

Avaliação Energética do Processo de Pasteurização do Iogurte

Arlézia Josefina Jamba Mandulo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Outubro de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Arlézia Josefina Jamba Mandulo, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11740 de Engenharia Eletromecânica, da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã _11___ / _10_ / _2024__

Arlézia J J Mandulo

Dedicatória

Queridos pais, Paulo e Angelina Mandulo; manos, Amadeu, Beatriz, Cátia, Felícia, Lucas, Generosa, Iany e Lígia, vocês foram o meu combustível durante todos esses anos longe. Aconteceu de tudo um pouco, os desafios trouxeram desânimo e incertezas, porém cada um de vós trazia a esperança de dias melhores e que eu devia concentrar-me apenas no que me correspondia, um dia de cada vez. Muitas vezes deixaram de desfrutar de muita coisa para que eu pudesse me manter cá.

Assim como foi com Moisés, que tiveram de apoiar as mãos dele para que se mantivessem levantadas durante as batalhas (Êxodo 17:11-13), vocês me mantiveram em pé. Este ciclo que agora se encerra é uma primeira forma de dizer a cada um que valeu a pena e que o melhor está por vir.

Agradecimentos

Não é possível mencionar todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta etapa. A Deus, Pai, pelo cuidado e orientação, à família restrita e alargada, ao meu amor, aos amigos e irmãos em Cristo, muito obrigada pelo encorajamento, pela disponibilidade, pelo escape oferecido em cada situação.

Aos professores, Luís Pires e Pedro Silva, pela disponibilidade e paciência ao orientar o trabalho; a toda equipa do departamento de manutenção da unidade industrial, que pacientemente ajudaram com toda a informação na recolha de dados, nos vários períodos. Muito obrigada, o Senhor abençoe a cada um.

Resumo

O iogurte, e os produtos láteos em geral, fazem parte da dieta de uma grande parte da população há muitos anos, pelo fato destes serem ricos em proteínas, vitaminas e minerais. Ao longo dos anos, o consumo de leite cru foi identificado como o principal motivo das mortes causadas por intoxicação alimentar, principalmente em crianças, o que levou os pesquisadores a desenvolverem métodos para reverter a situação. Em 1864, Louis Pasteur observou que se um líquido fosse aquecido e rapidamente arrefecido melhorava as condições de armazenamento, por causa do efeito da temperatura sob as bactérias que o constituem, tratamento que ficou conhecido como pasteurização, fundamental na indústria látea.

De um modo geral para processar os produtos láteos, o leite é submetido a um conjunto de tratamentos térmicos, para prolongar a vida útil, eliminar bactérias patogénicas e dar aos produtos as características requeridas; tudo isso torna a indústria látea num setor intensivo no consumo de energia. Para que reduções no consumo energético sejam alcançadas é necessário caracterizar o consumo em cada processo, para os diversos produtos. Com o objetivo de contribuir para a literatura existente, o presente trabalho apresenta uma avaliação energética do processo de pasteurização do iogurte, com base em dados recolhidos numa unidade industrial nos dias 30 e 31 de Maio de 2023, em Portugal. É apresentada uma breve descrição do processo de produção do iogurte; a história do processo de pasteurização; o princípio de funcionamento do pasteurizador, bem como todas as fases de aquecimento do produto, durante o processo. Colocando de parte as fases de reaproveitamento de calor, o consumo foi de 0,022 kWh de energia térmica por cada kg de produto pasteurizado.

Palavras-chave

Pasteurização; Avaliação Energética; Produção de Iogurte; Indústria Látea.

Abstract

Yoghurt and dairy products in general have been part of the diet of a large part of the population for many years, because they are rich in proteins, vitamins and minerals. Over the years, the consumption of raw milk was identified as the main reason for deaths caused by food poisoning, especially in children, which led researchers to develop methods to reverse the situation. In 1864, Louis Pasteur observed that if a liquid was heated and quickly cooled, it improved storage conditions, because of temperature on the bacteria present in the liquid. This treatment, which came to be known as pasteurisation, is a fundamental treatment in the dairy industry.

In general, to process dairy products, milk is subjected to a series of heat treatments to extend its shelf life, eliminate pathogenic bacteria and give the products the required characteristics; all of which makes the dairy industry an energy-intensive sector. To achieve reductions in energy consumption, it is necessary to characterise consumption in each process for the various products. To contribute to the existing literature, this paper presents an energy assessment of the yoghurt pasteurisation process, based on data collected in an industrial unit on 30 and 31 May 2023 in Portugal. A brief description is given of the yoghurt production process; the history of the pasteurisation process; the operating principle of the pasteuriser, as well as all the product heating phases during the process. Leaving aside the heat reuse phases, the consumption was 0.022 kWh of thermal energy per kg of pasteurised product.

Keywords

Pasteurization; Energy Analysis; Yogurt Production; Dairy Industry.

Índice

Dedicatória	v
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Palavras-chave.....	ix
Abstract.....	xi
Keywords	xi
1. Enquadramento e visão geral.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Revisão Bibliográfica.....	4
2. Processo de produção do iogurte.....	8
2.1. Breve descrição do processo de produção do iogurte.....	8
2.2. O processo de pasteurização	12
2.2.1. Breve história da pasteurização	12
2.2.2. Padronização e métodos de pasteurização	13
2.2.3. Equipamento utilizado	14
3. Caso de estudo	17
3.1. Descrição do sistema	18
3.2. Descrição dos processos	21
3.3. Análise energética	34
3.3.1. Primeira fase de aquecimento	36
3.3.2. Segunda fase de aquecimento.....	37
3.3.3. Terceira fase de aquecimento	39
3.3.4. Tempo de preparação.....	41
4. Discussão.....	45
5. Conclusão	48
6. Referências bibliográficas	49

Lista de Figuras

- Figura 1 - Sequência do processo de produção de iogurte por setor
- Figura 2 - Processos que ocorrem no setor de recepção de leite
- Figura 3 - Processos que ocorrem no setor de normalização
- Figura 4 - Processos que ocorrem no setor de processos
- Figura 5 - Processos que ocorrem no setor de lançamentos
- Figura 6 - Permutador de calor de placas planas
- Figura 7 – Sentido da circulação dos fluídos no permutador
- Figura 8 - Placa de um permutador de calor de placas
- Figura 9 - Corte transversal do pasteurizador
- Figura 10 - Circuito de pasteurização
- Figura 11 – Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo I)
- Figura 12 – Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo II)
- Figura 13 - Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo III)
- Figura 14 – Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo IV)
- Figura 15 - Caudal do produto (Iogurte tipo I)
- Figura 16 - Caudal do produto (Iogurte tipo II)
- Figura 17 - caudal do produto (Iogurte tipo III)
- Figura 18 - Caudal do produto (Iogurte tipo IV)
- Figura 19 - Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo I)
- Figura 20 - Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo II)
- Figura 21 - Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo III)
- Figura 22 – Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo IV)
- Figura 23 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo I)
- Figura 24 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo II)
- Figura 25 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo III)
- Figura 26 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo I)
- Figura 27 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo I)

Figura 28 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo II)

Figura 29 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo III)

Figura 30 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo IV)

Figura 31 - Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo I)

Figura 32 – Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo II)

Figura 33 - Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo III)

Figura 34 – Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo IV)

Figura 35 - Temperaturas ao longo do processo de preparação

Lista de Tabelas

- Tabela 1 - Padrão para a pasteurização do leite
- Tabela 2 - Sensores de temperatura ao longo do percurso
- Tabela 3 - Características do pasteurizador
- Tabela 4 - Pasteurizações realizadas nos dias 20 e 31 de maio de 2023
- Tabela 5 – Processos de pasteurização estudados
- Tabela 6 - Dados da pasteurização (Iogurte tipo I)
- Tabela 7 - Dados pasteurização (Iogurte tipo II)
- Tabela 8 - Dados pasteurização (Iogurte tipo III)
- Tabela 9 - Dados pasteurização (Iogurte tipo IV)
- Tabela 10 – Dados segunda fase (Iogurte tipo I)
- Tabela 11 - Dados segunda fase (Iogurte tipo II)
- Tabela 12 - Dados segunda fase (Iogurte tipo III)
- Tabela 13 - Dados segunda fase (Iogurte tipo IV)
- Tabela 14 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo I)
- Tabela 15 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo II)
- Tabela 16 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo III)
- Tabela 17 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo IV)
- Tabela 18 - Divisão do tempo de preparação
- Tabela 19 - Dados do processo no primeiro intervalo (10:46 – 10:51)
- Tabela 20 - Dados do processo no segundo intervalo (10:52 – 10:55)
- Tabela 21 - Dados do processo no terceiro intervalo (10:56 – 11:04)
- Tabela 22 - Dados do processo no quarto intervalo (11:05 – 11:10)
- Tabela 23 - Dados do processo no quinto intervalo (11:11 – 11:16)
- Tabela 24 - Dados do processo no sexto intervalo (11:17 – 11:22)
- Tabela 25 - Dados do processo no sétimo intervalo (11:23 – 11:28)
- Tabela 26 - Potência térmica em cada fase
- Tabela 27 - Energia consumida em cada fase
- Tabela 28 – Energia consumida por litro de leite pasteurizado
- Tabela 29 – Potência térmica e energia transferida pela água quente
- Tabela 30 - Potência térmica consumida em cada fase durante o período de preparação
- Tabela 31 - Energia consumida durante o tempo de preparação

Lista de Acrónimos

CIP	Clean In Place (limpeza no local)
HTST	High Temperature Short Time (alta temperatura por curtos períodos)
SIP	Sterilization In Place (Esterilização no local)

1. Enquadramento e visão geral

Este primeiro capítulo tem como objetivo apresentar a importância do trabalho desenvolvido. Para tal, exploramos alguns aspetos, tais como, a posição dos produtos láteos na alimentação, ao longo dos anos, o estado e a evolução da indústria nas diferentes regiões, o consumo de energia, as metas estabelecidas para o setor e a literatura existente sobre o consumo de energia no setor.

Os restantes capítulos estão organizados da seguinte forma: no capítulo 2 temos a descrição do processo de produção do iogurte, o capítulo 3 é dedicado ao processo de pasteurização, o capítulo 4 é dedicado ao caso de estudo, temos a discussão e a conclusão nos capítulos 5 e 6, respetivamente e, finalmente, as referências bibliográficas.

1.1. Introdução

A alimentação é uma necessidade básica de qualquer ser, é importante para a manutenção da vida. Entre os alimentos que fazem parte da dieta da maior parte da população mundial, ao longo dos anos, estão os laticínios [1]. Os produtos láteos são ricos em proteínas, lípidos, carboidratos, vitaminas, minerais, probióticos e pré-bióticos, entre outros nutrientes, que fazem com que o consumo destes produtos seja associado a uma dieta mais saudável e os torna muito populares [2][3].

Além dos nutrientes já conhecidos, vários estudos têm avaliado a possibilidade de utilização dos produtos láteos, principalmente os fermentados, para o tratamento e prevenção de doenças [4][5][6]; estes sugerem que os produtos láteos podem ter efeitos imunológicos positivos – pelo fato de modularem a produção de citocinas e peptídeos – efeitos anticancerígenos, anti alérgicos, entre outros [2]. Apesar de serem estudos laboratoriais, abrem uma nova janela, uma perspetiva diferente sobre o futuro da produção e consumo dos produtos láteos. Os autores sugerem que mais estudos sejam realizados de maneiras a também adequar os produtos aos gostos e necessidades dos consumidores [2].

A indústria de laticínios está bem consolidada nos países desenvolvidos, o consumo elevado destes produtos é promovido pelos benefícios que estes proporcionam à saúde. Nos países em desenvolvimento, por outro lado, a indústria está em expansão; há uma procura cada vez maior, impulsionada pelo desenvolvimento económico, aumento da população e mudanças nos padrões alimentares [1][7]. Apesar do aumento da procura ser maior nos países em desenvolvimento, prevê-se um aumento da produção dos produtos láteos, tanto nos países em desenvolvimento quanto nos países desenvolvidos [8].

O aumento da procura faz com que a indústria cresça, tornando-a importante para o desenvolvimento dos países; uma importante fonte de emprego, com significativa participação no PIB [7]. Em 2020, na União Europeia, a indústria alimentar foi responsável por 2% do PIB e gerou um volume de negócios de 1,112 bilhões de euros, equivalentes a 15% do total de volume de negócio gerado pela indústria transformadora; sendo, portanto, o segundo maior setor em volume de negócios dentro da indústria transformadora. Por outro lado, a indústria de laticínios é o terceiro subsetor principal da indústria alimentar, responsável por 16% do volume de negócios gerado pela indústria alimentar e 9% do total de empregos gerados [9].

Paralelamente à posição económica, o setor industrial é também um dos setores que mais consome energia. Em 2021, 25% da energia consumida na União Europeia foi para o setor industrial, dos quais 11,6% foram para a indústria alimentar e de bebidas [10]. A maior parte desta energia foi produzida a partir do carvão, gás natural e petróleo bruto, 68,4%, no conjunto, de fontes nucleares, 12,7%, e de fontes renováveis, 17,4%. No entanto, 91,7% das necessidades de petróleo, 83,4% das necessidades de gás natural e 37,5% das necessidades de combustíveis fósseis sólidos, na União Europeia, foram satisfeitas por importações; isto indica uma elevada dependência energética e necessidade de reduzir o consumo [11].

Outro ponto importante a considerar relativamente ao consumo de energia, principalmente proveniente dos combustíveis fósseis, é o impacto ambiental que estes provocam. A partir da década de 1970, uma nova preocupação surgiu, o clima. Depois da observação de eventos climáticos ocorridos na década anterior, a busca por uma explicação levou ao questionamento sobre o que estaria na base de tais acontecimentos, que conhecimentos havia sobre as alterações climáticas e de que maneira a atividade humana poderia influenciar. Estas questões levaram à realização da primeira conferência mundial sobre o clima, em Genebra, em 1979, que reuniu vários especialistas, levando-os a realizar um estudo profundo sobre as causas, impactos e medidas de mitigação. Vários órgãos e tratados surgiram para dar respostas aos novos desafios, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, fundado em 1988, com o objetivo de fornecer informação técnica e científica sobre o estado do clima e facilitar a formulação de medidas estratégicas [12]. Um importante marco foi a adoção da Convenção Quadro das Nações Unidas, em 1992; um tratado que tem ditado as bases da política ambiental global, visa limitar as emissões de gases com efeito de estufa e, ao longo dos anos, diferentes objetivos foram traçados pelas partes pertencentes ao acordo para períodos bem definidos [12]. Durante a vigésima primeira conferência das partes, realizada em Paris em 2015, foi assinado um novo acordo, o mundialmente conhecido Acordo de Paris, tendo como um dos principais objetivos limitar o aumento da temperatura global muito abaixo dos 2 °C, em relação aos níveis pré-industriais e continuar a empreender esforços para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais [13].

Uma parte da comunidade científica defende que o aumento da temperatura global é provocado pelo aumento da concentração de gases de efeito de estufa na atmosfera e, além da temperatura,

este acúmulo provoca alterações em outros indicadores climáticos, nomeadamente, precipitação, acidificação dos oceanos, condições meteorológicas extremas, entre outros [14][15]. Segundo o relatório do Secretariado das Nações Unidas para as Alterações Climáticas [16], alguns dos riscos decorrentes da alteração destes padrões incluem inundações, secas, furacões, ciclones, chuvas torrenciais, incêndios, vagas de frio, alterações na distribuição das espécies, degradação dos solos, alteração nos padrões de circulação oceânica, entre outros; nos últimos anos tem se verificado um aumento significativo na frequência de ocorrência destes eventos catastróficos ao redor do mundo [17].

Segundo o relatório anual de emissões de gases de efeito de estufa do Programa das Nações Unidas Para o Meio Ambiente (PNUMA) [18], as emissões de gases de efeito de estufa aumentaram entre 0,8% a 1,5% em 2022, tendo sido registados um total de 57,4 Gt de dióxido de carbono equivalente. As emissões provenientes da utilização de combustíveis fósseis foram responsáveis por 2/3 das emissões totais; os setores de produção de energia e industrial são os setores com as taxas de emissão mais elevadas, com 36% e 25% do valor total, respetivamente. Este facto reforça a necessidade, cada vez crescente, de ações que visam reduzir a utilização de combustíveis fósseis nestes setores.

Uma das medidas amplamente recomendada é o aumento da eficiência dos sistemas, o que na indústria tem particular importância porque significa também maximizar os ganhos. A indústria de laticínios é muito importante, pelo valor nutricional dos produtos e possíveis relações com o tratamento e prevenção de doenças, prevê-se que cresça cada vez mais, sem esquecer o papel no desenvolvimento económico; afinal, trata-se de um dos principais subsectores de um dos principais setores – a indústria alimentar – da maior indústria, em volume de negócio e consumo de energia do mundo, a indústria transformadora.

Os produtos láteos são processados a partir do leite cru, composto por uma grande variedade de microrganismos que podem ser agrupados em microrganismos deteriorantes e microrganismos patogénicos. Os microrganismos deteriorantes podem alterar a qualidade nutricional e sensorial do leite, enquanto os microrganismos patogénicos são prejudiciais à saúde; portanto a presença destes é indesejada [19]. Para garantir os requisitos de segurança alimentar, o leite cru precisa de ser submetido a vários processos de aquecimento e refrigeração; pois é durante estes processos que a produção e crescimento das bactérias indesejadas presentes no leite é controlada. Por essa razão, a indústria látea utiliza uma grande quantidade de energia eléctrica, para os processos de refrigeração e energia térmica para os processos de aquecimento. Além da questão de segurança alimentar, para processar os diferentes tipos de produtos é necessário separar ou concentrar os diferentes sólidos que compõem o leite cru, de maneira a dar aos produtos as características desejadas; este processo de separação pode exigir grandes quantidades de energia dependendo do produto [20]. Há ainda os altos padrões de limpeza exigidos na indústria; por causa da natureza do leite, podem ser criados biofilmes bacterianos ao longo das superfícies dos equipamentos de manuseio do produto, para removê-los é necessário recorrer a limpeza química,

que também requer aquecimento. Portanto, desde a recepção do leite até ao produto final, a indústria de processamento de laticínios utiliza quantidades significativas de energia.

A indústria de laticínios é dos mais importantes setores da indústria alimentar, como exposto anteriormente, sempre foi ao longo dos anos e é igualmente um dos que mais consome energia [21][22]. Apesar disto, existem poucos estudos que caracterizam o uso de energia neste setor tão importante. Os autores concordam que existe uma lacuna na literatura sobre o uso de energia na indústria de laticínios, os que existem são muito fragmentados e há uma urgência em produzir um estado da arte sobre a questão. A falta de ferramentas e profissionais, nas indústrias, para monitorizar o consumo são apontadas como umas das principais causas [20]. Num estudo publicado em 2019 sobre o uso de energia na indústria alimentar, os autores afirmam que para que reduções significativas sejam alcançadas na procura de energia, os pontos críticos precisam de ser identificados primeiro. São necessários estudos o mais próximo possível sobre a utilização real de energia em processos específicos para produtos individuais [22].

1.2. Revisão Bibliográfica

Existem diferentes tipos de produtos láteos, com necessidades energéticas diferentes tanto em intensidade quanto em forma. Assim sendo, para caracterizar corretamente o setor, todos os produtos têm de ser contemplados, assim como os respetivos processos. Alguns dos estudos que caracterizaram o consumo de energia no setor de laticínios são apresentados a seguir.

Ramírez, et al., 2006 [21], estudaram o padrão do consumo de energia e o estado da evolução da indústria látea na Alemanha, França, Reino Unido e Países Baixos, do ano 1980 ao ano 2000. O objetivo do estudo foi avaliar a eficiência energética do setor nos quatro países e fazer uma comparação da evolução do consumo, de maneira a identificar oportunidades de melhoria com base nas diferenças das magnitudes de intensidade energética. O estudo avaliou o consumo geral de energia por combustível na indústria dos países em questão e apresentou a percentagem média de procura de energia para alguns processos durante a produção de leite fluído, queijo, manteiga e leite em pó, no ano de 2000, numa indústria dos Países Baixos. Os processos com maior procura foram a pasteurização, centrifugação e homogeneização, juntos eram responsáveis por 38% da procura de energia para a produção do leite fluído; o tratamento e armazenamento do queijo era responsável 24% da procura durante a produção do queijo; a refrigeração era responsável por 66% durante a produção da manteiga; a concentração térmica e a evaporação eram responsáveis por 45% da procura durante a produção de leite em pó.

Xu e Flapper, 2009 [20], caracterizaram o uso de energia no processamento do leite líquido, com base em extensas revisões bibliográficas. Conscientes da quantidade de energia utilizada para o

processamento de laticínios, os autores optaram por estudar o processamento do leite, não apenas pela parcela que este ocupava, mas também pela disponibilidade de dados. Os autores também compararam os valores do consumo específico de energia por cada kg de produto fabricado entre diferentes países e entre indústrias de um mesmo país. Pela distribuição média do consumo de energia por processos, para 15 fábricas dos Países Baixos e do Canadá em 1998, concluíram que, para a produção do leite líquido, o tratamento do leite – padronização e pasteurização – correspondem a 38% e 48% da procura de energia, nos Países Baixos e no Canadá, respetivamente; sendo os processos mais intensivos, seguidos dos processos de limpeza, com uma média de 9% do uso total de energia nos Países Baixos e 25% no Canadá.

Numa abordagem comparativa sobre diferentes métricas para o cálculo da intensidade energética no fabrico de soro de leite e queijo, Briam, et al., 2015 [23], descreveram detalhadamente o processo de produção dos produtos e apresentaram a quantidade de energia necessária para produzir um kg de queijo cheddar, 0,6 kg de soro de leite seco e 0,1 kg de creme de soro de leite, a partir de 10,3 kg de leite cru. O consumo de eletricidade e gás natural, por processo, durante a produção foi apresentado, tendo sido a pasteurização do leite o processo mais intensivo, representando 32% do consumo total de energia. Uma das conclusões importantes do estudo foi que métodos para o cálculo de intensidade energética que não levam em consideração os processos individualmente, podem não representar a realidade dos fatos, principalmente quando se trata de vários produtos. Xu, et al., 2009 [24], também estudaram o consumo específico de energia no processamento do queijo em vários países e em várias fábricas no mesmo país, com o objetivo de identificar oportunidades de melhoria na eficiência energética pela observação da diferença nos valores de intensidade energética obtidos. Na altura eram necessários, em média, 4,9 a 8,9 MJ de energia para cada kg de queijo produzido, nos países estudados. Os autores apresentam também uma descrição do processo de produção do queijo e a participação de cada processo no uso total de energia primária, numa fábrica de produção de queijo em 1998; dos quais o processo de pasteurização do leite foi identificado como o processo com maior participação no consumo específico de energia, cerca de 17 a 26%. Os mesmos autores caracterizaram também o uso de energia nos mercados globais de processamento de manteiga, soro de leite em pó, leite em pó e leite condensado [25]. Segundo as estatísticas apresentadas por eles, os produtos láteos mais produzidos mundialmente foram os produtos láteos frescos, com cerca de 51% a 65% em média, do total da produção de leite; a seguir foi o queijo, com 25%, e por último o leite em pó e o leite condensado, com 9% e 1,9%, respetivamente. Apesar da intenção de apresentar o uso de energia relativo à produção de cada um dos produtos nos países estudados, apenas havia dados disponíveis sobre a utilização de energia dos três produtos nos Países Baixos. Os valores finais do consumo específico de energia foram 2,1 MJ/kg para a manteiga, 2,0 MJ/kg para o leite condensado, 6,0 MJ/kg para o soro de leite em pó e 10,3 MJ/kg para o leite em pó. Pela disponibilidade de dados os autores apresentam a participação de cada processo na procura de energia primária, tendo sido os processos de secagem e concentração os mais intensivos. Os autores afirmam que o estudo é muito limitado e fragmentado, é necessário um esforço geral para cobrir a lacuna.

Outros estudos que caracterizaram de alguma forma o consumo de energia são as avaliações de ciclo de vida. A avaliação do impacto ambiental do iogurte, numa unidade industrial portuguesa foi feita por González-García, et al., 2013 [26]; o estudo foi baseado em dados recolhidos no local de produção e contém uma descrição do processo produtivo de vários tipos de iogurtes. A contribuição significativa para avaliações energéticas está no fato de apresentarem os insumos de energia – 134,7 kWh de eletricidade e 16,4 m³ de gás natural – necessários para produzir uma tonelada de iogurte. Os autores não fazem referência a processos individualmente e uma particularidade da indústria estudada pelos autores é que os ingredientes sólidos, produzidos a partir do leite, que são adicionados ao iogurte na etapa de normalização (ver seção 2.1), são produzidos na unidade industrial, o que elevou o consumo energético. O subsistema da avaliação de ciclo de vida referente à fábrica, é o principal responsável pelos impactos de aquecimento global (53%), destruição da camada de ozono (65%) e procura cumulativa de energia (67%). Vale ressaltar que, apesar de tudo, a questão energética não é o foco das análises de ciclo de vida, pelo facto de esta ter um impacto ambiental menor, comparativamente ao subsistema de produção de leite. Uma outra análise do ciclo de vida ao leite [27], mostra que para a produção do leite líquido para consumo, as necessidades energéticas são muito menores relativamente ao iogurte. Neste estudo o subsistema referente à fábrica é responsável por 14% do potencial de aquecimento global e 29% do potencial de destruição da camada de ozono. Vários outros estudos sobre a avaliação do ciclo de vida de produtos láteos foram feitos [28][29], embora estes não quantifiquem propriamente o uso de energia e apenas situam o impacto do uso de energia dentro de todos os outros impactos ambientais causados pela produção dos produtos. Este tipo de análise ajuda a perceber que diferentes produtos têm impactos diferentes porque requerem intensidades de energia diferentes.

Diferentes avaliações termodinâmicas sobre perda de exergia também caracterizaram em algum grau a utilização de energia na indústria de laticínios. Sorguven e Olzigen, 2012 [30], realizaram uma avaliação termodinâmica sobre o processo de produção de iogurte aromatizado de morango, desde a produção de leite até o transporte para os vendedores. O estudo teve como objetivo identificar as perdas de exergia e o impacto ambiental dos processos de produção. O estudo avaliou os seguintes subsistemas: produção de leite, separação da nata, produção de iogurte, produção de aditivos como morangos e outros ingredientes, empacotamento e transporte do iogurte. Mais uma vez os autores concluíram que a maior parte da energia é gasta durante a produção de iogurte; com um consumo de mais de 15000 MJ de combustível, a fase de produção é também a fase com maior contribuição para as emissões de dióxido de carbono, com cerca de 50%.

Outros estudos sobre utilização de energia em processos específicos estão geralmente associados a tecnologias emergentes, Atkins, et al., 2010 [31], fizeram um estudo de caso sobre a integração de um coletor de tubo a vácuo para fornecer calor de processo numa indústria de processamento de leite em pó da Nova Zelândia. Yildirin e Genc, 2015 [32], fizeram uma análise exérgica a um sistema de pasteurização do leite assistido com energia geotérmica. Husnain, et al., 2022 [33],

desenvolveram um sistema de processamento de iogurte assistido por energia solar, capaz de realizar o aquecimento e refrigeração do leite/iogurte no mesmo recipiente. Para cada volume de leite utilizado os autores determinaram a quantidade de energia térmica e elétrica envolvida para o aquecimento e refrigeração, e determinaram a eficiência energética e exergética do sistema. Philip et al., 2018 [34], desenvolveram um sistema de recuperação de calor para aumentar a eficiência energética do processo de esterilização, durante a produção de soro de leite. Os autores desenvolveram dois modelos para o sistema de esterilização e avaliaram o desempenho energético de cada um, comparativamente ao sistema original utilizado na indústria, obtendo uma redução de 10% na procura de energia térmica. Tomasula, et al., 2013 [35], desenvolveram um modelo computacional para quantificar o consumo de energia elétrica, gás natural e emissões de gases de efeito de estufa, no processamento de leite, desde o armazenamento do leite cru até o armazenamento do produto final embalado. O modelo teve como objetivo avaliar a eficiência energética e servir de meio de avaliação para a implementação de novas medidas de eficiência. Depois da simulação os dados de energia elétrica e vapor utilizados foram apresentados para cada etapa do processamento; maior quantidade de vapor foi para os processos de CIP e pasteurização, com 1310 t/ano e 372 t/ano, respetivamente; enquanto o maior consumo de eletricidade foi para a refrigeração do produto no armazém e para os processos de embalagem do leite, com 2308800 KWh/ano e 503861 KWh/ano, respetivamente. Um sistema de pasteurização de leite utilizando um coletor solar de placa plana, para uma zona com difícil acesso a fontes de energia convencionais, foi desenvolvido por Tigabe, et al., 2022 [36], e o desempenho energético do sistema foi calculado.

Revisada a bibliografia, vale a pena considerar alguns aspetos: existem poucos estudos que caracterizam o consumo de energia na indústria de laticínios de uma maneira geral e que apresentam em detalhe os consumos associados aos processos de produção dos mais variados produtos. Nos anos passados, até pelo menos 2015, houve mais estudos sobre este aspeto e essa necessidade foi levantada pelos autores na época. No entanto nos anos mais recentes quase que nenhum estudo foi feito, os estudos apresentados na presente revisão são referentes a dados maioritariamente dos anos de 2005 para trás, e não podem ser considerados representativos atualmente. Os produtos mais estudados foram o leite líquido para consumo e o queijo, portanto são necessários estudos que contemplem os outros produtos.

É verdade que a preocupação sobre o cumprimento das metas de sustentabilidade foi a principal motivação para a realização dos estudos que existem, não obstante a isso o conhecimento real sobre o consumo energético permitirá também que as indústrias melhorem a sua competitividade.

2. Processo de produção do iogurte

Esta seção tem como objetivo apresentar sucintamente o processo de produção do iogurte, desde a receção do leite cru na unidade industrial, até a saída do iogurte para os armazéns dos clientes, assim como apresentar a razão de cada processo. No tópico a seguir é dada uma especial atenção ao processo de pasteurização, pelo facto de este ser objeto de estudo no trabalho desenvolvido, apresentamos a evolução histórica do processo de pasteurização e o princípio de funcionamento dos permutadores de calor de placas, equipamento utilizado para a realização do processo.

2.1. Breve descrição do processo de produção do iogurte

Durante o processo de produção, a unidade industrial pode ser subdividida em quatro subsectores, cada um responsável por um conjunto de processos, descritos a seguir.

O leite cru chega às instalações em camiões refrigerados e é recebido no setor de receção do leite, onde é primeiramente arrefecido e conservado em silos até ser submetido ao primeiro tratamento de pré-pasteurização. Apesar do leite chegar à indústria a uma temperatura de 4 °C a 6 °C, este primeiro arrefecimento serve para eliminar qualquer ganho térmico devido o transporte do leite e garantir que todo o produto esteja refrigerado, pois pode-se dar o caso deste não ser imediatamente submetido ao processo de pré-pasteurização, ao chegar à unidade industrial. Desta forma a baixa temperatura impede crescimento das bactérias no leite, durante período de espera até a pré-pasteurização.

A seguir à refrigeração, o leite cru é submetido à uma pré-pasteurização, que consiste em aquecer o leite até uma temperatura de 75 °C durante 20 segundos, com o objetivo de eliminar os microrganismos e aumentar a vida útil do produto. Terminados os 20 segundos, o leite passa por um processo de centrifugação para separar o leite das natas e, em seguida, tanto as natas quanto o leite são novamente arrefecidos e armazenados – sendo este o último processo do setor de receção do leite.

Seguidamente o produto vai para o setor de normalização, onde são preparadas as receitas dos iogurtes a produzir. Depois do último processo na receção do leite, o produto é normalizado, ou seja, nesta etapa são acrescentados ao leite os ingredientes necessários para obter os iogurtes desejados; para cada tipo de iogurte são adicionadas quantidades específicas de açúcar, proteínas, natas e outros componentes, ao leite anteriormente desnatado. A seguir o preparado é novamente arrefecido, de maneira a retirar qualquer ganho térmico devido ao processo de mistura, e reservado.

A seguir à normalização o leite vai ao setor de processos, onde primeiro é submetido ao processo de pasteurização, que consiste em aquecer o leite até uma temperatura de 90 °C, à qual deve permanecer durante 8 minutos. Segue ao homogeneizador, onde é submetido a uma determinada pressão, para deixar o produto bem homogêneo.

Depois da homogeneização, o leite é novamente arrefecido até uma temperatura em torno de 42 °C ou 5 °C, dependendo do tipo de iogurte a produzir. Os iogurtes que são arrefecidos até 42°C – os iogurtes batidos e iogurtes líquidos – seguem para a etapa de inoculação (fermentação). Depois de colocado o fermento, o leite é armazenado nos reservatórios de fermentação até atingir o pH de corte. Uma vez atingido o pH de corte o leite é imediatamente arrefecido até uma temperatura em volta dos 22 °C, de maneira a interromper o processo de fermentação e segue para os depósitos de lançamento.

Os iogurtes gelificados, que são arrefecidos até 5°C depois da pasteurização, não seguem imediatamente para a inoculação; o leite recebe o fermento depois do processo de pasteurização, assim como os iogurtes batidos e os iogurtes líquidos, mas por estarem a uma temperatura de 4°C a 5°C não ocorre o processo de fermentação, são simplesmente armazenados com o fermento, e seguem igualmente para os depósitos de lançamento.

No setor de lançamentos, os iogurtes líquidos e batidos chegam dos depósitos e são colocados nos recipientes, dependendo do tipo de iogurte os aromas e os preparados de fruta são diretamente injetados na linha de enchimento, sendo misturados com o produto, em outros casos são colocados antes ou depois do produto. Depois de cheios, os iogurtes vão ao paletizador onde são agrupados, formam-se as paletes e estas são encaminhadas aos túneis de frio, onde sofrem novamente um processo de refrigeração, dos 22 °C – temperatura a que o produto se encontra quando chega aos depósitos de lançamento, depois da fermentação – aos 5 °C, temperatura de armazenamento. Dos túneis de frio as paletes vão para as câmaras de conservação e finalmente para os armazéns dos clientes.

A sequência para produzir os iogurtes gelificados é ligeiramente diferente dos iogurtes batidos e líquidos, nesta fase. Os iogurtes gelificados, armazenados com fermento, chegam à linha de enchimento e antes do enchimento são aquecidos para ativar o fermento, em seguida vão aos recipientes. Depois de cheios, os recipientes vão igualmente ao paletizador, onde são agrupados e formam-se as paletes; do paletizador seguem para a estufa de fermentação, onde permanecem durante aproximadamente 4 horas a 42 °C e dá-se então o processo de fermentação. Em seguida os iogurtes vão aos túneis de frio onde são arrefecidos até atingirem a temperatura de armazenamento, 5 °C a 6 °C. Dos túneis de frio seguem para as câmaras de conservação e depois para os armazéns dos clientes. A sequência do processo de produção é apresentada na Figura 1, e os processos que ocorrem em cada setor são apresentados nas Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5.

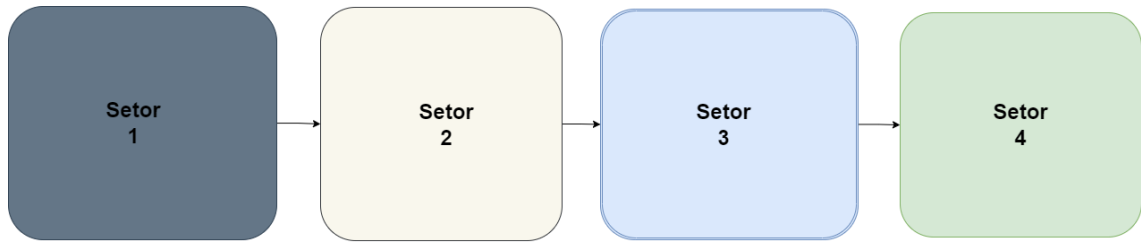


Figura 1 - Sequência do processo de produção de iogurte por setor

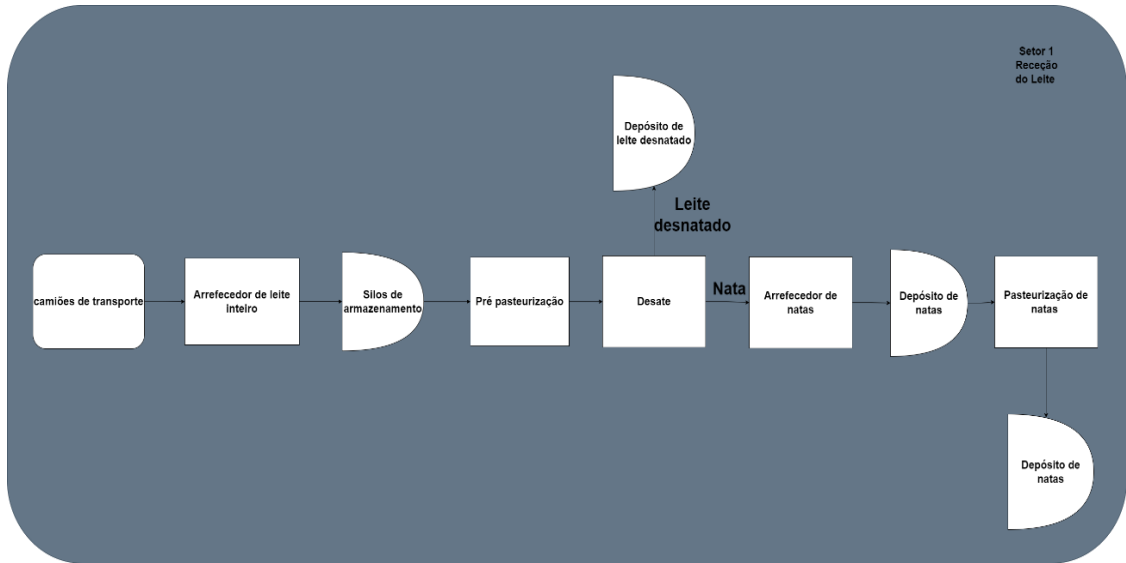


Figura 2 - Processos que ocorrem no setor de recepção de leite

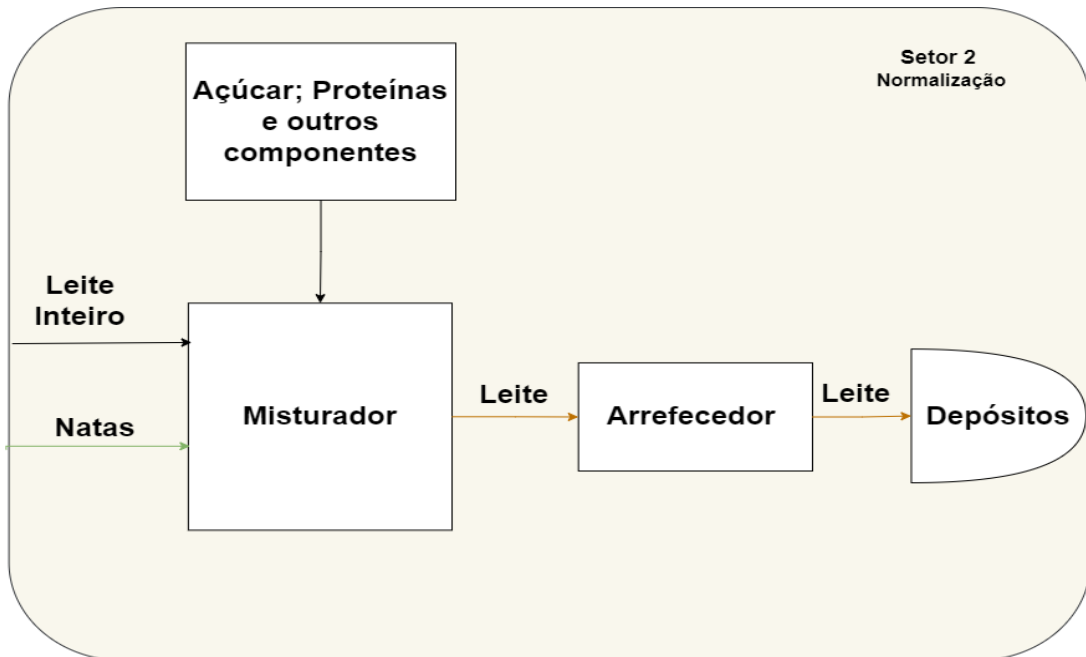


Figura 3 - Processos que ocorrem no setor de normalização

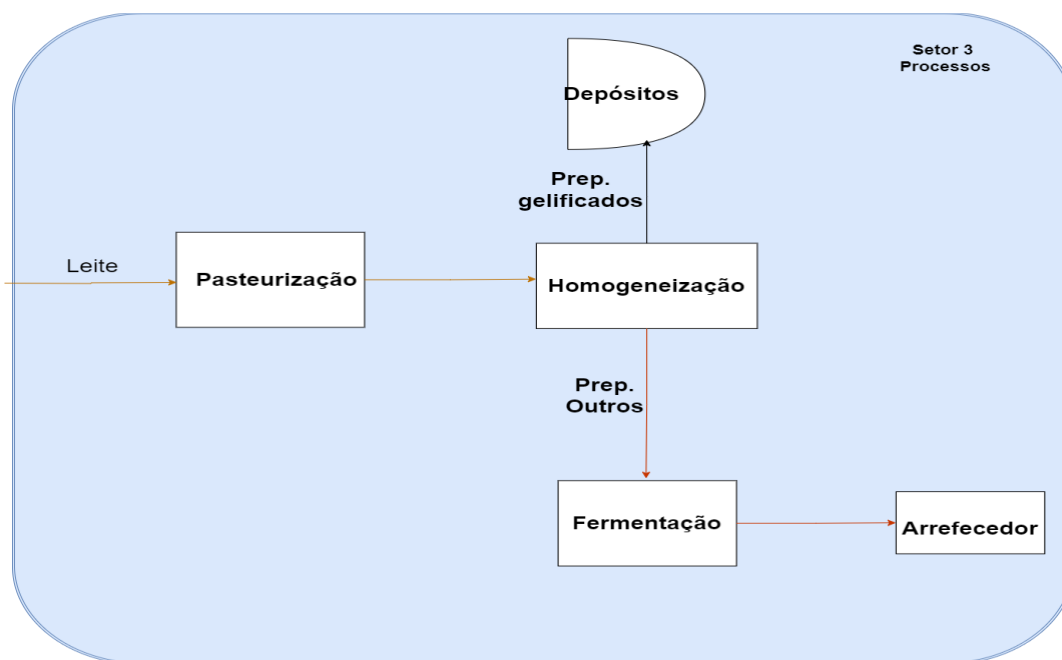


Figura 4 - Processos que ocorrem no setor de processos

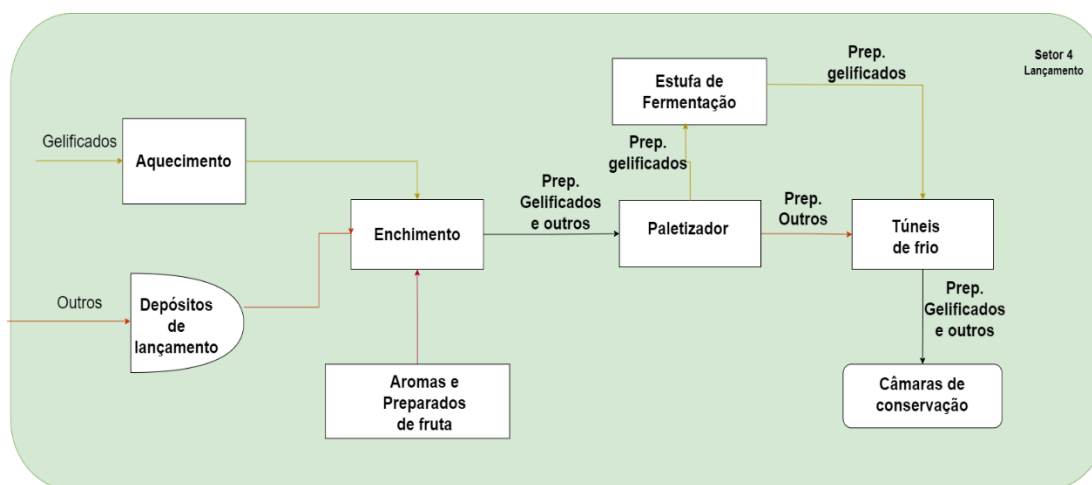


Figura 5 - Processos que ocorrem no setor de lançamentos

A maior parte dos processos requerem aquecimento ou refrigeração do leite, pelos motivos apresentados na introdução, que também serão reforçados na seção seguinte. Para os processos de refrigeração é utilizada energia elétrica, esta é usada para fazer funcionar os compressores e condensadores da central de frio. O calor de processo, para os processos de aquecimento, é proveniente da caldeira.

Entre todos os processos, o processo que mais requer energia – além dos processos de limpeza e esterilização, CIP e SIP, que não serão explorados no presente trabalho – é o processo da

pasteurização, pois é necessário elevar a temperatura do leite de 5 °C a 95 °C. No passado o processo já foi indicado como responsável por quase 50% do consumo total de energia [20], sendo igualmente um dos processos fundamentais durante a produção do iogurte.

2.2. O processo de pasteurização

A pasteurização é um processo fundamental na fabricação de todos os produtos láteos e não só, vários outros alimentos, como batidos de fruta, comercializados são submetidos ao processo de pasteurização. Esta seção é dedicada à evolução histórica do processo e sua importância, o que esteve na base do surgimento do processo, quais são os requisitos para as combinações de tempo e temperatura, equipamento utilizado e o princípio de funcionamento deste.

2.2.1. Breve história da pasteurização

Segundo a Associação Internacional de Laticínios, a pasteurização é o processo de aquecimento de cada partícula de leite ou produto láteo, em equipamento adequadamente projetado e operado, a temperaturas estabelecidas e mantido continuamente nesta temperatura ou acima dela por pelo menos o tempo especificado correspondente [37].

O nome pasteurização foi atribuído em homenagem ao cientista francês, Louis Pasteur, cujas descobertas demonstraram que a qualidade de conservação do vinho, durante o armazenamento, era melhorada se este fosse aquecido e rapidamente arrefecido, em 1864 [38]. Existem registros de que este método já havia sido sugerido antes de Pasteur; Willian Dewes recomendou aquecer o leite, em casa, antes de ser dado como alimento às crianças, cerca de 90 anos antes de Louis Pasteur; Dawes observou que se o leite fosse aquecido até a ebulição e rapidamente arrefecido, reduzia a tendência de deteriorar-se. Em 1853, Gail Borden, patenteou um sistema de aquecimento e condensação do leite a vácuo, seguido de adição de açúcar, para uma melhor conservação. Apesar destas descobertas, o elemento de destruição microbiana alcançado pela prática de aquecimento do leite, só foi reconhecido com os trabalhos de Pasteur [39].

As primeiras aplicações do tratamento térmico ao leite foram dirigidas ao leite consumido por bebês, essencialmente por questões de saúde pública: Vom Soxhlet desenhou um aparelho para a esterilização do leite para bebês em casa, que envolvia ferver o leite durante 40 minutos; Gerber e Wieske pasteurizaram o leite em garrafas a 65°C durante 1 hora; entre outros [38]. A implementação dos tratamentos térmicos no leite de vaca para consumo infantil, teve um efeito positivo na redução das taxas de mortalidade infantil. Esta notável melhoria fez com que alguns países começassem a adotar a pasteurização em escala comercial, já que até então as recomendações ou cuidados eram essencialmente voltados às casas, enquanto em outros países

ainda havia uma grande resistência à adoção em larga escala; alguns temiam que esta seria apenas uma medida paliativa no combate às doenças provocadas pelo consumo de leite cru e poderia deixar os fazendeiros descuidados quanto a rigorosidade necessária no saneamento das instalações de produção, bem como no cuidado a ter com as vacas leiteiras [39].

Em 1908, o serviço de saúde pública dos Estados Unidos da América publicou um estudo intitulado “O leite e sua relação com a saúde pública” (Milk and its Relation to the Public Health), que demonstrou que o consumo de leite cru era perigoso e causava, com frequência, muitas doenças a bebês. Neste documento constava a frase “A pasteurização previne doenças e salva muitas vidas”; a partir desta altura, várias instalações comerciais de processamento de leite foram construídas; a prática da pasteurização foi rapidamente disseminada; esforços foram feitos para a criação de um regulamento, combinações de tempo e temperatura foram estabelecidos e assim a pasteurização foi cada vez mais aceite na indústria [38].

2.2.2. Padronização e métodos de pasteurização

As combinações de tempo e temperatura propostas na época, foram realizadas com base no conhecimento que havia sobre os micro-organismos presentes no leite, prejudiciais à saúde, e a resistência que estes apresentavam ao calor. Alguns autores relataram que o principal agente causador de várias doenças e mais resistente ao calor, *Mycobacterium tuberculosis*, era morto se o leite fosse aquecido a 60°C durante 15 minutos; outros relataram que este era eliminado em 10 min, com os mesmos 60°C. Portanto, a recomendação era de que a pasteurização devia ser feita a 60°C, durante 20 minutos no mínimo, para assegurar uma destruição completa do patógeno, considerando as diferenças nos resultados obtidos [39].

O método de pasteurização mais comumente usado era o método de retenção, que consistia em encher grandes depósitos com o produto, aquecer o produto, manter o produto a temperatura de pasteurização durante o tempo determinado, a seguir arrefecer e esvaziar os recipientes. Este método não permitia grandes volumes de produto simultaneamente, era mais difícil controlar rigorosamente o processo e consumia muita energia. Com o desenvolvimento da ciência surgiram os permutadores de calor e com estes surgiu um novo método de pasteurização, o HTST (High Temperature Short Time). Este método é o mais comum nas indústrias atualmente, permite processar grandes quantidades de produto continuamente, permite um reaproveitamento de calor e, conseqüentemente, permite a economia de energia durante o processo [38].

Com o surgimento do método HTST e novas descobertas sobre a microbiologia do leite, houve a necessidade de reajustar os padrões estabelecidos para a pasteurização; anteriormente tinha sido estabelecido 60°C durante 20 min, que funcionava no método de retenção, agora era necessário estabelecer tempos para temperaturas mais elevadas, o que seria mais adequado para o método HTST. Outro aspeto foi o facto de o foco ter mudado, anteriormente o foco era a destruição do *M. Bacterium*, depois outros patógenos entraram na lista e estes eram um pouco mais resistentes ao

calor que o *M. Bacterium*. Atualmente os padrões estabelecidos para o tratamento térmico do leite são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Padrão para a pasteurização do leite [37]

Temperatura	Tempo
63 °C	30 min
72 °C	15 segundos
89 °C	1 segundo
90 °C	0,5 segundos
94 °C	0,1 segundos
96 °C	0,05 segundos
100 °C	0,01 segundos
138 °C	2,0 segundos

Na produção do iogurte não se verificam as combinações de tempo e temperatura descritos na Tabela 1, os tratamentos térmicos mais comuns na produção do iogurte são a pré-pasteurização (75 °C durante 15 segundos) e a pasteurização em alta temperatura (geralmente 85 °C durante 20 a 30 min, ou 90 a 95 °C durante 5 min) [40]. Atualmente, com o avanço da ciência, os efeitos da temperatura sobre leite são conhecidos e vão além da eliminação microbiana. Nos processos de baixa temperatura – 63 °C a 65 °C durante 30 minutos, ou 72 °C a 75 °C durante 15 a 20 segundos – a maior parte dos patógenos são eliminados e o sabor do produto permanece inalterado; nos processos de alta temperatura, a partir de 85 °C, além da eliminação microbiana, o efeito sobre as enzimas e proteínas provocam reações que têm impacto no sabor, um sabor de “cozido” é desenvolvido, e na formação da coalhada do iogurte, durante o processo de fermentação [40]. Por essa razão a combinação de temperatura e tempo na pasteurização durante a produção do iogurte é mais elevada. No caso de estudo que será apresentado, a pasteurização ocorre a 95 °C durante 8 minutos.

2.2.3. Equipamento utilizado

Nos processos de pasteurização contínuos, HTST, o pasteurizador é um permutador de calor de placas, que possui várias fases ou andares de transferência, nos quais se podem criar vários circuitos para circulação de diferentes fluidos de transferência de calor. Os permutadores de calor de placas são usados desde a década de 1920. Estes consistem num conjunto de chapas, paralelas – geralmente metálicas, mas dependendo da aplicação podem ser feitas de ligas metálicas ou até mesmo polímeros – compactadas, pressionadas junto de uma estrutura metálica.

Algumas particularidades podem diferir num caso e noutro, mas o princípio de funcionamento dos permutadores de calor de placas é o mesmo. Dois fluídos de transferência de calor são postos a circular no permutador, portanto os permutadores têm de ter canais de entrada e saída para cada um dos fluídos. Os fluídos escoam no espaço entre duas placas adjacentes, as configurações das placas e elementos como as juntas de borracha, fazem com que os fluídos quente e frio circulem por canais alternados e não se misturem. O fluído quente entra no permutador pelo canal de entrada do fluído quente, as juntas das placas direcionam o movimento deste entre um par de placas e impedem-no de fluir para o par de placas a seguir, indo apenas para o segundo par de placas; assim sucessivamente até percorrer por todas as placas destinadas ao processo e sair do permutador pelo canal de saída do fluído quente. O mesmo ocorre com o fluído frio, entra e sai pelos canais de entrada e saída do fluído frio, as juntas presentes nas placas direcionam o movimento do fluído pelos pares de placas corretos. Os fluídos circulam sempre em pares de placas alternados, deste modo um lado da placa fica em contacto com o fluído frio e outro lado com o fluído quente [41]. A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e a Figura 7 apresentam o conjunto de partes que constitui um permutador de calor de placas genérico e a circulação dos fluídos, respetivamente.

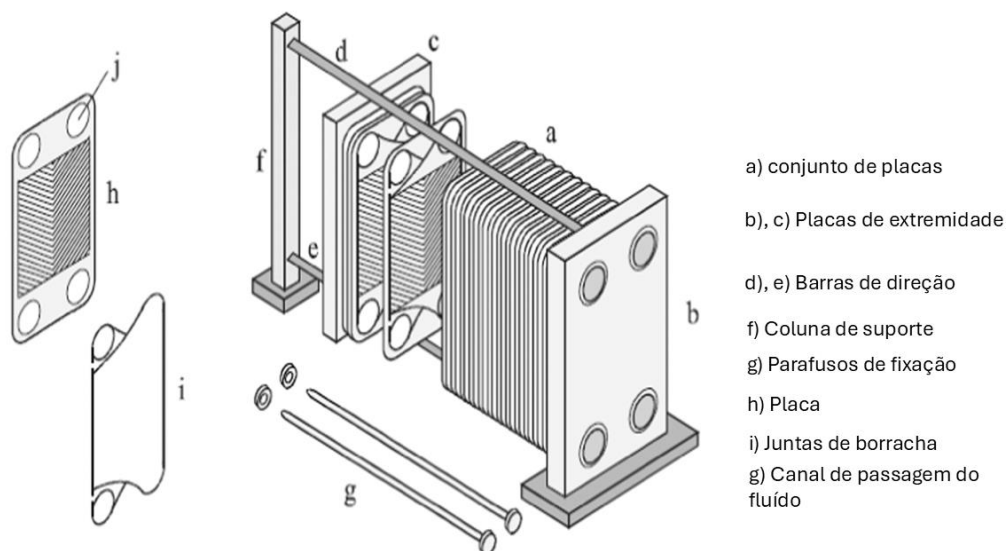


Figura 6 - Permutador de calor de placas planas [42]

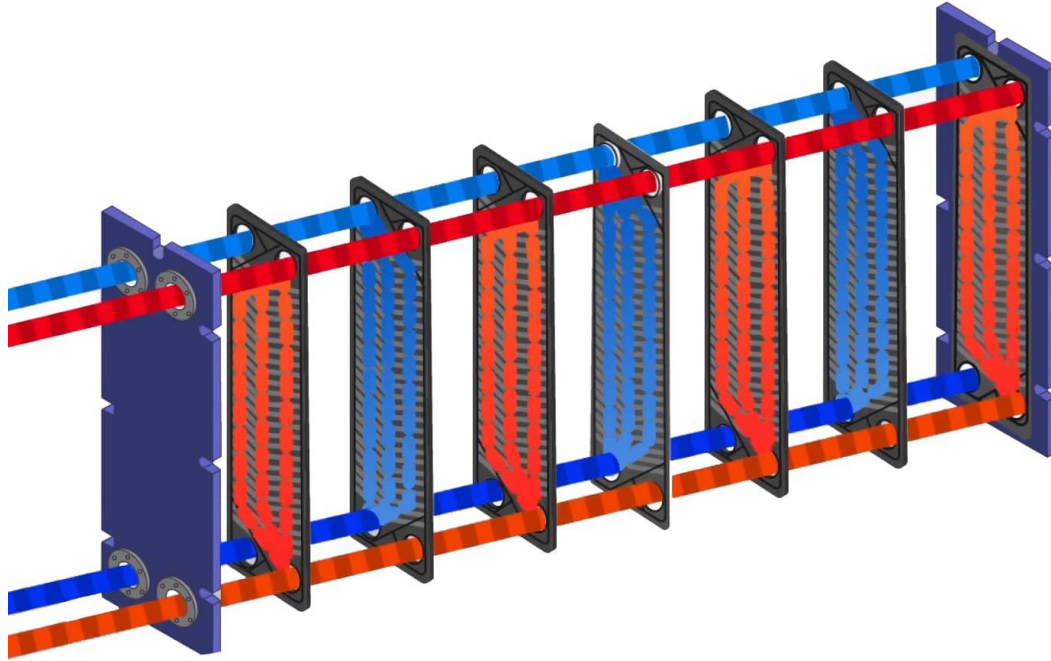


Figura 7 – Sentido da circulação dos fluidos no permutador [43]

A transferência de calor é feita do fluido quente para a placa e depois da placa para o fluido frio; as placas das extremidades geralmente não são usadas por estarem em contacto com a estrutura do permutador, ou seja, os fluidos não circulam na primeira e na última placa, a estrutura destas é feita para que assim suceda. As placas são muito finas, têm entre 0,3 mm a 1 mm de espessura; a folga entre duas placas adjacentes pode ser de 1 mm a 5 mm; têm uma grande área de transferência de calor; o material geralmente tem uma alta condutibilidade térmica e as superfícies não são lisas, geralmente apresentam ondulações que promovem um fluxo turbulento, aumentam a taxa de transferência de calor e reduzem os problemas da incrustação nas paredes, Figura 8, [42]. O fluxo no permutador pode ser paralelo, contracorrente ou cruzado, porém o mais comum é o fluxo contracorrente por ser mais eficiente. Os permutadores de placas permitem ainda adicionar etapas de regeneração de calor, ou seja, numa mesma estrutura podem ser adicionados vários conjuntos de placas, como se fossem vários permutadores ligados, com várias secções de transferência de calor, ver Figura 9. Estas secções de transferência de calor, separadas entre si, permitem com que haja reaproveitamento de calor. Nos processos industriais de leite, os permutadores podem ter até 5 secções de transferência de calor [44].



Figura 8 - Placa de um permutador de calor de placas [45]

3. Caso de estudo

Este capítulo é dedicado ao estudo detalhado do processo de pasteurização do iogurte na unidade industrial, como ocorre o processo de aquecer o leite de 5 °C à 95 °C, todas as fases de aquecimento, porque este aquecimento ocorre por fases, e os equipamentos que intervêm no processo, além do pasteurizador. Tudo isso com o objetivo de quantificar o consumo de energia térmica num processo de pasteurização real.

O estudo foi realizado em quatro processos de pasteurização, para 4 tipos de iogurtes, e os dados apresentados correspondem aos dados obtidos durante os processos descritos.

Antes de passar para a descrição do sistema e dos processos, convém esclarecer algumas terminologias relacionadas ao processo: *Holder*: O “holder” é o circuito de retenção. Um circuito em forma de serpentina, que dura exatamente 8 min a ser percorrido. Para garantir a pasteurização do leite é necessário que o leite permaneça a 95 °C durante 8 min; por se tratar de escoamento de fluidos, o holder serve justamente para garantir que o leite está a 95 °C durante 8 min. Tendo em conta o caudal que circula e o diâmetro das condutas, foi dimensionado um comprimento que dure um determinado tempo a ser percorrido, no caso o tempo necessário para

pasteurização. Assim sendo, depois de atingir 95 °C o leite percorre o holder e no final dele, se permanecer a 95 °C, o leite está pasteurizado.

Água termizada: a água termizada é a água quente reaproveitada depois de transferir calor ao leite. Na Figura 10 é possível observar que depois do primeiro processo de transferência de calor, a água quente é novamente bombeada para a segunda seção do pasteurizador onde aquece o leite que circula nesta seção e só depois volta ao permutador tubular onde é aquecida novamente com o vapor. O circuito da água quente é um circuito fechado.

3.1. Descrição do sistema

Durante o processo de produção do iogurte, o leite é submetido a vários processos de aquecimento e refrigeração, como exposto anteriormente. Durante a pasteurização o leite é aquecido até uma temperatura de 95 °C, devendo este permanecer a 95 °C durante 8 minutos. O leite chega ao pasteurizador a uma temperatura inferior a 6 °C, temperatura de armazenamento, é aquecido até atingir 95 °C, percorre o holder de 8 minutos, em seguida vai ao homogeneizador. Depois da homogeneização o leite volta ao pasteurizador onde é novamente arrefecido até uma temperatura determinada para o tipo de iogurte a preparar – 38 °C para os iogurtes não gelificados, e 5 °C para os gelificados – em seguida sai do pasteurizador e segue para a etapa da inoculação ou armazenamento. Uma imagem do pasteurizador e respectivas seções, bem como o circuito de pasteurização, podem ser vistas na Figura 9 e Figura 10, respetivamente.

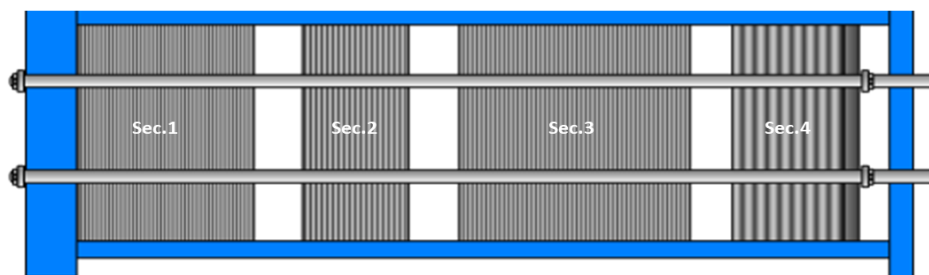


Figura 9 - Corte transversal do pasteurizador (adaptado do digrama do fabricante)

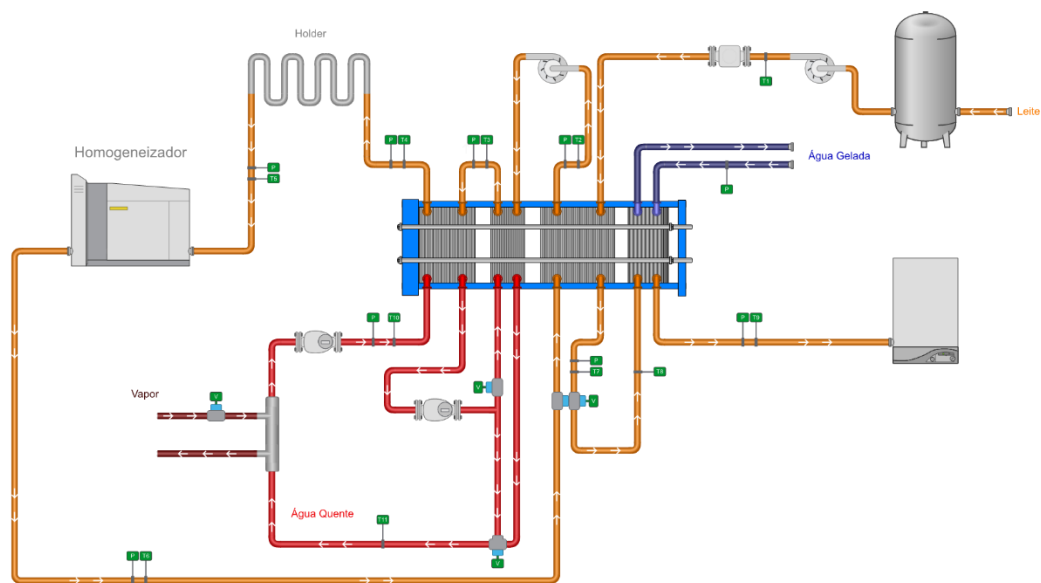


Figura 10 - Circuito de pasteurização (adaptado do diagrama da instalação)

Para uma melhor compreensão das temperaturas registadas em cada ponto, o pasteurizador foi dividido em duas partes. A primeira vai desde a entrada do leite no pasteurizador, vindo dos depósitos de armazenamento da normalização, até na saída do homogeneizador; a segunda parte começa imediatamente depois da homogeneização, quando o leite retorna ao pasteurizador para começar o processo de arrefecimento. Os sensores de temperatura presentes nos diferentes pontos do circuito, bem como os respetivos set-points, são identificados na

Tabela 2.

Tabela 2 - Sensores de temperatura ao longo do percurso

Temperaturas		
Código	Descrição	Set point
T1	Temperatura do leite na entrada do pasteurizador	4 °C – 6 °C
T2	Temperatura do leite na primeira saída do pasteurizador	-
T3	Temperatura do leite na segunda saída do pasteurizador	-
T4	Temperatura do leite na terceira saída do pasteurizador (depois de aquecido com água quente)	95 °C
T5	Temperatura do leite depois do “holder”	95 °C
T6	Temperatura do leite na primeira entrada do pasteurizador (2ª parte – retorno ao pasteurizador)	-

T7	Temperatura do leite na primeira saída do pasteurizador (2 ^a parte – retorno ao pasteurizador)	12 °C – 5 °C
T8	Temperatura do leite na segunda entrada (2 ^a parte – retorno ao pasteurizador)	12 °C – 38 °C
T9	Temperatura do leite na saída do pasteurizador	5 °C – 38 °C
T10	Temperatura da água quente na entrada do pasteurizador	96 °C
T11	Temperatura da água quente na entrada do permutador tubular	-

O circuito do leite no pasteurizador é apresentado na Figura 10; o leite chega ao pasteurizador a uma temperatura inferior a 6 °C, é aquecido com o leite quente já pasteurizado até uma temperatura em torno de 60 °C; seguidamente volta a ser aquecido com água termizada até uma temperatura em torno de 75 °C e só depois é aquecido com água quente até a temperatura de pasteurização, 95 °C. A seguir o leite vai ao holder, depois ao homogeneizador e volta ao pasteurizador para ser arrefecido. Nessa segunda fase, o produto já pasteurizado é inicialmente arrefecido com o leite frio à entrada do pasteurizador. O leite já pasteurizado é arrefecido até 6 °C, antes de terminar o processo é misturado com leite quente, com o auxílio de uma válvula bypass cuja percentagem de abertura é regulada de maneira a obter-se 38 °C no final do processo. As características do pasteurizador são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do pasteurizador

Capacidade	10000 L/H de leite
Temperatura de funcionamento	0°C – 95°C
Material das placas	aço AISI 316
Espessura das placas	0,7 mm
Número total de placas	258 placas (sec.1 – 49; sec.2 – 15; sec.3 – 169; sec.4 – 25)
Diâmetro das condutas do leite	63 cm
Diâmetro do “holder”	76 cm

Os dados apresentados, foram recolhidos durante os processos de pasteurização na unidade de produção, nos dias 30 e 31 de maio do ano de 2023. Todas as pasteurizações realizadas durante estes dias são apresentadas na Tabela 4, assim como os iogurtes produzidos e a duração de cada processo.

Tabela 4 - Pasteurizações realizadas nos dias 20 e 31 de maio de 2023

Tipo de Iogurte	Hora de Início	Hora de término
30 de maio de 2023		
Iogurte batido	11:50	13:55
Iogurte líquido	14:00	16:00
Iogurte líquido	16:45	18:03
Iogurte líquido	18:06	19:25
Iogurte batido	20:36	22:45
Iogurte líquido	23:20	01:40 (31/05/2023)
31 de maio de 2023		
Iogurte gelificado	04:26	06:45
Iogurte batido	06:59	08:10
Iogurte batido	08:46	10:05
Iogurte líquido	10:07	12:10
Iogurte gelificado	13:00	15:15
Iogurte líquido	15:43	17:05
Iogurte batido	17:08	18:43

3.2. Descrição dos processos

Apesar de termos apresentado na Tabela 4 todos os processos realizados nos dias 30 e 31, a análise será feita apenas em quatro processos. A Tabela 4 foi colocada para, no final da avaliação energética, termos uma noção de quantos processos no geral são realizados por dia.

Foram selecionados um iogurte batido e um iogurte líquido em cada dia, os quais estão identificados como conforme a

Tabela 5. Os valores de temperatura, caudal e pressão correspondem à média dos valores medidos durante os processos.

Tabela 5 – Processos de pasteurização estudados

<i>Designação</i>	<i>Tipo de iogurte</i>	<i>Data de realização</i>	<i>Hora de início</i>	<i>Hora de término</i>
Iogurte tipo I	Batido	30 de maio	11:50	13:55
Iogurte tipo II	Batido	31 de maio	17:08	18:43
Iogurte tipo III	Líquido	30 de maio	14:00	16:00

Iogurte tipo	Líquido	31 de maio	10:07	12:10
IV				

Existem três fases de aquecimento do leite durante a pasteurização, nas duas primeiras fases há uma troca térmica entre o leite frio à entrada ($T_1=6\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o leite já pasteurizado depois do homogeneizador ($T_6 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Apesar da temperatura de pasteurização ser de $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_5), há um aumento da temperatura do produto na saída do homogeneizador, que pode ser dado por causa da pressão e movimento a que o leite é submetido durante a homogeneização, já que não há no percurso entre as temperaturas T_5 e T_6 , nenhuma outra fonte de calor externa. A transferência de calor entre o leite à entrada (T_1) e o leite no final da pasteurização dá-se na secção 3 do pasteurizador, o leite quente circula de um lado das placas e o leite frio circula do outro lado, dessa transferência resulta um aumento na temperatura inicial do leite frio de mais de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_2), enquanto, no leite anteriormente a 100°C , ocorre uma diminuição de mais de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_7). Esta é a primeira fase de aquecimento no pasteurizador. Na segunda fase, o leite, a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, segue para a segunda secção do pasteurizador, onde ocorre mais uma transferência de calor entre o leite e a água termizada, que permite elevar a temperatura do leite de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_3). Depois das duas fases de aquecimento é que efetivamente o leite é aquecido com água quente, na secção 1 do pasteurizador, de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingir $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_4). Durante todo o processo, apenas nesta fase existe consumo de energia, contida no vapor proveniente da caldeira. A evolução da temperatura do produto ao longo do processo é apresentada na Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Figura 14, para os diferentes tipos de produto estudados.

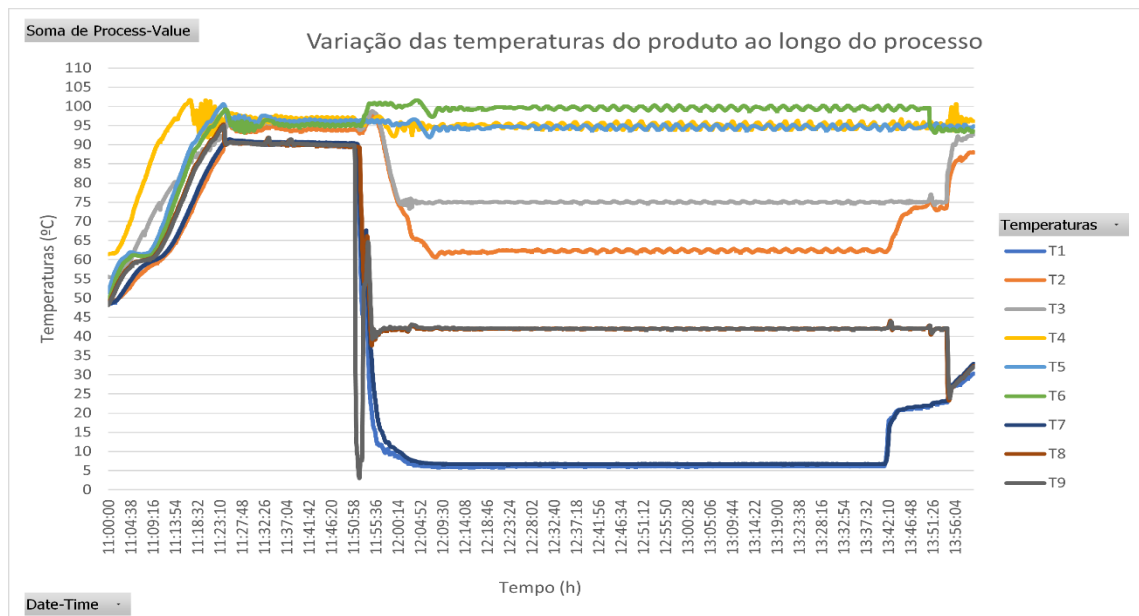


Figura 11 – Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo I)

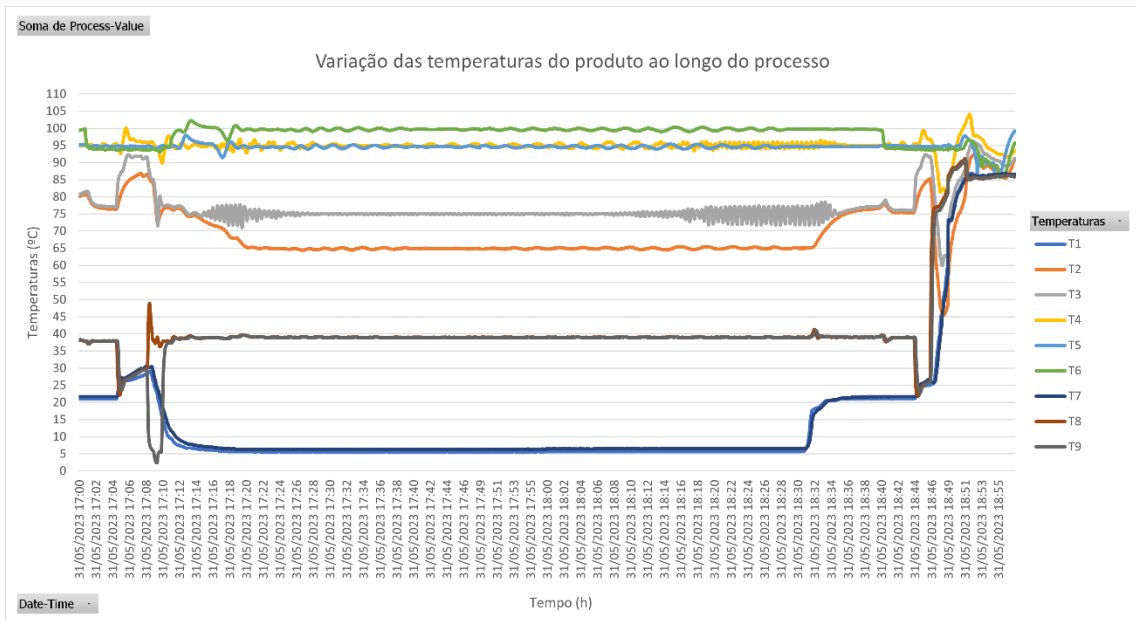


Figura 12 – Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo II)

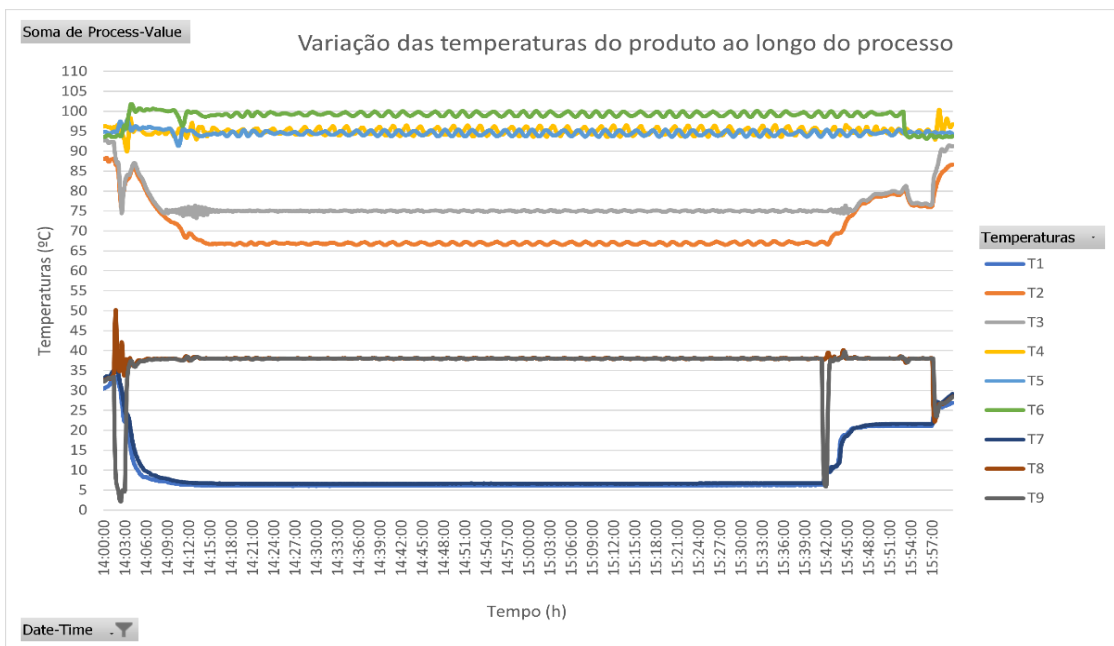


Figura 13 - Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo III)

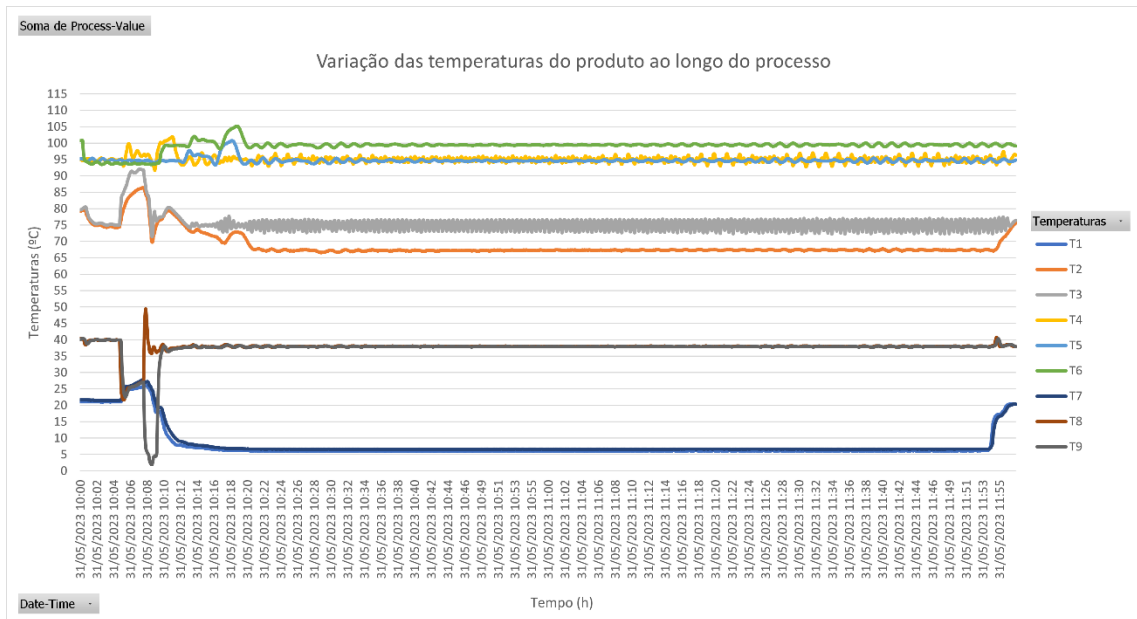


Figura 14 – Comportamento da temperatura do leite durante o processo (Iogurte tipo IV)

Os caudais dos produtos ao longo do processo, variaram conforme a Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18.

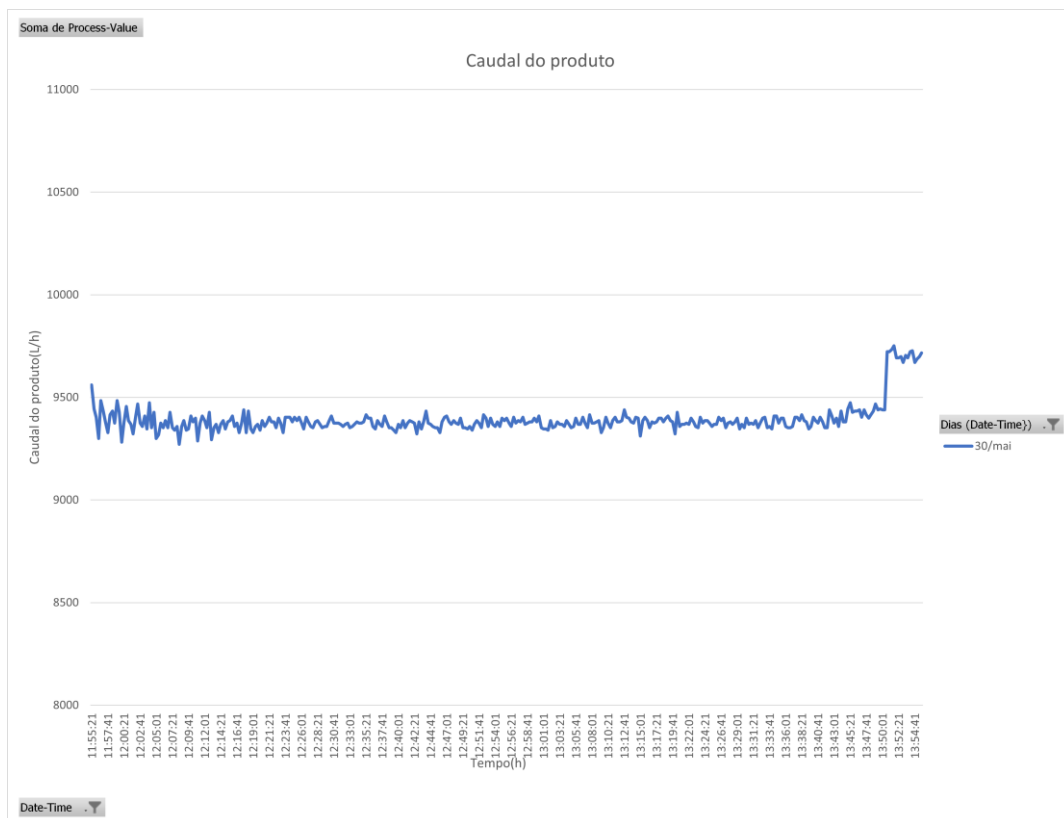


Figura 15 - Caudal do produto (Iogurte tipo I)

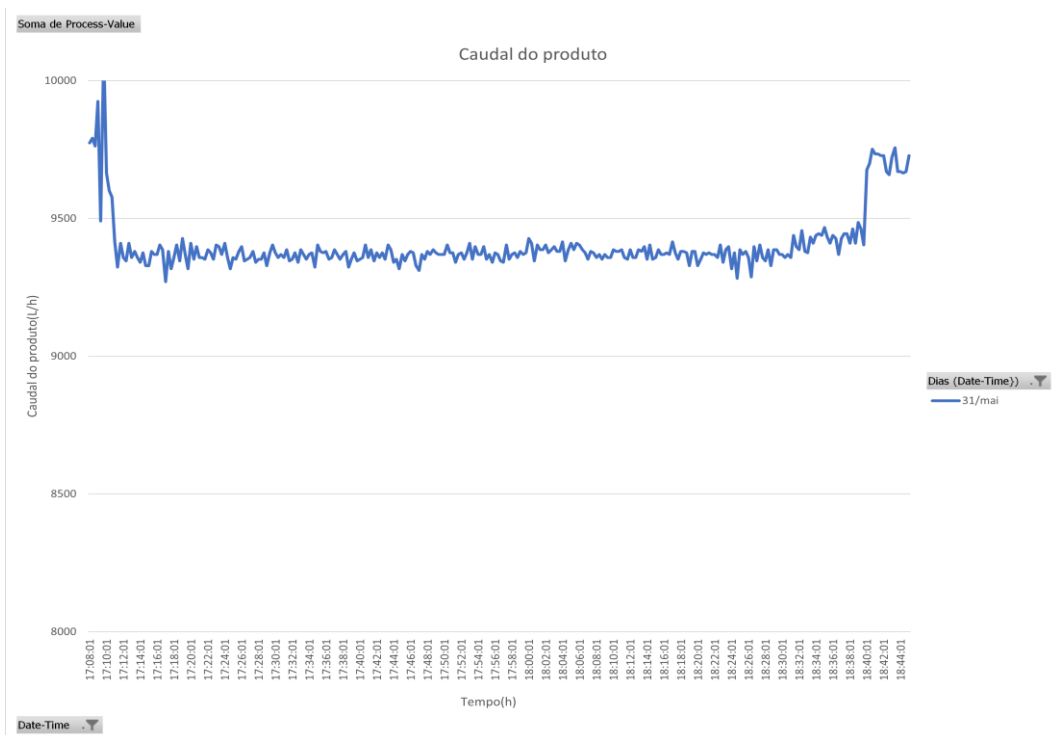


Figura 16 - Caudal do produto (Iogurte tipo II)



Figura 17 - caudal do produto (Iogurte tipo III)

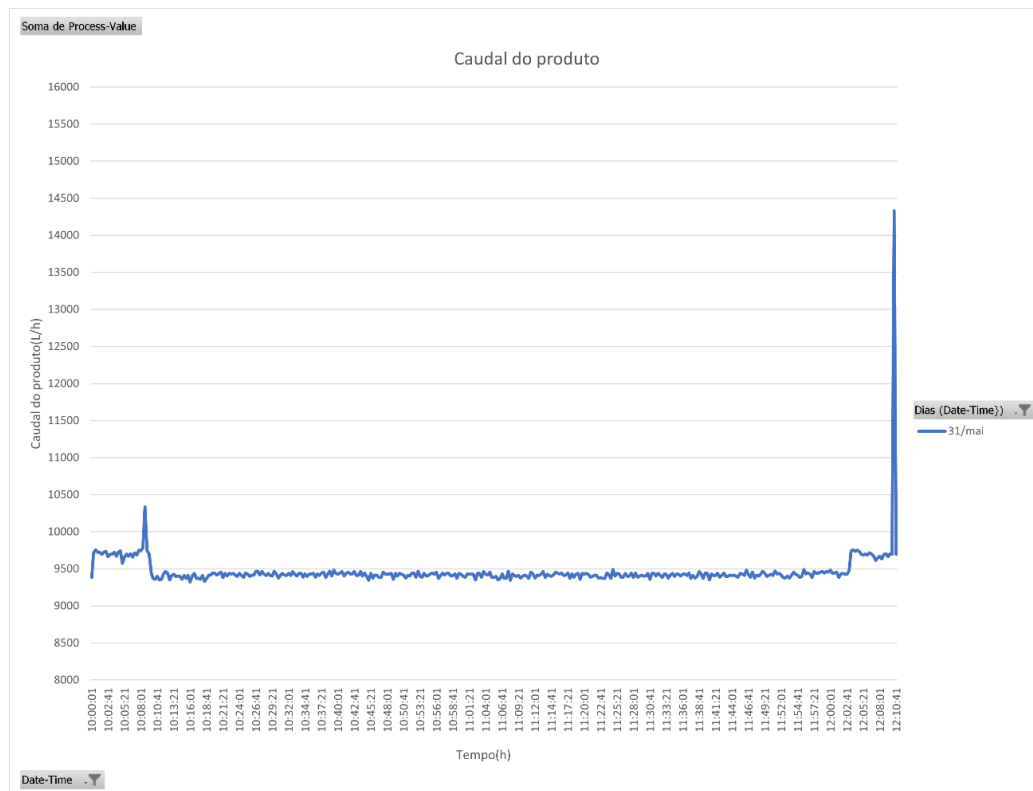


Figura 18 - Caudal do produto (Iogurte tipo IV)

Os gráficos de temperatura e caudal, durante o processo, para todos os produtos estudados seguem o mesmo padrão e andam em torno dos mesmos valores. Nota-se, antes ou depois do processo, uma variação muitas vezes brusca nos valores das propriedades, isto ocorre por dois motivos: preparação do sistema ou “empurro”. Tanto um quanto outro processo consistem em fazer circular água quente no sistema, sendo o processo de preparação mais longo relativamente ao de empurro. O processo de preparação é facilmente identificado no gráfico da variação das temperaturas do iogurte tipo I, Figura 11, no qual antes do processo de pasteurização os valores de todas as temperaturas aumentam até atingirem 90 °C e permanecem assim durante 30 min. Este é um tempo obrigatório para a preparação do sistema, e tem como objetivo aquecer todo o sistema, deixando-o preparado antes do início do processo de pasteurização. O processo de empurro é mais curto, geralmente é feito no final de cada processo, para tirar os resquícios de produto da pasteurização anterior e começar a pasteurizar outro produto.

Por causa do prévio aquecimento, no início do processo de pasteurização é necessário fazer circular água gelada através da secção 4 do pasteurizador para baixar um pouco a temperatura. A presença da água fria no sistema durante algum tempo pode ser observada nos gráficos da pressão da água gelada (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22) há um pico na pressão durante um curto intervalo de tempo antes do início da pasteurização.

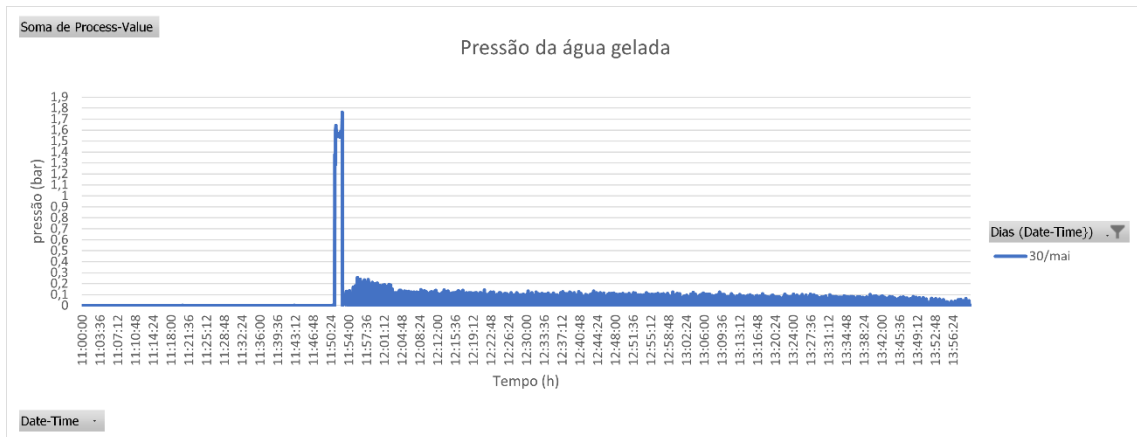


Figura 19 - Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo I)

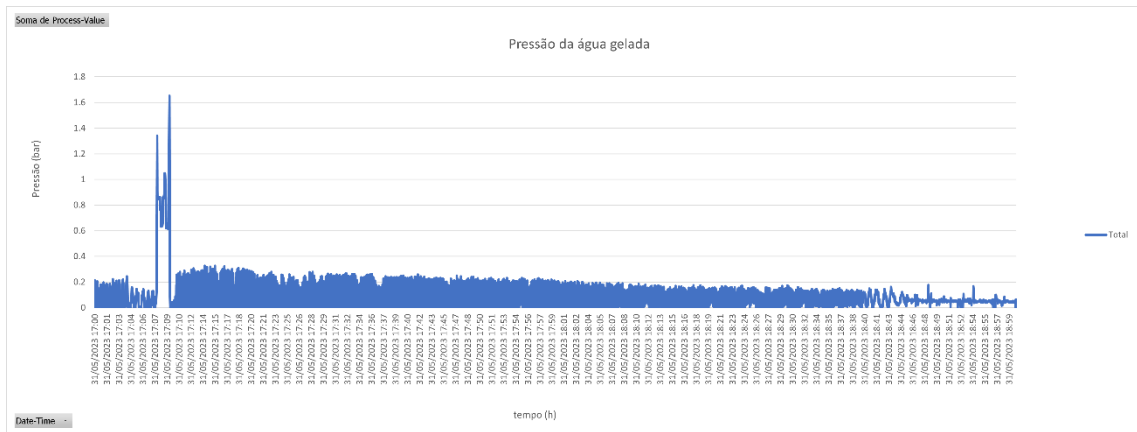


Figura 20 - Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo II)

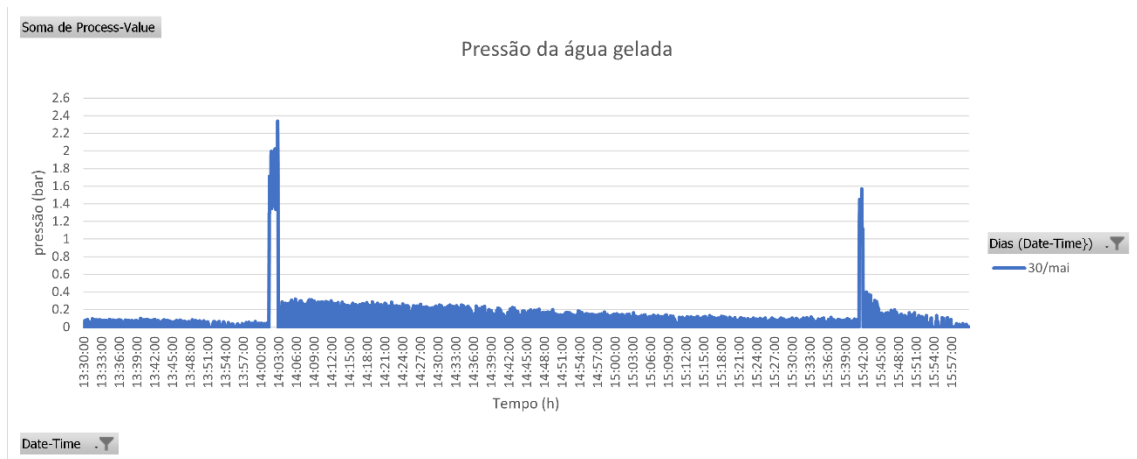


Figura 21 - Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo III)



Figura 22 – Variação da pressão da água gelada ao longo do processo (Iogurte tipo IV)

A temperatura da água quente, à entrada e saída do permutador tubular, onde ocorrem as trocas térmicas entre o vapor vindo da caldeira e a água que passa pelo pasteurizador ao longo do tempo de pasteurização, variou conforme os gráficos das figuras Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26.

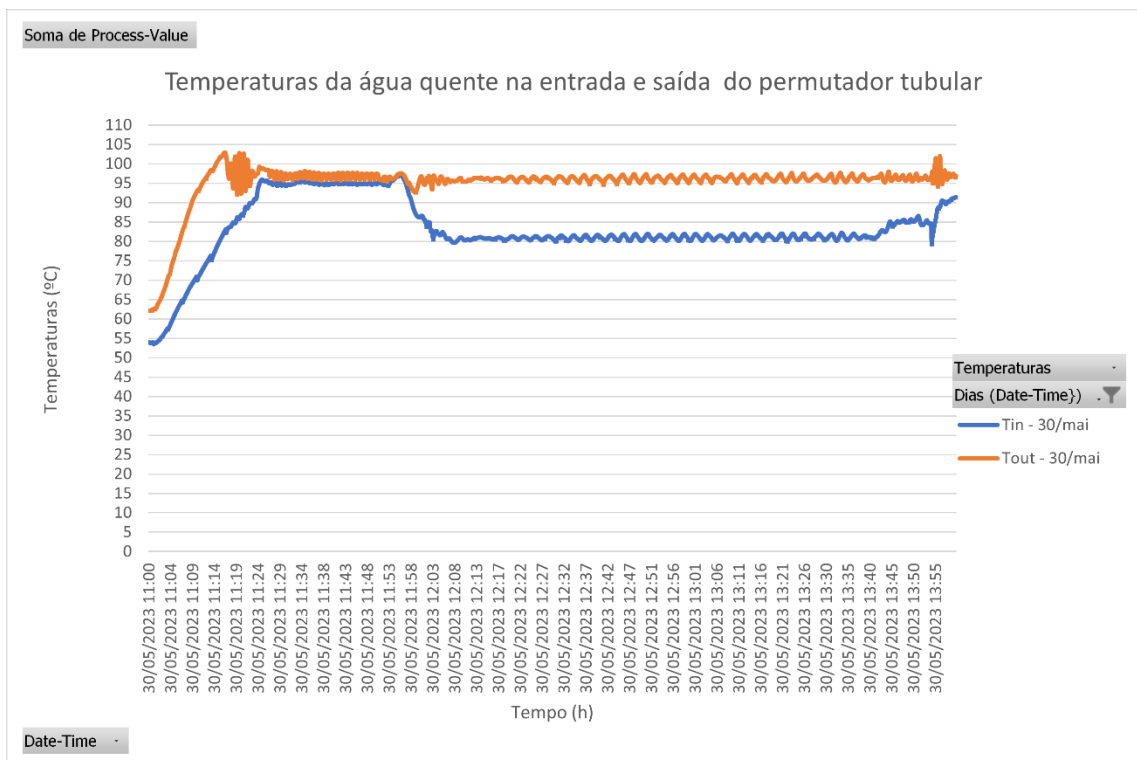


Figura 23 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo I)

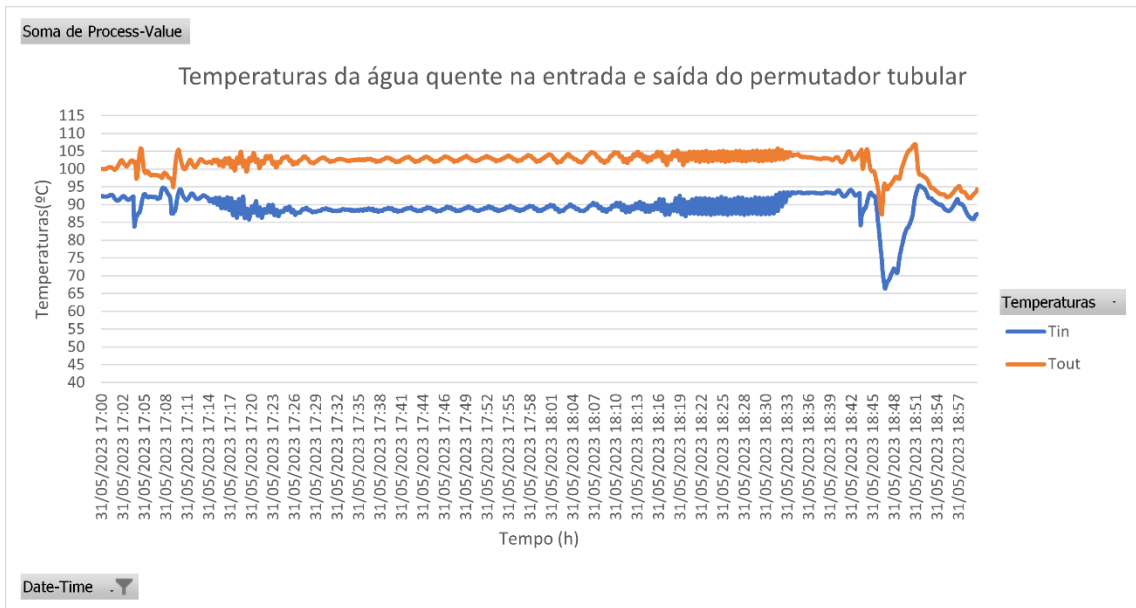


Figura 24 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo II)

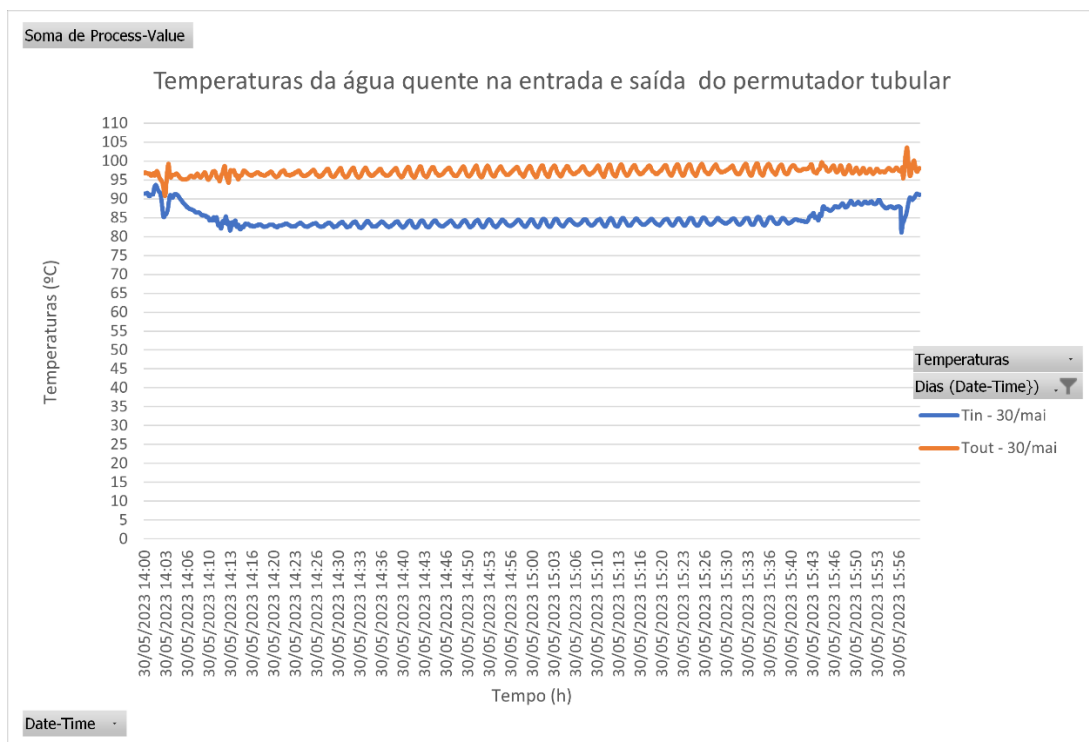


Figura 25 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (Iogurte tipo III)

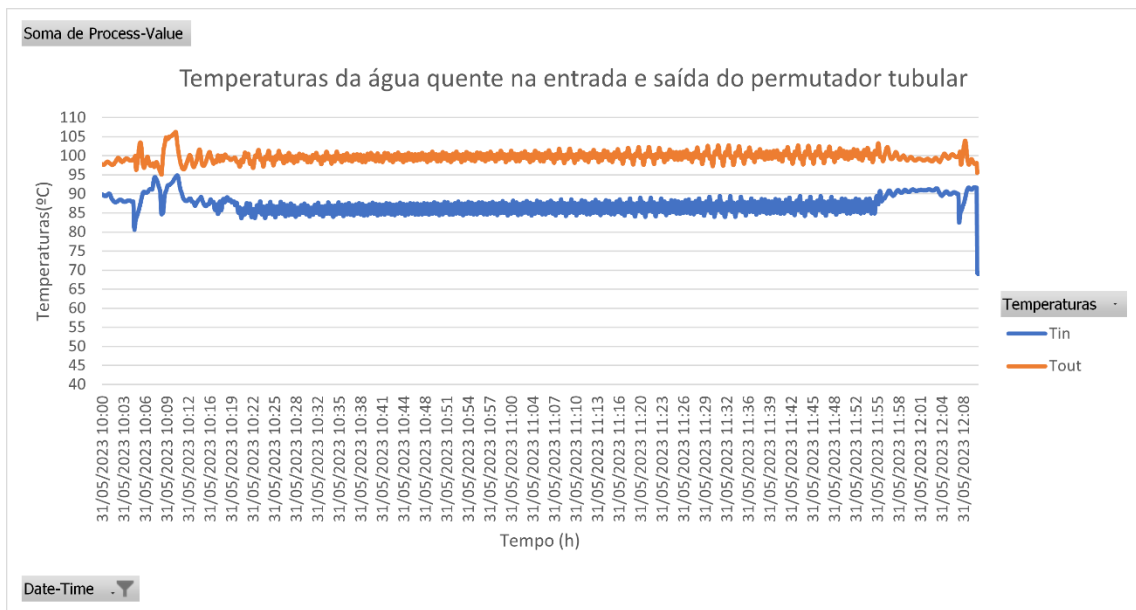


Figura 26 - Variação das temperaturas da água quente na entrada e saída do permutador tubular (iogurte tipo I)

Como mencionado anteriormente, antes e depois da pasteurização é necessário fazer circular água quente em todo o sistema, nos processos de preparação e empurro. Durante estes processos existe maior consumo de vapor que depois reduz e estabiliza durante o processo de pasteurização. A quantidade de vapor é controlada pela abertura da válvula de vapor, que abre e fecha conforme as necessidades de vapor no momento. O comportamento da válvula de vapor ao longo do tempo, é apresentada na Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30. Nas Figura 27 e Figura 28 existe um curto intervalo em que a válvula de vapor esteve 100% aberta, porém durante o tempo de pasteurização houve uma quantidade quase constante de vapor consumido para elevar a temperatura da água quente de 80 a 95 °C.

Vale ressaltar, que a preparação só é feita depois de uma paragem durante um tempo considerável do pasteurizador, já o empurro é feito entre dois processos de pasteurização. A preparação exige maior consumo de vapor, por essa razão vemos a válvula 100% aberta durante mais tempo na Figura 27, antes do início do processo da pasteurização, o que não acontece com as outras figuras, onde os picos de abertura da válvula de vapor devem-se ao processo de empurro, por essa razão são picos de curta duração ou com uma percentagem de abertura inferior a 100%.

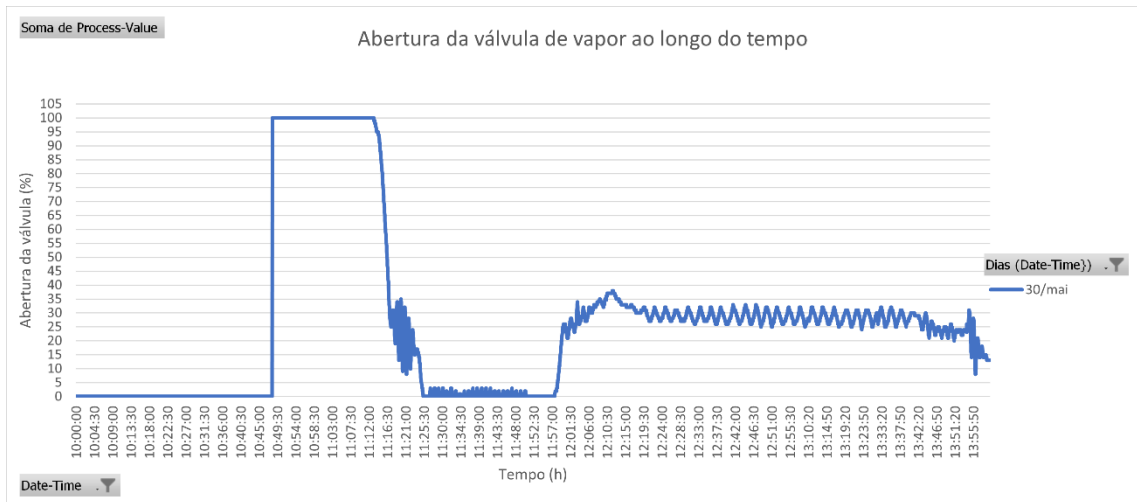


Figura 27 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo I)



Figura 28 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo II)

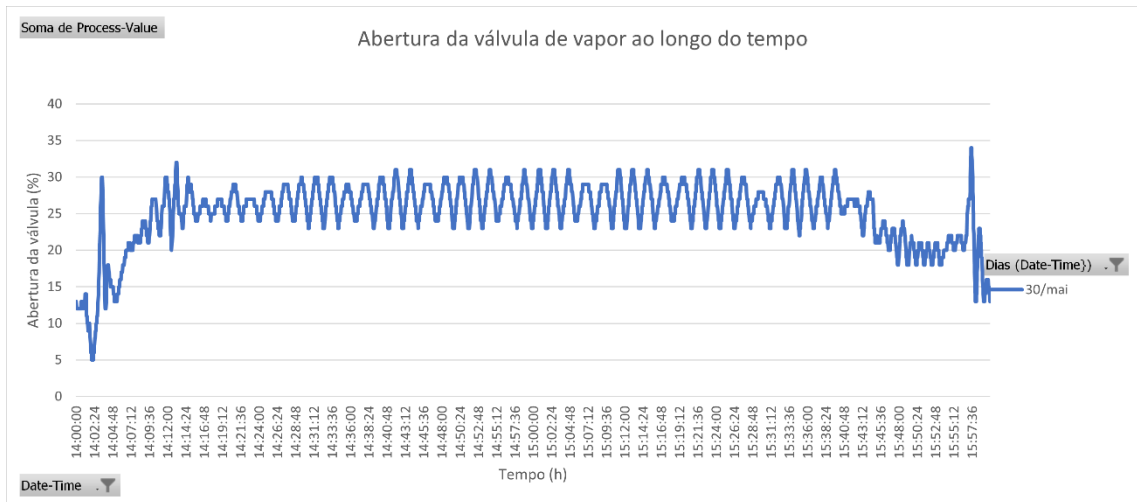


Figura 29 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo III)



Figura 30 - Variação da abertura da válvula de vapor ao longo do tempo (Iogurte tipo IV)

O leite pasteurizado depois do homogeneizador volta ao pasteurizador a 100°C (T6) e aquece o leite à entrada do pasteurizador, passando de 100°C à 6°C (T7); no entanto o set point dos iogurtes batido e líquido no final da pasteurização é de 38°C à 42°C, pelo que antes de finalizado o processo há uma mistura de leite quente com o leite frio; ou seja, só uma parte do leite a 100°C é usado para aquecer o leite à entrada, outra parte é misturado com o leite arrefecido de maneira a elevar a temperatura de 6°C à 38°C, T8 e T9. Esta mistura ocorre com o auxílio de uma válvula Bypass, cuja abertura define os caudais, quente e frio, de leite a misturar. Este arranjo, faz com que não seja necessário utilizar água gelada para arrefecer o leite, no final do processo de pasteurização de iogurtes batidos e iogurtes líquidos.

As figuras 31, 32, 33 e 34, mostram o comportamento da válvula Bypass ao longo do processo; para elevar a temperatura de 6 °C à 42 °C foi misturado uma pequena quantidade do leite quente vindo do homogeneizador ao leite frio. Para todos os processos estudados, a válvula permanece aproximadamente 20% aberta ao longo do processo de pasteurização.



Figura 31 - Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo I)



Figura 32 – Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo II)

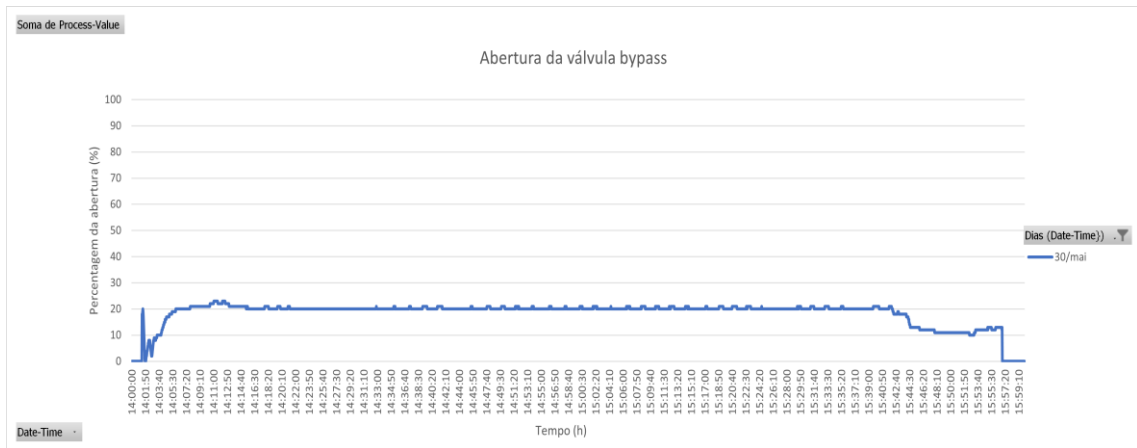


Figura 33 - Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo III)

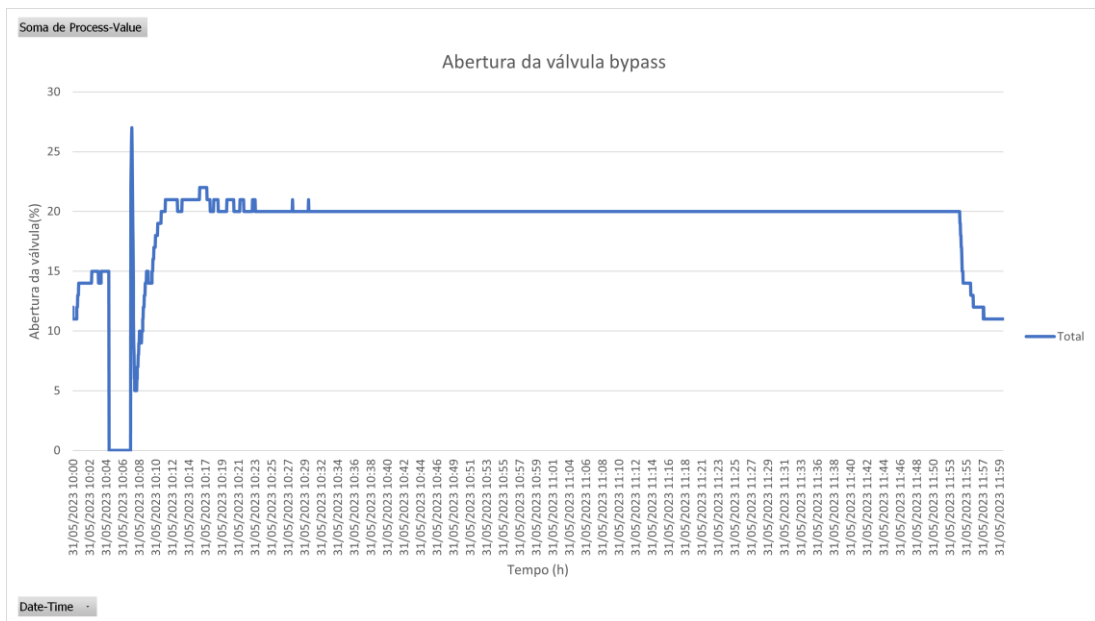


Figura 34 – Variação da abertura da válvula Bypass durante o processo (Iogurte tipo IV)

3.3. Análise energética

Considerando insignificantes as transferências de calor para a vizinhança e as variações nas energias cinética e potencial dos fluidos, a equação geral de balanço energético aplicada ao pasteurizador dá-nos:

$$q = \dot{m}_q \times c_{pq} \times (T_{qentrada} - T_{qsaída}) \quad (1)$$

$$q = \dot{m}_f \times c_{pf} \times (T_{fsaída} - T_{fentrada}) \quad (2)$$

Sendo:

- q = taxa total de transferência de calor entre os dois fluídos (W)
- \dot{m} = caudal mássico (kg/s)
- c_p = capacidade calorífica (kJ/kg K)
- T = temperatura do produto (°C)

Os índices f e q referem-se ao fluido frio e quente, respetivamente. Como os caudais medidos são caudais volúmicos, as equações (1) e (2) ficam:

$$q = Q_q \times \rho_q \times c_{pq} \times (T_{qentrada} - T_{qsaída}) \quad (3)$$

$$q = Q_f \times \rho_f \times c_{pf} \times (T_{fsaída} - T_{fentrada}) \quad (4)$$

Onde,

- Q = caudal volúmico (l/s)
- ρ = massa específica (kg/m³)

O leite tem uma composição variada, as suas propriedades físicas dependem das propriedades físicas dos seus componentes, pelo que o conhecimento exato das propriedades se torna complexo. Seguindo os resultados obtidos na literatura consultada [46][47][48] adotaremos para o leite os vales: $C_p = 3,98$ kJ/kgK para toda a gama de temperaturas; $\rho = 1000$ kg/m³ para temperaturas acima de 30°C e, para temperaturas iguais ou inferiores a 30°C, $\rho = 1028$ kg/m³.

A análise será feita nas secções 1, 2 e 3 do pasteurizador, onde ocorrem transferências de calor. Na primeira secção o leite é aquecido com água quente até atingir a temperatura de pasteurização; na secção 2, o leite é aquecido com água reaproveitada (água termizada); na secção 3 o leite é aquecido com leite que se encontra em fase final do processo de pasteurização. Apesar da sequência descrita as fases de aquecimento seguem uma sequência contrária, primeiro na secção 3, a seguir na secção 2 e finalmente na secção 1.

3.3.1. Primeira fase de aquecimento

Nesta fase de aquecimento ambos os fluídos, quente e frio, são leite. A temperatura inicial do leite a ser aquecido ($T_{fentrada}$) é a temperatura registada por T1 e a temperatura final do leite (T_{fsaida}) é a temperatura registada por T2; já a temperatura inicial do leite quente ($T_{qentrada}$) é a temperatura registada por T6 e a temperatura final (T_{qsaida}) é a temperatura registada por T7.

Para obter o caudal do fluído quente, recorreremos à percentagem de abertura da válvula bypass, uma válvula divisora de caudal. O caudal do fluido quente é o caudal total menos o caudal desviado pela válvula. Os valores registados durante o processo, são apresentados nas Tabela 6, Tabela 7,

Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 6 - Dados da pasteurização (Iogurte tipo I)

30/05/2023 – 11:50 às 13:55		
Dados		
Propriedade	Leite Frio	Leite Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	6,2	99,6
$T_{saida}(^{\circ}C)$	62,6	6,8
Q (L/h)	9394	7421
ρ (kg/m ³)	1028	1000
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98	3,98

$$q_f = 2169600 \text{ kJ/h} = 602,67 \text{ kW}$$

$$q_q = 2740200 \text{ kJ/h} = 761,16 \text{ kW}$$

Tabela 7 - Dados pasteurização (Iogurte tipo II)

31/05/2023 – 17:08 às 18:43		
Dados		
Propriedade	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	5,7	99,7
$T_{saida}(^{\circ}C)$	65,6	6,5
Q (L/h)	9393	7608
ρ (kg/m ³)	1028	1000
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98	3,98

$$q_f = 2303900 \text{ kJ/h} = 639,98 \text{ kW}$$

$$q_q = 2822800 \text{ kJ/h} = 784,12 \text{ kW}$$

Tabela 8 - Dados pasteurização (Iogurte tipo III)

30/05/2023 – 14:00 às 16:00		
Dados		
Propriedade	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	6,2	99,3
$T_{saida}(^{\circ}C)$	67,3	6,7
$Q \text{ (L/h)}$	9413	7531
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1028	1000
$C_p \text{ (kJ/kg}^{\circ}C\text{)}$	3,98	3,98

$$q_f = 235400 \text{ kJ/h} = 653,89 \text{ kW}$$

$$q_q = 2774900 \text{ kJ/h} = 770,80 \text{ kW}$$

Tabela 9 - Dados pasteurização (Iogurte tipo IV)

31/05/2023 – das 10:07 às 12:10		
Dados		
Propriedades	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	6,2	99,6
$T_{saida}(^{\circ}C)$	67,8	6,7
$Q \text{ (L/h)}$	9434	7548
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1028	1000
$C_p \text{ (kJ/kg}^{\circ}C\text{)}$	3,98	3,98

$$q_f = 2379100 \text{ kJ/h} = 660,87 \text{ kW}$$

$$q_q = 2789900 \text{ kJ/h} = 774,96 \text{ kW}$$

3.3.2. Segunda fase de aquecimento

Na segunda etapa de aquecimento o fluido quente é água reaproveitada (termizada), no entanto não há sensores de temperatura e caudal da água neste percurso específico do pasteurizador, o balanço será feito com base nas necessidades do leite apenas. A temperatura de entrada do leite

($T_{fentrada}$) é a temperatura registada por T2 e a temperatura de saída (T_{fsaida}) é a temperatura registada por T3. Os valores referentes à segunda fase de aquecimento, são apresentados nas Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 10 – Dados segunda fase (Iogurte tipo I)

30/05/2023 – 11:50 às 13:55	
Dados	
Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	62,6
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	75,0
$Q (L/h)$	9394
$\rho (kg/m^3)$	1000
$C_p (kJ/kg^{\circ}C)$	3,98

$$q_f = 461980 \text{ kJ/h} = 128,33 \text{ kW}$$

Tabela 11 - Dados segunda fase (Iogurte tipo II)

31/05/2023 – 17:08 às 18:43	
Dados	
Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	65,6
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	75,0
$Q (L/h)$	9393
$\rho (kg/m^3)$	1000
$C_p (kJ/kg^{\circ}C)$	3,98

$$q_f = 351660 \text{ kJ/h} = 97,68 \text{ kW}$$

Tabela 12 - Dados segunda fase (Iogurte tipo III)

30/05/2023 – 14:00 às 16:00	
Dados	
Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	67,3
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	75,1
$Q (L/h)$	9413
$\rho (kg/m^3)$	1000
$C_p (kJ/kg^{\circ}C)$	3,98

$$q_f = 289670 \text{ kJ/h} = 80,46 \text{ kW}$$

Tabela 13 - Dados segunda fase (Iogurte tipo IV)

31/05/2023 – das 10:07 às 12:10	
Dados	
Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	67,8
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	75,0
Q (L/h)	9434
ρ (kg/m ³)	1000
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98

$$q_f = 270580 \text{ kJ/h} = 75,16 \text{ kW}$$

3.3.3. Terceira fase de aquecimento

Na terceira fase de aquecimento, a leite é aquecido com água quente até atingir a temperatura de pasteurização. A temperatura de entrada do leite ($T_{fentrada}$) é a temperatura registada por T3 e a temperatura de saída (T_{fsaida}) é a temperatura registada por T4. A temperatura de entrada da água ($T_{qentrada}$) é a temperatura registada por T10 e à saída consideramos a temperatura registada por T11. O caudal da água quente é obtido a partir das curvas caraterísticas do fabricante da bomba de água [49], que relacionam a pressão na bomba com o caudal do fluído que a atravessa, porque não foi possível medir o caudal da água quente no local. Os dados são apresentados nas Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 14 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo I)

30/05/2023 – das 11:50 às 13:55		
Dados		
Propriedades	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	75,0	96,1
$T_{saida}(^{\circ}C)$	95,0	81,1
Q (L/h)	9394	35490
ρ (kg/m ³)	1000	961
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98	4,21

$$q_f = 747590 \text{ kJ/h} = 207,7 \text{ kW}$$

$$q_q = 2158200 \text{ kJ/h} = 599,5 \text{ kW}$$

Tabela 15 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo II)

31/05/2023 – 17:08 às 18:43		
Dados		
Propriedades	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	75,0	102,9
$T_{saida}(^{\circ}C)$	95,0	89,5
Q (L/h)	9393	35590
ρ (kg/m ³)	1000	956
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98	4,22

$$q_f = 746490 \text{ kJ/h} = 207,36 \text{ kW}$$

$$q_q = 1919700 \text{ kJ/h} = 533,25 \text{ kW}$$

Tabela 16 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo III)

30/05/2023 – das 14:00 às 16:00		
Dados		
Propriedades	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	75,0	97,1
$T_{saida}(^{\circ}C)$	95,0	83,5
Q (L/h)	9413	35490
ρ (kg/m ³)	1000	960
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98	4,22

$$q_f = 746370 \text{ kJ/h} = 207,32 \text{ kW}$$

$$q_q = 1956800 \text{ kJ/h} = 543,57 \text{ kW}$$

Tabela 17 - Dados da terceira fase (Iogurte tipo IV)

31/05/2023 – 10:07 às 12:10		
Dados		
Propriedades	Fluído Frio	Fluído Quente
$T_{entrada}(^{\circ}C)$	75,0	99,8
$T_{saida}(^{\circ}C)$	95,0	86,4
Q (L/h)	9434	35660
ρ (kg/m ³)	1000	958,02
C_p (kJ/kg ^o C)	3,98	4,22

$$q_f = 7500200 \text{ kJ/h} = 208,34 \text{ kW}$$

$$q_q = 1932700 \text{ kJ/h} = 536,87 \text{ kW}$$

3.3.4. Tempo de preparação

O tempo de preparação do pasteurizador, como mencionado anteriormente, é o tempo em que circula água quente no sistema todo, de maneira a aquecê-lo e deixá-lo pronto para o processo de pasteurização. A avaliação do tempo de preparação do pasteurizador apenas será feita para o dia 30 de Maio.

Ao contrário do tempo de pasteurização, onde os valores das grandezas se mantêm mais ou menos constantes, na preparação existe muita variação. Por essa razão, o tempo total foi dividido em 7 pequenos intervalos, nos quais a avaliação será realizada.

O fluido que circula no pasteurizador – no circuito de pasteurização onde mais tarde vai circular o leite – durante o processo de preparação é água quente, e existem apenas duas fases de aquecimento desta água quente, com água termizada e com água quente.

O aquecimento ocorre toda vez que há diferença nas temperaturas de entrada e saída, o que apenas verifica-se entre as temperaturas T2 e T3, e T3 e T4. O período de aquecimento acontece das 10:46 às 11:48, durante o qual nos primeiros 44 min a água é aquecida e nos 30 minutos restantes, depois de todas estarem a 90°C, mais ou menos, apenas acontece a circulação, Figura 35.

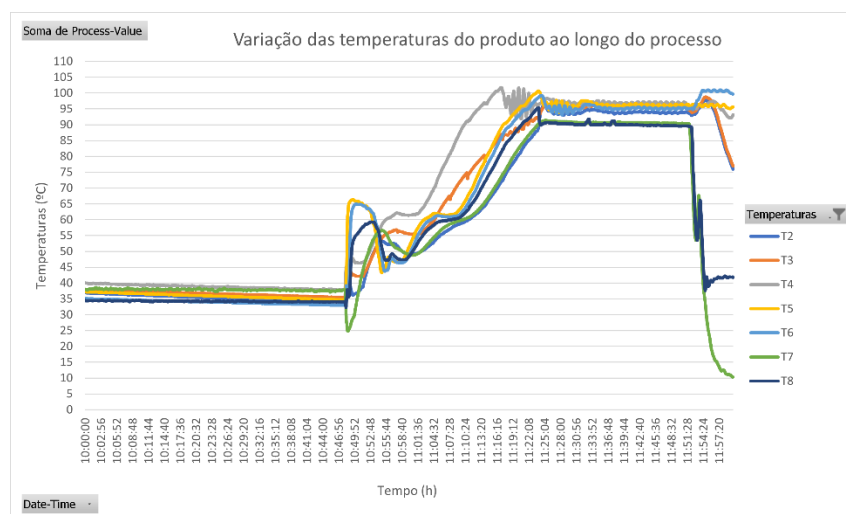


Figura 35 - Temperaturas ao longo do processo de preparação

Como o objetivo é avaliar o consumo de energia térmica durante o tempo de preparação, consideraremos apenas o tempo de aquecimento, das 10:46 às 11:28; pois depois de todas as temperaturas estarem a mesma temperatura, já não há consumo de energia térmica. O tempo total foi subdividido em pequenos intervalos de tempo, conforme a Tabela 18, já que os valores das temperaturas variam consideravelmente ao longo deste tempo. No tempo de preparação, como referido, há apenas duas fases de aquecimento e, para uma melhor compreensão, chamaremos de **fase 1** à fase de aquecimento com água reaproveitada (água termizada) e **fase 2** à fase de aquecimento com água quente. Os resultados referentes a cada intervalo são apresentados nas Tabela 19,

Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 18 - Divisão do tempo de preparação

Intervalos considerados	
Início	Fim
10:46	10:51
10:52	10:55
10:56	11:04
11:05	11:10
11:11	11:16
11:17	11:22
11:23	11:28

Tabela 19 - Dados do processo no primeiro intervalo (10:46 – 10:51)

Dados			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído	Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	38,26	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	42,4
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	42,38	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	45,9
Q (L/h)	10064	Q (L/h)	10064
ρ (kg/m ³)	993	ρ (kg/m ³)	991
C_p (kJ/kg ^o C)	4,18	C_p (kJ/kg ^o C)	4,18
$q_f = 172150$ kJ/h = 47.82 kW		$q_f = 148610$ kJ/h = 41.28 kW	

Tabela 20 - Dados do processo no segundo intervalo (10:52 – 10:55)

<i>Dados</i>			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído	Propriedades	Fluído
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	49,9	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	50,3
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	50,3	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	54,1
Q (L/h)	10535	Q (L/h)	10535
ρ (kg/m ³)	988	ρ (kg/m ³)	988
C_p (kJ/kg ^o C)	4,18	C_p (kJ/kg ^o C)	4,18
$q_f = 18950$ kJ/h = 5.26 kW		$q_f = 164980$ kJ/h = 45.83 kW	

Tabela 21 - Dados do processo no terceiro intervalo (10:56 – 11:04)

<i>Dados</i>			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído Frio	Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	50,9	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	56,5
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	56,5	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	63,1
Q (L/h)	10250	Q (L/h)	10250
ρ (kg/m ³)	988	ρ (kg/m ³)	985
C_p (kJ/kg ^o C)	4,18	C_p (kJ/kg ^o C)	4,18
$q_f = 238920$ kJ/h = 66.37 kW		$q_f = 276600$ kJ/h = 76.83 kW	

Tabela 22 - Dados do processo no quarto intervalo (11:05 – 11:10)

<i>Dados</i>			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído Frio	Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	57,3	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	68,4
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	68,4	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	82,2
Q (L/h)	10001	Q (L/h)	10001
ρ (kg/m ³)	984	ρ (kg/m ³)	978
C_p (kJ/kg ^o C)	4,18	C_p (kJ/kg ^o C)	4,19
$q_f = 456960$ kJ/h = 126,93 kW		$q_f = 568370$ J/h = 157,88 kW	

Tabela 23 - Dados do processo no quinto intervalo (11:11 – 11:16)

<i>Dados</i>			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído Frio	Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	63,2	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	78,4
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	78,4	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	95,0
Q (L/h)	10152	Q (L/h)	10152
ρ (kg/m ³)	981	ρ (kg/m ³)	973
C_p (kJ/kg ^o C)	4,19	C_p (kJ/kg ^o C)	4,20
$q_f = 6.34560 \text{ kJ/h} = 176,26 \text{ kW}$		$q_f = 686970 \text{ J/h} = 190,82 \text{ kW}$	

Tabela 24 - Dados do processo no sexto intervalo (11:17 – 11:22)

<i>Dados</i>			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído Frio	Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	77,1	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	87,6
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	87,6	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	97,6
Q (L/h)	10083	Q (L/h)	10083
ρ (kg/m ³)	973	ρ (kg/m ³)	967
C_p (kJ/kg ^o C)	4,20	C_p (kJ/kg ^o C)	4,21
$q_f = 432950 \text{ kJ/h} = 120,26 \text{ kW}$		$q_f = 407930 \text{ J/h} = 113,31 \text{ kW}$	

Tabela 25 - Dados do processo no sétimo intervalo (11:23 – 11:28)

<i>Dados</i>			
Fase 1		Fase 2	
Propriedades	Fluído Frio	Propriedades	Fluído Frio
$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	91,7	$T_{fentrada}(^{\circ}C)$	94,3
$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	94,3	$T_{fsaida}(^{\circ}C)$	97,2
Q (L/h)	10206	Q (L/h)	10206
ρ (kg/m ³)	964	ρ (kg/m ³)	962
C_p (kJ/kg ^o C)	4,21	C_p (kJ/kg ^o C)	4,21
$q_f = 105680 \text{ kJ/h} = 29,35 \text{ kW}$		$q_f = 122250 \text{ J/h} = 33,96 \text{ kW}$	

4. Discussão

Apesar de serem tipos de iogurtes diferentes, os processos apresentam o mesmo padrão de variação na temperatura do produto, caudal, temperatura da água quente e pressões durante o processo. Considerando apenas as necessidades dos produtos, a Tabela 26 apresenta os valores da potência térmica consumida em cada fase de aquecimento durante os quatro processos de pasteurização estudados.

Tabela 26 - Potência térmica em cada fase

Produto	Fase 1 (kW)	Fase 2 (kW)	Fase 3 (kW)	Total (kW)
Iogurte tipo I	602,7	128,3	207,7	938,7
Iogurte tipo II	640,0	97,7	207,4	945,0
Iogurte tipo III	653,9	80,5	207,3	941,7
Iogurte tipo IV	660,9	75,2	208,3	944,4

Sabendo que a energia é dada pelo produto da potência pelo tempo, equação (5), considerando o tempo de pasteurização podemos então determinar a energia consumida durante a pasteurização de cada um dos produtos considerados, os resultados são apresentados na Tabela 27.

$$Q = q \times t \quad (5)$$

Tabela 27 - Energia consumida em cada fase

Produto	Tempo de				
	pasteurização (horas)	Fase 1 (kWh)	Fase 2 (kWh)	Fase 3 (kWh)	Total (kWh)
Iogurte tipo I	2,08	1253,6	266,9	431,9	1952,4
Iogurte tipo II	1,58	1011,2	154,3	327,6	1493,1
Iogurte tipo III	2	1307,8	160,9	414,6	1883,3
Iogurte tipo IV	2,05	1354,8	154,1	427,1	1936,0

A potência térmica para os quatro produtos está a volta dos mesmos valores, há uma diferença maior na energia consumida por causa do tempo de pasteurização de cada produto. Se colocarmos de parte todas as fases de reaproveitamento de calor, o que realmente pesa nos custos da unidade fabril é a parcela de energia que provém diretamente da água quente, aquecida com o vapor proveniente da caldeira, expressa na terceira fase de aquecimento.

Tendo em conta os caudais dos produtos e os respetivos tempos de pasteurização, a energia necessária para pasteurizar cada litro de produto pode ser obtida dividindo a energia total

consumida, pelo total de litros pasteurizados, equação (6). Os resultados são apresentados na Tabela 28. Nesta etapa consideraremos apenas a energia consumida na terceira fase de aquecimento, onde a energia térmica provém da água aquecida com vapor da caldeira.

$$Energia/litro = \frac{Energia\ total\ consumida}{tempo\ de\ pasteurização \times caudal} \quad (6)$$

Tabela 28 – Energia consumida por litro de leite pasteurizado

Produto	Tempo de pasteurização (horas)	Caudal (L/h)	Total de litros pasteurizados	Energia (kWh)	Energia/litro (kWh/L)
Iogurte tipo I	2,08	9394,3	19540,5	431,9	0,022
Iogurte tipo II	1,58	9393,1	14841,1	327,6	0,022
Iogurte tipo III	2	9413,5	18827,0	414,65	0,022
IV	2,05	9434,5	19340,8	427,1	0,022

Aplicando o mesmo balanço à água quente, obtivemos os dados apresentados na Tabela 29. Um aspeto importante relativamente à energia liberada pela água quente é o facto de que os valores considerados ou disponíveis englobam também o trecho de reaproveitamento de água, água termizada. Não foi possível obter a temperatura a que a água quente sai do pasteurizador, depois de aquecer o leite, antes de voltar a este na secção 2 como água termizada. A temperatura de saída da água quente considerada (T11) para a análise é a temperatura à entrada do permutador tubular, e esta é a temperatura resultante da mistura da água quente depois da terceira fase de aquecimento do leite com a água quente, depois da segunda fase de aquecimento. No circuito das águas, Figura 10, depois da água quente a 90°C aquecer o leite, na terceira fase de aquecimento, uma parte é desviada para o pasteurizador na segunda secção, água termizada, outra parte segue o circuito e voltam a misturar-se antes do permutador tubular. Outro aspeto são os dados do caudal, que foram obtidos com base nas curvas características do fabricante. Assim sendo os dados apresentados a seguir são referentes ao conjunto água quente e água termizada, portanto uma aproximação.

Tabela 29 – Potência térmica e energia transferida pela água quente

Produto	Tempo de pasteurização (horas)	Caudal (L/h)	Potência térmica (kW)	Energia (kWh)	Energia/litro (kWh/l)
Iogurte tipo I	2,08	35490	599,5	1247,0	0,017
Iogurte tipo II	1,58	35590	533,2	842,5	0,015
Iogurte tipo III	2	35490	543,6	1087,1	0,015
Iogurte tipo IV	2,05	35660	536,9	1100,6	0,015

Passamos agora a avaliar o consumo durante o tempo de preparação, conforme os intervalos e fases anteriormente expostas. A potência térmica consumida em cada fase é apresentada na Tabela 30.

Tabela 30 - Potência térmica consumida em cada fase durante o período de preparação

Intervalo	Fase 1 (kW)	Fase 2 (kW)	Total (kW)
10:46 – 10:51	47,8	41,3	89,1
10:52 – 10:55	5,3	45,8	51,1
10:56 – 11:04	66,4	76,8	143,2
11:05 – 11:10	126,9	157,9	284,8
11:11 – 11:16	176,3	190,8	367,1
11:17 – 11: 22	120,3	113,3	233,6
11:23 – 11:28	29,4	34,0	63,3

Recordamos que durante a preparação também há reaproveitamento de calor e este ocorre na fase 1; portanto, apenas na fase 2 existe efetivamente consumo de energia térmica, pelo que a análise será restrita ao consumo na fase 2. Aplicando a equação (5), a energia consumida em cada intervalo é apresentada na

Tabela 31.

Tabela 31 - Energia consumida durante o tempo de preparação

Intervalo	Tempo (horas)	Potência térmica (kW)	Energia (kWh)
10:46 – 10:51	0,083	41,3	3,43
10:52 – 10:55	0,05	45,8	2,3
10:56 – 11:04	0,13	76,8	10,0
11:05 – 11:10	0,083	157,9	13,1
11:11 – 11:16	0,083	190,8	15,8
11:17 – 11: 22	0,083	113,3	9,4
11:23 – 11:28	0,083	34,0	2,8
Total	0,595	659,9 kW	56,9

5. Conclusão

Os resultados obtidos indicam que de uma forma geral, durante as pasteurizações, a variação das grandezas envolvidas é mais ou menos igual; a energia térmica consumida por litro de produto pasteurizado é a mesma, 0,022 kWh/l. Se considerarmos uma média de 5 pasteurizações por dia, que duram em média 2 horas e um caudal de 9500 l/h, o consumo de energia térmica seria de 418 kWh por produto, e 2090 kWh por dia. Considerando apenas os processos, sem contar com os ciclos de limpeza, fases de empurro e fases de preparação. Este valor pode ser comparado com o consumo total da indústria, para ver quanto corresponde dentro da parcela total de consumo de energia térmica.

Relativamente à comparação entre a energia consumida e a energia fornecida, no caso de estudo apresentado é difícil estabelecer precisamente essa diferença. Como mencionado anteriormente, não foi possível separar a parcela da água depois da troca térmica principal da parcela da água reaproveitada, sem uma diferença de temperaturas exata, não é possível saber precisamente a quantidade de energia térmica transferida da água para o produto. Além disso, os dados do caudal foram igualmente aproximações, este pode ter sido o motivo da grande diferença nos valores da potência térmica fornecida pela água quente, e a potência térmica recebida pelo leite.

Nas fases de reaproveitamento de calor, essencialmente na primeira fase de aquecimento durante a pasteurização, há uma diferença de mais de 100 kW entre a potência térmica fornecida pelo leite quente e a potência térmica absorvida pelo leite frio. Uma forma de melhorar seria melhorar a eficiência do permutador, optando por um equipamento mais recente e com menos perdas.

A fase de preparação é parte crucial do processo de pasteurização, ela garante que o sistema esteja pronto antes do início da pasteurização, o que permite maior rapidez e menores gastos de energia. Uma avaliação energética precisa desta fase também é complexa, pela variação instantânea das grandezas, no entanto o valor total de energia consumida nesta fase corresponde a 17,4% da energia necessária para pasteurizar por exemplo o Iogurte tipo II. Pode haver oportunidade de redução de custos se por exemplo for diminuída a distância entre o pasteurizador e o tanque de balanço, que faz o circuito de circulação do produto, demoraria menos tempo a aquecer e as perdas térmicas para a vizinhança seriam reduzidas. Por outro lado, também seria proveitoso rever a razão da duração do tempo de preparação, 30 minutos é muito tempo, havendo possibilidades de reduzir este tempo, haveria possibilidades de alcançar reduções no consumo de energia.

Os dados das propriedades do leite foram dados aproximados, massa específica e capacidade calorífica. Para trabalhos futuros seria interessante trazer dados cada vez mais próximos da realidade, considerando as diferenças das receitas (tipos de iogurtes) nas propriedades físicas. Outro ponto é relativamente à energia transferida pela água quente, seria interessante conhecer com exatidão para possíveis oportunidades de economia. Uma análise financeira também seria uma mais-valia, futuramente, ajudaria a dar uma visão dos custos do processo à empresa, e avaliar se vale a pena outros investimentos, como o caso de um equipamento novo. Se bem que neste contexto, além dos custos associados, está também em causa redução da quantidade de gás natural utilizado para produzir o vapor na caldeira.

Ainda há um vasto caminho a percorrer para a caracterização completa do consumo energético na indústria látea, é necessário agora cobrir outros processos dentro da linha de produção como os processos de limpeza, aquecimentos, pré pasteurizações, esterilizações, entre outros.

6. Referências bibliográficas

- [1] A. H. Robertson, “Milk and Milk Products,” *Am. J. Public Heal. Nations Heal.*, vol. 41, no. 10, pp. 1298–1299, 1951, doi: 10.2105/ajph.41.10.1298-b.
- [2] M. García-Burgos, J. Moreno-Fernández, M. J. M. Alférez, J. Díaz-Castro, and I. López-Aliaga, “New perspectives in fermented dairy products and their health relevance,” *J. Funct. Foods*, vol. 72, no. May, p. 104059, 2020, doi: 10.1016/j.jff.2020.104059.
- [3] N. Auestad and D. K. Layman, “Dairy bioactive proteins and peptides: A narrative review,” *Nutr. Rev.*, vol. 79, pp. 36–47, 2021, doi: 10.1093/nutrit/nuab097.

- [4] R. A. Ralston, J. H. Lee, H. Truby, C. E. Palermo, and K. Z. Walker, "A systematic review and meta-analysis of elevated blood pressure and consumption of dairy foods," *J. Hum. Hypertens.*, vol. 26, no. 1, pp. 3–13, 2012, doi: 10.1038/jhh.2011.3.
- [5] L. Schwingshackl *et al.*, "Food groups and risk of hypertension: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies," *Adv. Nutr.*, vol. 8, no. 6, pp. 793–803, 2017, doi: 10.3945/an.117.017178.
- [6] F. Gholami *et al.*, "The effect of dairy consumption on the prevention of cardiovascular diseases: A meta-analysis of prospective studies," *J. Cardiovasc. Thorac. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2017, doi: 10.15171/jcvtr.2017.01.
- [7] A. T. Adesogan and G. E. Dahl, "MILK Symposium Introduction: Dairy production in developing countries," *J. Dairy Sci.*, vol. 103, no. 11, pp. 9677–9680, 2020, doi: 10.3168/jds.2020-18313.
- [8] M. Bojovic and A. McGregor, "A review of megatrends in the global dairy sector: what are the socioecological implications?," *Agric. Human Values*, vol. 40, no. 1, pp. 373–394, 2023, doi: 10.1007/s10460-022-10338-x.
- [9] Food Drink Europe, "EU Food and Drink Industry: Data and Trends - 2023 Edition," p. 31, 2023.
- [10] H. Tweet, "Final energy consumption in industry - detailed statistics the industry sector by energy product , EU ," no. May, pp. 1–6, 2024.
- [11] EUROSTAT, "Energy statistics - an overview," *Stat. Explain.*, no. May, pp. 1–21, 2019, [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/>.
- [12] S. Fawzy, A. I. Osman, J. Doran, and D. W. Rooney, "Strategies for mitigation of climate change: a review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 2069–2094, 2020, doi: 10.1007/s10311-020-01059-w.
- [13] J. Delbeke, A. Runge-Metzger, Y. Slingenberg, and J. Werksman, "The paris agreement," *Toward. a Clim. Eur. Curbing Trend*, pp. 24–45, 2019, doi: 10.4324/9789276082569-2.
- [14] S. Bilgen, "Structure and environmental impact of global energy consumption," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 890–902, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.004.
- [15] J. Yang *et al.*, "Driving forces of China's CO₂ emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods," *Sci. Total Environ.*, vol. 711, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134569.
- [16] The United Nations, "Climate action and support trends," *United Nations Clim. Chang. Secr.*, pp. 1–40, 2019.
- [17] CRED, "396 11,755," 2019, [Online]. Available: https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf.
- [18] D. Bond, *Broken record*, vol. 164, no. 6. 2006.
- [19] F. Melini, V. Melini, F. Luziatelli, and M. Ruzzi, "Raw and heat-treated milk: From public

- health risks to nutritional quality,” *Beverages*, vol. 3, no. 4, pp. 1–33, 2017, doi: 10.3390/beverages3040054.
- [20] T. Xu and J. Flapper, “Energy use and implications for efficiency strategies in global fluid-milk processing industry,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 12, pp. 5334–5341, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.07.056.
- [21] C. A. Ramírez, M. Patel, and K. Blok, “From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry,” *Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1984–2004, 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.10.014.
- [22] A. Ladha-Sabur, S. Bakalis, P. J. Fryer, and E. Lopez-Quiroga, “Mapping energy consumption in food manufacturing,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 86, no. June 2017, pp. 270–280, 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.034.
- [23] R. Briam, M. E. Walker, and E. Masanet, “A comparison of product-based energy intensity metrics for cheese and whey processing,” *J. Food Eng.*, vol. 151, pp. 25–33, 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.11.011.
- [24] T. Xu, J. Flapper, and K. J. Kramer, “Characterization of energy use and performance of global cheese processing,” *Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 1993–2000, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.08.014.
- [25] T. Xu and J. Flapper, “Reduce energy use and greenhouse gas emissions from global dairy processing facilities,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 1, pp. 234–247, 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2010.09.037.
- [26] S. González-García, É. G. Castanheira, A. C. Dias, and L. Arroja, “Environmental life cycle assessment of a dairy product: The yoghurt,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 4, pp. 796–811, 2013, doi: 10.1007/s11367-012-0522-8.
- [27] V. Fantin, P. Buttol, R. Pergreff, and P. Masoni, “Life cycle assessment of Italian high quality milk production. A comparison with an EPD study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 28, pp. 150–159, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.10.017.
- [28] F. G. Üçtuğ, “The Environmental Life Cycle Assessment of Dairy Products,” *Food Eng. Rev.*, vol. 11, no. 2, pp. 104–121, 2019, doi: 10.1007/s12393-019-0187-4.
- [29] V. Vasilaki, E. Katsou, S. Ponsá, and J. Colón, “Water and carbon footprint of selected dairy products: A case study in Catalonia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 139, pp. 504–516, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.032.
- [30] E. Sorgüven and M. Özilgen, “Energy utilization, carbon dioxide emission, and exergy loss in flavored yogurt production process,” *Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 214–225, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.02.003.
- [31] M. J. Atkins, M. R. W. Walmsley, and A. S. Morrison, “Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes,” *Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1867–1873, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.06.039.

- [32] N. Yildirim and S. Genc, “Thermodynamic analysis of a milk pasteurization process assisted by geothermal energy,” *Energy*, vol. 90, pp. 987–996, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.08.003.
- [33] S. N. Husnain, W. Amjad, A. Munir, and O. Hensel, “Energy and Exergy Based Thermal Analysis of a Solar Assisted Yogurt Processing Unit,” vol. 10, no. June, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.887639.
- [34] M. Philipp *et al.*, “Increasing energy efficiency of milk product batch sterilisation,” *Energy*, vol. 164, pp. 995–1010, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.002.
- [35] P. M. Tomasula, W. C. F. Yee, A. J. Mcaloon, D. W. Nutter, and L. M. Bonnaille, “Computer simulation of energy use , greenhouse gas emissions , and process economics of the fluid milk process 1,” *J. Dairy Sci.*, vol. 96, no. 5, pp. 3350–3368, 2013, doi: 10.3168/jds.2012-6215.
- [36] S. Tigabe, A. Bekele, and V. Pandey, “Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector,” vol. 2022, 2022.
- [37] International Dairy Food association, “Pasteurization.” <https://www.idfa.org/pasteurization> (accessed Aug. 30, 2024).
- [38] K. J. Boor, M. Wiedmann, S. Murphy, and S. Alcaine, “A 100-Year Review: Microbiology and safety of milk handling,” *J. Dairy Sci.*, vol. 100, no. 12, pp. 9933–9951, 2017, doi: 10.3168/jds.2017-12969.
- [39] V. H. Holsinger, K. T. Rajkowski, and J. R. Stabel, “Milk pasteurisation and safety: a brief history and update.,” *Rev. Sci. Tech.*, vol. 16, no. 2, pp. 441–451, 1997, doi: 10.20506/rst.16.2.1037.
- [40] P. Sfakianakis and C. Tzia, “Conventional and innovative processing of milk for yogurt manufacture; development of texture and flavor: A review,” *Foods*, vol. 3, no. 1, pp. 176–193, 2014, doi: 10.3390/foods3010176.
- [41] R. L. Amalfi, F. Vakili-Farahani, and J. R. Thome, “Flow boiling and frictional pressure gradients in plate heat exchangers. Part 1: Review and experimental database,” *Int. J. Refrig.*, vol. 61, pp. 166–184, 2016, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.07.010.
- [42] T. M. Abou Elmaaty, A. E. Kabeel, and M. Mahgoub, “Corrugated plate heat exchanger review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. October 2016, pp. 852–860, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.266.
- [43] Savree, “Plate Heat Exchanger (PHE) Explained,” 2024. <https://savree.com/en/encyclopedia/plate-heat-exchanger-phe> (accessed Aug. 30, 2024).
- [44] H. F. Aguiar and J. A. W. Gut, “Continuous HTST pasteurization of liquid foods with plate heat exchangers: Mathematical modeling and experimental validation using a time-temperature integrator,” *J. Food Eng.*, vol. 123, pp. 78–86, 2014, doi:

10.1016/j.jfoodeng.2013.09.022.

- [45] ONDA, “Plate Heat Exchangers working Principle,” 2021. <https://www.onda-it.com/eng/news/how-a-plate-heat-exchanger-works/plate-heat-exchanger-working-principle> (accessed Aug. 30, 2024).
- [46] J. Hu, O. Sari, S. Eicher, and A. Rija Rakotozanakajy, “Determination of specific heat of milk at different fat content between 1 °C and 59 °C using micro DSC,” *J. Food Eng.*, vol. 90, no. 3, pp. 395–399, 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.009.
- [47] B. Guignon, I. Rey-Santos, and P. D. Sanz, “Determination, analysis and prediction of the volumetric behavior of milk at high pressure,” *Food Res. Int.*, vol. 64, pp. 336–347, 2014, doi: 10.1016/j.foodres.2014.06.046.
- [48] K. Kailasapathy, “Chemical Composition, Physical, and Functional Properties of Milk and Milk Ingredients DEFINITION OF MILK AND SAFE PROCESSING OF MILK AT THE FARM MILK AS A FOOD,” *Dairy Process. Qual. Assur.*, pp. 77–105, 2016.
- [49] Grundfos, “Referências bomba.” <https://product-selection.grundfos.com/products/tp-tpe/tp/tp-50-2902-96087178?pumpsystemid=2451341769&tab=variant-curves>.