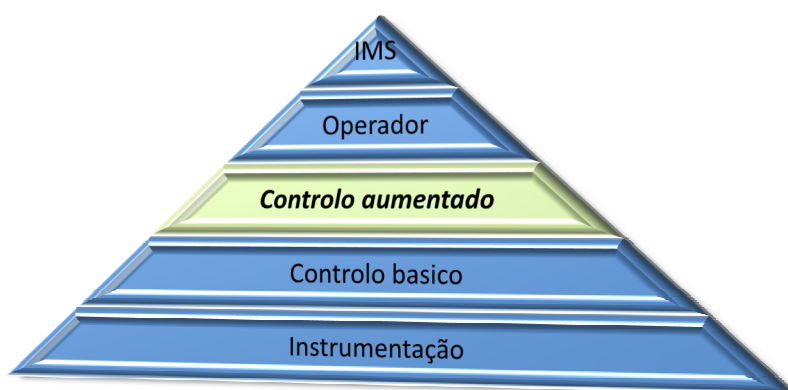


Figura 10 – Pirâmide do controlo de processos [35].

O controlo aumentado, ou supervisão, é um nível intermédio que não está presente nos algoritmos convencionais e introduz um patamar extra, na hierarquia de controlo, entre o controlo básico e o operador, como se mostra na figura 10. Uma característica importante destes algoritmos é a sua capacidade de previsão [35-43]. Os objectivos deste tipo de controlo podem ser sumarizados [43]:

- Prevenir violações nos sinais de entrada e saída;
- Direcctionar algumas variáveis de saída para os seus valores óptimos enquanto mantém outras variáveis de saída em gamas de valores específicos;
- Prevenir alterações excessivas nas variáveis de entrada;
- Controlar tantas variáveis quanto possível mesmo quando não estão disponíveis sensores ou actuadores.

A figura 11 mostra a forma de actuação de um sistema de supervisão sob a válvula de controlo de fluxo de vapor admitido à caldeira de ebulição. O modelo que se mostra é o *Multiple Input Single Output (MISO)*, i.e., a acção de controlo é sobre um equipamento e obedece a múltiplas entradas no algoritmo de controlo.

O modelo *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* pode ser obtido a partir do anterior por aplicação do princípio da sobreposição. Neste caso a acção de controlo é feita em múltiplos equipamentos, podendo mesmo alterar valores de *Set Point* e obedece a múltiplas entradas no algoritmo de controlo.

Existem vários algoritmos disponíveis, os mais poderosos pertencem às classes de redes neurais e lógica difusa [35-43].

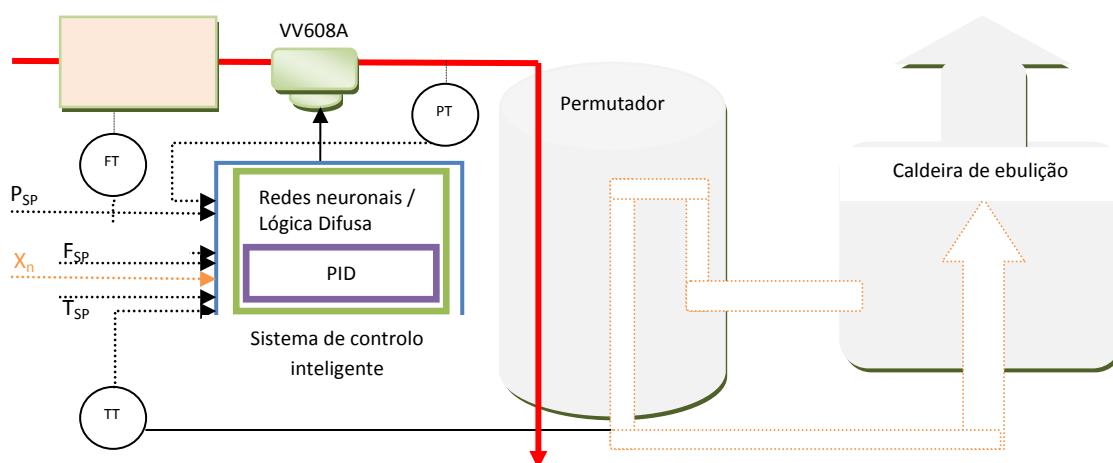


Figura 11 – Proposta para a implementação de um sistema de controlo inteligente, onde X_n representa variáveis que influenciam a ebulição e possíveis de ser medidas, por exemplo as condições ambientais. Modelo Multiple Input Single Output (MISO).

Recomenda-se a implementação de um sistema de supervisão por lógica difusa por ser uma base poderosa de resolução de problemas, especialmente nas áreas de controlo e tomada de decisão com múltiplos objectivos.

A lógica difusa tem grande importância a nível industrial uma vez que proporciona uma metodologia formal para representar, manipular e implementar conhecimentos humanos de como controlar um sistema, basicamente emula a tomada de decisões por humanos. Isto permite a construção de sistemas simples e de fácil manutenção.

5. Optimização da etapa de ebulição nas salas Ziemann e Meura

O sistema de ebulição instalado nestas salas é constituído por um tanque de ebulição ao qual está acoplado um permutador de carcaça e tubos vertical, localizado no interior do tanque, como se mostra na figura 12.

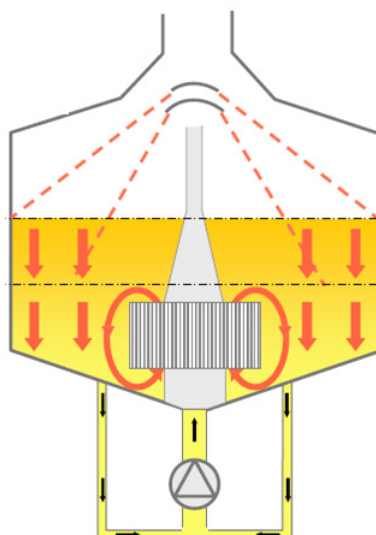


Figura 12 – Representação esquemática das caldeiras de ebulição da sala Ziemann-Meura.

No caso das salas Ziemann e Meura não existe um contador de vapor acoplado a cada caldeira de ebulição, assim não foi possível calcular os consumos específicos de vapor para cada sala.

Dadas estas limitações as performances dos ensaios foram avaliadas à custa das taxas de evaporação, os inconvenientes desta avaliação foram discutidos na secção 4.3.2.

O sistema de controlo é diferente do da sala Nordon, aqui o controlo é feito pelo tempo de duração da etapa e pela pressão de vapor admitido aos permutadores. Verificou-se também que o autómato existente controla as duas caldeiras da mesma forma e é o mesmo para as duas salas. Observou-se que os permutadores têm diferentes diâmetros, i.e., diferentes áreas de transferência de calor. Apesar dos esforços efectuados não se encontrou na Unicer documentação acerca destes permutadores.

Os ensaios realizados seguem a estratégia descrita no capítulo 3. As adaptações necessárias ao tratamento de dados, para esta sala, apresentam-se nas secções seguintes.

5.1. Levantamento de dados

Efectuou-se um levantamento de dados de forma a compreender as variáveis que podem ser alteradas neste processo e também com o objectivo de perceber a lógica de controlo existente. Estes dados encontram-se na tabela 13.

Tabela 13 – Situação actual dos parâmetros de controlo do mosto Pilsen, nas salas Ziemann e Meura.

Pressão de vapor no permutador	3,1 barg
Tempo de ebulição	60 Minutos
Velocidade de agitação da bomba durante a ebulição	30%
Velocidade de agitação da bomba durante a ida do mosto aos painéis de lúpulo	55%

5.2. Ensaios realizados

Foi adoptada uma abordagem holística. Procurou-se perceber qual o impacto do tempo de ebulição e da pressão de vapor admitido ao permutador. Estes parâmetros foram estudados isoladamente como se segue:

- Limite A – alteração na pressão de vapor;
- Limite B – alteração no tempo.

Definiram-se inicialmente dois ensaios, que constituíram o ponto de partida para a optimização deste sistema de ebulição. Estes ensaios estão caracterizados na tabela 14.

No segundo patamar do ensaio EA1 esperam-se reduções significativas nas taxas de evaporação, este ensaio foi construído de forma a implementar-se nesta sala o conceito *Dynamic Boiling*. No perfil EB1 retiraram-se 5 minutos à etapa de ebulição de forma a estudar a influência do tempo na optimização dos sistemas de ebulição desta sala.

Tabela 14 – Definição dos diferentes ensaios que constituíram o ponto de partida para a optimização da etapa de ebulição do sistema de ebulição da sala Ziemann-Meura. A contagem do tempo, no controlador, é decrescente.

	Tempo (min)	Agitação da bomba (%)	Pressão de vapor (bar)
Branco	Dos 60 aos 45	55	3,1
	Dos 45 aos 15	30	3,1
	Dos 15 aos 0	55	3,1
EA1	Dos 60 aos 45	55	3,1
	Dos 45 aos 15	30	2,5
	Dos 15 aos 0	55	3,1
EB1	Dos 55 aos 45	55	3,1
	Dos 45 aos 15	30	3,1
	Dos 15 aos 0	55	3,1

Note-se que nestas salas a ebulição decorre ao longo de 60 minutos, ao contrário da sala Nordon que demora 70 minutos. Isto deve-se à forma como o controlo é efectuado. O mosto vindo do filtro entra na caldeira onde sofre aquecimento e ebulição. A contagem do tempo inicia-se quando esta transferência é concluída, nesta altura o mosto já atingiu temperaturas superiores a 100°C, assim o tempo efectivo de ebulição ronda os 70 minutos.

5.3. Impactos no fabrico do mosto

5.3.1. Taxas de evaporação

As taxas de evaporação são calculadas tal como o descrito na secção 3.5.2. Convém frisar aqui que nestas salas, e à semelhança daquilo que acontece na sala Nordon, as taxas de evaporação são influenciadas pelas condições atmosféricas. Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 15 e 16.

Destas tabelas podemos verificar que o perfil EA1 é o que consegue maiores reduções nas taxas de evaporação. De acordo com a análise efectuada em 4.3.2, este será o perfil que consegue maiores reduções nos consumos específicos de vapor. Esta observação é válida nas duas salas, Ziemann e Meura.

Tabela 15 – Taxas de evaporação, abaixamentos das taxas de evaporação e intervalo de confiança a 95%, para a média das taxas de evaporação, na sala Ziemann.

Ensaio	Nº amostras	Taxas de evaporação (%)	Intervalo de confiança para a média a 95% (%)	Abaixamento das taxas de evaporação (%)
Branco	14	9±4	[6; 11]	(referência)
EA1	10	5±2	[4; 7]	38,8
EB1	3	7,7±0,6	[6; 10]	12,8

Tabela 16 – Taxas de evaporação, abaixamentos das taxas de evaporação e intervalo de confiança a 95%, para a média das taxas de evaporação, na sala Meura.

Ensaio	Nº amostras	Taxas de evaporação (%)	Intervalo de confiança para a média a 95% (%)	Abaixamento das taxas de evaporação (%)
Branco	13	14±2	[13; 15]	(referência)
EA1	10	11±3	[8; 13]	33,2
EB1	3	12±2	[4; 20]	17,0

Por comparação dos vários perfis nas duas salas, pode-se verificar que a sala Meura apresenta maiores taxas de evaporação, logo maiores consumos específicos de vapor. Isto deve-se à lógica de controlo, i.e., o autómato que controla estas duas salas faz este controlo de uma forma indiferenciada, quando os permutadores de calor são diferentes. O permutador da sala Meura tem maior área de transferência de calor, como se pode observar, *in situ*, pelo diâmetro destes equipamentos e como se testemunha através do cálculo das taxas de evaporação.

5.3.2. Taxas de isomerização

As taxas de isomerização são calculadas como o descrito na secção 3.5.3. O mosto vindo das caldeiras de ebulição destas duas salas é misturado na etapa seguinte. A amostragem necessária para análise do amargor, e que permite este cálculo, é realizada na etapa de arrefecimento de mosto. Assim, e para tornar possível este cálculo, partiu-se do princípio que o volume de mosto arrefecido é dado por igual contribuição de volume de mosto da etapa de ebulição. Estes resultados estão presentes na tabela 17.

Verifica-se que o perfil EA1 é o que melhor aproveitamento faz dos princípios activos do lúpulo, i.e., apresenta taxas de isomerização superiores.

Tabela 17 – Taxas de isomerização, aumento das taxas de isomerização e intervalo de confiança a 95%, para a média das taxas de isomerização, na sala Ziemann-Meura.

Ensaio	Nº amostras	Taxas de isomerização (%)	Intervalo de confiança para a média a 95% (%)	Aumento das taxas de isomerização (%)
Branco	12	34±4	[32; 37]	(referência)
EA1	9	40±3	[37; 43]	15,6
EB1	4	37±2	[34; 40]	7,3

5.4. Impactos na qualidade da cerveja

5.4.1. Resultados de qualidade e controlo organolético

Os resultados das análises de controlo da qualidade efectuadas ao produto final encontram-se nas tabelas 18 e 19 que se seguem.

Tabela 18 – Resultados, de controlo de qualidade, dos ensaios realizados na sala Ziemann-Meura.

Ensaio	Amargor (UA)	Estabilidade de espuma (s)	Polifenóis totais (mg/l)	Azoto aminado livre (mg/l)	SO ₂ total (mg/l)
Brc	19±3	296±19	108±18	119±25	6±1
EA1	20±2	277±14	92±4	117±28	5±3
EB1	20±4	342±26	109±16	97±2	6±1

Tabela 19 – Resultados de controlo de qualidade, dos parâmetros coloração, turvações e controle organolético.

Ensaio	Coloração (EBC's)	Turvação (EBC's)			Prova (u.a.)
		Total	20°C	0°C	
Brc	7±2	1,0±0,3	0,5±0,2	0,6±0,1	-0,5±0,2
EA1	7,2±0,4	1,3±0,3	0,5±0,1	0,6±0,1	-0,4±0,3
EB1	6,6±0,4	7,3±0,3	0,5±0,1	0,6±0,1	-0,6±0,1

Daqui pode-se observar que os ensaios EA1 e EB1 cumprem as restrições para os parâmetros em análise, exceptuar-se a turvação total no ensaio EB1 que ultrapassou largamente o limite máximo de 3,5 EBC's.

Pode concluir-se que a redução em 5 minutos no tempo de ebulição da sala Ziemann-Meura provoca um impacto negativo no parâmetro turvação total.

5.4.2. Álcoois/ésteres

Os resultados das análises efectuadas ao perfil aromático encontram-se nas tabelas 20 e 21 que a seguir se apresentam.

Tabela 20 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de acetaldáido, DMS e álcoois.

Ensaio	Acetaldáido (mg/l)	DMS (µg/l)	n-propanol (mg/l)	Isobutanol (mg/l)	Álcoois amílicos (mg/l)	Total álcoois (mg/l)
Brc	5±3	38±3	15±1	11±1	54±33	100±14
EA1	5±3	37±9	18±3	13±2	79±3	115±12
EB1	4,0±0,1	40±1	14±1	12,9±0,2	83±4	111±4

Tabela 21 – Resultados das análises de perfil aromático. Resultados das análises de acetaldáido, ésteres de razão álcoois / ésteres.

Ensaio	Acetato etilo (mg/l)	Acetato amílico (mg/l)	Total ésteres (mg/l)	Álcoois / Esteres
Brc	17±2	1,4±0,3	18±2	4±2
EA1	15±3	1,3±0,5	17±3	7±2
EB1	19,6±0,1	1,72±0,04	21,3±0,1	5,2±0,2

Daqui pode-se observar que o *DMS* está, em termos médios e em todos os ensaios realizados, muito próximo de limite de 40 (µg/l). Assim este parâmetro indica a impossibilidade de continuar a minimizar os consumos energéticos deste sistema, uma vez que esta restrição se tornou activa.

5.4.3. Estabilidade coloidal

Como se pode observar, pela figura 13, o centro de massa destas bolhas encontra-se na zona de maior estabilidade, com destaque para o ensaio EA1 que apresenta níveis de polifenóis e proteínas reactivas bastante baixos. Pode concluir-se então que os ensaios realizados mantêm a estabilidade coloidal da cerveja, sendo este um dos objectivos deste trabalho.

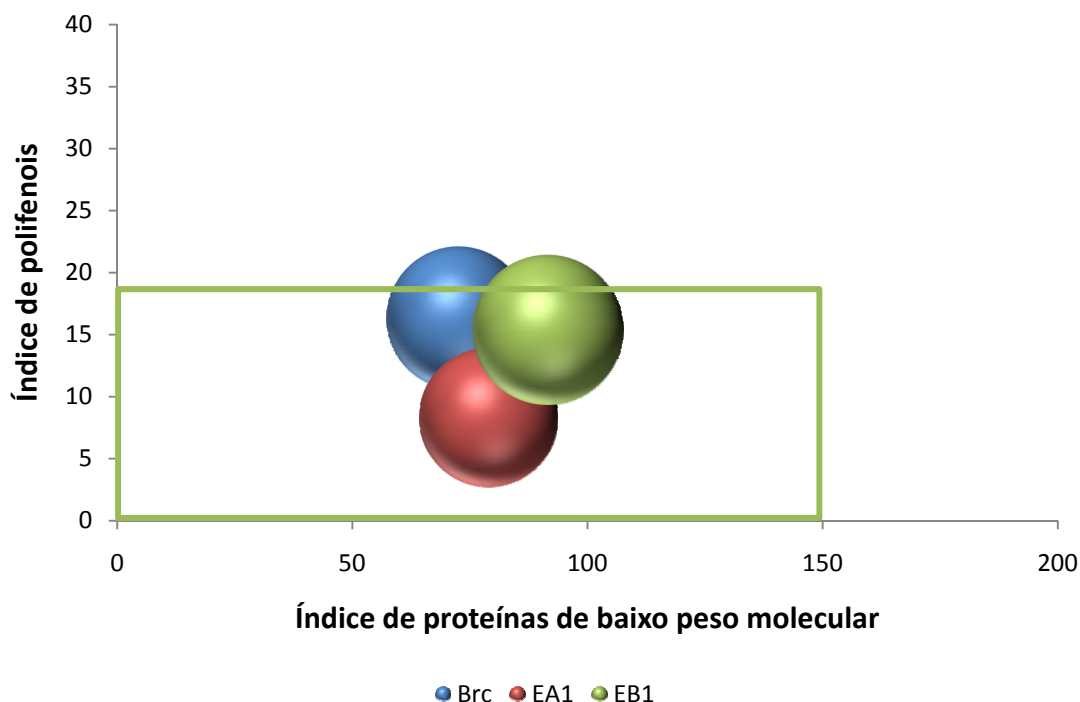


Figura 13 – Resultados das análises de estabilidade coloidal realizadas no equipamento *Analyser 2000PPT*. Análise gráfica. O rectângulo a verde delimita a zona de maior estabilidade coloidal.

5.5. Impactos económicos

Na discussão anterior demo-nos conta da impossibilidade de realizar mais ensaios de optimização uma vez que as restrições impostas para os níveis de *DMS* no produto final se tornaram activas. Das análises de qualidade vimos que o ensaio EA1 respeita todas as restrições e é o mais vantajoso em termos energéticos.

Assim, foi implementado o perfil de ebulições EA1 a partir de 8 de Dezembro de 2008. Na semana de 8 a 14 de Dezembro de 2008 registaram-se poupanças de 1 225 (€), comparativamente ao período homólogo de 2007, estas poupanças representam ganhos de 63 700 (€/ano), por redução das taxas de evaporação.

5.6. Oportunidades de melhoria

Como se verificou, secção 5.3.1, as taxas de evaporação da sala Meura são bastante superiores às da sala Ziemann. Isto acontece porque o controlador é o mesmo para as duas salas e insensível às características geométricas dos permutadores.

Recomenda-se a alteração do algoritmo de controlo básico de acordo com a proposta apresentada para a sala Nordon, anexo H, e a implementação de controladores independentes para cada sala. Desta forma é possível baixar ainda mais as taxas de evaporação, ou seja os consumos específicos de vapor.

6. Optimização dos consumos de água no enxaguamento dos filtros trap

Paralelamente à optimização da etapa de ebulição nas salas Nordon e Ziemann-Meura, realizaram-se ensaios de optimização dos consumos de água nos filtros trap, nas linhas de filtração Orion e Schenk, como trabalho suplementar a este projecto.

A principal função dos filtros trap é reter partículas de terra de diatomáceas ou kieselgur (KG) e de polivinilpolipirrolidona (PVPP) que possam ter escapado da malha daqueles filtros.

O kieselgur é um pó finamente dividido e extremamente poroso, tem como função reter proteínas reactivas e responsáveis por turvação. Quando existe kieselgur na cerveja esta adquire um aspecto barrento.

Por seu lado, o PVPP é um polímero de cadeia longa, tem por função reter os polifenóis reactivos responsáveis por turvação na cerveja e instabilidade coloidal.

Assim, os filtros trap são a última linha de protecção contra substâncias ou objectos indesejáveis. Depois deste equipamento a cerveja é armazenada em tanques de cerveja filtrada onde aguarda até ser acondicionada, em diferentes tipos de embalagens.

A figura 14 representa as linhas de filtração Orion e Schenk, onde se encontra a localização dos filtros trap que aqui se apresentaram. Como se pode observar, a linha Orion tem dois filtros trap localizados depois do filtro PVPP. A linha Schenk apresenta também estes dois filtros, adicionalmente tem um outro filtro localizado entre o filtro de kieselgur e o filtro PVPP.

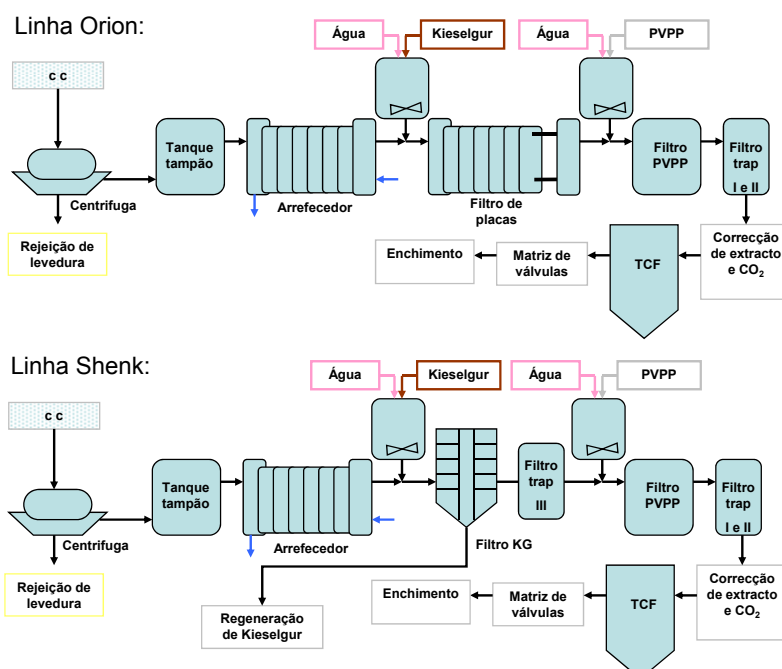


Figura 14 – Representação esquemática das linhas de filtração Orion e Schenk. Posição relativa dos vários filtros trap.

Os filtros trap I e II das linhas de filtração Orion e Schenk são idênticos entre si, o filtro trap III difere dos anteriores por apresentar uma malha mais aberta.

O sistema físico nos diferentes filtros é o mesmo e consiste numa resistência física ao fluxo de fluido, não existindo qualquer interacção química. Assim, o enxaguamento dos filtros trap tem por objectivo libertar a malha destes filtros das partículas retidas de forma a aliviar as perdas de carga durante a filtração da cerveja. Nas secções seguintes apresentam-se os resultados da optimização dos consumos de água na etapa de enxaguamento destes filtros.

6.1. Definição das variáveis em estudo e restrições do sistema

Numa primeira abordagem efectuou-se um estudo de forma a perceber as variáveis que se podem manipular, para atingir os objectivos pretendidos. Decidiu-se então trabalhar com os caudais e tempos de enxaguamento.

Foram assumidas como restrições para este sistema as seguintes:

- Manter a capacidade de filtração dos filtros trap, ao longo do ciclo de filtração, sem que estes colmatem antecipadamente;
- Os filtros trap não são factor de decisão para terminar um ciclo de filtração, o mesmo se deve verificar após ensaios de optimização;
- O tempo de vida útil de cada filtro trap deve ser mantido.

Nas secções seguintes apresentam-se as situações em que se encontraram os programas de enxaguamento e a situação em que ficaram após os ensaios de optimização.

6.2. Linha Orion

6.2.1. Trap's I/II

Na tabela 22 apresenta-se um levantamento da situação anterior e após optimização. São apresentados apenas os passos onde existe consumo efectivo de água, os restantes passos omitidos são de preparação de equipamentos para criar condições para o enxaguamento.

Tabela 22 – Situação da receita de enxaguamento antes dos ensaios de optimização.

Passo	Descrição	Antes		Depois	
		Tempo (s)	Caudal (hl/h)	Tempo (s)	Caudal (hl/h)
2	Enxaguamento com água fria	240	650	200	650
3	Enxaguamento com água quente	240	650	200	650
4	Enxaguamento com água fria	240	650	30	650

Da tabela anterior pode verificar-se que na situação anterior o enxaguamento demorava 12 minutos e gastavam-se 13 000 litros de água. Após os ensaios de optimização esta etapa passou a demorar cerca de 7 minutos e a gastar 7472 litros de água. Isto representa um abaixamento de consumos de água de 42,5%.

6.3. Linha Schenk

6.3.1. Trap's I/II

Na tabela 23 apresentam-se as situações anteriores e após ensaios de optimização. Como se verifica antes dos ensaios o enxaguamento destes filtros demorava 9 minutos e consumia 9759 litros de água. Após ensaios de optimização passou a demorar 4 minutos e a gastar 4333 litros de água. Isto representa um abaixamento dos consumos de água de 55,6%.

Tabela 23 – Situação da receita de enxaguamento antes e após os ensaios de optimização.

Passo	Descrição	Antes		Depois	
		Tempo (s)	Caudal (hl/h)	Tempo (s)	Caudal (hl/h)
2	Enxaguamento no sentido contrário com água quente	300	650	120	650
3	Enxaguamento no sentido directo com água quente	240	650	120	650

6.3.2. Traps's III

Na tabela 24 apresenta-se um levantamento da situação anterior e posterior à optimização. São apresentados apenas os passos onde existe consumo efectivo de água, os restantes passos estão omissos.

Tabela 24 – Situação da receita de enxaguamento antes dos ensaios de optimização.

Passo	Descrição	Antes		Depois	
		Tempo (s)	Caudal (hl/h)	Tempo (s)	Caudal (hl/h)
2	Enxaguar tubagem	60	300	30	300
3	Enxaguar filtro	0	300	0	300
6	Enxaguar no sentido contrario o filtro	300	750	100	750
7	Enxaguar no sentido contrario o filtro com água quente	300	750	30	300
8	Enxaguar no sentido directo o filtro com água quente	300	750	100	750
9	Enxaguar no sentido directo o filtro com água fria	300	750	30	300
10	Esvaziar filtro trap com pressão de CO2	45	0	45	0

Por comparação destes dados podemos verificar que antes dos ensaios de optimização a fase de enxaguamento dos filtros trap demorava 21 minutos e consumia 25500 litros de água. O enxaguamento optimizado passou a demorar cerca de 5 minutos e a gastar 4916 litros de água. Estes dados correspondem a um abaixamento de consumos de água de 80,7%.

6.4. Impactos económicos

Para esta avaliação considera-se que a água, nas condições de fabricação, tem um custo de 0,68 (€/m³) e tem igual custo, quer seja água à temperatura ambiente ou aquecida.

Nos trap's I e II da linha Orion conseguiu-se uma redução de 5 528 litros, o que equivale a 3,75 (€/trap enxaguamento). Em 2008 registaram-se 268 ciclos de filtração de cerveja nesta linha, no fim de cada ciclo os filtros são sujeitos a um enxaguamento. Assim as poupanças anuais, na linha Orion, estão avaliadas em 2 015 (€/ano).

Na linha Schenk, nos trap's I e II conseguiram-se reduções de 5 417 litros de água, ou seja 3,68 (€/trap enxaguamento). No trap III as reduções são de 20 583 litros, i.e., 14 (€/trap enxaguamento). Na linha Schenk, em 2008, registaram-se 256 ciclos de filtração. Assim, as poupanças conseguidas nesta linha, por abaixamento dos consumos de água estão avaliadas em 5 469(€/ano).

6.5. Oportunidades de melhoria

Da comparação dos programas de enxaguamento verifica-se que para cada filtro trap I/II e III e por cada linha os programas são diferentes, embora o sistema físico seja idêntico. Da comparação dos vários programas existentes verifica-se que o do trap III é o mais bem conseguido, assim parte-se desta base para a uniformização destes enxaguamentos. Propõem-se os passos descritos na tabela 25 para conseguir esta uniformização.

Tabela 25 – Proposta para alteração dos programas de enxaguamento dos filtros trap, nas linhas Orion e Schenk.

Passo	Descrição do passo	Tempo (seg)	Q (hl/hr)
1	Arranque do Programa	-	-
2	Enxaguar no sentido directo com água fria	30	300
3	Enxaguar no sentido contrário com água fria	100	600
4	Enxaguar no sentido directo com água quente	30	300
5	Enxaguar no sentido contrário com água quente	100	600
6	Enxaguar no sentido directo com água fria	30	300
7	Esvaziar filtro trap com CO ₂	-	-
8	Terminar Programa	-	-

Os enxaguamentos em sentido directo, com água fria e quente, apenas servem para provocar choques térmicos e hidrodinâmicos no sistema de forma a libertar as partículas presas na malha dos filtros.

As limpezas efectivas são conseguidas com a passagem de água em sentido contrário, assim numa primeira fase faz-se passar água fria, i.e. à temperatura ambiente, para eliminar a maioria das partículas. Numa segunda fase usa-se água quente. Pretende-se, com o uso de água quente, aumentar a difusão das partículas e assim melhorar o enxaguamento.

Este tipo de programação, da fase de enxaguamento dos filtros trap, permite:

- Uniformizar o programa de enxaguamento para os vários filtros trap;
- Implementar a capacidade do enxaguamento em promover choques térmicos e hidrodinâmicos em sequência capaz de melhorar o enxaguamento;
- Libertar o programa de passos internos que não podem ser alterados pelos operadores, promovendo assim o uso racional da água de enxaguamento (ex. nos trap's I/II verifica-se que nos passos 2 e 3 o enxaguamento em sentido contrário só ocorre ao fim de 120 segundos);
- Dotar os técnicos de maior entendimento dos passos e tempos da fase de enxaguamento dos filtros trap;
- Minimizar os consumos de água. Nos filtros trap I/II das linhas Orion e Schenk. É possível baixar ainda mais os consumos de água, nestes filtros.

No anexo J esta proposta é apresentada juntamente com o jogo de abertura e fecho de válvulas, que permite a implementação desta programação nos diferentes filtros das diferentes linhas de filtração.

A proposta apresentada inclui um passo que permite o despejo dos fluidos dos filtros com CO₂, este passo não está presente no filtros trap I/II. É um passo de relativa importância uma vez que para além de esgotar os fluidos do interior do trap também pressuriza o filtro. Assim, a cerveja no arranque do ciclo de filtração, quando chega ao filtro trap encontrando um meio pressurizado não espuma, consequentemente não se torna necessário fazer purgas e eliminam-se perdas de cerveja.

7. Conclusões

7.1. Optimização da etapa de ebulição na sala Nordon

Os objectivos deste trabalho foram a optimização energética da etapa de ebulição, mantendo a estabilidade coloidal, características físico-químicas e sensoriais da cerveja.

De entre os vários perfis de ebulição testados verificou-se que os perfis energeticamente mais vantajosos são o EC1 que apresenta reduções nos consumos específicos de vapor de 43,2% e o perfil EC3 com reduções de 50,6%. Por desconhecimento do efeito da agitação no número de vezes que o mosto é reciclado ao permutador, implementou-se o perfil EC1.

Os ensaios realizados com o perfil EC3 mostram que as restrições impostas à qualidade do produto final são respeitadas, pelo que este é um perfil que deve ser explorado no futuro.

Provou-se, a partir do teste de igualdade de médias, que a maioria das características físico-químicas da cerveja, com perfil de ebulição EC1, se mantêm, anexo E. Registaram-se melhorias nos resultados das turvações (total e 20°C) e controlo organolético.

O perfil EC1 permite poupanças, por redução de consumos de vapor, de 258 734 (€/ano).

7.2. Optimização da etapa de ebulição nas salas Ziemann e Meura

Com os mesmos objectivos enunciados na secção anterior, aqui testaram-se dois perfis. O perfil EB1, menos 5 minutos de ebulição em relação ao controlo, produz cervejas com turvações totais elevadas e em termos energéticos é o menos vantajoso. Assim este perfil foi abandonado.

O perfil EA1 respeita as restrições de qualidade impostas no produto final e apresenta resultados de estabilidade coloidal melhores que o perfil de controlo. Energeticamente é o mais vantajoso, apresenta reduções nas taxas de evaporação de 38,8% na sala Ziemann e 33,2% na sala Meura. Apresenta ainda aumentos nas taxas de isomerização de 15,6%, o que é bastante significativo. Assim, este foi o perfil adoptado.

Este perfil permite poupanças, por redução de consumos de vapor, de 63 700 (€/ano).

7.3. Optimização dos consumos de água no enxaguamento dos filtros trap

Efectuaram-se ensaios de minimização dos consumos de água na fase de enxaguamento dos filtros trap, das linhas de filtração Orion e Schenk. Pretendeu-se manter a capacidade de filtração destes filtros, ao longo do ciclo de filtração da cerveja, e manter o seu tempo de vida útil. Para os objectivos delineados conseguiram-se reduções nos consumos de água de 42,5% no trap's I e II da linha Orion. Nos filtros trap I e II da linha Schenk conseguiram-se reduções de 55,6% e nos filtros trap III registam-se reduções de 80,7%.

Os abaixamentos nos consumos de água conseguidos permitem poupanças anuais de 7 484 (€/ano).

7.4. Sugestões para trabalho futuro

Ao longo deste texto foram sendo apresentadas algumas oportunidades de melhoria.

Para os vários trabalhos realizados, a abordagem utilizada foi a de construção de uma rede de forma a identificar um ponto, onde se minimizam consumos e se respeitam as restrições de sistema. Posteriormente fizeram-se ensaios à volta desse ponto, de forma a apertar a malha de procura. É portanto um processo iterativo.

Recentemente desenvolveram-se outros tipos de abordagens utilizando ferramentas de integração de processos. A integração de processos compreende todas as melhorias no processo, nas operações unitárias e suas interacções de forma a minimizar o uso efectivo de massa e energia. A minimização dos consumos energéticos é conseguida optimizando os sistemas de recuperação de calor, abastecimento de energia e reconfiguração da rede de permutadores de calor. A minimização dos consumos de água é conseguida optimizando a configuração das alimentações e reutilizações e optimização dos sistemas de tratamento de água.

A bibliografia da especialidade dá-nos conta de resultados espantosos na optimização de recursos energéticos e mássicos por uso destas ferramentas. Assim, sugere-se o uso e implementação destas técnicas na Unicer.

Para indústrias de comidas e bebidas o potencial de reduções energéticas está avaliado em 15% a 40% e o potencial de reduções de consumos de água em 30% a 40% [30]. Desta forma há um potencial de abaixamentos de custos considerável que pode ser explorado.

8. Bibliografia

- [1] Kunze, Wolfgang; Weber, Richard; "Technology brewing and malting" 2nd edition; VLB Berlin; 1999
- [2] Esslinger, Hans Michael; Narziss, Ludwig; "Beer"; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co; 2005
- [3] Galitsky, Christina; Martin, Nathan; Worrel, Ernst; Lehman, Bryan; "Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for breweries" University of California; 2003
- [4] O'Rourke, Tim; "The role of pH in brewing"; The BREWER International; 2002
- [5] O'Rourke, Tim; "The function of enzymes in brewing"; The BREWER International; 2002
- [6] O'Rourke, Tim; "Sedimentation – liquid/solid separation in the brewing process"; The BREWER International; 2002
- [7] O'Rourke, Tim; "The function of wort boiling"; The BREWER International; 2002
- [8] Dardyschire, A.; Cross, S.; Torline, P.; "studies on DMS fluctuation: evidence on substantial DMS production during fermentation"; Journal of the institute of brewing; 1983
- [9] Sommer, G.; "Basic principles relating to the continuous high temperature boiling method"; VLB Berlin; 1993
- [10] Dethier, M.; De Jaeger, B.; Barszczak, E.; Dufour, J.P.; "In vivo and in vitro investigations of the synthesis of S-Methylmethionine during barley germination"; ASBC journal; 1990
- [11] Dufour, Jean Pierre; "Direct assay of S-Methylmethionine using high performance liquid chromatography and fluorescence techniques"; ASBC journal; 1986
- [12] Anness, B. J.; Bamforth, C. W.; "Dimethyl sulfide – A review"; Journal of the institute of brewing; 1982
- [13] Dickenson, C. J.; "Dimethyl sulphide – Its origin and control in brewing"; Journal of the institute of brewing; 1983
- [14] O'Rourke, Tim; "The process of wort boiling"; The BREWER International; 2002
- [15] O'Rourke, Tim; "Colloidal stabilisation of beer"; The BREWER International; 2002
- [16] Hyttinen, Ilkka; "Beer haze"; The Scandinavian School of Brewing; 2001
- [17] Hyttinen, Ilkka; "Beer foam"; The Scandinavian School of Brewing; 2001
- [18] O'Rourke, Tim; "Predicting colloidal stability in beer"; The BREWER International; 2002
- [19] O'Rourke, Tim; "The role of oxygen in brewing"; The BREWER International; 2002
- [20] Hyttinen, Ilkka; "External wort boiling"; The Scandinavian School of Brewing; 2001

- [21] Hallbergnoos, G. E. Schu; "The balance of energy and warm water in the brew house"; Brawelt international; 1995
- [22] Vollhals, Bernhard; "Energy saving in the brew house"; MBAA technical quarterly; 1994
- [23] Han, Y. M.; Wang, R. Z.; Dai, Y. J.; "Thermal stratification within the water tank", Renewable and sustainable energy reviews, 2008
- [24] Hackensellner, Thomas; "Efficient energy use in the brew house"; Huppmann – technical documentation; 1st edition; 2000
- [25] CANET, Energy Technology Centre-Varennes; "Pinch analysis for the efficient use of energy, water & hydrogen"; 2003 (<http://cetc-verennes.nrcan.gc.ca>)
- [26] Tan, R.R. et al; "A methodology for the design of efficient resource conservation networks using adaptive swarm intelligence"; Journal of Cleaner Production; 2008
- [27] Akbarnia, M.; Amidpour, M.; Shadaram, A.; "A new approach in pinch technology considering piping costs in total cost targeting for heat exchanger network"; Chemical Engineering Research and Design; 2008
- [28] Akkaya, Ali Volkan et al; "An analysis of SOFC/GT CHP system based on exergetic performance criteria"; International Journal Of Hydrogen Energy; 2008
- [29] Aspelund, Audun et al; "An Extended Pinch Analysis and Design procedure utilizing pressure based exergy for subambient cooling"; Applied Thermal Engineering; 2007
- [30] Ras̃kovic', P.; Stoiljkovic', S.; "Pinch design method in the case of a limited number of process streams"; Energy; 2008
- [31] Akbari, A.; "Heat exchanger network area targeting considering stream allocation to shell or tubes"; Computers and Chemical Engineering; 2008
- [32] Isafiade, A. J.; Fraser, D. M.; "Interval based MINLP superstructure synthesis of mass exchange networks"; Chemical Engineering Research and Design; 2008
- [33] Barakat, T. M. M. et al; "Multi-objective optimisation of batch separation processes"; Chemical Engineering and Processing; 2008
- [34] Cao, Kai et al; "Pinch multi-agent genetic algorithm for optimizing water-using networks"; Computers and Chemical Engineering; 2007
- [35] Jantzen, Jan; "Fuzzy Supervisory Control"; Technical University of Denmark; 1998
- [36] Burns, Roland S.; "Advanced control engineering"; Butterworth-Heinemann; 2001
- [37] Mintz, Rachel et al; "Fuzzy logic modeling of surface ozone concentrations"; Computers and Chemical Engineering; 2005
- [38] Passino, Kevin M.; Yurkovich, Stephen; "Fuzzy Control"; Addison-Wesley; 1998

- [39] Heo, Jeong-Sook; Kim, Dong-Sool; "A new method of ozone forecasting using fuzzy expert and neural network systems"; Science of the Total Environment; 2004
- [40] Sousa, S.I.V et al; "Prediction of ozone concentrations in Oporto city with statistical approaches"; Chemosphere; 2006
- [41] Mintz, Rachel et al; "Fuzzy logic modeling of surface ozone concentrations"; Computers and Chemical Engineering; 2005
- [42] Ogata, Katsuhiko; "Engenharia do controle moderno"; 4ª edição; Prentice Hall; 2003
- [43] Seborg, Dale E. et al; "Process Dynamics and control"; 2nd edition; Willey; 2004

Anexo A — Principais alterações bioquímicas que ocorrem no mosto na etapa de ebulição

Neste anexo é apresentada uma análise detalhada dos principais objectivos da ebulição e das principais alterações bioquímicas que ocorrem nesta fase.

1. Principais objectivos da ebulição

O propósito da fase de ebulição é estabilizar a composição, química e microbiológica, do mosto recorrendo a:

- i. Esterilização do mosto e inactivação das enzimas;
- ii. Solubilização e isomerização dos princípios activos do lúpulo;
- iii. Precipitação de proteínas instáveis e outras substâncias, promovendo a estabilidade coloidal;
- iv. Eliminação de substâncias voláteis indesejáveis, por evaporação;

2. Considerações energéticas

A fase de ebulição requer grandes quantidades de energia e representa cerca de 40% dos gastos totais de uma cervejeira.

Parte da energia requerida na fase de ebulição é recuperada durante o arrefecimento do mosto, contudo a energia adicional necessária para evaporar o vapor de água durante a fervura é perdida através da chaminé. Existem várias formas de recuperar esta energia perdida por evaporação. A mais eficiente é a redução das taxas de evaporação, actualmente os valores de referência encontram-se entre os 4% e 9%, dependendo da configuração do sistema de ebulição.

De forma a perceber as consequências do abaixamento das taxas de evaporação é necessário entender as principais alterações que ocorrem no mosto durante a fase de ebulição.

3. Principais alterações bioquímicas que correm durante a fase de ebulição

3.1. Esterilização do mosto

Matérias-primas como o malte, griz e ocasionalmente água podem estar infectadas com microrganismos que devem ser destruídos durante a ebulição para evitar contaminações nas etapas subsequentes. Alguns microrganismos, termófilos, têm a capacidade de produzir esporos. Estas estruturas são resistentes a temperaturas elevadas, podem não ser destruídas durante a ebulição, e podem estar presentes no produto final. Contudo a cerveja não oferece condições para a germinação daqueles esporos.

3.2. Inactivação das enzimas

As enzimas são estruturas tridimensionais na sua forma activa. Geralmente na gama de 50°C a 75°C as enzimas desnaturam e perdem a sua actividade. Quando o mosto atinge o ponto de ebulição, este encontra-se livre de actividade enzimática.

3.3. Concentração do mosto

Durante a fase de ebulição ocorrem perdas de água por evaporação, isto provoca a concentração do mosto. A quantidade de água perdida durante a ebulição é directamente proporcional à taxa de evaporação bem como a quantidade de energia perdida. A eficiência do sistema é afectada pelo design da caldeira, particularmente pela área superficial.

Tradicionalmente cervejas de elevada concentração são obtidas a partir de etapas de ebulição longas de forma a evaporar água concentrando o mosto. Existem outras formas de obter mostos concentrados, sem necessidade de ebulições demoradas, tais como a adição de adjuntos como o xarope de glucose.

3.4. Solubilização e isomerização dos princípios activos do lúpulo

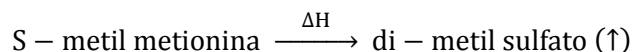
Durante a ebulição os α -ácidos insolúveis, presentes no extracto de lúpulo, são convertidos em iso- α -ácidos. Esta reacção é catalisada pela temperatura.

A isomerização é uma reacção relativamente rápida, cerca de 90% dos alfa-ácidos são isomerizados nos primeiros 30min. Atinge o seu ponto máximo entre os 60min e 70min onde cerca de 60% do total de α -ácidos são isomerizados.

Os iso- α -ácidos são continuamente perdidos ao longo do processo, assim a conversão final é de cerca de 40% na cerveja.

3.5. Eliminação de substâncias voláteis indesejáveis

Durante a ebulição os compostos orgânicos voláteis perdem-se por arrastamento no vapor de água evaporado. O principal derivado do malte que é perdido durante a ebulição é o *DMS* (di-metil sulfato). Este é produzido por decomposição termal da *SMM* (S-metil metionina) numa reacção de primeira ordem e com um tempo de meia vida de 35 minutos.



O *DMS* ($d_{20^{\circ}\text{C}} = 0,846$; $B_p = 37,3^{\circ}\text{C}$; insolúvel na água) produzido durante a ebulição é rapidamente perdido por evaporação. No entanto a sua formação continua entre o fim da ebulição e o arrefecimento do mosto. O *DMS* presente no mosto arrefecido não é perdido, uma parte pode ser produzido durante a fermentação, e persiste no produto final.

Uma das formas de controlar os níveis de *DMS* na cerveja é regular a duração e intensidade da ebulição, promovendo ebulições longas de forma a decompor o precursor e libertar por evaporação o *DMS*. Deve-se promover um rápido arrefecimento do mosto, reduzindo o tempo de residência no decantador.

Durante a fase de ebulição também se perdem óleos aromáticos, tais como o mirceno, humuleno, cariofileno e farneseno. Estes são as quatro principais essências do lúpulo e constituem cerca de 60% a 80% da totalidade de óleos aromáticos, dependendo da variedade. Estes compostos são todos hidrocarbonetos altamente voláteis perdendo-se quase na totalidade ao fim de 60min a 90min de fervura, contribuindo pouco para o sabor e aroma do lúpulo na cerveja. Alguns produtos da oxidação destes compostos, tais como epóxidas humulenas, são contribuidores positivos para o sabor da cerveja.

Os principais factores que afectam a evaporação de voláteis são:

- Temperatura do mosto;
- Vigor da ebulição;
- Tensão superficial;
- Condensação de voláteis na fase de vapor;
- Difusividade;
- Duração da ebulição.

3.6. Incremento de coloração

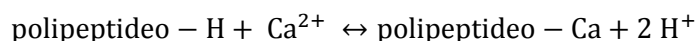
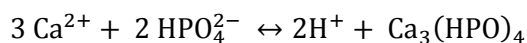
A coloração do mosto aumenta durante a ebulição. As reacções responsáveis por este incremento de coloração pertencem a três categorias:

- Reacções de *Maillard* entre os grupos carbonil e compostos aminados;
- Caramelização de açúcares;
- Oxidação de polifenóis.

A oxidação de polifenóis é particularmente importante uma vez diminui o poder redutor aumentando assim estabilidade coloidal e diminui a coloração do mosto e cerveja.

3.7. Redução do pH

O controlo do pH ao longo do processo é fundamental para a consistência do produto. O pH do mosto começa por decair na brassagem e continua durante a ebulição. A principal queda de pH é durante a reacção de compostos de Ca^{2+} com fosfatos e polipeptídeos para formar compostos insolúveis libertando iões H^+ .



Os níveis de cálcio decrescem dos 100ppm, no início da ebulição, para os 40ppm, no final da ebulição. Pode-se adicionar sulfato de cálcio ou cloreto de cálcio nas etapas anteriores para promover a formação de precipitados insolúveis durante a ebulição, aumentando assim a estabilidade coloidal.

É importante garantir esta redução para níveis de pH=5. Isto pode ser conseguido com a adição de ácidos como o ácido fosfórico ou sulfúrico. Um pH baixo tem efeitos positivos no mosto e no carácter da cerveja, tais como:

- Promove a coagulação de proteínas;
- Acentua os sabores da cerveja, em particular pela redução de diacetilo;
- Promove o crescimento da levedura;
- Inibe o crescimento de microrganismos contaminantes;
- Valores de pH baixos resultam em menores colorações;
- Um pH baixo resulta num menor aproveitamento do griz.

3.8. Redução dos níveis de Azoto no mosto

No processo cervejeiro é necessário baixar os níveis de compostos de azoto de elevado peso molecular provenientes do malte. Se estes persistirem podem afectar negativamente os níveis de pH, a estabilidade coloidal, a fermentação e o sabor da cerveja.

O processo de coagulação de proteínas/polipeptídeos envolve a troca de ligações intra-moleculares por outras inter-moleculares, catalisadas pela temperatura mas destruídas por movimentos mecânicos. O grau de proteínas e polipeptídeos removidos depende da probabilidade de moléculas individuais colidirem e formarem ligações estáveis durante a ebulição. Tradicionalmente os critérios usados para avaliar uma eficiente ebulição são:

- Temperatura de ebulição, normalmente 100°C à pressão atmosférica;
- Tempo de ebulição;
- Taxa de evaporação.

Tipicamente, as caldeiras de ebulição mais recentes, operam durante 60min de ebulição com taxas de evaporação de 5% a 9%.

Um critério usualmente não muito mencionado, mas de importância crítica é o grau de agitação ou vigor da ebulição. Assim, a remoção de compostos azotados de elevado peso molecular é função do tempo e vigor da ebulição e independente da taxa de evaporação. O vigor da ebulição é de elevada importância uma vez que a coagulação de proteínas é promovida com a intensidade de formação de bolhas de vapor. A temperatura registada no seio do mosto e o tempo de contacto com a área de transferência de calor são também importantes.

3.9. Extração e precipitação de taninos/polifenóis

Os taninos, provenientes do grão, e a maioria dos polifenóis, provenientes do malte, são solúveis no mosto quentes e moderadamente solúveis em água fria. Estes compostos combinam-se com as proteínas para formarem complexos proteínas polifenóis.

- Proteínas que se combinam com polifenóis oxidados formam complexos insolúveis no mosto quente e precipitam durante a decantação;
- Proteínas que se combinam com polifenóis não oxidados são solúveis no mosto quente. Os polifenóis podem oxidar durante o processamento da cerveja gerando instabilidade coloidal.

3.10. Produção de compostos reduzidos

O mosto tem compostos que não foram oxidados durante a sua produção. A injeção de oxigénio no mosto pode reduzir rapidamente estes compostos químicos. Muitos destes compostos provêm das matérias-primas, mas outros são reductonas ou melanoides que se formam durante a ebulição.

Cervejas com baixos níveis de oxidação tendem a preservar compostos reduzidos naturais que estão presentes no mosto. Estes podem persistir na cerveja conferindo estabilidade coloidal e organoléptica.

4. Conclusões

A etapa de ebulição do mosto cervejeiro é ainda pouco compreendida mas crucial para a estabilização do mosto e da cerveja. Assim, alterações no sistema de ebulição podem afectar a estabilidade e qualidade da cerveja.

Anexo B – Parâmetros monitorizados ao longo de cada etapa

Fase de produção	Etapa	Parâmetros em análise
Fabrico de mosto	Sacarificação	pH
	Ultimas águas da filtração	- Extracto - pH
	Início e fim de ebulição	- Extracto - pH - Cones d' Himoff (leituras aos 70 e 90 minutos de decantação) - Consumos de vapor
	Arrefecimento de mosto	- Extracto - pH - Coloração - Unidades de amargo - Extracto aparente limite - Atenuação real limite - Cones d' Himoff (leituras aos 70 e 90 minutos de decantação) - Volume de mosto
Adegas	Fermentação Maturação Estabilização a frio	- Extracto - Álcool - Coloração - Unidades de amargor - pH - SO₂ total - Contagem de células da sementeira - Resultados microbiológicos da levedura - Diacetilo
Produto acabado	Controlo de qualidade	- Extractos (primitivo, aparente e real) - Atenuação real - Álcool - pH - Coloração - Amargor - Turvações (total, 20°C e 0°C) - Estabilidade de espuma - CO₂ - Polifenóis - Azoto aminado livre - Diacetilo - SO₂ total - Controlo organolético - Álcoois / esteres - Estabilidade coloidal

Anexo C – Especificações para as análises de qualidade

Neste anexo são apresentados os valores limites dos parâmetros de análises de qualidade para o mosto Pilsen, tipo de mosto em estudo ao longo deste trabalho.

Análise	Unidade de medida	Mínimo	Máximo
Extracto primitivo (p/p)	°Plato	11,40	11,80
Extracto primitivo (p/v)	%(p/v)	-	-
Álcool (p/p)	%(p/p)	-	-
Álcool (v/v)	%(v/v)	4,60	5,60
Extracto real	°P	-	-
Extracto parente	°P	-	-
Atenuação real	%	67	73
pH		4,00	4,40
Coloração	EBC	6,0	8,0
Amargor	U.A.	18	22
Turvação 20°C	EBC	0,5	0,7
Turvação 0°C	EBC	0,5	0,9
Turvação total	EBC	1,0	3,5
Diacetilo	mg/l	-	0,05
Estabilidade de espuma	s	250	-
SO2 total	mg/l	6	10
n-Propanol	mg/l	-	-
Isobutanol	mg/l	-	-
Álcoois amílicos	mg/l	-	-
Acetato de etilo	mg/l	-	-
Acetatos amílicos	mg/l	-	-
Acetaldaído	mg/l	-	-
DMS	µg/l	-	40
Controle organolético	u.a.	-1,4	1

Anexo D – Modelo matemático da caldeira de ebulição

O actual sistema de ebulição da sala Nordon é constituído por um tanque ao qual está acoplado um permutador de carcaça e tubos vertical, que fornece calor latente ao mosto, provocando elevações de temperatura e ebulição.

A seguir apresenta-se a modelização matemática deste sistema dinâmico, como se apresenta na figura D.1. Como a transferência de mosto entre o tanque de ebulição e o permutador ocorre a elevados caudais e a distâncias muito curtas, considera-se que o tempo de atraso é nulo. Consideram-se que as propriedades físicas dos fluidos são constantes.

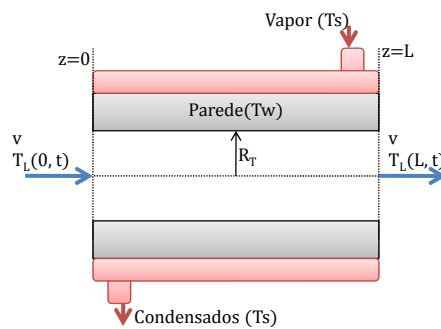


Figura D.1 – Representação do sistema dinâmico do permutador de ebulição da sala Nordon.

No tratamento que se segue despreza-se a condução de energia axial e radial. O mosto viaja ao longo do permutador com a velocidade v e com temperatura T_L , função do espaço e tempo. Considera-se ainda que o vapor se encontra à temperatura T_s , função do tempo, e as paredes dos tubos internos do permutador encontram-se à temperatura T_w , função da posição espacial e do tempo. O tubo tem área de secção recta S_L .

O balanço de energia a este sistema pode ser traduzido como se segue:

$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{c} \text{taxa de} \\ \text{acumulação} \\ \text{de energia} \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} \text{taxa de entrada} \\ \text{de energia por} \\ \text{convecção} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{taxa de saída} \\ \text{de energia por} \\ \text{convecção} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{taxa de adição} \\ \text{de energia} \\ \text{ao sistema pelas} \\ \text{vizinhanças} \end{array} \right] \\ &+ \left[\begin{array}{c} \text{trabalho exercido} \\ \text{pelas vizinhanças} \\ \text{no sistema} \end{array} \right] \end{aligned}$$

- Balanço energético ao mosto:

$$\rho_L C_{p,L} S_L \frac{\partial T_L}{\partial t} = -\rho_L C_{p,L} S_L v \frac{\partial T_L}{\partial z} + h_L A_L (T_w - T_L)$$

$$\frac{\partial T_L}{\partial t} = -v \frac{\partial T_L}{\partial z} + \frac{1}{\tau_{HL}} (T_w - T_L) \quad (1)$$

Onde

$$\tau_{HL} = \frac{h_L A_L}{\rho_L C_{p,L} S_L} = \left[\begin{array}{c} \text{tempo de} \\ \text{passagem} \\ \text{do mosto} \\ \text{no permutador} \end{array} \right]$$

- Balanço energético à parede:

$$\rho_w C_{p,w} S_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = h_S A_S (T_S - T_w) - h_L A_L (T_w - T_L)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{1}{\tau_{Sw}} (T_S - T_w) - \frac{1}{\tau_{wL}} (T_w - T_L) \quad (2)$$

Onde

$$\tau_{Sw} = \frac{h_S A_S}{\rho_w C_{p,w} S_w} = \left[\begin{array}{c} \text{tempo de transporte termal} \\ \text{entre o vapor e a parede} \end{array} \right]$$

$$\tau_{wL} = \frac{h_L A_L}{\rho_w C_{p,w} S_w} = \left[\begin{array}{c} \text{tempo de transporte termal} \\ \text{entre a parede e o liquido} \end{array} \right]$$

- Condições iniciais e aos limites:

Para $t = 0$:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial T_L}{\partial t} = 0 \quad e \quad T_S(t = 0) \text{ é conhecido}$$

Para $z = 0$:

Integrar a equação 1 e substituir em 2. Resolver em ordem a z.

Pode calcular-se $h_L A_L$ por balanço energético entre as várias interfaces. Considera-se que em estado estacionário os caudais térmicos são constantes e iguais.

$$h_L A_L (T_L^{z=0} - T_L^{z=L}) = M_L \lambda_L$$

$$h_L A_L = \frac{M_L \lambda_L}{(T_L^{z=0} - T_L^{z=L})} \quad (3)$$

Onde M_L é o caudal de vapor condensante e λ_L o calor latente de condensação.

A partir das equações 1 e 2, por resolução analítica ou numérica, pode-se simular a resposta deste sistema dinâmico em $T_L(t, z)$ a partir de perturbações em $T_L(t, 0)$ e $T_S(t)$.

Procurou-se informação nos arquivos da Unicer e contactaram-se os fabricantes dos permutadores de calor afectos aos sistemas de ebulição das salas Nordon e Ziemann-Meura, de forma a conhecer as características destes equipamentos. Apesar dos esforços realizados, á data de realização deste texto, não conhecemos os parâmetros de projecto destes permutadores nem as curvas características das bombas que fazem o transporte do mosto. Assim, não se dispõem de elementos suficientes para a simulação deste sistema dinâmico.

Anexo E – Análise estatística: Branco vs EC1

Nos quadros abaixo apresentados encontra-se uma análise estatística dos parâmetros de qualidade. Trata-se do teste de igualdade de médias de duas populações normais, caso das variâncias desconhecidas e iguais. Incluem-se expressões faciais para mais fácil interpretação de resultados.

Como se pode verificar, para a maior parte dos parâmetros o teste de igualdade de médias é aceite, indica que se mantêm as características físico-químicas da cerveja, onde a etapa de ebulição foi testada com o perfil EC1.

Os parâmetros físico-químicos e sensoriais onde o teste de igualdade de médias não é aceite (turvação a 20°C, turvação a 0°C, prova) houve uma melhoria nos resultados obtidos com cervejas em que a ebulição foi realizada com perfil EC1.

O teste de igualdade de médias também não foi aceite para os consumos específicos de vapor e taxas de evaporação, no entanto os resultados obtidos para o perfil EC1 são melhores que os obtidos para o perfil branco, isto prova uma melhoria efectiva do desempenho do ensaio EC1, *Dynamic Boiling*.

Tabela 3 – Análise estatística aos resultados das análises de estabilidade coloidal, para o mosto Super Bock. No caso H_0 seja rejeitada, ☺ indica uma melhoria nos resultados, ☹ indica que apesar de o resultado do ensaio não ser tão bom como o branco encontra-se dentro das especificações e ☹ indica que os resultados ultrapassam os limites das especificações.

Comparação de ensaios		Índice de Polifenóis	Índice de proteínas de baixo peso molecular	Índice de proteínas de elevado peso molecular
Branco	Nº amostras	9	9	9
	Média	19	99	136
	Variância	29	227	382
	Desvio padrão	5	15	20
EC1	Nº amostras	11	11	11
	Média	16	88	145
	Variância	18	192	962
	Desvio padrão	4	14	31
Teste	$\mu_{Branco} = \mu_{EC1}$	☺	☺	☺
	$\mu_{Branco} \neq \mu_{EC1}$			

Tabela 4 – Análise estatística aos resultados dos principais parâmetros de decisão em análise durante a etapa de ebulição, para o mosto Super Bock. No caso H_0 seja rejeitada, ☺ indica uma melhoria nos resultados, ☹ indica que apesar de o resultado do ensaio não ser tão bom como o branco encontra-se dentro das especificações e ☹ indica que os resultados ultrapassam os limites das especificações.

Comparação de ensaios		Consumos específicos de vapor (kg/hl)	Taxa de Evaporação (%)	Taxa de isomerização (%)
Branco	Nº amostras	36	19	36
	Média	9	10	46
	Variância	3	0,1	0,1
	Desvio padrão	2	3	3
EC1	Nº amostras	36	20	45
	Média	5	7	47
	Variância	2	0,03	0,1
	Desvio padrão	1	2	4
Teste	$\mu_{Branco} = \mu_{EC1}$			☺
	$\mu_{Branco} \neq \mu_{EC1}$	☺	☺	

Anexo F – Dimensionamento dos equipamentos do sistema de armazenamento e recuperação de energia

Neste anexo apresentam-se os cálculos realizados para o dimensionamento dos equipamentos que se apresentam nas propostas de recuperação e armazenamento de energia, secção 4.6.1.

1. Permutador de carcaça e tubos

Para o dimensionamento deste permutador, para condensação dos vapores gerados durante a ebulição, recorreu-se às seguintes hipóteses simplificativas:

- Permutador em co-corrente;
- Termicamente isolado;
- Uma só passagem ($F=1$);
- Coeficiente global de transferência de calor constante;
- Queda de pressão constante;
- Propriedades térmicas dos fluidos constantes.

Considerou-se apenas a recuperação do calor latente dos vapores condensantes, provocando uma elevação de temperatura de 75°C para 99°C , na água do tanque de armazenamento de energia.

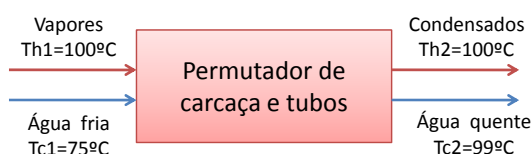


Figura E.1 – Representação esquemática do permutador de carcaça e tubos, para condensação de vapores gerados durante a fase de evaporação

Considerou-se que o fabrico tem um volume de 750 hl e que a taxa de evaporação é de 10%, assumiu-se um coeficiente de transferência de calor constante e igual a $852\text{ (W/m}^2\text{ K)}$, de acordo com as regras heurísticas. Para estes dados o permutador de carcaça e tubos deve possuir 740 m^2 .

$$Q = UA\Delta T_{lm} = M_L \lambda \Rightarrow A = \frac{M_L \lambda}{U \Delta T_{lm}} = \frac{M_{\text{água}} \lambda_{\text{água}}}{U \frac{(T_{h1} - T_{c1})(T_{h2} - T_{c2})}{\ln\left(\frac{T_{h1} - T_{c1}}{T_{h2} - T_{c2}}\right)}}$$

$$A = \frac{750 \times 0,1 \left(\frac{hl}{h} \right) \times \frac{1}{3600} \left(\frac{h}{s} \right) \times \frac{100}{1} \left(\frac{l}{hl} \right) \times 2257 \left(\frac{kJ}{kg_{\text{água}}} \right) \times \frac{1000}{1} \left(\frac{g}{kg} \right) \times \frac{1}{1} \left(\frac{l_{\text{água}}}{kg_{\text{água}}} \right)}{852 \left(\frac{W}{m^2K} \right) \times \frac{(100 - 75) - (100 - 99)}{\ln \left(\frac{100 - 75}{100 - 99} \right)} (K)}$$

$$A = 740(m^2)$$

O modo de funcionamento deste permutador é idêntico para os diferentes cenários apresentados. No cenário III como as ebulições são alternadas o seu funcionamento será em contínuo, no entanto os parâmetros de funcionamento não se alteram em relação aos cenários I e II. Assim, o dimensionamento é igual para os diferentes cenários.

2. Blower

Considerando que taxa de evaporação é de 10 % e o volume médio do fabrico é de 750 hl então o *blower* deverá ter uma capacidade mínima de cerca de 75 hl/h.

3. Tanque de armazenamento de energia

Para o dimensionamento deste equipamento assumiu-se um modelo de estratificação termal no tanque de armazenamento de água. Assumiu-se que o tanque tem 20 piscinas bem agitadas, considerou-se 75 °C na base e 99 °C no topo.

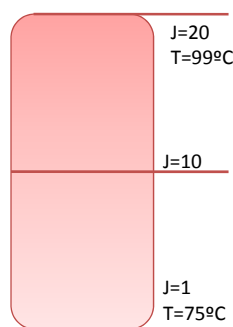


Figura E.2 – Representação esquemática do tanque de armazenamento de energia com estratificação térmica.

O número de estratificação encontrado é de 1,3 °C/piscina, de acordo com a bibliografia este número deve ser inferior a 3. O número encontrado é bastante razoável e permite obter

vantagens significativas na estratificação termal. O efeito do aumento do número de piscinas traduz-se numa diminuição do número de estratificação e aumento do volume do tanque.

A quantidade de água necessária para elevar 750 *hl* de mosto de 75 °C a 98 °C é de cerca de 4 840 *litros*. Considerando uma eficiência de 90 % na transferência de calor e como o tanque tem 20 piscinas então o volume total do tanque deve ser de cerca de 100 *m*³ de água.

$$\begin{aligned}\Delta H_{mosto} &= \Delta H_{\text{água}} \Rightarrow (m C_p \Delta T)_{mosto} = (m C_p \Delta T)_{\text{água}} \Rightarrow m_{\text{água}} = \frac{(m C_p \Delta T)_{mosto}}{(C_p \Delta T)_{\text{água}}} \\ &= \frac{750 \text{ hl} \times \frac{100}{1} \left(\frac{l}{hl} \right) \times 1,06 \frac{kg_{mosto}}{l_{mosto}} \times 4000 \frac{J}{kg_{mosto} K} (99 - 75) K}{8,314 \left(\frac{J}{mol K} \right) (8,712 + 1,25 \times 10^{-3} \times 371 + 1,8 \times 10^{-7} \times 371^2) \times 371(K) \times \frac{1}{18} \left(\frac{g}{mol_{H_2O}} \right)} \\ &= 4\,840\,477 (g_{H_2O}) \times \frac{1}{1000} \left(\frac{kg_{H_2O}}{g_{H_2O}} \right) \times \frac{1}{1} \left(\frac{l_{H_2O}}{kg_{H_2O}} \right) \times \frac{1}{1000} \left(\frac{m^3}{l} \right) \\ &= 4,840 \left(\frac{m^3_{H_2O}}{piscina} \right) \times (1 + (1 - 0,9)) \times 20 (piscinas) \\ &= 106 (m^3_{H_2O}) \\ &\approx 100 (m^3_{H_2O})\end{aligned}$$

A razão geométrica *L/d* dever ser igual a 3 para se obter o máximo proveito da estratificação térmica. Assim este tanque deverá ter de raio 1,74 *m* e de altura 10,5 *m*.

É importante que se verifiquem algumas características na implementação do tanque de armazenamento de energia, tais como:

- Isolamento do tanque e linhas de transporte de energia / água quente;
- Existência de anéis cónicos, nas piscinas de topo e de base do tanque, para que as perturbações provocadas na estratificação, resultantes de entradas e saídas de água, sejam minimizadas.

4. Permutador de placas

Considerando um volume do mosto de 750 *hl*, pretende-se provocar uma elevação de temperatura de 75°C para 98°C. Considera-se que se tem água quente do tanque de armazenamento de energia a 99°C e baixa-se a temperatura desta corrente para os 78°C.

Considerou-se ainda um tempo de passagem de 90 *min*, i.e., a duração de aquecimento do mosto é semelhante ao tempo de ocupação do tanque tampão. De acordo com as regras heurísticas assumiu-se um coeficiente global de transferência de calor de 852 (W/m² K), transferência de calor da água para líquidos. Com estes dados necessitamos de um permutador de placas com 1 040 m².

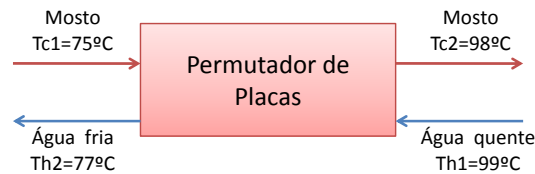


Figura E.3 – Representação esquemática do permutador de placas e elevação pretendida no mosto à custa da água de armazenamento de energia.

$$Q = U A \Delta T_{lm} = (M C_p \Delta T)_{\text{mosto}} \Rightarrow A = \frac{(M C_p \Delta T)_{\text{mosto}}}{U \Delta T_{lm}}$$

$$A = \frac{\frac{750}{90} \left(\frac{hl}{min} \right) \times \frac{1}{60} \left(\frac{min}{s} \right) \times \frac{100}{1} \left(\frac{l}{hl} \right) \times \frac{1}{1} \left(\frac{kg}{l} \right) \times 4000 \left(\frac{J}{kg K} \right) \times (98 - 75)(K)}{852 \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \times \frac{(77 - 75) - (99 - 98)}{\ln \left(\frac{77 - 75}{99 - 98} \right)}}$$

$$= 1040(m^2)$$

Sabendo que para permutadores compactos existe no máximo 1200 m²/m³ de área de transferência de calor, então o valor encontrado é razoável, uma vez que é inferior à referência.

Anexo G – Avaliação do potencial de poupanças mássicas e energéticas do actual sistema de ebulição da sala Nordon

1. Avaliação do potencial máximo de poupanças

1.1. Custos energéticos da rampa de aquecimento

Com o objectivo de avaliar os consumos de vapor, na rampa de aquecimento, imediatamente antes do início da ebulição, recorreu-se ao contador de vapor instalado na linha de admissão de vapor ao permutador da caldeira de ebulição. Registaram-se os dados da tabela G.1.

Tabela G.1 – Levantamento das necessidades de vapor na rampa de aquecimento de mosto.

Fabrico nº	Tipo de mosto	Gama de temperaturas consideradas na rampa de aquecimento		Vapor consumido (kg)	Volume de mosto arrefecido (hl)
		T _{início} (°C)	T _{fim} (°C)		
1883	Cristal	95,87	97,87	1055	744
1884		95,65	98,04	1090	742
1885		96,18	98,17	1064	751
1886		95,26	97,65	1101	797
1887		95,37	97,96	1096	672
1888		94,09	98,09	1087	743
1890		95,48	98,17	1098	743

Com os dados recolhidos, considerando que o custo de vapor é de 33,08 €/Ton, então os custos médios das necessidades específicas de vapor estão avaliados em 0,019 € / hl_{mosto}°C.

De forma a avaliar os custos anuais da rampa de aquecimento efectuou-se um levantamento da produção mensal de mosto. Estes dados encontram-se na tabela G.2.

Tabela G.2 – Produção mensal de mosto da sala Nordon, em 2008.

Mês	Volume de mosto produzido (hl)
Janeiro	136477
Fevereiro	96865
Março	159237
Abril	140142
Maio	170469
Junho	159730
Julho	217000
Agosto	171816

A rampa de aquecimento consiste em elevar a temperatura do mosto dos 78°C , temperatura do mosto á saída do filtro, até aos 100°C , temperatura média registada no seio da caldeira de ebulição no início desta fase.

Pelos dados apresentados na tabela G.2, verificamos que a produção média da sala Nordon é de $156\,467\text{ hl}_{\text{mosto}}/\text{mês}$. Para a elevação de temperatura pretendida na rampa de aquecimento os custos em vapor estão avaliados em $801\,697\text{ €/ano}$.

Para esta avaliação desprezaram-se as perdas de massa e energia por evaporação, uma vez que a temperatura média do mosto, na rampa de aquecimento, é inferior a 100°C .

1.2. Perdas de energia por transferência de mosto entre caldeiras

No actual sistema de ebulição da sala Nordon, a rampa de aquecimento inicia-se no tanque tampão e é interrompida momentaneamente para a transferência de mosto para a caldeira de ebulição, onde é concluída. Uma vez na caldeira de ebulição o mosto cede calor às paredes da caldeira para que se atinja o equilíbrio térmico.

Pode-se considerar que em termos práticos se perde $1,5^{\circ}\text{C}$ nesta transferência. Isto representa $54\,661\text{ €/ano}$.

1.3. Perdas de massa e energia por evaporação durante a fase de ebulição

Atendendo ainda os dados da tabela G.2, considerando uma taxa de evaporação média de 7%, para todos os tipos de mostos, taxa de evaporação média registada no perfil EC1, as perdas de massa por são de $131\,432\text{ hl/ano}$.

Considerando que o custo da água de fabricação do mosto é de $0,68\text{ €/m}^3$, então as perdas de massa por evaporação estão avaliadas em $8\,937\text{ €/ano}$.

Considerando que os custos energéticos de manutenção da etapa de ebulição são de $0,16\text{ €/hl}$, no perfil de ebulições EC1 como se mostra na secção 4.5, então as perdas energéticas são avaliadas em $21\,288\text{ €/ano}$.

1.4. Potencial de poupanças

Da soma das varias parcelas atrás apresentadas verifica-se que o total de custos destas operações unitárias é de $886\,584\text{ €/ano}$. Este valor representa o potencial máximo de poupanças energéticas e mássicas do actual sistema de ebulição da sala Nordon.

2. Cálculo dos rendimentos relativos de cada cenário

Pode-se definir o rendimento de cada cenário com base na rampa de aquecimento, i.e.:

$$\eta = \frac{\text{Gama de temperaturas conseguida pelo sistema}}{\text{Gama de temperaturas máxima registada na rampa de aquecimento}} \times 100$$

Então podemos calcular os rendimentos de cada cenário.

2.1. Cenário I

- Rendimentos especuláveis:

$$\eta = \frac{93 - 78}{100 - 75} \times 100 = 60\%$$

- Recuperações especuláveis:

$$Rec = 801\,697 \frac{\text{€}}{\text{ano}} \times 0,6 = 481\,018 \text{ €/ano}$$

2.2. Cenário II

- Rendimentos especuláveis:

$$\eta = \frac{95 - 78}{100 - 75} \times 100 = 68\%$$

- Recuperações especuláveis:

$$Rec = 801\,697 \frac{\text{€}}{\text{ano}} \times 0,68 = 545\,154 \text{ €/ano}$$

2.3. Cenário III

- Rendimentos especuláveis:

$$\eta = \frac{97 - 78}{100 - 75} \times 100 = 76\%$$

- Recuperações especuláveis:

$$Rec = 801\,697 \frac{\text{€}}{\text{ano}} \times 0,76 + 54\,661 \frac{\text{€}}{\text{ano}} = 663\,951 \text{ €/ano}$$

Note-se que a segunda parcela desta recuperação é devida à não transferência de mosto entre o tanque tampão e a caldeira de ebulição, como se descreve atrás.

3. Calculo dos rendimentos globais

Podemos ainda calcular o rendimento global de cada cenário, se definirmos o rendimento como sendo:

$$\eta = \frac{\text{Recuperações especuláveis}}{\text{Potencial máximo de poupanças do sistema}} \times 100$$

O que dentro da gama de erro associado a estes cálculos, erros de previsão, é contudo uma medida de comparação mais fiável.

- Cenário I

$$\eta = \frac{481\,018}{886\,584} \times 100 = 54\%$$

- Cenário II

$$\eta = \frac{545\,154}{886\,584} \times 100 = 61,5\%$$

- Cenário III

$$\eta = \frac{663\,951}{886\,584} \times 100 = 75\%$$

4. Comentários finais

Atendendo ao sistema de integração energética em análise em cada cenário, bem como a uma abordagem conservativa para as recuperações especuláveis, então os valores encontrados, no cálculo dos rendimentos globais, são razoáveis.

Uma característica comum a todos os cenários, e muito importante para que se obtenham rendimentos globais consideráveis, é o tanque de armazenamento de energia. Este foi dimensionado com 20 piscinas. A piscina do topo foi dimensionada para se conseguir obter um aumento de temperatura no mosto de 75°C a 98°C, para um fabrico de 750 hl.

Uma outra característica comum a todos os cenários, é o *blower*. A implementação deste equipamento no topo da caldeira de ebulição permite isolar o sistema de ebulição das condições atmosféricas e o controlo de uma outra variável de grande importância na ebulição, a pressão no lado do mosto. Actualmente o sistema de ebulição não permite qualquer tipo de controlo ou monitorização sobre esta variável.

Anexo H – Proposta de alteração do algoritmo de controlo básico

No decorrer da execução do projecto de optimização da ebulição verificou-se que para perfis de ebulição idênticos e ebulições sucessivas os consumos específicos de vapor apresentam elevada variância. Isto deve-se às condições atmosféricas mas também à forma como o controlo é efectuado. Uma filosofia de controlo baseada na quantidade de vapor/energia gasta, como função da quantidade de mosto em ebulição e do tempo desta fase, pode trazer grandes vantagens:

- Diminuição dos consumos específicos de vapor;
- Estandarização da etapa de ebulição, i.e., todas as ebulições confinadas a um período, onde se verifiquem condições envolventes ao sistema idênticas, devem apresentar consumos específicos de vapor idênticos;

A proposta aqui apresentada refere-se à mudança de critérios a controlar, substituindo-se o controlo de temperaturas pelo controlo de quantidade de vapor/energia gasta por ebulição.

O sistema deve ter uma forma fidedigna de aquisição da variável *volume de mosto no inicio da ebulição*, pelo que a implementação de um contador na linha de admissão de mosto à caldeira de ebulição é recomendado.

Não obstante de outras necessidades de código, inerentes à linguagem do programa *WinCC*, sistema de aquisição de dados usado na Unicer, e o controlo de outras variáveis aqui não consideradas, o controlo da quantidade de vapor gasta durante a fase de ebulição que se propõem é como se apresenta no pseudo-código abaixo apresentado.

%% 1 - Dados introduzidos pelo operador (armazenados em receita de forma a poderem ser ajustados)

T=input('Introduza temperatura para inicio de ebulição =');

n=input('Introduza o numero de fases permitidas =');

disp(' ')

for i=1:1:n

 t(i)=input('Introduza o tempo de duração da fase i (min)=');

 temperature(i)=input('Introduza de temperatura da fase i (°C)=');

 cmev(i)=input('Introduza o caudal massico especifico de vapor na fase i (kg vapor/(hl mosto h))=');

 rb(i)=input('Introduza a rotação da bomba de recirculação de mosto na fase i (%)=');

 pmb(i)=input('Introduza a pressão a montante do *blower* na fase i (mbar)=');

end

disp(' ')

%% 2 - Dados adquiridos pelo sistema informático de interesse para a rotina de controlo

temperature_exp %Temperatura do mosto à saída do permutador

cmv(i) %Caudal massico de vapor - dado pelo contador de vapor

vm %volume do mosto (hl) - dado pelo contador a introduzir antes da caldeira de ebulição ou por
 estimativa a partir dos sensores de nível

%% 3 - Iniciar contadores e rotina de controlo

if temperature_exp>T

 start timer %O algoritmo que se segue pressupõem contagem crescente

 for i=1:1:n

 if timer<t(i)

 cmv(i)=0; % É o mesmo que dizer que a válvula de vapor é normalmente fechada (sinal para abrir)

 rb(i); % Corre com a rotação da bomba na fase i armazenada em receita

 pmb(i); % Corre com a pressão a montante do *blower* armazenada em receita

 if temperature_exp<temperature(i)

 cmv(i)=cmev(i)*vm; %condição para abertura da válvula de vapor (sinal para abrir)

 end

 else timer>t(i)

 i=i+1

 end

 end

 stop timer

end

Anexo I – Necessidades de vapor no perfil EC1

Da observação de várias ebulições verificou-se que as quantidades de vapor consumidas, em cada fase e em cada ebulição são diferentes, mesmo em ebulições consecutivas. Assim, realizou-se o presente levantamento de forma a identificar os consumos médios de vapor em cada fase.

Os dados que se seguem referem-se ao mosto Super Bock e para o perfil EC1.

Tabela I.1- Leituras cumulativas do contador de vapor, e volumes do fabrico, para vários fabricos Super Bock.

Fabrico nº	Leituras cumulativas do contador de vapor (kg)			Volume de mosto frio (hl)
	Fase I	Fase II	Fase III	
1016	1595	3145	4165	687
1017	1482	2996	3845	698
1018	1568	2517	3384	702
1019	1580	2680	3704	706
1020	1543	2838	3698	700
1022	1580	2700	3715	734
1023	1500	2590	3640	816
1055	2492	3736	4743	702
1056	2400	3800	4900	738
1057	2480	3840	4970	757
1059	1450	3046	3791	720
1060	1467	2966	3943	752
1061	2685	4190	5178	753

Do quociente entre a diferença das leituras de vapor em cada fase e os volumes de mosto frio tiram-se os consumos específicos de vapor em cada fase.

Sabendo que o mosto quente ao ser arrefecido sofre uma contracção de 4% no seu volume então os consumos médios específicos são como se segue:

- Fase I: 2,44 (kg vapor/hl mosto quente)
- Fase II: 1,75 (kg vapor/hl mosto quente)
- Fase III: 1,28 (kg vapor/hl mosto quente)

Tendo em consideração a duração de cada fase então as necessidades de vapores são:

- Fase I: 9,77 ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto quente hr}}$)
- Fase II: 2,34 ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto quente hr}}$)
- Fase III: 7,69 ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto quente hr}}$)

Estes valores servem como uma estimativa inicial para um controlo de ebulição baseado na quantidade de vapor/energia gasta por cada ebulição. A quantidade de mosto quente pode ser dada pelos sensores de nível existentes na caldeira de ebulição. Para melhores resultados deve-se aplicar um contador na linha de admissão de mosto à caldeira de ebulição.

Estes valores devem estar acessíveis na receita do mosto de forma a poderem ser ajustados.

A estimativa acima apresentada permite consumos específicos de vapor de 5 ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto}}$), como se mostra na tabela 3. A tabela I.2 mostra que estes consumos se mantêm constantes independentemente da quantidade de mosto presente na etapa de ebulição, como se pretende para o algoritmo de controlo apresentado na secção 4.6.2.1.

Tabela I.2- Consumos de vapor em cada fase, em função da quantidade de mosto em ebulição.

Fase	Duração de cada fase (min)	Caudais específicos de vapor ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto h}}$)	Volume de mosto na ebulição (hl_{mosto})		
			700	750	800
I	15	9,77	1710	1832	1954
II	45	2,34	1229	1316	1404
III	10	7,69	897	961	1025
Soma (kg_{vapor})			3835	4109	4383
Consumos específicos de vapor ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto}}$)			5,5	5,5	5,5

As células com preenchimento são uma estimativa da quantidade de vapor gasta em cada fase em função do volume de mosto em ebulição.

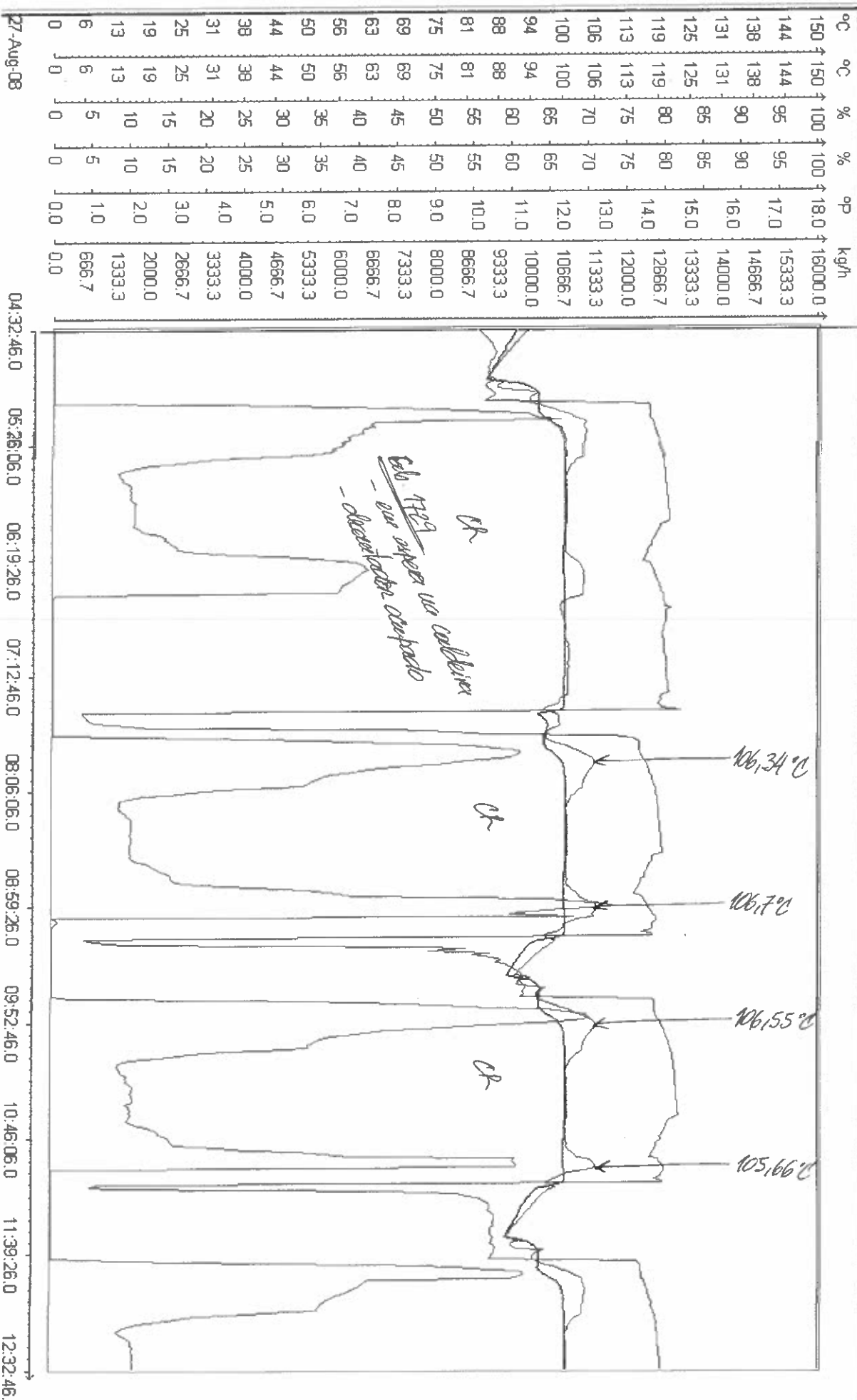
Somando estas quantidades para as varias fases da ebulição e por divisão pelo volume de mosto mostra-se que estas estimativas para os caudais específicos de vapor respeitam os consumos registados experimentalmente, para o perfil EC1, como se mostra na tabela 3.

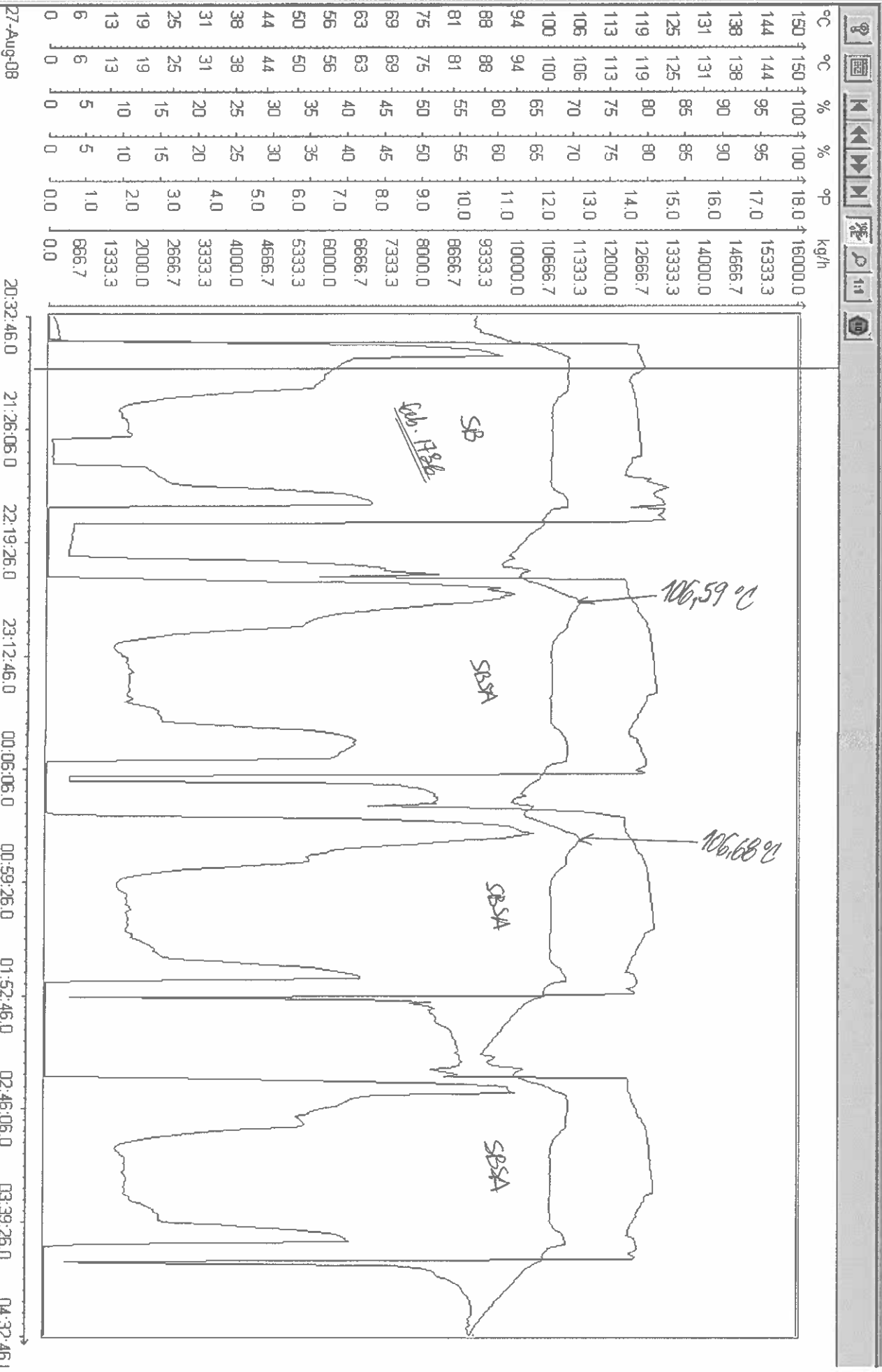
Pode concluir-se que os valores encontrados para as estimativas dos caudais específicos de vapor são plausíveis.

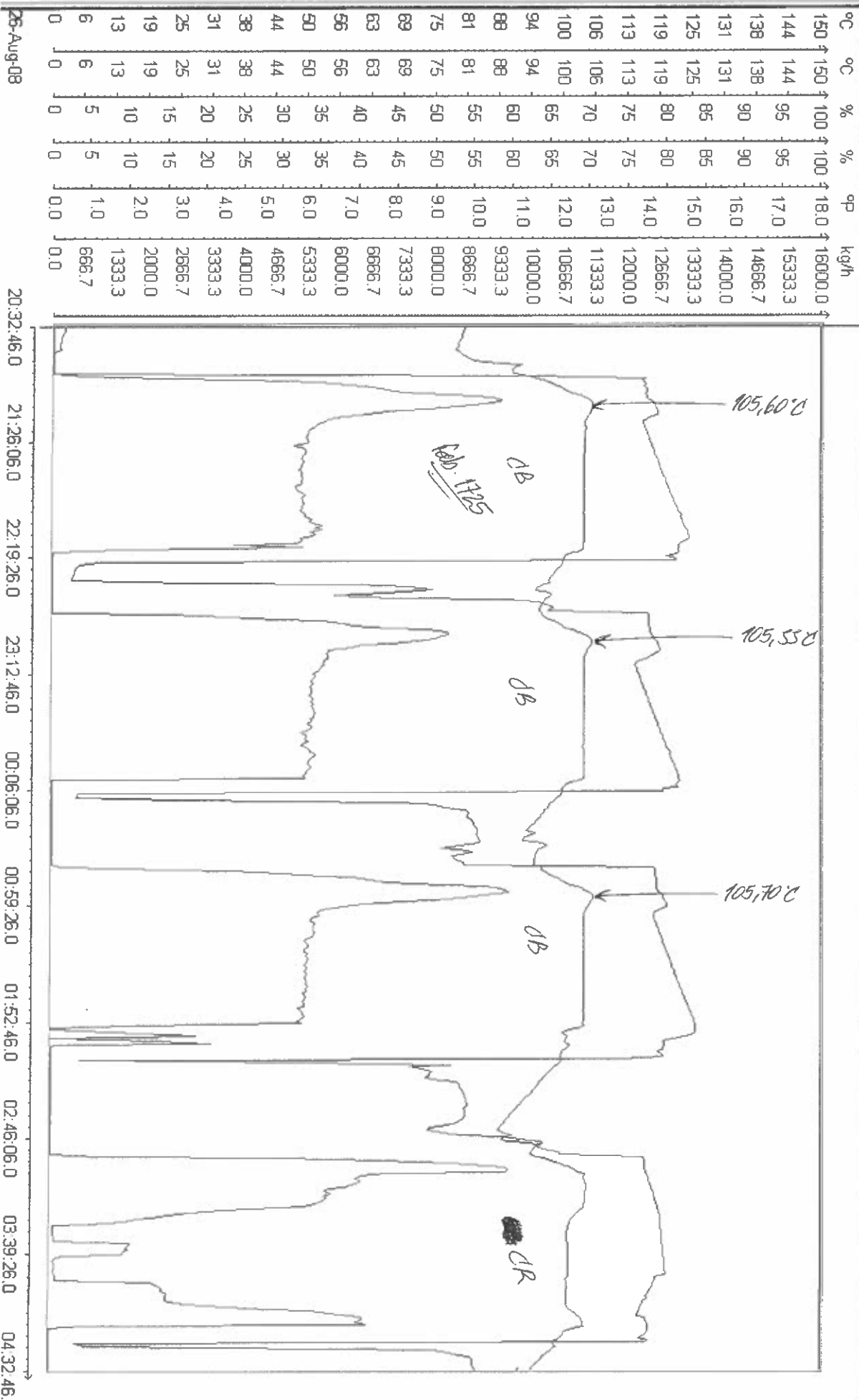
Os valores experimentais registados permitiram calcular os consumos específicos em cada ebulição. Por procura do valor mínimo verifica-se que ocorrerem ebulições com consumos de 3 ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{hl}_{\text{mosto}}$), para o perfil EC1.

Por implementação do algoritmo de controlo básico, como o sugerido na secção 4.6.2.1, e por redução sucessiva destes valores estimados e avaliação dos impactos na qualidade do produto final, consegue-se uma melhor optimização energética da etapa de ebulição do mosto.

Anexo J – Erros nos perfis de ebulição









°C	°C	%	%	°P	kg/h
150	150	100	100	18.0	16000.0
144	144	95	95	17.0	15333.3
138	138	90	90	16.0	14666.7
131	131	85	85	15.0	14000.0
125	125	80	80	14.0	13333.3
119	119	75	75	13.0	12666.7
113	113	70	70	12.0	12000.0
106	106	65	65	11.0	11333.3
100	100	60	60	10.0	10666.7
94	94	55	55	9.0	10000.0
88	88	50	50	8.0	9333.3
81	81	45	45	7.0	8666.7
75	75	40	40	6.0	8000.0
69	69	35	35	5.0	7333.3
63	63	30	30	4.0	6666.7
56	56	25	25	3.0	6000.0
50	50	20	20	2.0	5333.3
44	44	15	15	1.0	4666.7
38	38	10	10	0.0	4000.0
31	31	5	5	0.0	3333.3
25	25	0	0	0.0	2666.7
19	19	0	0	0.0	2000.0
13	13	0	0	0.0	1333.3
6	6	0	0	0.0	666.7
0	0	0	0	0.0	0.0

24-Jul-08

19:33:54.2

20:27:14.2

21:20:34.2

22:13:54.2

23:07:14.2

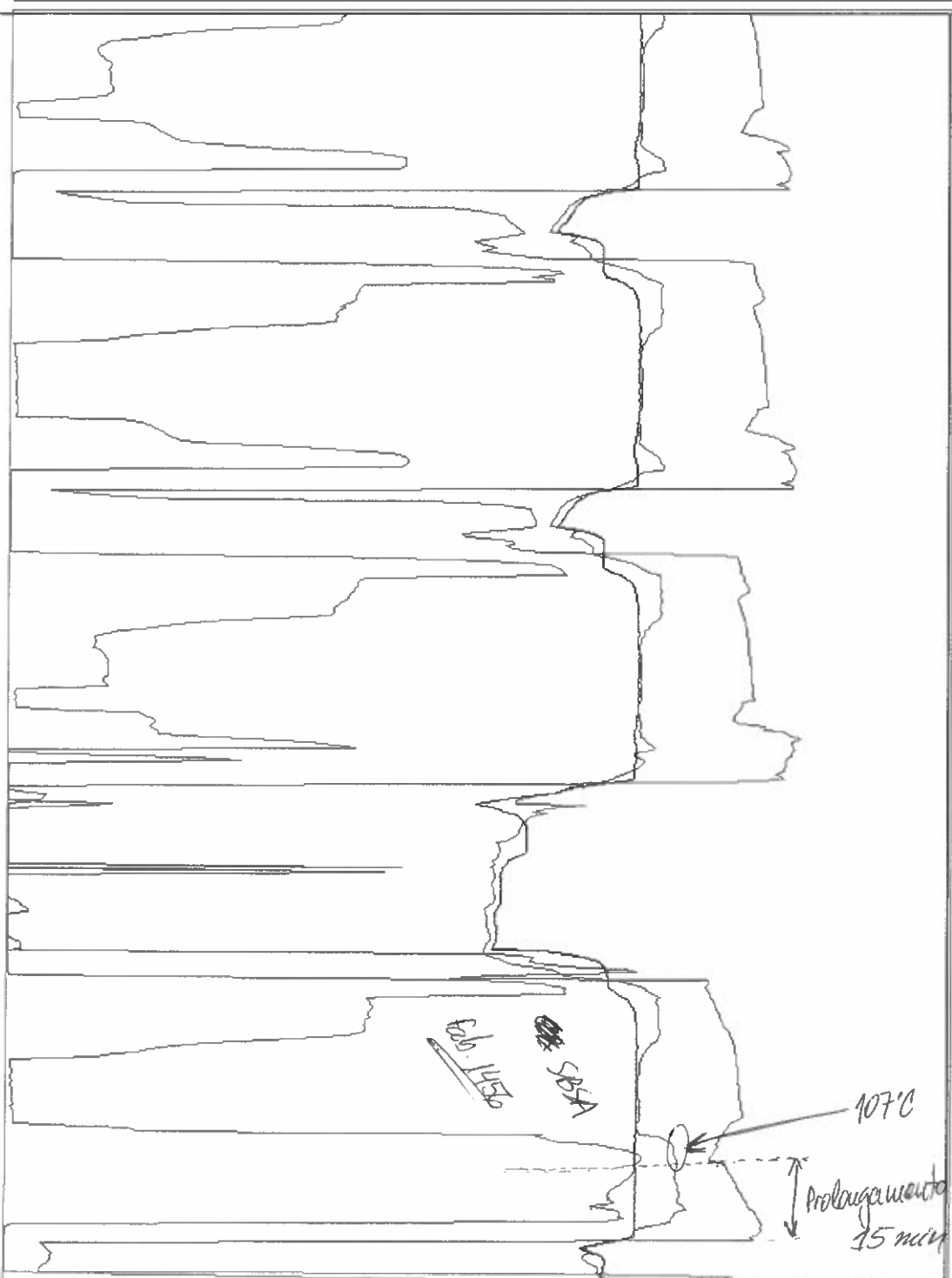
00:00:34.2

00:53:54.2

01:47:14.2

02:40:34.2

03:33:54.2



Anexo L – Proposta de alteração dos programas de enxaguamento dos filtros trap

Da comparação dos programas de enxaguamento verifica-se que para cada filtro trap I/II e por cada linha os programas são diferentes, embora as funções sejam as mesmas. Da comparação dos vários programas existentes verifica-se que o do trap III é o mais bem conseguido, assim parte-se desta base para a uniformização destes enxaguamentos. Propõem-se os passos abaixo descritos para conseguir esta uniformização. Os tempos de enxaguamento devem ser ajustados em função das características do filtro trap e os caudais devem ser de 300 hl/h sentido directo e 750 hl/h no sentido inverso.

Tabela I.1 - Proposta de alteração dos programas de enxaguamento dos filtros trap. Objectivos de cada passo do enxaguamento.

Descrição do passo	Tempo (seg)	Objectivo do passo
Enxaguar no sentido directo com água fria	30	Expulsar a cerveja da linha
Enxaguar no sentido contrario com água fria	100 (Max 120)	Expulsar a maior parte da sujidade
Enxaguar no sentido directo com água quente	30	Provocar um choque térmico e hidrodinâmico
Enxaguar no sentido contrario com água quente	100 (Max 120)	Expulsar sujidade por aumento da difusão
Enxaguar no sentido directo com água fria	30	Arrefecer a linha

Esta proposta permite:

- I. Uniformizar o programa de enxaguamento para os vários filtros trap;
- II. Implementar a capacidade do enxaguamento em promover choques térmicos e hidrodinâmicos em sequência capaz de melhorar o enxaguamento;
- III. Libertar o programa de passos internos que não podem ser alterados pelos operadores, promovendo assim o uso racional da água de enxaguamento (ex. nos trap's I/II verifica-se que nos passos 2 e 3 o enxaguamento em sentido contrário só ocorre ao fim de 120 segundos);
- IV. Dotar os técnicos de maior entendimento dos passos e tempos da fase de enxaguamento dos trap's.

Nas tabelas abaixo apresenta-se a mesma proposta, mas com o jogo de abertura e fecho de válvulas necessário à execução de cada passo, nos vários filtros trap e nas diferentes linhas de filtração.

Tabela I.2 - Proposta para alteração do enxaguamento dos filtros trap na linha Schenk. Jogo de abertura e fecho de válvulas necessário para a execução dos passos propostos.

Passo	Descrição do passo	Tempo (seg)	Q (hl/hr)	Obs.		
				Trap I	Trap II	Trap III
1	Arranque do Programa	-	-	Abrir: HV205, HV206, GS204	Abrir: HV205, HV206, GS204	Abrir: HV205, HV206, GS204
2	Enxaguar no sentido directo com água fria	30	300	Abrir: V291, V272, V273	Abrir: V292, V293, V284, V280	Abrir: HV201, V803, V808, V809, V241, V244, V268, V521, V517
3	Enxaguar no sentido contrário com água fria	100	750	Abrir: V292, V275, V274, V271	Abrir: V292, V283, V284, V280	Abrir: HV201, V802, V808, V804
4	Enxaguar no sentido directo com água quente	30	300	Abrir: V291, V272, V273	Abrir: V292, V293, V284, V280	Abrir: HV201, V803, V808, V809, V241, V244, V268, V521, V517
5	Enxaguar no sentido contrário com água quente	100	750	Abrir: V291, V275, V274, V271	Abrir: V292, V283, V284, V280	Abrir: HV201, V802, V808, V804
6	Enxaguar no sentido directo com água fria	30	300	Abrir: V291, V272, V273	Abrir: V292, V293, V284, V280	Abrir: HV201, V803, V808, V809, V241, V244, V268, V521, V517
7	Esvaziar filtro trap com CO ₂	-	-	Abrir: V806, V804	Abrir: V806, V804	Abrir: V806, V804
8	Terminar Programa	-	-	Fechar: HV205, HV206, GS204	Fechar: HV205, HV206, GS204	Fechar: HV205, HV206, GS204

Tabela I.3 - Proposta para alteração do enxaguamento dos filtros trap na linha Orion. Jogo de abertura e fecho de válvulas necessário para a execução dos passos propostos.

Passo	Descrição do passo	Tempo (seg)	Q (hl/hr)	Trap I	Obs.	Trap II
1	Arranque do Programa	-	-	Abrir:		Abrir:
2	Enxaguar no sentido directo com água fria	30	300	Abrir: V3507-1, V3502-1		Abrir: V3507-2, V3502-2
3	Enxaguar no sentido contrário com água fria	100	600	Abrir: V3508-1, V3509-1, V3504-1		Abrir: V3508-1, V3509-2, V3509-2, V3504-2
4	Enxaguar no sentido directo com água quente	30	300	Abrir: V3507-1, V3502-1		Abrir: V3507-2, V3502-2
5	Enxaguar no sentido contrário com água quente	100	600	Abrir: V3508-1, V3509-1, V3504-1		Abrir: V3508-1, V3509-2, V3509-2, V3504-2
6	Enxaguar no sentido directo com água fria	30	300	Abrir: V3507-1, V3502-1		Abrir: V3507-2, V3502-2
7	Esvaziar filtro trap com CO ₂	-	-	RESERVA*		RESERVA*
8	Terminar Programa	-	-	Fechar:		Fechar:

* Este passo fica inactivo, a instalação da linha Orion não está preparada para receber CO₂, no entanto, convém programá-lo por forma a que possa ser activado no futuro