

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ADAM LUIZ EVANGELISTA SOARES

**IMPACTO DE FATORES TECNOLÓGICOS NA ESTABILIDADE
LÁCTEAS UHT PROTEICAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

ADAM LUIZ EVANGELISTA SOARES

**IMPACTO DE FATORES TECNOLÓGICOS NA ESTABILIDADE
LÁCTEAS UHT PROTEICAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título Especialista em Tecnologia e Qualidade de Produção de Alimentos pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia de Alimentos.

Orientador: Eric Batista Ferreira

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Soares, Adam Luiz Evangelista.

Impacto de fatores tecnológicos na estabilidade lácteas UHT proteicas:
Uma revisão integrativa / Adam Luiz Evangelista Soares. - Alfenas, MG,
2025.

29 f. : il. -

Orientador(a): Eric Batista Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologia e
Qualidade na Produção de Alimentos) - Universidade Federal de Alfenas,
Alfenas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Bebidas lácteas UHT. 2. Gelificação. 3. Proteínas do leite. 4.
Estabilidade. 5. Processamento térmico. I. Ferreira, Eric Batista , orient. II.
Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

ADAM LUIZ EVANGELISTA SOARES

**IMPACTO DE FATORES TECNOLÓGICOS NA ESTABILIDADE LÁCTEAS UHT
PROTEICAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA**

O(A) Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Tecnologia e Qualidade de Produção de Alimentos pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia de Alimentos.

Aprovada em: 08 de dezembro de 2025

Prof. Dr. Eric Batista Ferreira
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Flavia Della Lucia
Universidade Federal de Alfenas

Prof.^a Dr.^a Gislene Regina Fernandes
Universidade Federal de Alfenas

RESUMO

Este trabalho analisa os fatores tecnológicos que influenciam a estabilidade de bebidas lácteas UHT (Ultra-high Temperature) com alto teor proteico ($\geq 5\%$ p/v), com foco nas interações entre caseínas, proteínas do soro (whey protein) e condições de processamento. A partir de uma revisão científica integrativa, são explorados os princípios da tecnologia UHT, os procedimentos de envase asséptico, os mecanismos de instabilidade durante o armazenamento prolongado, os impactos sensoriais e físico-químicos ao longo da vida de prateleira, e estratégias de formulação para mitigar esses problemas. Um dos fatores de instabilidade é a gelificação sendo apresentada como um fenômeno multifatorial, envolvendo desnaturação térmica, reações químicas (Maillard e oxidação), atividade de proteases bacterianas e variáveis de estocagem. A adoção de boas práticas de processamento, controle rigoroso da matéria-prima, uso de embalagens com barreira e ajustes na formulação (como estabilizantes minerais e hidrocoloides) mostrou-se essencial para prolongar a estabilidade coloidal e sensorial dessas bebidas. O trabalho propõe recomendações técnicas e estruturas de subtópicos para orientar pesquisas futuras e otimizar a qualidade de bebidas lácteas UHT proteicas. A abordagem integrada aqui apresentada visa contribuir para o desenvolvimento de produtos mais estáveis, seguros e com maior aceitação sensorial, alinhados às demandas do mercado por conveniência, nutrição e vida útil prolongada.

Palavras-chave: Bebidas lácteas UHT, gelificação, proteínas do leite, estabilidade, processamento térmico.

ABSTRACT

This work analyzes the technological factors that influence the stability of UHT (Ultra-high Temperature) dairy beverages with high protein content ($\geq 5\%$ w/v), focusing on the interactions between caseins, whey proteins, and processing conditions. Through an integrative scientific review, the principles of UHT technology, aseptic filling procedures, mechanisms of instability during prolonged storage, sensory and physicochemical impacts throughout shelf life, and formulation strategies to mitigate these issues are explored. One of the main instability factors is gelation, which is presented as a multifactorial phenomenon involving thermal denaturation, chemical reactions (Maillard and oxidation), bacterial protease activity, and storage variables. The adoption of good processing practices, strict control of raw materials, the use of barrier packaging, and formulation adjustments (such as mineral stabilizers and hydrocolloids) have proven essential to prolong the colloidal and sensory stability of these beverages. This work proposes technical recommendations and outlines subtopics to guide future research and optimize the quality of high-protein UHT dairy beverages. The integrated approach presented here aims to contribute to the development of more stable, safe, and sensorially acceptable products, aligned with market demands for convenience, nutrition, and extended shelf life.

Keywords: UHT dairy beverages, gelation, milk proteins, stability, thermal processing

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	4
3.1	ESTRATÉGIA DE REVISÃO E SELEÇÃO DE ESTUDOS.....	4
3.2	ANÁLISE DA TECNOLOGIA UHT E SUAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS	6
3.3	AVALIAÇÃO DO ENVASE ASSÉPTICO E DA EMBALAGEM	6
3.4	ESTUDO DA ESTABILIDADE TÉRMICA E INTERAÇÕES PROTEICAS	6
3.5	INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE ADITIVOS ESTABILIZANTES.....	7
3.6	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS CRÍTICOS.....	7
3.7	CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS TECNOLÓGICOS	7
3.8	COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE FORMULAÇÃO E PROCESSAMENTO	7
3.9	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO ARMAZENAMENTO	7
3.10	SÍNTESE DAS RECOMENDAÇÕES E DAS LACUNAS DE PESQUISA	8
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
4.1	O PAPEL CENTRAL DA COMPLEXAÇÃO B-LACTOGLOBULINA–K-CASEÍNA	9
4.2	MECANISMOS DE GELIFICAÇÃO – ENZIMÁTICO VS. FÍSICO-QUÍMICO	10
4.3	INFLUÊNCIA DO TEOR DE PROTEÍNA E DO CÁLCIO	11
4.4	ESTUDOS COMPARATIVOS – LACUNAS E COMPLEMENTOS	12
4.4.1	CONTROLE ENZIMÁTICO RIGOROSO	13
4.4.2	PROCESSAMENTO OTIMIZADO	14
4.4.3	EMBALAGEM ADEQUADA E ARMAZENAMENTO MODERADO	15
4.4.4	PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS FUTURAS	16
5.	CONCLUSSÕES	16
6.	REFERÊNCIAS	17

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por alimentos saudáveis e práticos tem impulsionado a relevância das bebidas lácteas de alto teor proteico no mercado. (HENCHION et al., 2017). O tratamento UHT (Ultra-high Temperature) é um dos processos que permite que produtos alcancem longa vida de prateleira sem refrigeração, pois esteriliza o produto a temperaturas de 135–145 °C por alguns segundos (DEETH; LEWIS, 2017). No entanto, um grande desafio técnico é manter a estabilidade física das proteínas do produto durante o processamento UHT e o posterior armazenamento prolongado. Defeitos como gelificação tardia (age gelation), sedimentação de proteínas e separação de fases (ex.: creaming) comprometem a qualidade sensorial e a aceitação do produto.

O leite é a principal matéria-prima das bebidas de alto teor proteico, pois, além de ser o componente majoritário, permite a adição de seus derivados como WPC (Concentrado proteico do soro) e MPC (Concentrado proteico do leite) para complementar o teor de proteína do produto. O leite é composto principalmente por água, lactose, gorduras e proteínas, sendo estas últimas divididas em duas classes principais: caseínas (aprox. 80% das proteínas do leite) e proteínas do soro (whey protein, aprox. 20%) (FOX; BRODKORB, 2008). As caseínas formam micelas coloidais estáveis na fase aquosa do leite, graças à presença de fosfato de cálcio nanométrico em seu interior e à κ -caseína na superfície micelar, o que confere carga negativa e estabilização por repulsão estérica (BROYARD; GAUCHERON, 2015). Já as proteínas do soro (principalmente β -lactoglobulina e α -lactoalbumina) são globulares e solúveis, com estrutura terciária definida em condições nativas (WIJAYANTI et al., 2014). Durante o tratamento térmico UHT, ocorrem modificações estruturais significativas nessas proteínas: as proteínas do soro desnaturam (desdobram-se), expondo grupos sulfidríla reativos, e podem interagir com as caseínas, enquanto as caseínas – mais resistentes ao calor – podem sofrer alterações na superfície micelar (por exemplo, desprendimento parcial de β -caseína) e perder cálcio coloidal (ANEMA, 2019).

Entender como fatores tecnológicos – intensidade e tipo de aquecimento (direto ou indireto), pré-tratamentos térmicos, homogeneização, aditivos estabilizantes, ajuste de pH, condições de envase asséptico, etc. – afetam as interações entre caseínas e proteínas do soro é essencial para prevenir defeitos de estabilidade. Por

exemplo, sabe-se que o processo UHT direto (injeção de vapor) costuma resultar em leite esterilizado com sabor mais fresco, porém com maior suscetibilidade à sedimentação de caseína durante o armazenamento, enquanto o processo UHT indireto (trocadores de calor) expõe o leite a maior carga térmica, reduzindo a ocorrência de gelificação precoce às custas de um sabor mais “cozido” (ANEMA, 2019).

Além disso, a embalagem asséptica desempenha papel crucial: materiais com barreira efetiva à luz e ao oxigênio, como cartonados multicamadas (papel/ polímero/ alumínio), protegem o produto de oxidação e preservam melhor sua qualidade do que embalagens plásticas simples (ARVANITTOYANNIS; BOSNEA, 2001; FAYED et al., 2022).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar criticamente os principais fatores tecnológicos que afetam a estabilidade físico-química de bebidas lácteas UHT com elevado teor proteico ($\geq 5\%$ p/v), com foco nas interações entre caseínas e proteínas do soro durante o processamento térmico e o armazenamento. Busca-se compreender como ajustes na formulação (como uso de sais estabilizantes, controle de pH e adição de hidrocoloides) e no processo (pré-tratamentos térmicos, tipo de aquecimento, homogeneização e envase asséptico) podem mitigar defeitos como gelificação, sedimentação e separação de fases. A partir de uma revisão científica aprofundada, pretende-se identificar estratégias que contribuam para o desenvolvimento de produtos mais estáveis, seguros e com maior aceitação sensorial, alinhados às demandas do mercado por conveniência e nutrição.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o impacto de fatores tecnológicos (processamento térmico UHT, condições de envase asséptico, adição de sais estabilizantes e parâmetros físico-químicos) na gelificação e estabilidade de bebidas lácteas UHT de alto teor proteico, elucidando as interações entre caseínas, proteínas do soro do leite e condições de processamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos para atingir os objetivos gerais são:

- a) Analisar os princípios e etapas da tecnologia UHT (aquecimento direto e indireto, tempos/temperaturas típicos, etapas de homogeneização e resfriamento) e compreender como esses fatores afetam a estrutura e estabilidade das proteínas do leite durante o processamento.
- b) Entender o papel do envase asséptico e do tipo de embalagem na qualidade e shelf life de bebidas lácteas UHT proteicas, especialmente no que se refere à proteção contra luz e oxigênio e à prevenção de contaminações ou migração de compostos indesejados.
- c) Investigar a estabilidade térmica das proteínas do leite (caseínas e proteínas do soro) em condições UHT, detalhando os mecanismos de desnaturação da β -lactoglobulina e α -lactoalbumina e de interação destas com as micelas de caseína durante e após o calor.
- d) Avaliar os efeitos de aditivos estabilizantes, em particular sais fosfato e citrato, sobre a estabilidade e textura de bebidas lácteas de alta proteína, verificando como a quelagem de cálcio e a modificação do equilíbrio mineral influenciam a tendência à gelificação ou sedimentação.
- e) Identificar parâmetros físico-químicos críticos (pH do produto, força iônica, atividade de água, conteúdo mineral) que favorecem ou inibem a gelificação, floculação de proteínas ou separação de fases, estabelecendo faixas ótimas para a estabilidade.
- f) Caracterizar os defeitos comuns em leite UHT de alta proteína – sobretudo gelificação com o tempo (age gelation) e sedimentação – e relacioná-los com suas causas tecnológicas principais (presença de enzimas proteolíticas, condições de estocagem, etc.), compilando estratégias documentadas para mitigar cada um desses defeitos.
- g) Compilar estratégias de formulações utilizadas para melhorar a estabilidade de bebidas lácteas proteicas, incluindo o uso de diferentes ingredientes proteicos (como concentrados proteicos do leite – MPC – em substituição ao leite em pó), adição de hidrocoloides (por exemplo, carragenana, Carboximetilcelulose sódica, celulose microcristalina, gomas) e alterações de processamento (por exemplo, pré-tratamentos do leite, ajustes de pH antes do UHT).

- h) Avaliar os efeitos das condições de armazenamento (temperatura e tempo) na estabilidade das proteínas em leite UHT, explicando por que temperaturas de estocagem mais elevadas podem acelerar a gelificação em alguns casos e inibi-la em outros.
- i) Propor recomendações industriais para o desenvolvimento de bebidas lácteas UHT de alto teor proteico estáveis, baseadas nos achados da literatura (por exemplo, otimização da etapa de pré-aquecimento para inativação de enzimas, uso de determinadas concentrações de citrato para sequestro de cálcio, escolha de embalagem com barreira adequada, etc.).
- j) Identificar lacunas de pesquisa atuais e futuras tendências tecnológicas que possam aperfeiçoar a qualidade desses produtos, como novos métodos de processamento (microfiltração, ultra-altas pressões) ou ingredientes inovadores (proteínas lácteas modificadas enzimaticamente, blends com proteína vegetal, etc.).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESTRATÉGIA DE REVISÃO E SELEÇÃO DE ESTUDOS

Realizou-se uma revisão integrativa conforme os princípios metodológicos recomendados por guias de revisão integrativa, com o objetivo de garantir transparência, reprodutibilidade e abrangência temática. Foram consultadas as bases ScienceDirect, Scopus, PubMed e Google Scholar, com recorte temporal entre janeiro de 2000 e dezembro de 2024, e filtros de idioma aplicados apenas para viabilizar a triagem (português, inglês e espanhol).

A construção das expressões de busca foi orientada pelo modelo PCC (Problema–Conceito–Contexto), contemplando três eixos temáticos principais. O primeiro eixo refere-se à Tecnologia UHT e Esterilização Ultra-Alta Temperatura, incluindo termos como “UHT”, “ultra-high temperature”, “tratamento UHT”, “esterilização ultrarrelâmpago”, “Embalagem UHT” e “esterilização UAT”.

O segundo eixo aborda Bebidas Lácteas Proteicas, com termos como “bebida láctea”, “leite”, “milk”, “dairy”, “dairy beverages”, “alto teor proteico”, “hiperproteica”,

“high protein”, “protein enriched”, “milk protein concentrate” e “MPC”.

Por fim, o terceiro eixo trata da Estabilidade Proteica e Defeitos Tecnológicos, englobando termos como “estabilidade”, “protein stability”, “gelificação”, “age gelation”, “floculação”, “sedimentação”, “precipitação”, “estabilizante”, “phosphate”, “citrate”, “hidrocoloide”, “hydrocolloid”, “carragenana” e “interações proteína-hidrocoloide”.

Os sinônimos de cada eixo foram combinados com o operador OR, e os eixos entre si com o operador AND.

Complementarmente, foram realizadas buscas em literatura cinzenta (teses, dissertações, documentos técnicos) e rastreamento manual das listas de referências dos artigos selecionados.

Filtros de período (jan. 2000–dez. 2024) e idiomas (português, inglês e espanhol) foram aplicados com moderação, apenas para garantir a viabilidade da triagem, conforme recomendações metodológicas.

As referências foram gerenciadas no software Excel, com remoção de duplicatas por título, autores e DOI. Cada etapa foi registrada em planilhas, incluindo número de registros recuperados, aplicados os filtros, e duplicatas removidas.

A seleção dos estudos foi conduzida em duas etapas sequenciais. Inicialmente, realizou-se a triagem de títulos e resumos, com base em critérios de elegibilidade previamente definidos: disponibilidade do texto completo, foco em bebidas UHT com teor proteico igual ou superior a 5% p/v, ênfase em aspectos físico-químicos e tecnológicos relacionados à estabilidade proteica, e originalidade metodológica ou contribuição relevante para o tema. Em seguida, os artigos que atenderam aos critérios foram submetidos à leitura integral, com avaliação detalhada da aderência ao escopo da revisão.

Os estudos selecionados forneceram a base para a abordagem metodológica deste trabalho, permitindo a exploração, nos tópicos subsequentes, de aspectos relacionados à tecnologia UHT e suas variáveis operacionais, ao envase asséptico e aos tipos de embalagem, bem como aos mecanismos de estabilidade térmica e interações proteicas.

Ao todo, foram inicialmente avaliados 97 trabalhos. Após a triagem de títulos e resumos, 63 artigos foram submetidos à leitura integral, permitindo uma análise aprofundada de sua relevância e aderência aos critérios estabelecidos. Dentre esses, 28 estudos foram selecionados para compor a base teórica da revisão, por

apresentarem contribuições significativas em termos metodológicos e alinhamento ao escopo proposto. Essa seleção criteriosa assegurou a consistência científica do trabalho e forneceu suporte para a discussão dos aspectos tecnológicos e físico-químicos abordados nos capítulos seguintes.

Também serão discutidos os efeitos de aditivos estabilizantes, a identificação de parâmetros físico-químicos críticos, a caracterização de defeitos tecnológicos e suas causas, além da comparação de estratégias de formulação e processamento. Por fim, será avaliada a influência do armazenamento sobre a estabilidade proteica, culminando na síntese de recomendações industriais e na identificação de lacunas de pesquisa.

3.2 ANÁLISE DA TECNOLOGIA UHT E SUAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS

Compilaram-se os procedimentos de aquecimento direto e indireto, com seus respectivos perfis de tempo-temperatura (por exemplo, 135–150 °C por 2–10 s, ou 120–130 °C por 20–30 s), além dos procedimentos de homogeneização e resfriamento aplicáveis. Esses dados foram correlacionados com suas influências relatadas sobre a estabilidade das proteínas do leite.

3.3 AVALIAÇÃO DO ENVASE ASSÉPTICO E DA EMBALAGEM

Estudou-se o impacto do sistema de envase asséptico (selagem, esterilização de tampas, controle de fluxo laminar) e dos tipos de embalagem (cartão multilayer, PET com barreira, alumínio) sobre a proteção contraluz, oxigênio e contaminações microbianas, bem como a migração de compostos nas condições de armazenamento.

3.4 ESTUDO DA ESTABILIDADE TÉRMICA E INTERAÇÕES PROTEICAS

Foram revisados os mecanismos de desnaturação térmica da β -lactoglobulina e da α -lactoalbumina e suas interações com as micelas de caseína durante o tratamento UHT. Também foram investigadas as transformações pós-tratamento (reassociação, agregação, géis).

3.5 INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE ADITIVOS ESTABILIZANTES

Foram avaliados trabalhos experimentais e teóricos os efeitos de sais de fosfato e citrato sobre a estabilidade e textura das bebidas lácteas de alto teor proteico. Analisou-se o papel da quelagem de cálcio, modificações do equilíbrio mineral e sua relação com gelificação ou sedimentação.

3.6 IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS CRÍTICOS

Foram analisados os parâmetros pH, força iônica, atividade de água e conteúdo mineral relatados nos estudos. Identificaram-se faixas operacionais críticas associadas à ocorrência de gelificação precoce, floculação e separação de fases.

3.7 CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS TECNOLÓGICOS

Procedeu-se à categorização dos defeitos mais comuns — especialmente gelificação tardia (*age gelation*) e sedimentação — e sua relação com causas tecnológicas, como atividade enzimática residual, formulação inadequada ou condições adversas de estocagem.

3.8 COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE FORMULAÇÃO E PROCESSAMENTO

Foram compiladas estratégias adotadas nas formulações de bebidas lácteas proteicas: uso de concentrados proteicos do leite (MPC), diferentes tipos de hidrocoloides (carragenana, celulose microcristalina, gomas), pré-tratamentos térmicos ou físicos, e ajustes de pH antes do processo UHT.

3.9 AVALIAÇÃO DO EFEITO DO ARMAZENAMENTO

Os trabalhos que relacionaram estabilidade proteica com tempo e temperatura de estocagem foram revisados. Buscou-se explicar mecanismos pelos quais temperaturas elevadas podem acelerar ou retardar a formação de gel dependendo da formulação.

3.10 SÍNTESE DAS RECOMENDAÇÕES E DAS LACUNAS DE PESQUISA

A partir da revisão, foram sintetizadas recomendações industriais para

formulação e processamento de bebidas lácteas UHT de alto teor proteico com estabilidade prolongada. Também foram identificadas lacunas de pesquisa e tendências emergentes, como microfiltração, ultra-altas pressões e uso de blends proteicos inovadores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos estudos analisados, é possível sintetizar os principais fatores intrínsecos e extrínsecos que afetam a estabilidade físico-química de bebidas lácteas proteicas UHT, destacando seus efeitos predominantes, sejam eles estabilizantes ou desestabilizantes. A Tabela 1 resume alguns desses fatores e seus efeitos.

Tabela 1 - Fatores que influenciam a estabilidade de sistemas lácteos submetidos ao tratamento UHT com a referência de cada autor

Fator	Efeito na estabilidade	Mecanismo/Observações	Referências
Teor de proteína elevado	Desestabiliza (gel/sedimento mais rápidos)	Micelas de caseína mais próximas favorecem pontes proteicas e rede contínua precoce.	PANDALANENI, S. et al., 2019; HAVEA, 2006
Razão caseína:whey protein maior	Estabiliza (aumenta tolerância térmica)	Menos β -lactoglobulina para formar agregados; caseína micelar confere robustez estrutural.	SINGH et al., 2019; HAVEA, 2006
Atividade de proteases (plasmina, etc.)	Desestabiliza (gel enzimático precoce)	Proteólise de caseínas (especialmente β -caseína) gera peptídeos que enfraquecem a rede; redução do tamanho micelar e produção de fragmentos amargos.	RAYNES et al., 2018 BAGLINIÈRE et al., 2013
Processo UHT indireto (mais calor)	Estabiliza (coloidal, não enzimático)	Desnaturação completa das proteínas de soro e inativação de enzimas; formam-se complexos estáveis β -Lg- κ -caseína durante o aquecimento (embora intensifique sabor "cozido").	ANEMA, 2019 DEETH; LEWIS, 2017 DATTA; DEETH, 2001
Processo UHT direto (menos calor)	Desestabiliza (gel tardio possível)	Whey protein parcialmente nativa e enzimas possivelmente ativas pós-UHT; requer estabilização extra (p.ex., pré-tratamentos, aditivos).	ANEMA, 2019 DEETH; LEWIS, 2017 DATTA; DEETH, 2001
Pré-aquecimento	Estabiliza (coloidal e enzimático)	Inativa plasmina e destrói flora psicotrófica; pré-agrega β -	KELLEHER et al., 2020

do leite cru		lactoglobulina à caseína de forma controlada (menos reação desordenada após UHT).	2001	DATTA ; DEETH, OLDFIELD, 2000
Estocagem a ≥ 30 °C	Desestabiliza (acelera gel/sedimento)	Acelera reações de <i>Maillard</i> e entre S–H/S–S em proteínas; aumenta a difusão e colisão entre micelas, adiando a percolação da rede.	2018	ANEMA, 2019 SUNDS et al., DATTA; DEETH, 2001
Estocagem refrigerada (≤ 5 °C)	Estabiliza (retarda reações)	Reações físico-químicas praticamente cessam; pode ocorrer precipitação reversível de β -caseína (“instabilidade a frio”), revertida ao voltar a 20 °C.	2018	ANEMA, 2019 SUNDS et al., DATTA; DEETH, 2001
Oscilação de temperatura	Desestabiliza (floculação inesperada)	Ciclos térmicos induzem precipitações de sais e variações de pH local, favorecendo floculação que não ocorreria a temperatura constante.	2018 2017	SUNDS et al., DEETH; LEWIS,
Embalagem barreira (c/ alumínio)	Estabiliza (proteção química)	Evita oxidação de gorduras e proteínas por O ₂ /luz; previne sabores oxidativos e ligações cruzadas induzidas por radicais livres.	2009	SMET et al., ; FAYED et al., 2022
Embalagem permeável (plástica)	Desestabiliza (no longo prazo)	Permite entrada de O ₂ /luz; oxidação gera compostos que podem modificar ou agregar proteínas; possível migração de contaminantes.	2022	FAYED et al.,
Sais estabilizantes (fosfato, citrato)	Estabiliza (retarda gel/sedimento)	Sequestram Ca ²⁺ e aumentam repulsão entre micelas; evitam agregação protéica excessiva durante UHT e estocagem.		GAUR ; SCHALK ; ANEMA, 2018; RAMCHANDRAN et al., 2017
Hidrocoloides (carragenana κ, etc.)	Estabiliza (impede sedimentação)	Formam gel fraco que mantém micelas e partículas em suspensão homogênea; minimizam sinérese e separação de fases.		MEDIWATHTHE et al., 2023

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.1 O PAPEL CENTRAL DA COMPLEXAÇÃO B-LACTOGLOBULINA–K-CASEÍNA

Praticamente todos os trabalhos identificaram a complexação entre β -lactoglobulina desnaturada e κ -caseína micelar como elemento-chave da estabilidade ou instabilidade do leite UHT (BROYARD; GAUCHERON, 2015; MALMGREN et al., 2017). Nenhum artigo contestou isso; ao invés, complementaram a visão com detalhes. Por exemplo, MALMGREN et al. (2017) demonstraram visualmente a

presença de β -lactoglobulina e κ -caseína nos filamentos intermicelares via imunomarcção, reforçando o modelo da “ponte β -lactoglobulina– κ -caseína” (MALMGREN et al., 2017).

Outros autores destacaram que a extensão dessas pontes varia conforme as condições de aquecimento – BROYARD; GAUCHERON, 2015) notaram que a distribuição de tamanho dos agregados β -lactoglobulina– κ -caseína depende do tempo/temperatura de calor. Entretanto, nenhum estudo propôs outro mecanismo proteico primário conflitante. Há, portanto, uniformidade em direcionar as estratégias tecnológicas para controlar essas interações. Em essência, deve-se evitar a saturação completa das micelas por β -lactoglobulina desnaturada, o que se obtém via controle do calor (processo menos drástico ou pré-aquecimentos para complexação prévia) ou uso de estabilizantes minerais (que alteram a afinidade da β -lactoglobulina pela micela) (GAUR; SCHALK; ANEMA, 2018).

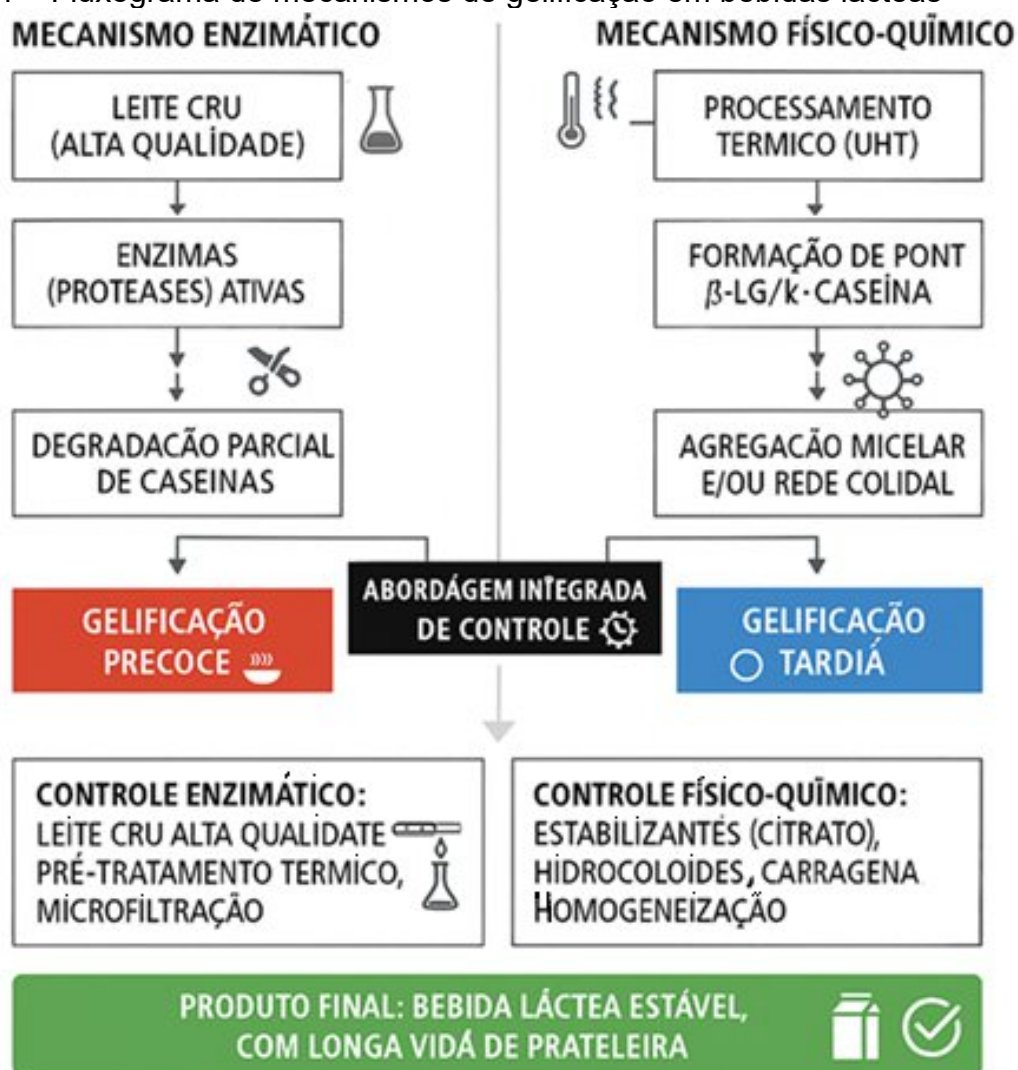
4.2 MECANISMOS DE GELIFICAÇÃO – ENZIMÁTICO VS. FÍSICO-QUÍMICO

Historicamente discutiu-se se o enfraquecimento por proteólise ou a agregação não enzimática seria a causa primordial da gelificação tardia (DATTA; DEETH, 2001). Os trabalhos mais recentes reconhecem que ambos os mecanismos ocorrem e podem inclusive atuar simultaneamente (RAYNES et al., 2018).

Em amostras onde a carga microbiana e enzimática é eliminada, prevalece o mecanismo físico-químico: as micelas se conectam por polímeros de β -lactoglobulina / κ -caseína até formarem um gel frágil (MALMGREN et al., 2017). Por outro lado, se houver enzimas ativas, elas podem degradar parcialmente as caseínas a ponto de precipitar um gel, às vezes antes mesmo do mecanismo coloidal se completar.

Na prática, isso significa que diferentes lotes de produto podem falhar por motivos distintos: um lote com leve contaminação pode gelificar precocemente por proteólise; outro, estéril, porém mal estabilizado, gelifica tardiamente por agregação físico-química. Para lidar com essa incerteza, diversos autores sugerem que ambos os mecanismos sejam suprimidos – ou seja, controle enzimático e controle coloidal – para máxima segurança (BAGLINIÈRE et al., 2013; ANEMA, 2019).

Figura 1 – Fluxograma de mecanismos de gelificação em bebidas lácteas



Fonte: Autor (2025)

A abordagem integradora proposta é corroborada por todos os estudos revisados, que apontam para a necessidade de estratégias combinadas de controle enzimático e coloidal.

4.3 INFLUÊNCIA DO TEOR DE PROTEÍNA E DO CÁLCIO

Os artigos concordam que aumento do teor de proteína leva a uma estabilidade mais crítica (HAVEA, 2006; PANDALANENI, S. et al., 2019). Nenhum estudo relatou o oposto. Em relação ao cálcio, também há consenso de que excesso de cálcio livre promove instabilidade, enquanto redução do cálcio com quelantes aumenta a estabilidade (GAUR; SCHALK; ANEMA, 2018). Uma nuance adicionada é o ponto

ótimo de quelantes: RAMCHANDRAN et al., (2017) e GAUR, SCHALK e ANEMA (2018) enfatizaram que “um pouco é bom; demais é ruim”, como já discutido. Não há contradição, apenas detalhe prático. Para a formulação do produto, isso significa que o uso de estabilizantes deve ser calibrado – doses insuficientes não prevenirão a gelificação, e doses excessivas podem desestruturar o leite. Os trabalhos de Boumpa et al. (2008) e de RAMCHANDRAN et al., (2017) fornecem parâmetros úteis para essa calibragem.

4.4 ESTUDOS COMPARATIVOS – LACUNAS E COMPLEMENTOS

Os artigos abrangem uma variedade de enfoques (revisões, experimentos, estudos de caso), e não se observaram conflitos diretos entre eles – ao contrário, há complementaridade. Por exemplo, ANEMA (2019) e MALMGREN et al. (2017) focaram nos fenômenos físico-químicos; em conjunto, fornecem uma visão completa dos dois mecanismos de gelificação. Se há lacuna, talvez seja a falta de estudos combinando ambos os mecanismos num só modelo: apenas ANEMA (2019) sugerem explicitamente que a gelificação final pode resultar da soma de proteólise + agregação coloidal. Para este TCC, isso indica que podemos propor um modelo híbrido, onde ocorre primeiro uma hidrólise parcial das caseínas que facilita, em seguida, a agregação das partes remanescentes em rede – de forma que ambos os mecanismos se reforcem, encurtando o tempo até o gel. Essa possibilidade concilia os achados sem conflito.

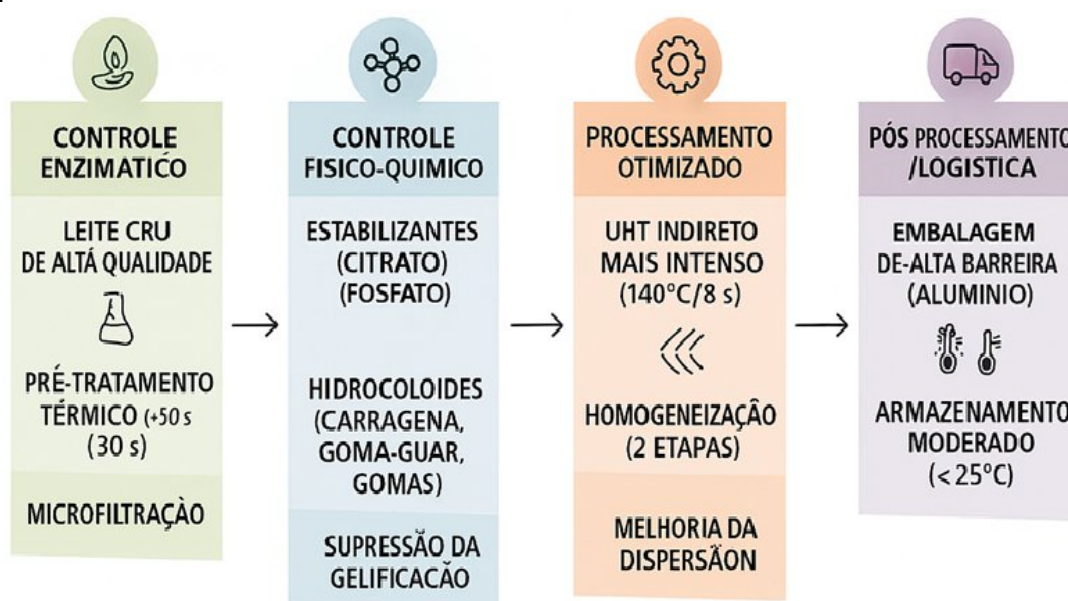
Outra diferença de foco está na estabilidade da gordura: a maioria dos artigos tratou principalmente das proteínas, mas ANEMA (2019) e FAYED et al. (2022) mencionam a separação de gordura (creaming) como parte do problema. Embora o foco deste trabalho sejam as proteínas, é relevante observar que glóbulos de gordura de maior dimensão também podem promover o arraste de caseínas para a superfície durante o processo de creaming (JUKKOLA; ROJAS, 2017). Apesar de esse fenômeno ocorrer em menor intensidade em bebidas de alto teor proteico — devido à menor concentração de gordura em comparação ao leite integral UHT —, a homogeneização é amplamente recomendada na literatura como estratégia eficaz para mitigar a separação de fases. Todos os autores que abordaram essa temática sugerem a homogeneização como medida fundamental para aprimorar a estabilidade físico-química do sistema (MEDIWATHTHE et al., 2023).. Não foram identificadas

divergências nesse ponto, apenas variações na ênfase atribuída aos diferentes componentes.

Recomendações Práticas para a Estabilidade em Projetos Industriais

Com base na análise, podemos delinear recomendações para projetos industriais de bebidas lácteas UHT de alto teor proteico estáveis, sendo:

Figura 2 – Estratégias integradas de controle para estabilidade de bebidas lácteas UHT



Fonte: Autor (2025)

4.4.1 CONTROLE ENZIMÁTICO RIGOROSO

A utilização de leite cru com alta qualidade microbiológica, caracterizada por baixa contagem de psicrotróficos, é fundamental para minimizar a presença de enzimas proteolíticas termorresistentes. Esses microrganismos, quando presentes, produzem proteases que permanecem ativas mesmo após o tratamento térmico, comprometendo a estabilidade das bebidas UHT. Para reduzir esse risco, recomenda-se aplicar pré-tratamentos térmicos intensos, como aquecimento a 90 °C por 30 s, visando inativar a plasmina e diminuir significativamente a carga microbiana, incluindo esporos. A literatura indica que essa etapa é essencial para prevenir a degradação proteica e, conseqüentemente, a gelificação indesejada durante o armazenamento (BAGLINIÈRE et al., 2013).

Adicionalmente, técnicas complementares como a microfiltração antes do processamento UHT podem remover mais de 99% das bactérias e esporos, reduzindo drasticamente a concentração de proteases termorresistentes. Essa redução não ocorre de forma direta, mas como consequência da menor carga microbiológica, já que as proteases são produzidas por microrganismos deteriorantes.

Assim, ao controlar a população microbiana, limita-se a síntese dessas enzimas, garantindo maior estabilidade físico-química do produto ao longo da vida de prateleira. Essas medidas, amplamente discutidas na literatura, configuram estratégias indispensáveis para prevenir mecanismos proteolíticos de gelificação e assegurar a qualidade tecnológica das bebidas lácteas proteicas UHT.

Controle das interações físico-químicas

Usar estabilizantes adequados – sais sequestrantes de cálcio (citrato de sódio ~0,1%, ou fosfatos na faixa de 10–20 mM) para reduzir a ponte iônica entre micelas (GAUR; SCHALK; ANEMA, 2018) e adicionar hidrocoloides como carragenana κ , celulose microcristalina, carboximetilcelulose sódica, gomas (gelana, guar, xantana), para manter as partículas suspensas (MEDIWATHTHE et al., 2023). Essas medidas atuam diretamente sobre o mecanismo coloidal de gelificação, reduzindo a concentração de cálcio livre e promovendo a formação de uma rede tridimensional viscosa que confere estabilidade à matriz. Esse efeito impede agregações irreversíveis durante a estocagem, preservando a integridade do sistema proteico. É fundamental, contudo, ajustar a dosagem dos estabilizantes dentro da faixa ótima, pois concentrações excessivas podem comprometer a estrutura micelar — por exemplo, níveis elevados de citrato podem desestabilizar as micelas de caseína. As referências consultadas fornecem diretrizes consistentes para garantir esse equilíbrio.

4.4.2 PROCESSAMENTO OTIMIZADO

Preferir, sempre que possível, processos UHT que confirmam robustez. Por exemplo, se a formulação permitir, utilizar um regime indireto ligeiramente mais intenso (p. ex., 140 °C/8 s) para garantir completa desnaturação das proteínas de soro e inativação enzimática (ANEMA, 2019). Além das estratégias de processamento, como a adoção de sistemas UHT diretos combinados a pré-aquecimento e homogeneização intensivos — abordagem que, segundo Kelleher et al. (2020), pode conferir estabilidade próxima à obtida pelo processo indireto sem comprometer

significativamente o perfil sensorial (KELLEHER et al., 2020; MEDIWATHTHE et al., 2024) —, destaca-se também a possibilidade de incorporar aromas específicos à formulação. A adição de compostos aromatizantes pode ser empregada para mascarar notas sensoriais indesejáveis, como o off note de cozido gerado durante o tratamento térmico intenso, contribuindo para a manutenção da aceitação sensorial do produto final. Dessa forma, o balanceamento entre intensidade térmica, preservação da qualidade sensorial e uso de aromatizantes deve ser considerado de acordo com os objetivos da aplicação e as expectativas do consumidor. Além disso, aplicar homogeneização eficiente (pelo menos 15 MPa em duas etapas) em produtos com gordura e até mesmo em desnatados concentrados, para reduzir qualquer tendência de creaming e dispersar agregados β -lactoglobulina- κ -caseína (JUKKOLA, A.; ROJAS, O. J., 2017).

4.4.3 EMBALAGEM ADEQUADA E ARMAZENAMENTO MODERADO

Optar por embalagens de alta barreira (como cartonados com alumínio ou garrafas multicamadas opacas) (SMET, K et al., 2009; FAYED et al., 2022) protege contra oxidação e preserva o sabor e a qualidade coloidal. Deve-se também orientar a cadeia logística e consumidores a manterem o produto em local fresco – embora não requeira refrigeração, temperaturas acima de 30 °C aceleram reações indesejadas. Muitos fabricantes especificam “armazenar em temperatura ambiente (máx. 25 °C)”, o que é embasado pelos dados de estabilidade.

Implementando-se esse conjunto de ações, espera-se obter uma bebida láctea de alto teor proteico estável, homogênea e segura durante toda a vida de prateleira (RAMCHANDRAN et al., 2017; MEDIWATHTHE et al., 2023). Essa abordagem multifatorial reflete a principal lição extraída da literatura: não há solução única para a estabilidade, mas sim o gerenciamento simultâneo de múltiplos fatores para prevenir todas as possíveis causas de instabilidade.

4.4.4 PERSPECTIVAS E TENDÊNCIAS FUTURAS

Do ponto de vista científico, esta revisão bibliográfica permitiu consolidar as bases teóricas que sustentam o trabalho e identificar lacunas para pesquisas futuras. Uma lacuna notada é o desenvolvimento de métodos preditivos rápidos de

estabilidade; atualmente, ainda dependemos de testes de prateleira demorados para prever shelf life.

Recentemente, AGUILERA-TORO et al. (2022) empregaram marcadores químicos (produtos da reação de Maillard e de desidratação de cisteína) para monitorar a estabilidade de leites UHT. Iniciativas desta natureza podem evoluir para modelos preditivos, mas não há um consenso ainda. Outra tendência emergente é investigar a estabilidade em formulações mistas (proteína láctea + vegetal): a demanda por produtos híbridos é crescente, e estudos relatam interações entre proteínas de leite e de plantas que afetam a estabilidade (SINGH et al., 2019). Embora este trabalho foque o leite bovino, essa é uma fronteira que pode ampliar as conclusões aqui apresentadas.

Por fim, a dimensão sensorial e de aceitação do consumidor merece atenção. Embora a maioria dos artigos técnicos não aborde profundamente o quanto pequenas variações de viscosidade ou sedimento são toleradas pelo consumidor, revisões recentes destacam que atributos como turbidez, sedimentação e textura influenciam diretamente a percepção sensorial e a aceitação de bebidas proteicas (SINGH et al., 2022). Estudos dedicados às características físico-químicas e sensoriais de bebidas lácteas proteicas são fundamentais para alinhar as metas de estabilidade do produto à experiência do consumidor final. Por exemplo, um aumento moderado na viscosidade ao longo do shelf life pode ser percebido positivamente, conferindo maior cremosidade à bebida. Por outro lado, a presença de sedimentos visíveis tende a ser interpretada de forma negativa. Compreender esses limiares sensoriais é essencial para definir o grau de rigor necessário em cada aplicação e direcionar o desenvolvimento de formulações mais adequadas às expectativas do mercado.

5. CONCLUSÕES

A estabilidade de bebidas lácteas UHT de alto teor proteico depende de múltiplos fatores interligados, incluindo a qualidade da matéria-prima, formulação, processamento térmico, homogeneização, uso de estabilizantes e condições de armazenagem. Os estudos revisados mostraram que não existe uma solução única: é necessário adotar uma abordagem integrada, combinando diferentes estratégias para prevenir defeitos como gelificação, sedimentação e separação de fases.

A literatura destaca que tanto mecanismos enzimáticos quanto estruturais

podem atuar simultaneamente, exigindo medidas complementares para garantir a estabilidade do produto. A aplicação rigorosa das recomendações técnicas — desde o controle microbiológico até a escolha adequada de aditivos e embalagens — permite obter bebidas estáveis, fluidas e sensorialmente aceitáveis ao longo do shelf life.

Além disso, a revisão aponta a importância de desenvolver métodos rápidos para prever a propensão à gelificação e de investigar a estabilidade em sistemas híbridos lácteos-vegetais, acompanhando tendências de inovação e consumo. Em resumo, o domínio dos fatores tecnológicos e a integração de estratégias de controle são essenciais para o sucesso no desenvolvimento de bebidas lácteas proteicas UHT de alta qualidade.

6. REFERÊNCIAS

AGARWAL, S. et al. Innovative uses of milk protein concentrates in product development. **Journal of Food Science**, 2015 A23–A29.

AGUILERA-TORO, M. et al. Development in Maillard reaction and dehydroalanine pathway markers during storage of UHT milk representing differences in casein micelle size and sedimentation. **Foods**, 2022. 1525.

ANEMA, S. G. Age gelation, sedimentation, and creaming in UHT milk: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2019. 140–165.

ARVANITOYANNIS, I. S.; BOSNEA, L. Migration of substances from food packaging materials to foods. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2001. 693–705.

BOUMPA, T. et al. Effects of phosphates and citrates on sediment formation in UHT goat's milk. **Journal of Dairy Research**, 2008. 160–166.

BAGLINIÈRE, F. E. A. Proteolysis of ultra high temperature-treated casein micelles by AprX enzyme from *Pseudomonas fluorescens* F induces their

destabilisation. **International Dairy Journal**, 2013. 55–61.

BROYARD, C.; GAUCHERON, F. Modifications of structures and functions of caseins: a scientific and technological challenge. **Dairy Science & Technology**, 2015. 831–862.

DATTA, N.; DEETH, H. C. Age gelation of UHT milk: A review. **Food and Bioproducts Processing**, 2001. 197–210.

DEETH, H. C.; LEWIS, M. J. **High temperature processing of milk and milk products**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2017.

FAYED, A. E. E. A. The effects of packaging type and storage temperature on some UHT milk quality indexes. **Food Science and Technology International**, 2022. 291–301.

FOX, P. F.; BRODKORB, A. The casein micelle: historical aspects, current concepts and significance. **International Dairy Journal**, 2008. 677–684.

GAUR, V.; SCHALK, J.; ANEMA, S. G. Interactions of calcium chelators with casein micelles in concentrated skim milk. **Food Chemistry**, 2018. 8–14.

HAVEA, P. Protein interactions in milk protein concentrate powders. **International Dairy Journal**, 2006, 415–422.

HENCHION, M. E. A. Future protein supply and demand: strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. **Foods**, 2017. 53.

JUKKOLA, A.; ROJAS, O. J. Milk fat globules and associated membranes: Colloidal properties and processing effects. **Advances in Colloid and Interface Science**, Espoo, Abril 2017.

KELLEHER, C. M. E. A. The effect of protein profile and preheating on denaturation of whey proteins and development of viscosity in milk protein beverages

during heat treatment. **International Journal of Dairy Technology**, 2020. 494–502.

MALMGREN, B. E. A. Changes in proteins, physical stability and structure in directly heated UHT milk during storage at different temperatures. **International Dairy Journal**, 2017. 60–75.

MEDIWATHTHE, A. E. A. Heat-Induced Changes in κ -Carrageenan-Containing Chocolate-Flavoured Milk Protein Concentrate Suspensions under Controlled Shearing. **Foods**, Victoria, AUS, Dezembro 2023. 4404

MEDIWATHTHE, A. E. A. Heat-induced changes of milk protein concentrate suspensions as affected by addition of calcium sequestering salts and shearing. **International Dairy Journal**, Outubro 2024. 105829.

OLDFIELD, D. J.; SINGH, H.; TAYLOR, M. W. Effect of preheating and other process parameters on whey protein reactions during skim milk powder manufacture. **International Dairy Journal**, 2000. 575–584.

PANDALANENI, K.; BHANDURIYA, K.; AMAMCHARLA, J. K.; MARELLA, C.; METZGER, L. E. Influence of milk protein concentrates with modified calcium content on enteral dairy beverage formulations: Storage stability. **Journal of Dairy Science**, v. 102, p. 155–163, jan. 2019.

RAMCHANDRAN, L.; LUO, X.; VASILJEVIC, T. Effect of chelators on functionality of milk protein concentrates obtained by ultrafiltration at a constant pH and temperature. **Journal of Dairy Research**, Melbourne, AUS, Agosto 2017. 1–8.

RAYNES, J. K.; VINCENT, D.; ZAWADZKI, J. L. Investigation of Age Gelation in UHT Milk. **Beverages**, 2018. p. 1–14.

SINGH, Jaspal; PRAKASH, Sangeeta; BHANDARI, Bhesh; BANSAL, Nidhi. Ultra high temperature (UHT) stability of casein–whey protein mixtures at high protein content: Heat induced protein interactions. **Food Research International**, v. 116, p. 103–113, 2019.

SINGH, R.; RATHOD, G.; MELETHARAYIL, G. H.; KAPOOR, R.; SANKARLAL, V. M.; AMAMCHARLA, J. K. Shelf-stable dairy protein beverages—Scientific and technological aspects. **Journal of Dairy Science**, v. 105, n. 12, p. 9327–9346, 2022.

SMET, P. et al., 2. Oxidative stability of UHT milk as influenced by fatty acid composition and packaging. **International Dairy Journal**, Melle, Março 2009. 372–379.

SUNDS, A. V. et al. Maillard reaction progress in UHT milk during storage at different temperature levels and cycles. *International Dairy Journal*, v. 77, p. 56–64, 2018.

WIJAYANTI, H. B.; BANSAL, N.; DEETH, H. C. Stability of Whey Proteins during Thermal Processing: A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2014. 1232–