



Valorização do Resíduo Industrial Carbonato de Cálcio numa Perspetiva de Sustentabilidade e Economia Circular

CLÁUDIA FILIPA SILVA VILA COVA

Julho de 2024

Valorização do Resíduo Industrial Carbonato de Cálcio numa Perspetiva de Sustentabilidade e Economia Circular

Cláudia Filipa Silva Vila Cova

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Biorrecursos**

Orientador: Simone Morais

Supervisor empresarial (RAR): Delfim Alves Lopes & Joana Sousa Rebelo

Porto, julho 2024

Resumo

Num cenário marcado pela crescente produção de resíduos e pelo uso insustentável de recursos naturais, a busca por alternativas circulares torna-se cada vez mais urgente. A indústria do açúcar enfrenta o desafio de gerir os seus resíduos de forma eficaz, minimizando os impactos ambientais e otimizando os seus processos. Neste contexto, a presente tese dedica-se a investigar estratégias, alinhadas com os princípios da sustentabilidade e da economia circular, para a valorização do carbonato de cálcio nas lamas de carbonatação obtidas durante a produção de açúcar. Para tal, foram caracterizadas as propriedades físico-químicas do resíduo, avaliados métodos de processamento e de reutilização em diferentes contextos industriais.

O estudo sobre o aproveitamento das lamas de carbonatação da RAR revelou que estas atendem aos requisitos legais para uso agrícola e como corretivo alcalinizante, embora o seu teor médio de humidade de 29% limite as aplicações industriais. A opção mais viável é o uso como corretivo de solos ácidos. Diversos setores industriais demonstraram interesse, mas as lamas precisam de pré-tratamento, especialmente secagem, para cumprir às especificações desses setores. Testes laboratoriais reduziram a humidade para 0,57%, próximo do valor requerido por algumas indústrias, com um secador rotativo sendo adequado para este processo. A viabilidade económica mostrou ganhos anuais significativos ao vender as lamas ao natural para uso agrícola, eliminando custos de gestão de resíduos. Contudo, a secagem requer investimentos e sua viabilidade depende fortemente do preço de venda do produto final. Recomenda-se, assim, manter as parcerias para uso agrícola, realizar testes piloto de secagem e aprofundar estudos de mercado para identificar setores que valorizem o carbonato de cálcio seco. Explorar a integração energética e otimização de processos também é essencial.

Há potencial para transformar as lamas de um passivo ambiental num produto de valor agregado, começando pelo uso agrícola e avançando conforme a procura do mercado. Trabalhos futuros devem focar-se em estudos de mercado, otimização do pré-tratamento das lamas, estratégias de marketing eficazes e parcerias para promover a valorização de resíduos e a economia circular na indústria do açúcar.

Palavras-chave: Refinação de Açúcar, Valorização de Resíduos, Economia Circular, Lamas de carbonatação.

Abstract

In a scenario marked by increasing waste production and unsustainable use of natural resources, the search for circular alternatives becomes increasingly urgent. The sugar industry faces the challenge of effectively managing its waste, minimizing environmental impacts, and optimizing its processes. In this context, this thesis focuses on investigating strategies aligned with sustainability and circular economy principles for valorizing calcium carbonate in carbonation sludges generated during sugar production. The physical-chemical properties of the residue were characterized, and processing and reuse methods were evaluated in different industrial contexts.

The study on the utilization of RAR's carbonation sludges revealed compliance with legal requirements for agricultural use and as an alkalinity amendment, although its average moisture content of 29% limits industrial applications. The most viable option is its use as a soil amendment for acidic soils. Various industrial sectors have shown interest, but the sludges require pre-treatment, especially drying, to meet sector specifications. Laboratory tests reduced moisture to 0.57%, close to the required value for some industries, with a rotary dryer being suitable for this process.

Economic feasibility showed significant annual gains from selling the sludges as-is for agricultural use, eliminating waste management costs. However, drying requires investment, and its viability heavily depends on the selling price of the final product. Therefore, it is recommended to maintain partnerships for agricultural use, conduct pilot drying tests, and further market studies to identify sectors that value dry calcium carbonate. Exploring energy integration and process optimization is also crucial.

There is potential to transform sludges from an environmental liability into a value-added product, starting with agricultural use and progressing with market demand. Future work should focus on market studies, optimizing sludge pre-treatment, effective marketing strategies, and partnerships to promote waste valorization and circular economy in the sugar industry.

Keywords: Sugar Refining, Waste Recovery, Circular Economy, Carbonation Pressmud.

Agradecimentos

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão ao meu orientador, Sr. Delfim Lopes, pelo seu tempo e paciência ao longo do meu percurso na RAR. Estou imensamente agradecida pela incrível oportunidade de trabalhar com esta equipa.

Também gostaria de agradecer à Joana Rebelo pela sua inestimável ajuda e dedicação ao longo deste trabalho, fornecendo todos os recursos necessários para a realização da minha dissertação. Agradeço por estar sempre disponível para discutir as minhas dúvidas e por me fazer sentir à vontade para expô-las. Agradeço igualmente pelo acompanhamento contínuo do meu trabalho.

Agradeço ao departamento de Sistema de Gestão Integrado – Laboratório: Sr. Joaquim, José Caldas, Ricardo Gonçalves, Alexandra Aveiro, Ivone Almeida, Raquel Almeida, Rita Ferreira e Sandra Gomes, pela ajuda e dedicação dispensadas durante este trabalho. A orientação de cada um de vocês foi extraordinária e essencial, permitindo-me adquirir mais conhecimento na área da refinação e crescer profissionalmente.

Gostaria de agradecer aos meus colegas de estágio, Lia Monteiro, António Ribeiro e Salomé Gaspar, por todo o apoio e companheirismo, que foram essenciais para o meu bem-estar. Gostaria também de destacar a valiosa ajuda e amizade de Ana Isabel Faria. Foi uma das pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar mais de perto, e essa colaboração foi extremamente enriquecedora.

Um especial agradecimento à minha professora e orientadora, Simone Moraes, pela incrível ajuda fornecida, tanto a nível profissional quanto pessoal. A sua ajuda e compreensão promoveram grande motivação e confiança em mim.

Agradeço à RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas e ao Departamento de Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pelo fornecimento das instalações utilizadas neste trabalho.

À minha família, pais e irmão, pelo apoio incondicional e força nos momentos mais difíceis. Por acreditarem em mim e nas decisões que tomei, vocês inspiram-me a ser melhor todos os dias, a dar o meu melhor em tudo o que faço e a lutar pelo que quero. Sem vocês, isto não teria sido possível. Um especial agradecimento ao meu namorado, João, pelo tempo e ajuda dispensados, pelas inúmeras conversas de motivação, pela paciência e falta dela, foram cruciais para encerrar este capítulo da minha vida.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento geral e Objetivos	1
1.2	Apresentação do Local de Estágio	2
1.3	Organização da Tese	3
2	Revisão Bibliográfica.....	6
2.1	Processo de Refinação da <i>RAR Açúcar</i>	6
2.1.1	A Cana-de-açúcar e o Açúcar	6
2.1.2	Matéria-Prima - Rama de cana-de-açúcar	7
2.1.3	Produção de Açúcar Branco.....	8
2.1.4	Produção de Açúcar Areado Amarelo.....	18
2.1.5	Recuperação	19
2.2	Economia Circular e o seu Papel na Indústria do Açúcar	23
2.2.1	Conceitos de Economia Circular e Bioeconomia	23
2.2.2	Resíduos Industriais e o Seu Impacto Ambiental.....	25
2.2.3	Desafios e Oportunidades na Indústria do Açúcar	26
2.3	Importância da Valorização de Resíduos na Sustentabilidade	28
2.3.1	Valorização de Subprodutos / Bioprodutos	28
2.3.2	Práticas de Valorização Aplicadas na <i>RAR Açúcar</i>	33
2.4	Processos de Valorização do Carbonato de Cálcio.....	34
2.4.1	Matéria-prima Carbonato de Cálcio: Propriedades e Aplicações	34
2.4.2	Resíduo Carbonato de Cálcio	36
2.4.3	Estudos de Casos de Implementação da Valorização do Carbonato de Cálcio na Indústria do Açúcar	36
3	Metodologia Experimental.....	38
3.1	Carbonato de Cálcio	38
3.1.1	Pesquisa bibliográfica	38
3.1.2	Parâmetros e Métodos de Caracterização	39
3.1.3	Procedimentos Experimentais	41
4	Análise dos Resultados e Discussão	43
4.1	Carbonato de Cálcio	43
4.1.1	Caracterização do Resíduo.....	43
4.1.2	Recolha e Análise de Dados.....	46
4.1.3	Estudo do Processo de Pré-tratamento	49
4.1.4	Estudo e Viabilidade Económica	53
5	Conclusões.....	58

Lista de Figuras

Figura 1.2.1 Instalações fabris da RAR Açúcar [imagem retirada de www.googlemaps.pt].....	2
Figura 2.1.1 – Reação de condensação e formação da molécula de sacarose [Andreia, 2019] ..	7
Figura 2.1.2 – Conjunto de fotografias da matéria-prima, rama de cana-de-açúcar.	8
Figura 2.1.3 - Fluxograma geral do processo de refinação do açúcar [adaptado do documento original RAR, 2018a]	9
Figura 2.1.4 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Afinação [RAR, 2019b]	11
Figura 2.1.5 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Carbonatação [RAR, 2018b]..	12
Figura 2.1.6 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Descoloração [RAR, 2018c] ...	13
Figura 2.1.7 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Evaporação [RAR, 2018d]	14
Figura 2.1.8 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Cristalização [RAR, 2018e]	15
Figura 2.1.9 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Centrifugação [RAR, 2018f] ..	16
Figura 2.1.10 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Secagem [RAR, 2018g]	17
Figura 2.1.11 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Classificação [RAR, 2018h] ..	18
Figura 2.1.12 – Fluxograma da produção de açúcar amarelo areado [RAR, 2017]	19
Figura 2.1.13 – Fluxograma do processo de recuperação – Pré-Primeira [RAR, 2009a]	20
Figura 2.1.14 – Fluxograma do processo de recuperação – Primeira Recuperação [RAR, 2009b]	21
.....	22
Figura 2.1.15 – Fluxograma do processo de recuperação – Segunda Recuperação [RAR, 2009c]	22
.....	23
Figura 2.1.16 – Fluxograma do processo de recuperação – Terceira Recuperação [RAR, 2009d]	23
.....	24
Figura 2.2.1 – Ilustração dos diversos pontos estratégicos da economia circular [Adriele, 2023]	24
.....	34
Figura 2.4.1 – Estrutura química do CaCO_3 (Al Omari et al. 2016).....	34
Figura 4.1.1. Gráfico da humidade das lamas de carbonatação, em percentagem, ao longo do tempo, em anos	46
Figura 4.1.2. Secador de leito fluidizado a) esquema de funcionamento, b) fotografia do aspeto exterior [Marques, Paula & Silva, 2022]	51
Figura 4.1.3. Secador de túnel com correias transportadoras a) esquema de funcionamento, visto de frente, b) fotografia do equipamento [Marques, Paula & Silva, 2022]	52
Figura 4.1.4. Secador rotativo a) esquema de funcionamento; b) exemplo da forma das pás no interior [Marques, Paula & Silva, 2022]	53
Figura 4.1.5. Imagem do mapa com um raio de 50 km da localização da RAR [imagem adaptada de www.googlemaps.pt].....	54

Lista de Tabelas

Tabela 3.1.1. Análises às lamas de carbonatação, com os respetivos parâmetros, métodos analíticos e normas aplicadas.	39
Tabela 4.1.1. Resultados das análises às lamas de carbonatação, com os respetivos valores-limite.	43
Tabela 4.1.2. Resultados das análises às lamas de carbonatação, com os respetivos valores-limite. Continuação.	44
Tabela 4.1.3. Resultados das análises às lamas de carbonatação, com os respetivos valores mínimos.....	45
Tabela 4.1.4. Número de empresas contactadas distribuído pelos diferentes setores.	47
Tabela 4.1.5. Especificações do CaCO_3 presente na RAR e de 4 empresas.	48
Tabela 4.1.6. Parâmetros avaliados e os respetivos resultados.	48
Tabela 4.1.7. Valores do estudo e viabilidade económica de secadores de tambor rotativo e de túnel com correias transportadoras.	55

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

CQO	Carência Química de Oxigênio
EPS	Exopolissacarídeos
ICP-AES	Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy
LAS	Alquilo benzenossulfonatos lineares
NPE	Nonilfenóis e nonilfenóis etoxilados
PAH	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
PCB	Compostos bifenilos policlorados
PCDD	Policlorodibenzodioxinas
PCDF	Furanos
PHA	Polihidroxialcanoatos
RAR	Refinarias de Açúcar Reunidas
SBFCNC	Sugarcane Bagasse Fiber Cellulose Nanocrystals
SCBA	Sugar Cane Bagasse Ash
SCSA	Sugar Cane Straw Ash

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral e Objetivos

O trabalho de dissertação aqui apresentado resulta de um estágio empresarial realizado na empresa RAR – Refinarias de Açúcar Reunidas, no departamento de Sistema de Gestão Integrado – Laboratório. O período de estágio foi compreendido entre 4 de dezembro de 2023 a 31 de julho de 2024.

A gestão eficiente de recursos e a sustentabilidade ambiental estão no centro das agendas mundiais nos últimos anos. A economia circular (EC) é uma abordagem inovadora e necessária para fazer face à crescente produção de resíduos e ao uso insustentável dos recursos naturais. Ela propõe uma mudança para um modelo económico circular que prioriza a reutilização, reciclagem e regeneração de bens em vez do modelo linear tradicional baseado em "extrair, usar e descartar". No contexto industrial, a produção de resíduos é um grande problema para as empresas devido às oportunidades desperdiçadas de recuperação de valor e às consequências negativas para o meio ambiente. Para além disso, a gestão de resíduos industriais enfrenta desafios complexos, incluindo a necessidade de conformidade com regulamentações ambientais rigorosas, a minimização de impactos ecológicos e a otimização económica dos processos produtivos. Estas foram algumas das razões pela qual a RAR propôs um tema de estágio ligado à área de valorização de resíduos. A RAR identificou o carbonato de cálcio, derivado das lamas de carbonatação, como um dos resíduos industriais com maior potencial de valorização. A matéria-prima carbonato de cálcio é amplamente utilizada em diversas indústrias, como as de papel, plástico e construção. A potencial reutilização do carbonato de cálcio proveniente das lamas de carbonatação nestes diferentes setores pode

reduzir a necessidade de extração de recursos naturais e diminuir a quantidade de resíduos encaminhados para aterros.

Neste contexto, o objetivo principal desta tese é investigar e desenvolver estratégias eficazes para a valorização do carbonato de cálcio, alinhadas com os princípios da sustentabilidade e da economia circular. Para alcançar este objetivo, foram definidos os seguintes tópicos:

1. Analisar as características químicas e físicas do carbonato de cálcio.
2. Avaliar métodos de processamento e reutilização deste resíduo em diferentes contextos industriais.
3. Examinar a viabilidade económica e ambiental das estratégias de valorização propostas.
4. Identificar potenciais aplicações industriais para o material, promovendo a sua integração em novos ciclos produtivos.

1.2 Apresentação do Local de Estágio

A empresa Refinarias de Açúcar Reunidas S.A., também conhecida por RAR Açúcar, localizada na zona industrial do Porto (Figura 1.2.1), foi onde se realizou o trabalho que está na base da presente dissertação de mestrado.



Figura 1.2.1 Instalações fabris da RAR Açúcar [imagem retirada de www.googlemaps.pt]

Até à década de 60, o setor industrial de refinação de açúcar na região norte de Portugal era composto por nove pequenas refinarias, incapazes de produzir açúcar de qualidade que fosse capaz de satisfazer as exigências do mercado. Em resposta a esta necessidade, em 1962, surgiu a RAR Açúcar, resultante da fusão das nove refinarias existentes, com o objetivo de modernizar e aumentar a produção de açúcar. Após cinco anos de preparação, em 1967, a RAR

Açúcar iniciou suas operações com uma capacidade de 25.000 toneladas por ano (Gomes, 2010; Rodrigues, 2000; Vaz, 2016).

Em 1962, a RAR introduziu mudanças significativas no seu processo de refinação, adotando novas etapas como Carbonatação, Sulfitação e Recuperação, aumentando assim a sua capacidade para 300 toneladas por dia. Nos anos seguintes, a empresa continuou a inovar, implementando sistemas de resinas de permuta iônica para descoloração e estabelecendo uma estação de Evaporação nos anos 80 e um sistema de Cogeração nos anos 90 (Gomes, 2010; Rodrigues, 2000; Vaz, 2016).

Ao longo dos anos, a empresa expandiu as suas operações, adquirindo a Refinaria Angola em 1973, o que aumentou a sua participação de mercado para cerca de 45%. Esta consolidação industrial permitiu melhorias significativas na produção de açúcar, incluindo o aumento da capacidade e a modernização dos processos de fabricação, logística e gestão (Gomes, 2010; Rodrigues, 2000; Vaz, 2016).

Além do seu foco na refinação de açúcar, o Grupo RAR, do qual a RAR Açúcar é parte, diversificou os seus investimentos em diversas áreas, como alimentar, embalagem, imobiliária, serviços e turismo. Este crescimento levou à formação da RAR - Sociedade de Controle (Holding), S.A., que detém, entre outras participações, a da RAR - Refinarias de Açúcar Reunidas, S.A. (Gomes, 2010; Rodrigues, 2000; Vaz, 2016).

Atualmente, a RAR Açúcar é uma empresa líder no mercado, com uma capacidade de produção anual superior a 130.000 toneladas, oferecendo uma variedade de produtos e serviços inovadores. A sua dedicação à qualidade resultou em certificações de Qualidade (NP EN ISO 9001:2008), Ambiental (ISO 14001:2004) e de Segurança Alimentar (NP EN ISO 22000:2005). Além disso, as suas instalações abrangem uma área de 55.000 m², incluindo oficinas de mecânica e elétrica, refinaria, embalagem e armazéns além de laboratórios dedicados ao controlo de processo e qualidade, demonstrando um compromisso contínuo com a excelência e a inovação no setor de refinação de açúcar (Gomes, 2010; Rodrigues, 2000; Vaz, 2016).

1.3 Organização da Tese

Esta tese está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução sobre a empresa onde o estágio foi realizado, bem como o tema e os objetivos propostos para o trabalho. O segundo capítulo expõe os fundamentos que servem de base para

a compreensão do estudo. O terceiro capítulo descreve a parte experimental. No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos, seguidos pela análise e discussão. Finalmente, o quinto capítulo é dedicado às conclusões e às perspectivas futuras.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Processo de Refinação da *RAR Açúcar*

2.1.1 A Cana-de-açúcar e o Açúcar

A *Saccharum officinarum*, mais comumente conhecida como cana-de-açúcar, pertence à família das gramíneas, *Poaceae*¹, uma classificação que partilha com muitas outras culturas agrícolas importantes, como o trigo, o arroz, a aveia, o milho e a cevada (Edde, 2022).

Na produção global de culturas primárias, quatro culturas desempenham um papel significativo, sendo responsáveis por metade da produção total. Estas culturas incluem cana-de-açúcar, milho, trigo e arroz. No período de 2000 a 2021, a cana-de-açúcar destacou-se, contribuindo com aproximadamente 21% da produção agrícola mundial. Apesar da diversidade de culturas cultivadas e colhidas em todo o mundo, em 2021, estas quatro culturas individuais permaneceram como dominantes da produção global de culturas primárias: cana-de-açúcar, representando 20% do total (com 1,9 bilhão de toneladas), milho com 13% (1,2 bilhão de toneladas), trigo e arroz com 8% cada (0,8 bilhão de toneladas cada) (FAO, 2023).

A cana-de-açúcar é amplamente usada para a produção de açúcar e de outros produtos afins. O açúcar comumente conhecido como sacarose ou açúcar de mesa, é um hidrato de carbono “doce”, utilizado mundialmente em diversos produtos do nosso quotidiano.

A sacarose, com fórmula empírica $C_{12}H_{22}O_{11}$, é composta por duas moléculas, glucose e frutose (ambas com fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$), sendo a glucose de maior importância por ser a principal fonte de energia do organismo humano (Quaresma, 2019; Vaz, 2016). Na Figura

¹ *Poaceae* é o nome científico atribuído à família de plantas das angiospermas, ou seja, plantas espermatófitas cujas sementes são protegidas por uma estrutura denominada fruto.

2.1.1 verifica-se a formação do dissacarídeo, sacarose, através da condensação dos monossacarídeos, glucose e frutose.

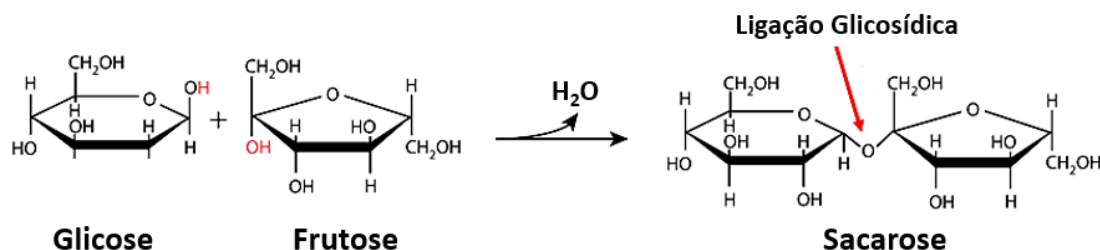


Figura 2.1.1 – Reação de condensação e formação da molécula de sacarose [Andreia, 2019]

A sacarose é considerada um açúcar não redutor devido à participação dos grupos químicos redutores da glucose e da frutose na ligação glicosídica, é altamente solúvel em água e tem um ponto de fusão entre 170-180°C. A ligação glicosídica, embora estável, pode ser hidrolisada por ação enzimática (invertases) ou soluções ácidas (Quaresma, 2019; Vaz, 2016).

Nas plantas, a sacarose é produzida nas folhas, através do processo de fotossíntese, e armazenada no caule e nas raízes, principalmente em gramíneas como a cana-de-açúcar. É principalmente extraída da cana-de-açúcar devido ao maior rendimento do processo industrial em comparação com a beterraba. A extração não altera o produto natural, sendo refinado para obtenção de cristais, visando a remoção de impurezas para produção de um produto alimentar de qualidade (Quaresma, 2019; Vaz, 2016).

2.1.2 Matéria-Prima – Rama de cana-de-açúcar

A matéria-prima essencial no processo de refinação de açúcar é a rama de açúcar, composta por cristais de sacarose amarela acastanhada (corantes naturais), envolvidos por uma película do mesmo composto, e impurezas, tal como é possível observar na Figura 2.1.2 (RAR, 2019a; Vaz, 2016).



Figura 2.1.2 – Conjunto de fotografias da matéria-prima, rama de cana-de-açúcar.

A rama tem a sua principal origem na cana-de-açúcar, resultando da cristalização dos xaropes provenientes das fábricas de cana, onde ocorre a extração e purificação do açúcar contido na planta. Durante este processo, não são realizadas etapas de filtração, o que explica a presença de bagacilho (pedaços de cana moída), areias e outros sólidos na rama, apresentando uma pureza entre 96 e 99% (RAR 2019a). A rama de cana-de-açúcar utilizada na RAR Açúcar é originária de países tropicais e subtropicais. As origens mais comuns incluem países como Fiji, Zimbabwe, Swazilândia, Guiana, Trinidad & Tobago, Malawi, Zâmbia, Cuba, Maurícia, Índia, Brasil, Nepal e Etiópia (RAR 2019a).

2.1.3 Produção de Açúcar Branco

A produção de açúcar branco inicia-se com o transporte de rama. A rama de cana é transportada a granel, por meio de barcos, até o porto de Leixões. Posteriormente, é conduzida em caminhões até a Refinaria, envolvendo tanto o transporte terrestre quanto o marítimo (RAR, 2019a).

A RAR Açúcar tem um processo de refinação de açúcar composto por sete etapas fundamentais, nomeadamente, afinação, carbonatação, descoloração, evaporação, cristalização, centrifugação e secagem, como é possível observar no esquema presente na Figura 2.1.3 (RAR, 2018a).

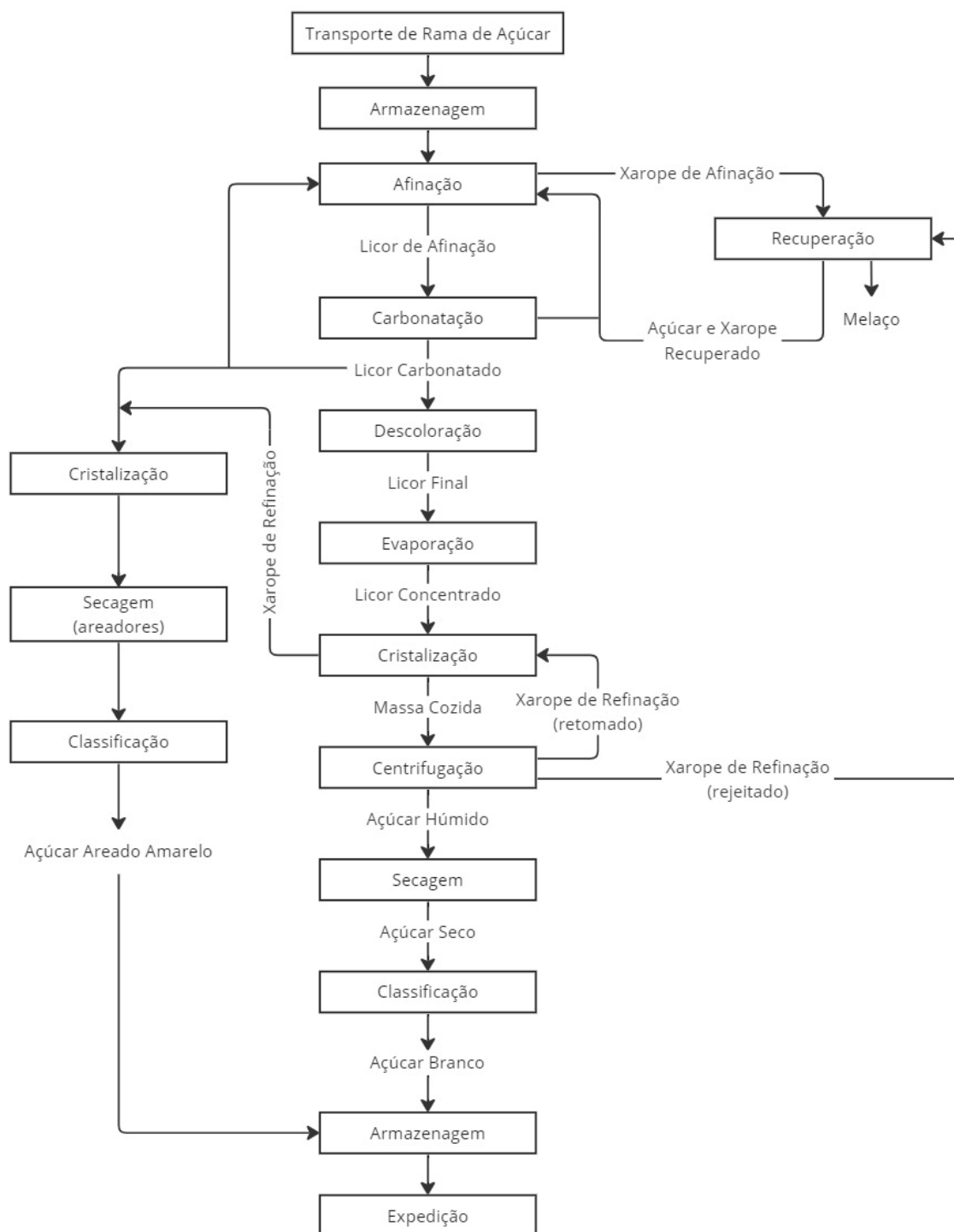


Figura 2.1.3 - Fluxograma geral do processo de refinação do açúcar [adaptado do documento original RAR, 2018a]

2.1.3.1 Afinação

Na etapa de afinação, existem três fases distintas. A primeira fase envolve a preparação da rama, durante a qual esta é transportada e todos os metais presentes são removidos. Em

seguida, a rama passa para a segunda fase, denominada preparação de magma. Nesta fase, a rama de açúcar é cuidadosamente combinada com o xarope de afinação de magma num equipamento chamado amassadora de magma, resultando no magma de afinação. Por fim, a terceira fase, designada centrifugação/dissolvedor, começa. Neste ponto, o magma é submetido à centrifugação em centrífugas específicas, o que separa o açúcar afinado do xarope de afinação (RAR, 2019b).

Após a separação, o açúcar afinado é dissolvido em água doce proveniente de pontos estratégicos da refinaria. Durante este processo, é adicionado o licor de recuperação, que é obtido a partir dos açúcares recuperados por cristalização dos xaropes de afinação e refinação, além dos retornos dos classificadores, secador, peneiras de açúcar areado amarelo, da embalagem, armazéns e devoluções de clientes (RAR, 2019b).

O resultado deste processo é conhecido como licor de afinação. Se necessário, carvão ativado é incorporado no dissolvedor de recuperação para remover a cor, garantindo que o produto final atenda aos padrões desejados de qualidade e aparência (RAR, 2019b).

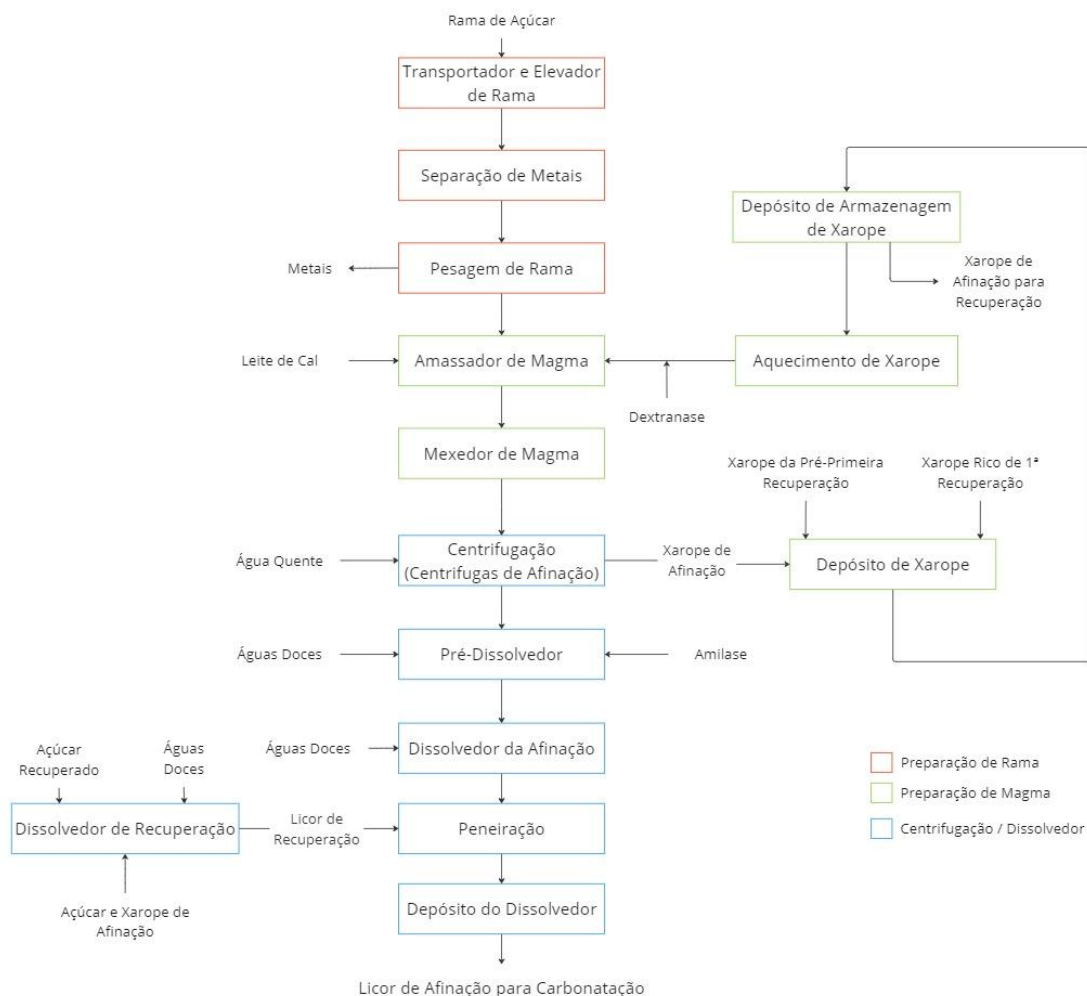


Figura 2.1.4 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Afinação [RAR, 2019b]

2.1.3.2 Carbonatação

O licor de afinação segue da etapa de afinação para a carbonatação, onde passa por um processo meticuloso. Tal como anteriormente, esta etapa é dividida em duas fases. A primeira fase é denominada de mistura de leite de cal da afinação e saturação com gás de carbonatação. Inicialmente, o licor é misturado com leite de cal, uma solução de hidróxido de cálcio em água, e, em seguida, é submetido à carbonatação nos saturadores, também conhecidos como torres de saturação. Durante esta fase, dióxido de carbono, frequentemente denominado gás de carbonatação, é injetado no licor. A injeção provoca uma reação com a cal, resultando na formação de um precipitado de carbonato de cálcio (RAR, 2018b).

A segunda fase refere-se à filtração. O precipitado, juntamente com parte das impurezas presentes no licor de afinação, é separado por meio de filtração, dando origem ao licor carbonatado. Este licor passa por uma segunda fase de filtração, a filtração de segurança,

A filtração ocorre no filtro prensa, resultando não apenas em águas doces reaproveitadas, mas também em lamas da carbonatação. Este processo é essencial para garantir a pureza e a qualidade do licor carbonatado antes de prosseguir para as próximas etapas do processo de refinação (RAR, 2018b).



Na etapa de descoloração, o objetivo é eliminar uma considerável quantidade de compostos responsáveis pela coloração no licor carbonatado. Para alcançar este propósito, o licor é direcionado através de colunas que contêm resinas de permuta iônica. Estas resinas possuem a capacidade de reter os compostos coloridos presentes no licor (RAR, 2018c).

O processo de passagem pelo leito de resinas ocorre em ciclos de tratamento, ao término dos quais as resinas necessitam passar por um procedimento de lavagem e regeneração. Após este processo, as resinas são novamente submetidas à lavagem, ficando prontas para iniciar um novo ciclo de tratamento. O licor resultante da passagem pelas colunas de resinas, denominado licor final, é encaminhado para a secção dos evaporadores. Este procedimento assegura a remoção eficaz das impurezas coloridas, contribuindo para a obtenção de um licor final de alta qualidade (RAR, 2018c).

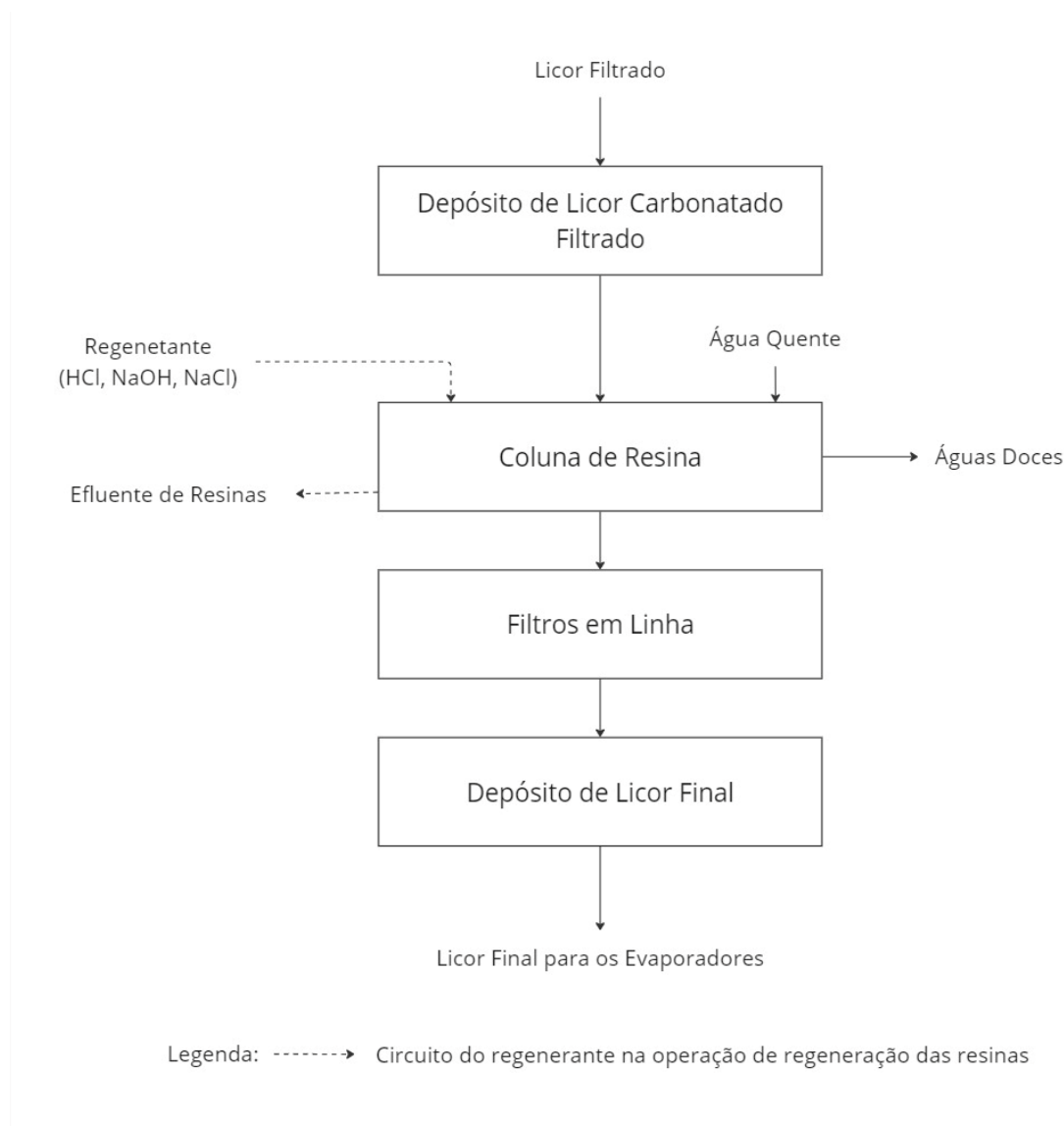


Figura 2.1.6 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Descoloração [RAR, 2018c]

2.1.3.4 Evaporação

Na etapa de evaporação, realiza-se a concentração do licor final, obtido na secção de descoloração, por meio da evaporação da água. O resultado deste processo é o licor concentrado (RAR, 2018d).

Esta operação é conduzida num sistema de evaporadores de duplo efeito. No primeiro efeito, o licor final é aquecido por vapor, utilizando uma calandra de aquecimento. Os vapores gerados desta evaporação são direcionados para alimentar a calandra do segundo efeito, onde a evaporação ocorre sob vácuo. O vácuo necessário é criado por um condensador barométrico (RAR, 2018d).

Entre o condensador barométrico e o evaporador, encontra-se um condensador tubular responsável pelo aquecimento da água e pela recuperação de águas doces. Este processo garante uma eficiente utilização da energia térmica, contribuindo para a sustentabilidade e eficácia do sistema de evaporação (RAR, 2018d).

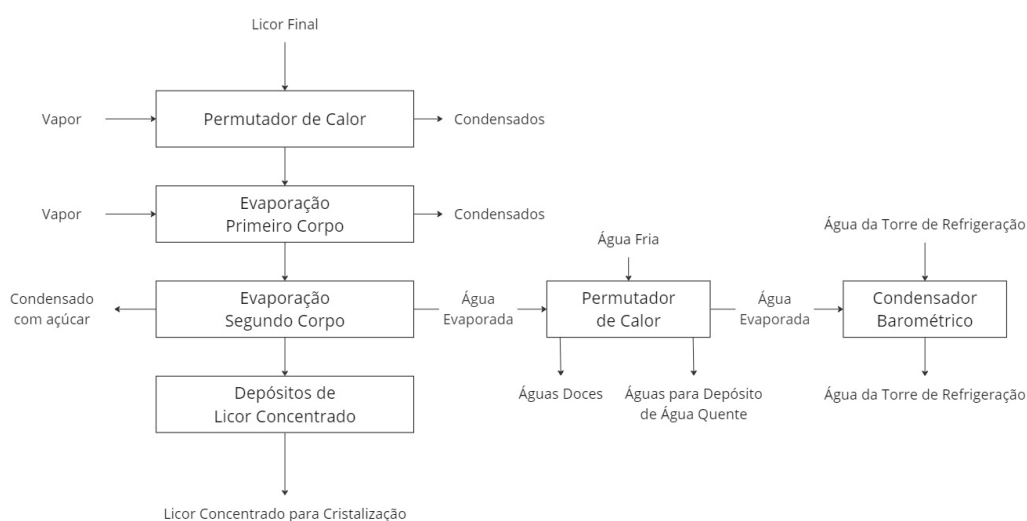


Figura 2.1.7 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Evaporação [RAR, 2018d]

2.1.3.5 Cristalização

Na etapa de cristalização, o açúcar dissolvido tanto no licor concentrado quanto no xarope de refinação passa por um processo de cristalização parcial, resultando uma massa cozida. Esta cristalização é realizada em cristalizadores descontínuos conhecidos como tachos de vácuo. Neste equipamento, o licor é concentrado até atingir um ponto de sobressaturação, momento em que é introduzida uma suspensão de pó de açúcar em álcool, chamada de sementeira (RAR, 2018e).

Após a formação dos cristais, o tacho é alimentado com mais licor ou xarope, dependendo do tipo de açúcar a ser produzido, até atingir o nível de enchimento padrão. Ao final deste processo, obtém-se uma massa cozida, a qual é armazenada nos mexedores de massa cozida até ser submetida à centrifugação nas centrífugas de refinação. Este método de produção assegura a obtenção de cristais de açúcar de alta qualidade e uniformidade, essenciais para o produto final refinado (RAR, 2018e).

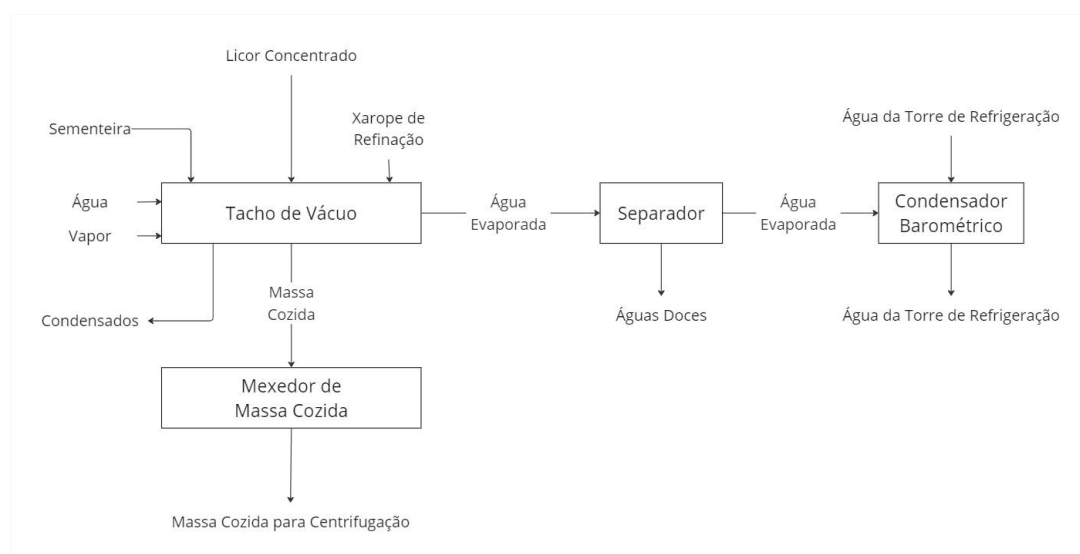


Figura 2.1.8 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Cristalização [RAR, 2018e]

2.1.3.6 Centrifugação

A massa cozida, proveniente do mexedor de massa cozida, é submetida à centrifugação nas centrífugas de refinação, onde ocorre a separação entre o açúcar húmido e o xarope de refinação. Este xarope é composto pela porção líquida presente na massa cozida, somada ao líquido resultante das lavagens do açúcar durante a centrifugação e da água de diluição. O xarope é armazenado e bombeado para os depósitos de armazenagem, sendo posteriormente reaproveitado no processo de cristalização, seja para açúcar branco ou açúcar amarelo. Periodicamente, uma parte do xarope é encaminhada para a secção de recuperação (RAR, 2018f).

O açúcar húmido resultante das centrífugas de refinação é transportado por meio de um sistema composto por transportador-gafanhoto, elevador e tapete de banda até alcançar o secador de açúcar. Este eficiente processo garante a separação precisa dos componentes, permitindo a recuperação do xarope para uso subsequente e o encaminhamento adequado do açúcar húmido para as etapas seguintes do processo (RAR, 2018f).

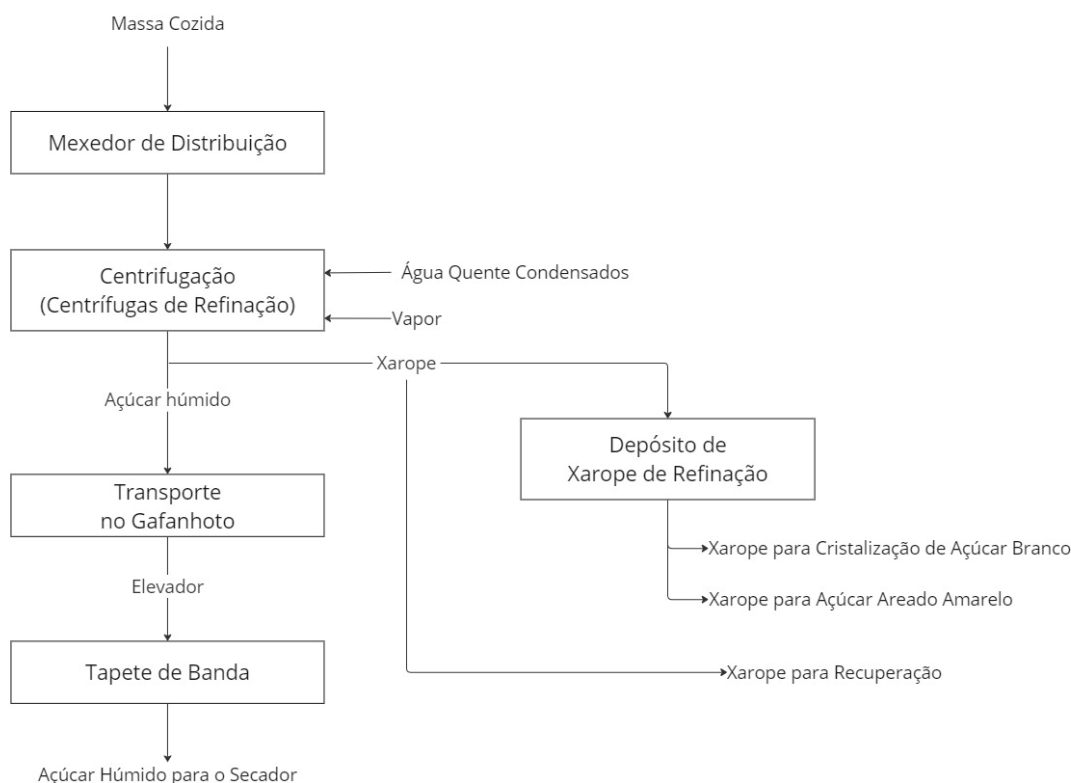


Figura 2.1.9 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Centrifugação [RAR, 2018f]

2.1.3.7 Secagem

O açúcar húmido, proveniente das centrífugas de refinação, passa por um processo de secagem em dois secadores rotativos. Antes de ser classificado e encaminhado para acondicionamento, embalagem ou armazenagem nos silos de enchimento a granel, o açúcar é cuidadosamente seco e arrefecido num permutador de calor (RAR, 2018g).

O ar utilizado para a secagem do açúcar é devidamente filtrado. Os ventiladores posicionados na entrada e na saída do secador garantem o fluxo contínuo do ar. Antes de entrar no topo final do secador, o ar frio é aspirado e passa por filtros. A aspiração, realizada no interior do secador, promove um contato em contracorrente com o açúcar, otimizando o processo (RAR, 2018g).

O ar que deixa o secador é direcionado para um ciclone, onde ocorre a separação do pó de açúcar por aspersão de águas doces quentes. O excesso destas águas doces é enviado para a etapa de afinação. Na zona de saída do açúcar, o secador possui uma rede com a finalidade de remover cristais aglomerados (troças), os quais são reintroduzidos no dissolver de afinação (RAR, 2018g).

A segunda fase de arrefecimento do açúcar acontece num permutador de calor. Este processo utiliza água em circuito fechado, refrigerada por meio de outro permutador de calor. Este último faz a troca de calor com a água armazenada no canal, que é um depósito destinado ao abastecimento de água para a produção. Esta abordagem garante uma eficiente e controlada redução da temperatura do açúcar, preservando a sua qualidade durante todo o processo (RAR, 2018g).

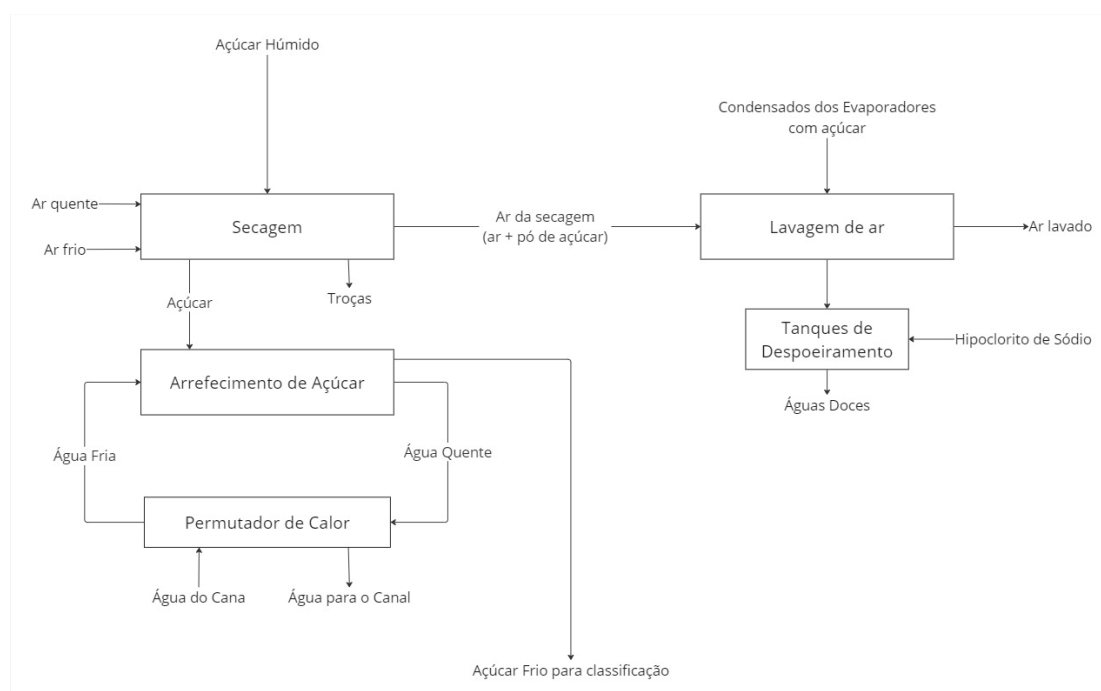


Figura 2.1.10 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Secagem [RAR, 2018g]

2.1.3.8 Classificação

O açúcar seco, após o processo de secagem, passa por uma etapa de classificação antes de ser direccionado para o acondicionamento, embalagem ou armazenamento nos silos a granel. Durante o processo de classificação, o açúcar é separado do pó e dos grãos mais robustos utilizando os classificadores, peneiros compostos por três andares de redes de classificação (RAR, 2018h).

Na rede superior dos classificadores, são retidos os grãos mais robustos, enquanto o pó é direccionado para a rede inferior. Os açúcares retidos na rede intermédia e inferior são combinados, resultando no Açúcar Branco / EU 2 ou Açúcar Branco Extra. Para a produção de açúcar fino, utiliza-se exclusivamente o açúcar retido na rede inferior e o açúcar grosso na rede superior (RAR, 2018h).

Os classificadores operam em ambiente fechado, permitindo a aspiração eficiente do pó que se desprende do açúcar. Da mesma forma, realiza-se a aspiração do pó de açúcar libertado nos sistemas de transporte. Este pó é aspirado e o açúcar é recuperado em ciclones húmidos, enquanto as águas doces resultantes são encaminhadas para o depósito de águas doces de afinação. Este processo garante a qualidade do açúcar final, ao mesmo tempo em que promove a recuperação sustentável dos subprodutos (RAR 2018h).

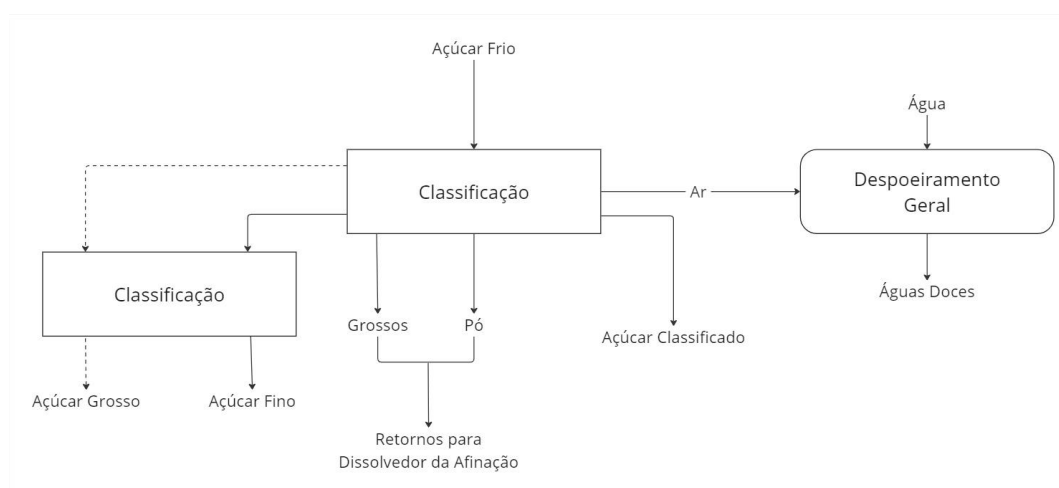


Figura 2.1.11 - Fluxograma da etapa do processo de refinação – Classificação [RAR, 2018h]

2.1.4 Produção de Açúcar Areado Amarelo

A produção do açúcar areado amarelo começa com a combinação de licor carbonatado e xarope de refinação. Esta mistura é então concentrada e cristalizada num tacho de vácuo. Durante este processo, deseja-se formar uma grande quantidade de cristais de pequenas proporções. Para isso, os xaropes são concentrados até que os cristais de açúcar surjam espontaneamente, adicionando uma suspensão de pó de açúcar em álcool, técnica anteriormente referida como sementeira. Assim, obtém-se uma massa de cristais que não aumentam de tamanho, devido ao grande número deles e ao facto de não serem adicionados mais licor e xarope ao tacho, como ocorre na produção de açúcar Branco (RAR, 2017).

A massa cozida resultante é aquecida no próprio tacho de vácuo e depois transferida para os areadores, que são mexedores/cristalizadores de vácuo, onde ocorre uma cristalização adicional e a secagem da massa. Nesta fase, a massa transforma-se em açúcar amarelo húmido. Posteriormente, o açúcar é descarregado dos areadores para o sistema de transporte, onde é seco, arrefecido e peneirado durante o trajeto. Durante a peneiração do açúcar areado amarelo,

são separadas troças de açúcar, que são então retornadas para o dissolvedor da recuperação (RAR, 2017).

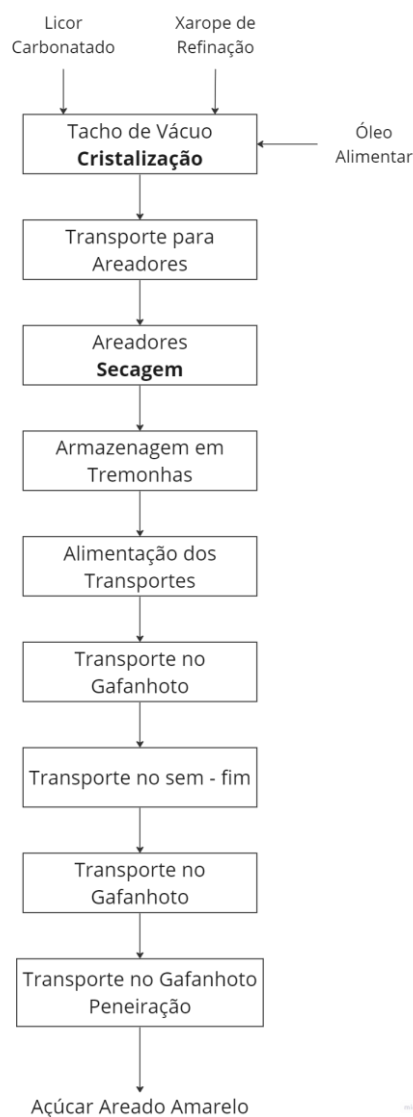


Figura 2.1.12 – Fluxograma da produção de açúcar amarelo areado [RAR, 2017]

2.1.5 Recuperação

2.1.5.1 Pré-Primeira Recuperação

Na etapa pré-primeira, ocorre a cristalização do açúcar a partir dos xaropes de refinação rejeitado e águas doces para recuperação. A formação dos cristais é realizada por meio da adição de sementeira. Ao final de cada processo de cocção, a massa cozida é descarregada num cristizador. A partir deste cristizador, a massa é encaminhada para centrífugas contínuas. O

xarope resultante da centrifugação é então misturado com o xarope de afinação no depósito de receção de xarope das centrífugas de afinação. O açúcar é então transferido para o dissolvedor da recuperação (RAR, 2009a).

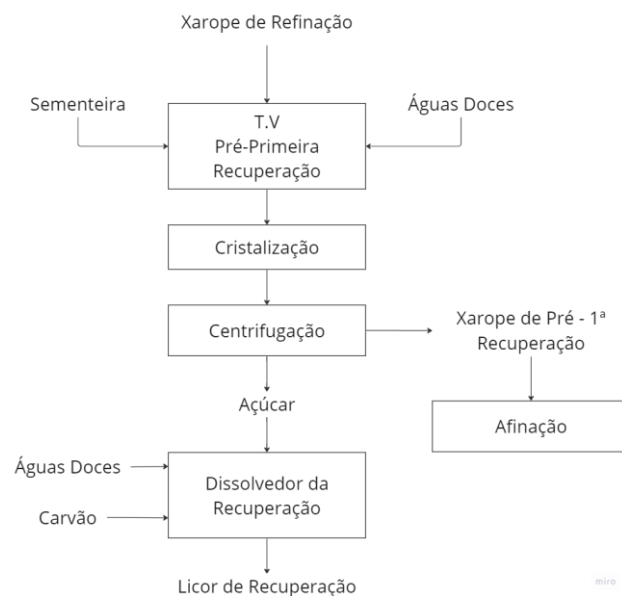


Figura 2.1.13 – Fluxograma do processo de recuperação – Pré-Primeira [RAR, 2009a]

2.1.5.2 Primeira Recuperação

Na etapa primeira recuperação, realiza-se a cristalização da sacarose presente no xarope de afinação. O processo de cozedura é iniciado com a adição do magma de pé-de-cozedura de primeira recuperação, seguido pela incorporação do xarope de afinação. Após o cozimento, a massa resultante é descarregada num cristalizador e posteriormente centrifugada numa centrífuga contínua. O xarope obtido nessa centrifugação é então utilizado para os processos de cozedura da segunda e terceira recuperação, enquanto o açúcar é encaminhado para o dissolvedor da recuperação (RAR, 2009b).

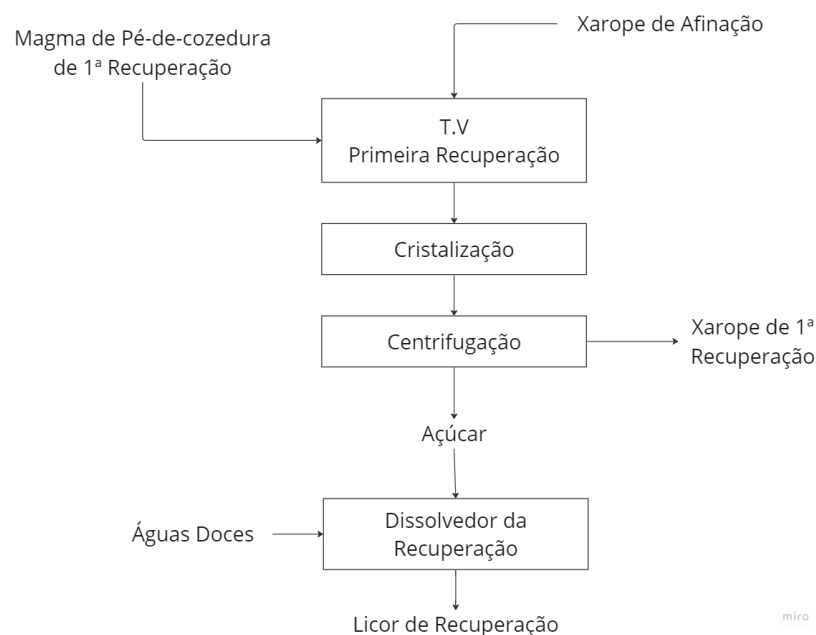


Figura 2.1.14 – Fluxograma do processo de recuperação – Primeira Recuperação [RAR, 2009b]

2.1.5.3 Segunda Recuperação

Na etapa segunda recuperação, realiza-se a cristalização do xarope de primeira recuperação. O processo de cozimento é iniciado com o magma de pé-de-cozedura proveniente de segunda recuperação. Após o cozimento, a massa resultante é descarregada num cristalizador e, em seguida, centrifugada numa centrífuga contínua. O xarope obtido nessa centrifugação é utilizado para os processos de cozimento da terceira recuperação, enquanto o açúcar é enviado para a amassadora de pé-de-cozedura da primeira recuperação, onde é misturado com o xarope de primeira recuperação (RAR, 2009c).

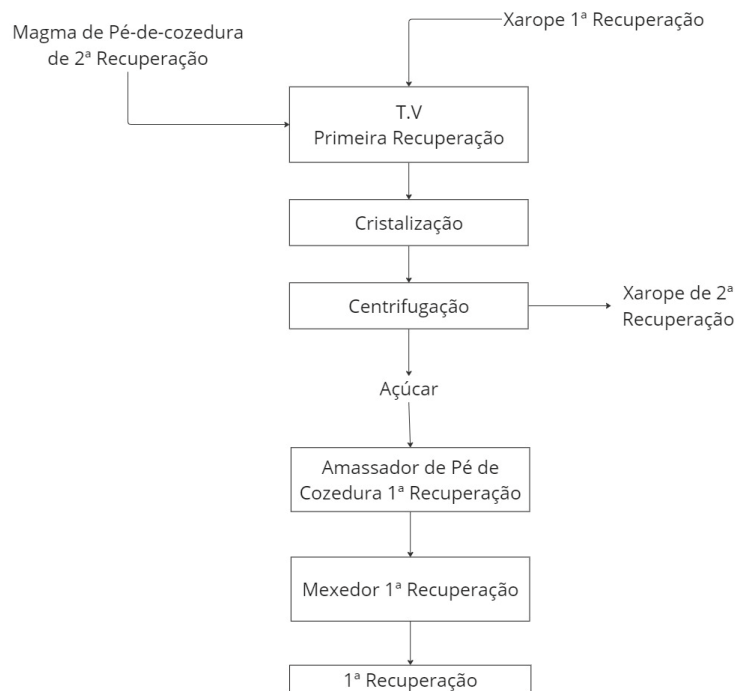


Figura 2.1.15 – Fluxograma do processo de recuperação – Segunda Recuperação [RAR, 2009c]

2.1.5.4 Terceira Recuperação

Na etapa terceira recuperação, realiza-se a cristalização do açúcar presente no xarope de segunda recuperação. Este processo de cristalização é conduzido num tacho de vácuo e em cristalizadores (RAR, 2009d).

O cozimento no tacho de vácuo começa com o xarope de segunda recuperação, e os grãos são formados através da introdução de sementeira. A massa cozida é então transferida para os cristalizadores, onde ocorre uma cristalização por arrefecimento. Quando cristalizadores verticais são utilizados, a massa é reaquecida num aquecedor de magma antes de ser centrifugada numa centrífuga contínua (RAR, 2009d).

O açúcar resultante desta centrifugação é encaminhado para o mexedor de pé-de-cozedura, onde é misturado com o xarope de segunda recuperação. O xarope resultante dessa centrifugação constitui o melaço (RAR, 2009d).

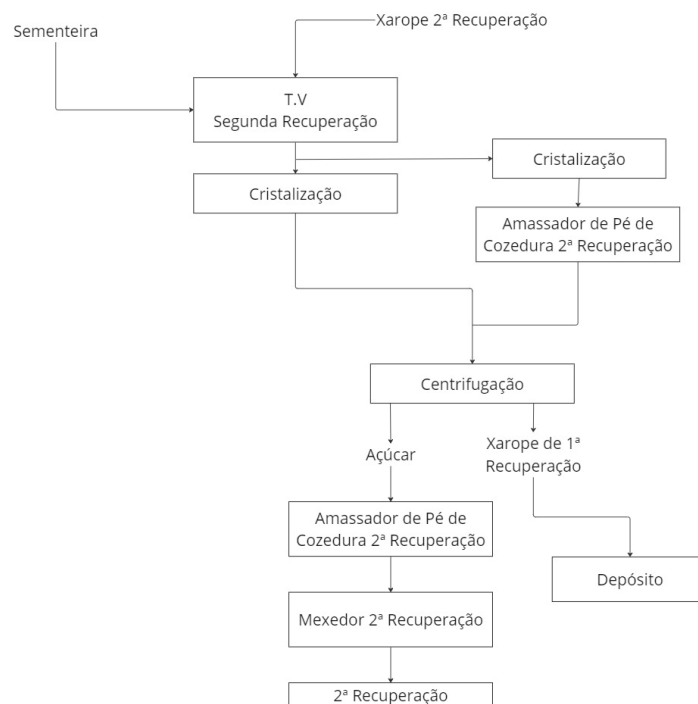


Figura 2.1.16 – Fluxograma do processo de recuperação – Terceira Recuperação [RAR, 2009d]

2.2 Economia Circular e o seu Papel na Indústria do Açúcar

2.2.1 Conceitos de Economia Circular e Bioeconomia

Nas últimas décadas, a abordagem para a gestão de resíduos tem sido linear, assim como a economia, baseada na extração de matérias-primas, nos combustíveis fósseis como fonte de energia, e no aterro como gestão de resíduos (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).

A natureza finita dos recursos deve ser reconhecida. No entanto, os humanos usam todos os recursos biológicos, que a Terra reabastece ao longo de um ano, em questão de meses. Este dia, que ocorre mais cedo a cada ano, é conhecido como o Dia da Superação da Terra e, no passado ano de 2023, deu-se a 2 de agosto (Global Footprint Network, sem data). É importante proteger estes recursos e ter em mente os ciclos da natureza. Portanto, a principal questão é como abordar estas dificuldades (Fernández-Gutiérrez et al., 2022). Neste contexto, nasceu o conceito de economia circular, que ao longo dos anos, tem sido um tópico altamente abordado mundialmente. Este surgiu com o intuito de substituir o então atual modelo de economia linear baseado no crescimento constante e insustentável, assente na utilização limitada de recursos. É de realçar que o conceito de economia circular, devido ao grande número de definições e

abordagens de investigação, é bastante vago (Soliwoda, Wieliczko & Kulawik, 2020; Zhang, Dhir & Kaur, 2022). No entanto, trata-se de um sistema económico que oferece uma alternativa às práticas lineares predominantes de "extrair, usar e descartar", estimulando a criação de novos bens a partir de uma variedade de resíduos / subprodutos, reduzindo assim a necessidade de matérias-primas e a quantidade de resíduos produzidos (Figura 2.2.1). Esta ideia é colocada em prática por meio de métodos como reutilização, reciclagem, entre outros. A economia circular tem vindo a ganhar, recentemente, apoio como uma estratégia para minimizar impactos ambientais e impulsionar a economia (Blomsma & Brennan, 2017; Moraga et al., 2019; Zhang, Dhir & Kaur, 2022).

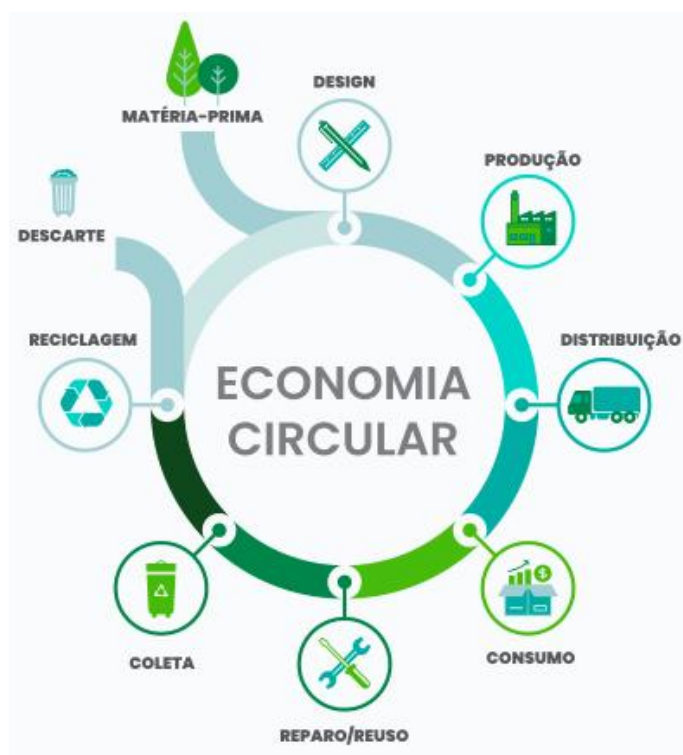


Figura 2.2.1 – Ilustração dos diversos pontos estratégicos da economia circular [Adrielle, 2023]

Para que as comunidades mantenham os seus estilos de vida atuais, atendam às suas necessidades imediatas, diminuam os problemas ambientais e sociais associados à economia linear e limitem o consumo de recursos, a valorização dos biorresíduos na perspetiva da economia circular é essencial (Fernández-Gutiérrez et al., 2022).

Neste contexto, também é essencial destacar o conceito de bioeconomia, que prioriza a utilização de recursos biológicos renováveis para a produção de diversos produtos de alto valor agregado, como alimentos para consumo humano e animal, produtos bioquímicos e bioenergia. O seu principal objetivo é lidar com os desafios das mudanças climáticas, oferecer

uma fonte de carbono sustentável e criar oportunidades económicas, especialmente em áreas rurais. A noção de biorrefinaria desempenha um papel fundamental ao otimizar a conversão da biomassa para alcançar os objetivos estabelecidos pela bioeconomia (Ubando, Felix, & Chen, 2020).

2.2.2 Resíduos Industriais e o Seu Impacto Ambiental

A indústria do açúcar é uma indústria agroalimentar que gera vários resíduos e que não se refere somente à parte da refinação do açúcar. Existem as etapas de colheita e tratamento da cana-de-açúcar que têm lugar antes do processo de refinação onde existe a produção de outros tipos de resíduos. Primeiramente, a cana-de-açúcar é colhida e entregue a unidades de processamento locais. Nesta primeira fase, já é produzido o que se chama de restos de cana-de-açúcar, resíduo deixado nos campos após a colheita mecânica da cana-de-açúcar. Consiste em caules, folhas e topos de cana-de-açúcar, e estima-se que constitua cerca de 18% da matéria seca da planta da cana-de-açúcar (Bhatnagar, Kesari, & Shurpali, 2016; Lee et al., 2023; de Moraes Dutkenfer, Machado & de Oliveira Ribeiro, 2022; de Castro, Alves & Nascimento, 2021; Silalertruksa, Wirodcharuskul & Gheewala, 2022).

Na unidade de processamento, a cana é esmagada, passando por um difusor de água, onde o sumo obtido é cristalizado, transformando-se em rama de açúcar. A fibra que sobra do processo de moagem é chamada bagaço. É um bioproduto lenhocelulósico e consiste em hemicelulose, lenhina, celulose e pequenas quantidades de extrativos e sais minerais. O bagaço é gerado em grandes quantidades, tornando-o um dos principais resíduos da indústria açucareira, que representa cerca de 30% do produto agrícola da cana-de-açúcar, em peso (Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016; Casanova et al., 2023; Lee et al., 2023; Negrão et al., 2021; Pandey et al., 2000; Da Silva et al., 2015).

De seguida, na fase de transporte podem acontecer duas situações. A primeira consiste que a unidade de processamento local faça a própria refinação do açúcar, por isso não é necessário o seu transporte; a segunda consiste no transporte em navios para refinarias internacionais, como é o caso da RAR. Como referido anteriormente, a rama de cana-de-açúcar utilizada na RAR Açúcar é originária de países tropicais e subtropicais. Uma vez chegada à refinaria, esta matéria-prima é então refinada e embalada. No processo de refinação, são filtradas grandes quantidades de rama de açúcar para eliminar impurezas e produzir uma ampla variedade de açúcares (RAR, 2019a).

Durante a refinação é onde ocorre a produção de uma maior quantidade de resíduos, nomeadamente, lamas de carbonatação e melaço. Em muitas partes do mundo, a indústria de açúcar não só produz açúcar como também energia, acrescentando a vinhaça como sendo mais um dos resíduos produzidos por esta indústria (Meghana & Shastri, 2020).

As lamas de carbonatação ou lamas de prensa, também conhecidas como torta de filtro, são um subproduto do processo de filtragem do caldo de cana. É um resíduo sólido rico em matéria orgânica, nutrientes e minerais, caracterizado como amorfo, esponjoso e de cor acastanhado escuro (Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016; Cerri et al., 2022; Ge et al., 2022; Raimondi et al., 2020; Da Silva et al., 2015).

O melaço é um subproduto da produção de açúcar a partir do sumo da cana-de-açúcar, derivado do processo de cristalização. Existem diferentes graus, incluindo o melaço *light*, o robusto e o melaço *blackstrap*, e são caracterizados por níveis variáveis de nutrientes, antioxidantes e sabores. O melaço de cana-de-açúcar é um subproduto líquido viscoso rico em açúcar (teor >43% em peso) que contém água, glucose, polifenóis, vitaminas, cinzas e vestígios de minerais como o potássio, o cálcio e o magnésio (Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016; Botha & von Blottnitz, 2006; González-Torres et al., 2024; Kee et al., 2022; Lee et al., 2023; Molina-Cortés et al., 2020; Walter et al., 2014).

A vinhaça é um efluente aquoso da unidade de destilação da indústria do açúcar, gerado como subproduto da produção de etanol a partir do melaço. É um resíduo líquido rico em matéria orgânica, contendo elevados teores de potássio, cálcio e teores moderados de azoto e fósforo. Com uma carência química de oxigénio (CQO) que varia entre 100.000 e 130.000 mg/L, a vinhaça pode levar à contaminação do solo e da água se não for tratada corretamente, devido às suas elevadas concentrações de micronutrientes e compostos orgânicos (Ferreira et al., 2022; Pinheiro et al., 2020; Silalertruksa, Pongpat & Gheewala, 2017; Silalertruksa, Wirodcharuskul & Gheewala, 2022; Da Silva et al., 2015; Vitor et al., 2022).

2.2.3 Desafios e Oportunidades na Indústria do Açúcar

A indústria da produção de açúcar enfrenta desafios significativos relativamente à gestão de resíduos. Este setor gera uma variedade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos ao longo de todo o processo produtivo, desde a colheita da cana-de-açúcar até à etapa final de refinação. As grandes quantidades de resíduos criam problemas de eliminação e aumentam o risco de poluição ambiental do ar, do solo e da água. Além disso, a gestão ineficiente destes

resíduos pode resultar em sanções regulatórias e comprometer a sustentabilidade ambiental da produção de açúcar (Gbadeyan et al., 2024; Raimondi et al., 2020).

Os principais países produtores de açúcar no mundo variam ao longo dos anos devido a fatores como condições climáticas, políticas, tecnologia agrícola e procura global. Atualmente, os principais produtores de açúcar são Brasil, Índia, China e Tailândia. Com esta liderança vêm desafios associados (FAO, 2023).

Um desafio, enfrentado pelos maiores produtores de açúcar, é a proibição da queima de restos de cana-de-açúcar nos campos, uma prática tradicionalmente utilizada para facilitar a colheita e eliminar pragas. A queima gera cinzas volantes, que reduzem significativamente a diversidade dos microrganismos do solo, e emite quantidades consideráveis de gases de efeito de estufa e poluentes atmosféricos. A proibição desta prática representa um desafio para os produtores, que precisam de encontrar alternativas para a gestão de resíduos deixados nos campos. No entanto, este desafio apresenta também uma oportunidade significativa, pois surgiram práticas agrícolas mais sustentáveis, como a colheita mecanizada e a utilização da palha de cana como matéria-prima para a produção de biogás e bioetanol. A colheita mecanizada não só reduz as emissões de poluentes, como também melhora a eficiência do processo de colheita. Além disso, a palha deixada no campo pode ser utilizada como cobertura para ajudar a preservar a humidade do solo e reduzir a erosão (Antunes et al., 2022; Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016; Bordonal et al., 2018).

Outro desafio é a produção de enormes quantidades de bagaço de cana-de-açúcar, especialmente em países em desenvolvimento. Frequentemente, este bagaço é queimado ou destruído de forma ineficiente, poluindo o ambiente. No entanto, é uma matéria-prima promissora e economicamente viável para a fabricação de bioenergia. Pode ser utilizado como combustível em caldeiras para gerar vapor e eletricidade, promovendo a redução da dependência de combustíveis fósseis (Antunes et al., 2022; Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016; Chandel & da Silva, 2013).

Além disto, o negócio da cana-de-açúcar produz muita lama de prensa e cinzas da caldeira, e livrar-se destes subprodutos é um grande problema. Porém, podem ser utilizados como fertilizantes ou condicionadores de solo, fechando o ciclo de nutrientes e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Bernardino et al., 2018; Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016).

Outro exemplo de oportunidades, são os efluentes líquidos, quando tratados adequadamente, podem ser reutilizados na irrigação agrícola ou até mesmo na própria lavagem

da cana-de-açúcar, reduzindo o consumo de água doce e contribuindo para a conservação de recursos hídricos. Além disso, tecnologias de tratamento avançadas, como biodigestores anaeróbicos, permitem a recuperação de biogás a partir destes efluentes, proporcionando uma fonte adicional de energia renovável (Bordonal et al., 2018; Mehrizi et al., 2023).

Portanto, a adoção de práticas de gestão de resíduos mais eficientes e sustentáveis não apenas diminui os impactos ambientais negativos, mas também abre caminho para a exploração de novas oportunidades económicas e operacionais na indústria de produção de açúcar. A inovação e o investimento em tecnologias limpas são cruciais para transformar os desafios de gestão de resíduos em vantagens competitivas, promovendo uma produção de açúcar mais sustentável e integrada aos princípios de economia circular (Freitas et al., 2021; Gbadeyan et al., 2024).

2.3 Importância da Valorização de Resíduos na Sustentabilidade

2.3.1 Valorização de Subprodutos / Bioprodutos

A descrição do processo de fabricação de açúcar revela a geração de diversos produtos que têm potencial para se transformar em matérias-primas renováveis e serem valorizados como subprodutos. Esta otimização possibilita a redução da poluição desde a fonte, contribuindo para a proteção ambiental e a diminuição dos custos relacionados à água e energia. Abaixo, estão resumidos os subprodutos do processo de fabricação de açúcar e casos de estudo sobre possíveis valorizações destes resíduos (Ahmed, Souad & Tijani, 2014).

2.3.1.1 Restos de cana-de-açúcar

Os restos de cana-de-açúcar referem-se às partes que sobram e que são deixadas após a colheita da cana-de-açúcar, como folhas, caules, palha e outros materiais vegetais (Panosso et al., 2012). Existem inúmeras oportunidades de utilização sustentável oferecidas por estes restos de cana-de-açúcar. Podem ser utilizados para gerar calor e eletricidade, produzir biocombustíveis e melhorar o abastecimento de energia renovável. Na agricultura, a palha pode ser utilizada como material de cobertura vegetal para melhorar a humidade do solo e a retenção de nutrientes, enquanto os restantes resíduos da cana-de-açúcar podem ser retidos na superfície do solo para reduzir as emissões de gases e melhorar a saúde do solo. Além disto,

estes resíduos podem ser convertidos em produtos químicos e polímeros através de processos de fermentação microbiana, constituindo um recurso valioso para as biorrefinarias. Outras utilizações incluem a cama para animais e a compostagem (Ball-Coelho et al., 1993; Carvalho et al., 2017; Franco et al., 2013; Lee et al., 2023; Meier et al., 2006; Dutenkefer, Machado & Ribeiro, 2022; Panosso et al., 2012; Silalertruksa, Wirodcharuskul & Gheewala, 2022).

Por exemplo, Mayer et al. (2020) destacaram como fertilizante natural, que se degrada durante o ciclo da cultura, auxiliando no controlo de ervas daninhas, aumentando a concentração de nutrientes e reduzindo a erosão.

Outro exemplo de estudo de valorização de restos de cana-de-açúcar, é a incorporação de cinza de palha de cana-de-açúcar em betão. Da Silva et al. (2021) analisaram o comportamento mecânico e hidráulico do betão permeável contendo cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA, sigla em inglês) e cinza de palha de cana-de-açúcar (SCSA, sigla em inglês) em diferentes proporções de mistura. Concluíram que, o betão permeável com 10 % de SCSA apresentou bons resultados em termos de resistência mecânica e comportamento hidráulico no estudo.

2.3.1.2 Bagaço

Globalmente, o bagaço de cana-de-açúcar representa uma oportunidade significativa para o desenvolvimento sustentável e o crescimento económico da indústria açucareira (Negrão et al., 2021).

O bagaço é um recurso renovável valioso que pode ser utilizado para várias aplicações. A sua elevada disponibilidade e baixo custo tornam-no uma matéria-prima atrativa para ser convertido em biocombustíveis, papel e alimentação animal, e a sua biomassa lenhocelulósica pode ser utilizada para produzir produtos de valor acrescentado, como a celulose. Além disso, o bagaço pode ser utilizado como matéria-prima para produtos químicos e industriais, ou como um reservatório de energia solar (Abas et al., 2020; Abo et al., 2019; de Castro, Alves & Nascimento, 2021; Goyal & Kaur 2022; Lim et al., 2021; Mayer et al., 2020; Pandey et al., 2000; Zang, Martins & Da Fonseca-Zang, 2018). Por exemplo, Pinheiro *et al.* (2020) investigaram a possibilidade de o bagaço ser uma fonte potencial de carbono para a produção de lacases. As lacases são biocatalisadores pertencentes a um grupo de enzimas capazes de degradar a lenhina presente nos resíduos lenhocelulósicos. Produzidas por fungos como *Trametes versicolor*, estas enzimas desempenham um papel crucial em diversos processos industriais, como a produção de bioetanol e nas indústrias de papel e celulose, entre outras. No contexto

do estudo, o bagaço de cana-de-açúcar foi investigado como uma das fontes indutoras para aumentar a produção de lacase por *Trametes versicolor*. Utilizado como fonte de carbono no meio de crescimento, o bagaço estimula a produção de enzimas no bioprocessamento. Os resultados indicaram que o bagaço, especificamente o bagaço de cevada e o bagaço de cana-de-açúcar, serviram como fontes de carbono eficazes para induzir a produção de lacase de *Trametes versicolor*. O estudo demonstrou que o bagaço, quando utilizado em combinação com outros substratos, como a vinhaça e os resíduos de descaroçamento de algodão, contribuiu para um aumento significativo na produção de lacase. A utilização do bagaço no meio de cultura resultou em rendimentos enzimáticos superiores, evidenciando seu potencial como uma valiosa fonte de carbono para a produção de lacase (Pinheiro et al., 2020).

Khoo, Chow & Ismail (2018) exploraram as potenciais aplicações do bagaço em diversos domínios, como a recuperação ambiental, a ciência dos materiais e a produção de biocombustíveis, utilizando métodos inovadores de pré-tratamento e aproveitando a sua fração de celulose para produtos de valor agregado. Os resultados do estudo incluíram o isolamento bem-sucedido da fibra de celulose, a melhoria das propriedades mecânicas em compósitos poliméricos e o potencial de adsorção de metais pesados. As conclusões sublinharam a importância do tratamento químico e da função dos nanocristais de celulose de fibra de bagaço de cana-de-açúcar (SBFCNC, sigla em inglês) para melhorar a sua capacidade de reforço em compósitos poliméricos. Sugeriram também que futuras pesquisas se concentrem na capacidade de processamento dos compósitos reforçados com bagaço de cana-de-açúcar e SBFCNC em diversas condições operacionais (Khoo, Chow & Ismail, 2018).

2.3.1.3 Lamas de Carbonatação

As lamas de carbonatação são um recurso valioso com muitas utilidades. Como são ricas em nutrientes, são um excelente fertilizante ou condicionador de solo para culturas agrícolas e horticulturas, promovendo a agricultura sustentável e melhorando a saúde do solo, a produtividade das culturas e a integridade do ecossistema. Ao transformar este produto residual em fertilizantes orgânicos, é possível economizar dinheiro na produção agrícola e, ao mesmo tempo, melhorar o arejamento do solo, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes. Para além destas utilidades, também podem ser usadas no fabrico de cimento, tintas, agentes espumantes e até na fabricação de cera (Bhatnagar, Kesari & Shurpali, 2016; Cerri et al., 2022; Ge et al., 2022).

As lamas de carbonatação quando secas, devido à sua elevada percentagem de compostos combustíveis, também podem ser usadas para produzir energia, sendo uma boa fonte de biogás (Bhatnagar, Kesari, and Shurpali 2016).

Raimondi *et al.* (2020) estudaram o uso potencial da lama de carbonatação como material reativo para a remoção do catião de cádmio (Cd^{2+}) através de métodos de adsorção. O estudo destacou as características promissoras de adsorção, incluindo uma área de superfície específica elevada, e considerou a possibilidade de remoção do ião após a sua utilização. A lama de carbonatação demonstrou uma eficiência significativa na remoção de Cd^{2+} , reduzindo entre 79 e 97%, dependendo da concentração inicial. O processo de adsorção foi irreversível, indicando interações químicas fortes entre o Cd^{2+} e a lama de carbonatação (Raimondi *et al.*, 2020).

2.3.1.4 Melaço

O melaço é um subproduto valioso da transformação da cana-de-açúcar, com um elevado teor de açúcar e uma composição nutritiva que o torna adequado para processos de fermentação, como a produção de levedura de padeiro e produtos farmacêuticos. Tem potenciais utilizações na alimentação animal, na produção de biocombustíveis e como fonte de compostos antioxidantes para aplicações agroindustriais. O melaço pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de etanol, fornecendo um produto energético alternativo, e também pode ser utilizado em várias indústrias, como a produção de bebidas alcoólicas (Botha & von Blottnitz, 2006; Lee *et al.*, 2023; Molina-Cortés *et al.*, 2020; Walter *et al.*, 2014).

Um exemplo de valorização do melaço é a sua utilização como fonte de carbono renovável para a produção de bioprodutos como polihidroxialcanoatos (PHA) e biossurfactantes. Kee *et al.* (2022) tiveram como principal objetivo deste estudo explorar a produção de PHA e biossurfactantes utilizando resíduos agroindustriais como fontes de carbono, como o melaço, além de fornecer informações sobre a fermentação microbiana desses biomateriais para futuras direções. Os resultados mostraram que o melaço tem um alto teor de açúcar, consistindo principalmente de sacarose (41%), glicose (6,7%) e frutose (3,2%), além de outros promotores de crescimento, como vitaminas e biotina. O melaço é rico em açúcar, proteínas, aminoácidos e microelementos como Mg, P e K, tornando-se uma valiosa fonte alternativa de carbono para fermentações em escala industrial (Kee *et al.*, 2022).

Outro exemplo é o potencial do melaço de cana-de-açúcar como fonte de carbono para a produção de exopolissacarídeos (EPS), estudo conduzido por González-Torres *et al.* (2024). Os

EPS são polímeros produzidos por microrganismos através da hidrólise e subsequente polimerização da sacarose. Eles são utilizados na indústria alimentícia e de bebidas como edulcorantes e prebióticos devido ao seu baixo teor calórico e potenciais benefícios para a saúde. O principal objetivo deste estudo foi investigar os fatores que influenciam a produção de EPS pela estirpe de levedura indígena *Suhomyces kilbournensis*. O estudo se concentrou na otimização das condições do processo, como fontes de carbono e nitrogênio, para aumentar a produção de EPS para aplicações industriais. Os resultados obtidos com a utilização de melaço como fonte de carbono mostraram que a concentração mais elevada de EPS alcançada foi de 44,33 g/L quando foram utilizados 400 g/L de melaço. Além disso, o rendimento máximo obtido foi de 4,46 g/L, o que foi 10 vezes maior em comparação com a utilização de sacarose a uma concentração de 550 g/L. O estudo também revelou uma relação direta entre a concentração de melaço e a produção de EPS, com um aumento da concentração conduzindo a uma maior produção de EPS até atingir 400 g/L, após o que diminuiu proporcionalmente. Em conclusão, o estudo produziu com sucesso levedura a partir da nova estirpe *Suhomyces kilbournensis*, com o melaço a 400 g/L apresentando a maior produção de EPS. Os resultados indicaram que altas concentrações de melaço como fonte de carbono podem aumentar significativamente a produção de EPS, tornando-o uma matéria-prima económica para aplicações industriais (González-Torres et al., 2024).

2.3.1.5 Vinhaça

A vinhaça é um subproduto valioso da transformação da cana-de-açúcar que pode ser utilizado de várias formas. O seu elevado teor de matéria orgânica torna-a um fertilizante eficaz e rico em nutrientes e um condicionador do solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e melhorando a retenção de humidade no solo, a matéria orgânica, aumentando o crescimento das culturas e promovendo práticas agrícolas sustentáveis. A vinhaça também pode ser bio-digerida para produzir biometano e biogás, ou como matéria-prima para a recuperação e produção de produtos de valor acrescentado, como o hidrogénio. As oportunidades para a vinhaça também incluem a exploração de aplicações inovadoras na agricultura e nos processos de biorefinaria (Cerri et al., 2022; Ferreira et al., 2022; Rossetto et al., 2022; Santos Júnior et al., 2023; Silalertruksa, Pongpat & Gheewala, 2017; Silalertruksa, Wirodcharuskul & Gheewala, 2022; de Vasconcelos et al., 2012; Vitor et al., 2022; Volpi et al., 2022; Zang, Martins & Da Fonseca-Zang, 2018).

Santos Júnior *et al.* (2023) avaliaram o potencial de produção de energia a partir da biomassa no Nordeste brasileiro, com foco em fontes tradicionais e não tradicionais de biomassa. O estudo concluiu que a vinhaça, um subproduto das torres de destilação de etanol de primeira geração (1G), possui um potencial significativo para a produção de biogás. Foi observado que 1 m³ de vinhaça poderia gerar entre 10 e 26,24 m³ de biogás, com uma média de 18,2 m³. Estes resultados indicam que a vinhaça pode ser efetivamente utilizada como um recurso valioso para a produção sustentável de biogás, contribuindo de maneira significativa para a cadeia de fornecimento de energia (Santos Júnior et al., 2023).

Molina-Cortés *et al.* (2020) avaliaram o comportamento antioxidante de extratos aquosos de melaço e vinhaça de cana-de-açúcar, com o intuito de explorar seu potencial como agentes antiproliferativos em contexto celular. O estudo teve como objetivo identificar compostos bioativos com capacidade antioxidante nestes subprodutos, contribuindo para sua utilização em diversas aplicações e potencialmente reduzindo os impactos ambientais e económicos associados à sua eliminação. Os resultados indicaram que a vinhaça apresentou melhores propriedades antioxidantes em comparação com o melaço, devido à sua maior concentração de compostos fenólicos totais. Isto assinala seu potencial como uma fonte valiosa de compostos bioativos. Em conclusão, o estudo sugeriu que a vinhaça poderia ser reutilizada a partir de resíduos industriais para a produção de produtos com valor comercial, devido ao seu elevado teor de fenólicos totais e capacidade antioxidante, contribuindo para o uso eficiente dos subprodutos da cana-de-açúcar e potencialmente a criação de novos produtos (Molina-Cortés et al. 2020).

2.3.2 Práticas de Valorização Aplicadas na RAR Açúcar

A RAR Açúcar já tem implementadas várias estratégias de reaproveitamento, como por exemplo:

- **Reutilização de Águas Doces:** As águas doces produzidas durante a refinação, provenientes de etapas como a carbonatação e a centrifugação, são transportadas para a etapa de afinação, entrando no sistema através dos dissolvedores de recuperação e afinação, bem como no pré-dissolvedor.
- **Reutilização de Dióxido de Carbono:** O dióxido de carbono (CO₂) produzido nas caldeiras é aproveitado na etapa de carbonatação como fonte direta de CO₂.

- Reprocessamento de Açúcar Rejeitado: Todo o açúcar que não atende aos padrões, rejeitado ou devolvido, é reprocessado, entrando novamente como matéria-prima no sistema.
- Aproveitamento de Condensados de Vapor: Os condensados de vapor, formados nas diferentes zonas de troca de calor da refinaria, são encaminhados para várias partes do processo. Dependendo da sua pureza, eles são reintroduzidos nas caldeiras e no processo. Toda a água adicionada ao processo tem origem nos condensados.

2.4 Processos de Valorização do Carbonato de Cálcio

2.4.1 Matéria-prima Carbonato de Cálcio: Propriedades e Aplicações

O carbonato de cálcio (CaCO_3) é um composto químico constituído por um átomo de cálcio, um átomo de carbono e três átomos de oxigénio (Figura 2.4.1). Pode existir como um cristal incolor ou como um pó branco. É o principal componente do calcário, existe em rochas sedimentares e minerais sob a forma de mármore e giz, e pode também ser encontrado em sedimentos marinhos. Além disso, encontra-se numa grande variedade de seres vivos (Britannica 2024; CAMEO n.d.; Niu et al. 2022).

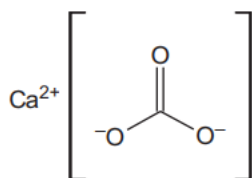


Figura 2.4.1 – Estrutura química do CaCO_3 (Al Omari et al. 2016).

Existem três formas minerais de carbonato de cálcio encontradas na natureza: vaterite, aragonite e calcite. A calcite é um polimorfo com estrutura hexagonal e apresenta estabilidade à maioria das pressões e temperaturas. É um componente significativo de calcários, margas, travertinos, veios de calcite, a maioria dos depósitos de cavernas, muitos mármore, carbonatitos e alguns portadores de minério (Bessler and Rodrigues 2008; Britannica 2024; Dante 2016; Niu et al. 2022). A aragonite ortorrômbica do carbonato de cálcio, embora seja geralmente encontrada na natureza, é metaestável à temperatura e pressão normais e transforma-se facilmente em calcite. A forma hexagonal do carbonato de cálcio conhecida

como vaterite é um mineral bem mais escasso e transforma-se em calcite, aragonite ou ambas (Bessler and Rodrigues 2008; Britannica 2024; Niu et al. 2022).

O carbonato de cálcio é um material versátil e amplamente utilizado em diversas indústrias devido às suas propriedades únicas. As suas aplicações vão desde a construção civil até a indústria farmacêutica, passando por papel, plásticos, tintas e tratamento de água, destacando a sua importância económica e ambiental (Mattila and Zevenhoven 2014; Saulat et al. 2020; Tegethoff, Rohleder, and Kroker 2001).

Uma das principais aplicações do carbonato de cálcio é então na indústria de construção. Utilizado como material de enchimento, ele é um componente essencial na fabricação de cimento, betão e argamassas. A sua adição melhora a resistência mecânica e a durabilidade dos produtos de construção (Jin et al. 2024; Saulat et al. 2020).

Na indústria de papel, o carbonato de cálcio é utilizado como um agente de revestimento e enchimento. Ele proporciona uma superfície mais lisa e branca ao papel, melhorando a qualidade de impressão e a opacidade. Além disso, a substituição de outros materiais de enchimento por carbonato de cálcio pode reduzir os custos de produção e aumentar a eficiência do processo de fabricação de papel (Tegethoff, Rohleder, and Kroker 2001).

A indústria de plásticos também beneficia do uso de carbonato de cálcio, onde ele é utilizado como aditivo em polímeros para melhorar propriedades como rigidez, resistência ao impacto e estabilidade dimensional. O uso de carbonato de cálcio em plásticos pode reduzir o custo dos materiais, já que ele é um enchimento económico, e também contribuir para a sustentabilidade ao permitir a utilização de materiais reciclados (Tegethoff, Rohleder, and Kroker 2001).

Na indústria de tintas, o carbonato de cálcio é utilizado como pigmento branco e agente de enchimento. Ele melhora a opacidade, brilho e dispersão das tintas, proporcionando uma aplicação mais uniforme e económica. Além disso, a sua utilização ajuda a controlar a viscosidade e a densidade das tintas, otimizando o processo de aplicação e a qualidade do acabamento (Tegethoff, Rohleder, and Kroker 2001).

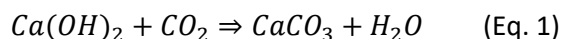
Outra aplicação significativa do carbonato de cálcio é na indústria farmacêutica e de alimentos. No setor farmacêutico, ele é utilizado como excipiente em medicamentos e como suplemento dietético de cálcio, essencial para a saúde óssea e cardiovascular. Na indústria alimentar, o carbonato de cálcio é adicionado a produtos como farinha, leite em pó e bebidas

para enriquecer o conteúdo de cálcio e melhorar a qualidade nutricional dos alimentos (Britannica 2024; Tegethoff, Rohleder, and Kroker 2001).

Além destas aplicações, o carbonato de cálcio também desempenha um papel importante na indústria química como agente neutralizante em processos de tratamento de água e efluentes. Ele ajuda a controlar o pH e a remover impurezas, contribuindo para a proteção ambiental e a sustentabilidade dos recursos hídricos (Mallakpour, Tabesh, and Hussain 2023; Tegethoff, Rohleder, and Kroker 2001).

2.4.2 Resíduo Carbonato de Cálcio

A refinação do açúcar envolve várias etapas críticas para garantir a remoção de impurezas e a produção de açúcar de alta pureza. Uma dessas etapas é a carbonatação, um processo químico no qual o dióxido de carbono (CO_2) é injetado através de um caldo de açúcar previamente tratado com leite de cal (hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2). Esta reação resulta na formação de carbonato de cálcio, que desempenha um papel fundamental na purificação do açúcar. Portanto, durante a carbonatação, o leite de cal adicionado ao caldo de açúcar reage com o dióxido de carbono, formando carbonato de cálcio e água de acordo com a reação presente na Equação 1 (RAR 2018b).



O carbonato de cálcio precipitado atua como um agente de clarificação, capturando e coagulando impurezas suspensas e coloidais presentes no caldo de açúcar. Estas impurezas incluem proteínas, corantes naturais, ácidos orgânicos e partículas finas que podem afetar a cor e a pureza do açúcar refinado (RAR 2018b).

Uma vez formado, o carbonato de cálcio, junto com as impurezas adsorvidas, é removido por sedimentação e filtração. Este processo não só melhora a qualidade do açúcar, mas também aumenta a eficiência do processo de refinação, resultando num produto final mais branco e puro (RAR 2018b).

2.4.3 Estudos de Casos de Implementação da Valorização do Carbonato de Cálcio na Indústria do Açúcar

A valorização do carbonato de cálcio na indústria do açúcar tem se mostrado uma prática eficaz tanto para a sustentabilidade ambiental quanto para a eficiência económica.

Vários estudos de casos demonstram como a implementação de técnicas para reaproveitamento do carbonato de cálcio pode trazer benefícios significativos. A seguir, são descritos alguns desses casos:

- O estabelecimento industrial de São Martinho, Brasil, implementou um sistema de reaproveitamento do carbonato de cálcio formado durante o processo de carbonatação. Nesta empresa, o carbonato de cálcio precipitado é filtrado e reutilizado como corretivo de solo agrícola. Esta prática não apenas reduz a necessidade de rejeitar resíduos, mas também melhora a qualidade do solo, promovendo uma agricultura mais sustentável (São Martinho 2021, 2022).
- A Raízen, São Paulo, Brasil, uma das principais produtoras de açúcar e etanol no Brasil, está a implementar o uso das lamas de prensa em operações agrícolas, sendo utilizadas como adubo organomineral em grande parte dos seus campos, e como um componente essencial no processo de sua planta de biogás. Esta inovação desempenha um papel crucial no projeto sustentável da empresa (Raízen 2020, 2022).
- Bajaj Hindusthan Sugar Ltd, Índia, uma das maiores produtoras de açúcar do país, utiliza o carbonato de cálcio gerado durante a carbonatação como um agente corretivo para solos agrícolas, aumentando a produtividade agrícola ao corrigir a acidez do solo (Bajaj Hindusthan Sugar n.d.).

Estes estudos de casos demonstram que a valorização do carbonato de cálcio na indústria do açúcar pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a sustentabilidade ambiental e a eficiência económica. A implementação de tecnologias avançadas e práticas inovadoras permite transformar resíduos em recursos valiosos, promovendo uma abordagem mais circular e sustentável na produção de açúcar.

3 Metodologia Experimental

3.1 Carbonato de Cálcio

3.1.1 Pesquisa bibliográfica

As bases de dados *ScienceDirect*, *Google Scholar* e *Web of Science* foram utilizadas para localizar artigos pertinentes publicados sobre o assunto. Primeiramente, numerosos resultados foram obtidos por meio de uma pesquisa avançada com os termos de “Sugar factory” (fábrica de açúcar), “Sugar industry” (indústria açucareira), “Sugar process” (processo do açúcar), “Sugar production” (produção de açúcar) e “Sugar manufacturing” (fabricação de açúcar). A pesquisa foi posteriormente refinada com a inclusão de duas categorias temáticas:

- 1) A gestão de resíduos e valorização de subprodutos produzidas em geral no processo de produção de açúcar. Para tal, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “Wastes” (desperdícios), “Residues” (resíduos), “Subproducts” (subprodutos), “Bioproducts” (bioprodutos) e / ou “Valorization” (valorização);
- 2) O resíduo industrial em estudo, nomeadamente, o carbonato de cálcio. Para tal, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “Calcium carbonate” ou “CaCO₃”, “Carbonation sludge” ou “Carbonatation sludge” (lodo de carbonatação), “Carbonation mud” ou “Carbonatation mud” (lama de carbonatação) e “Pressmud” ou “Filter press mud” (lama de prensa).

Os trabalhos que não abordavam os temas de investigação propostos foram retirados da amostra inicial de artigos em cada uma das subáreas. Os resumos dessas publicações foram avaliados, sendo desconsiderados aqueles que não se enquadravam no âmbito do trabalho.

Foram seleccionados 188 artigos para uma análise mais aprofundada, uma vez confirmada a sua aplicabilidade e contribuição para o tema de estudo.

3.1.2 Parâmetros e Métodos de Caracterização

Os parâmetros que foram avaliados para caracterizar as lamas de carbonatação, bem como os métodos gerais e as normas respetivas utilizadas para essa caracterização são apresentados na Tabela 3.1.1. As análises foram realizadas por laboratórios especializados contratados pela RAR, garantindo a conformidade com as normas e os padrões industriais.

Tabela 3.1.1. Análises às lamas de carbonatação, com os respetivos parâmetros, métodos analíticos e normas aplicadas.

Parâmetros		Métodos Analíticos / Norma
Reatividade		EN 13971:2008 Materiais calcários carbonatados - Determinação da reatividade - Método de titulação potenciométrica com ácido clorídrico
Valor Neutralizante (CaCO ₃)		EN 12945:1997 Têxteis - Determinação da resistência ao pilling e à alteração do aspeto dos tecidos - Parte 1: Método da caixa de pilling
Granulometria >1 mm		EN 13650:2001 Correctores de solos e suportes de cultura - Extração de elementos solúveis em água régia
Granulometria 0,1 mm – 0,5 mm		
Granulometria <0,1 mm		
Magnésio (mg/kg m.s)		DIN EN ISO 17294-2 2005-02 Qualidade da água - aplicação da espetrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (icp-ms) - parte 2: determinação de elementos seleccionados incluindo isótopos de urânio
Cálcio (mg/kg m.s)		
Metais pesados	Cádmio (mg/kg m.s)	
	Cobre (mg/kg m.s)	
	Níquel (mg/kg m.s)	
	Chumbo (mg/kg m.s)	
	Zinco (mg/kg m.s)	
	Crómio (mg/kg m.s)	
Mercúrio (mg/kg m.s)		DIN EN 1483 2007-07 Qualidade da água - Determinação do mercúrio - Método por espetrometria de absorção atómica

Microorganismos	Escherichia coli	ISO 16649-2 2001 Microbiologia dos géneros alimentícios e dos alimentos para animais - Método horizontal para a contagem de Escherichia coli beta-glucuronidase positiva - Parte 2: Técnica de contagem de colónias a 44 °C utilizando beta-D-glucuronido de 5-bromo-4-cloro-3-indolilo
	Salmonella spp	ISO 6579-1 2017 Microbiologia da cadeia alimentar - Método horizontal para a deteção, enumeração e serotipagem de Salmonella - Parte 1: Deteção de Salmonella spp.
Compostos orgânicos	LAS (alquilo benzenossulfonatos lineares)	M I por, HPLC-MS/MS
	NPE (nonilfenóis e nonilfenóis etoxilados)	DIN CEN/TS 16182 (8DIN SPEC 91262) Lamas, resíduos biológicos tratados e solo - Determinação de nonilfenóis (NP) e nonilfenol-mono- e dietoxilatos por cromatografia gasosa com deteção selectiva de massa (GC-MS);
	PAH (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos)	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243) Lamas, resíduos biológicos tratados e solos - Determinação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) por cromatografia gasosa (GC) e cromatografia líquida de alta resolução (HPLC)
	PCB (compostos bifenilos policlorados)	DIN EN 16167 Solo, resíduos biológicos tratados e lamas - Determinação de bifenilos policlorados (PCB) por cromatografia gasosa com deteção selectiva de massa (GC-MS) e cromatografia gasosa com deteção por captura de electrões (GC-ECD) DIN EN 16168 Lamas, resíduos biológicos tratados e solo - Determinação

		do azoto total pelo método de combustão seca DIN EN 16169 Lamas, resíduos biológicos tratados e solo - Determinação do azoto Kjeldahl.
	PCDD/F (policlorodibenzodioxinas/furanos)	DIN CEN/TS 16190 Lamas, resíduos biológicos tratados e solo - Determinação de dioxinas e furanos e de bifenilos policlorados sob a forma de dioxina por cromatografia gasosa com deteção selectiva de massa de alta resolução (HR GC-MS) DIN CEN/TS 16191 DIN CEN/TS 16192 Caracterização dos resíduos - Análise dos eluatos DIN CEN/TS 16193

No laboratório interno da RAR, a humidade das lamas de carbonatação é medida utilizando um analisador de humidade modelo MS-70. O MS-70 utiliza o método termogravimétrico para determinar a humidade, que consiste na medição da perda de peso da amostra enquanto ela é aquecida e a humidade é evaporada. Uma quantidade de 10 g de amostra a uma temperatura de 160 °C até estabilização do peso (RAR 2024).

3.1.3 Procedimentos Experimentais

Procedeu-se à secagem e moagem das lamas de carbonatação.

3.1.3.1 Secagem

Preparação das amostras:

- Recolher, aproximadamente, 1 kg de lamas de carbonatação e colocá-las num tabuleiro sem nenhum pré-tratamento.
- Colocar numa estufa à temperatura de 80 °C.
- Manter as lamas na estufa durante um período contínuo de dois dias (48 horas).

Após a secagem:

- Deixar a amostra seca arrefecer até a temperatura ambiente antes de proceder à moagem.

3.1.3.2 Moagem

- Utilizar um martelo para partir manualmente as lamas secas, assegurando que todos os pedaços grandes sejam reduzidos a um tamanho que permita uma moagem mais eficiente.
- Triturar a amostra até obter um pó fino e homogéneo.
- Recolher o pó e armazená-lo num recipiente hermético para evitar a absorção de humidade.

4 Análise dos Resultados e Discussão

4.1 Carbonato de Cálcio

4.1.1 Caracterização do Resíduo

Como referido ao longo deste trabalho, o carbonato de cálcio produzido como subproduto na RAR é uma consequência da etapa de carbonatação. Este forma-se a partir da reação do leite de cal com o dióxido de carbono. Nas tabelas 4.1.1. e 4.1.2. estão apresentados os resultados das análises efetuadas ao subproduto. Estes resultados permitem uma caracterização detalhada do resíduo gerado com vista a verificar a sua adequação para uso em solos agrícolas e como corretivo alcalinizante segundo as especificações presentes no Decreto-Lei nº. 276/2009 de 2 de outubro e no Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de junho de 2019, respetivamente (Ministério do Ambiente 2009; Parlamento Europeu 2019).

Tabela 4.1.1. Resultados das análises às lamas de carbonatação, com os respetivos valores-limite.

Parâmetros	Valores-limite		Resultados
Magnésio (mg/kg m.s)	---		2700
Cálcio (mg/kg m.s)	---		318000
Cádmio (mg/kg m.s)	20 ⁽¹⁾	2 ⁽²⁾	<0,2
Cobre (mg/kg m.s)	1000 ⁽¹⁾	300 ⁽²⁾	38
Níquel (mg/kg m.s)	300 ⁽¹⁾	90 ⁽²⁾	6
Chumbo (mg/kg m.s)	750 ⁽¹⁾	120 ⁽²⁾	<2
Zinco (mg/kg m.s)	2500 ⁽¹⁾	800 ⁽²⁾	27
Crómio (mg/kg m.s)	1000 ⁽¹⁾	---	9

⁽¹⁾ Decreto-Lei nº. 276/2009, de 2 de outubro

⁽²⁾ Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de junho de 2019

Tabela 4.1.2. Resultados das análises às lamas de carbonatação, com os respetivos valores-limite.
Continuação.

Parâmetros		Valores-limite		Resultados
Mercúrio (mg/kg m.s)		16 ⁽¹⁾	1 ⁽²⁾	<0,07
Contagem de <i>Escherichia coli</i>		< 1000 células/g de matéria fresca		<1,0*101 ufc/g
Pesquisa <i>Salmonella</i>		Ausente em 50 g de material original		Negativo em 50 g de matéria original
LAS (mg/kg m.s)		5000		<10
NPE (mg/kg m.s)	Nonifenol Monoetoxilados	450	<0,1	
	Nonifenol dietoxilados		<0,1	
	Soma nonifenol/nonifenoletoxilados		<0,3	
	Nonifenol – Isômeros		<0,1	
PAH (mg/kg m.s)		6	<1,6	
PCB (mg/kg m.s)		0,8	<0,12	
PCDD/F (ng TEQ/kg m.s)	2378 TetraCDD	100	<1	
	12378 PentaCDD		<1	
	123478 HexaCDD		<1	
	123678 HexaCDD		<1	
	123789 HexaCDD		<1	
	1234678 HeptaCDD		<5	
	OctaCDD		<10	
	2378 TetraCDF		<1	
	12378 PentaCDF		<1	
	23478 PentaCDF		<1	
	123478 HexaCDF		<1	
	123678 HexaCDF		<1	
	123789 HexaCDF		<1	
	234678 HexaCDF		<1	
	1234678 HeptaCDF		<3	
	1234789 HeptaCDF		<3	
	OctaCDF		<10	
	I-TEQ (NATO/CCMS) (Limite Inferior)		0	
	I-TEQ (NATO/CCMS) (Limite Superior)		3	
	WHO (2005)-PCDD/F TEQ (Limite Inferior)		0	
	WHO (2005)-PCDD/F TEQ (Limite Superior)		3	

⁽¹⁾ Decreto-Lei nº. 276/2009, de 2 de outubro

⁽²⁾ Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de junho de 2019

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que todos se encontram abaixo dos valores-limite, o que indica que as lamas de carbonatação podem ser aplicadas em solos agrícolas. No entanto, para ser considerado um corretivo alcalinizante, ainda é necessário analisar alguns parâmetros adicionais, apresentados na Tabela 4.1.3. Estes parâmetros são analisados consoante os valores mínimos especificados no Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de junho de 2019 (Parlamento Europeu 2019). Pode se observar que os resultados obtidos (Tabela 4.1.3.) são superiores aos valores mínimos especificados. Portanto, verificando-se que os níveis de metais pesados estão abaixo dos valores-limite (tabelas 4.1.1. e 4.1.2.) e que os restantes parâmetros estão acima dos valores mínimos (Tabela 4.1.2), é possível assumir que as lamas de carbonatação podem ser usadas como corretivo alcalinizante.

Tabela 4.1.3. Resultados das análises às lamas de carbonatação, com os respetivos valores mínimos.

Parâmetro		Valor Mínimo	Resultado
Reatividade (%)		10	47,7
Valor Neutralizante (equivalente a CaO)		15	47,6 ^(*)
Granulometria (%)	> 1 mm	70% <1 mm	Não detetado
	0,1 mm – 0,5 mm		Não detetado
	<0,1 mm		100

(*) Conversão de valor neutralizante equivalente a CaCO_3 para CaO apresentada no Anexo A.

Entre todos os parâmetros listados, a humidade é o único que não afeta a possibilidade de as lamas serem utilizadas em solos agrícolas ou como corretivo alcalinizante. No entanto, é importante conhecer o seu valor, uma vez que para diversas indústrias, como a produção de borrachas ou de colas, a humidade é uma das principais especificações a ser considerada. Na Figura 4.1.1, estão representados os valores de humidade lidos entre o período de janeiro de 2021 até maio de 2024.

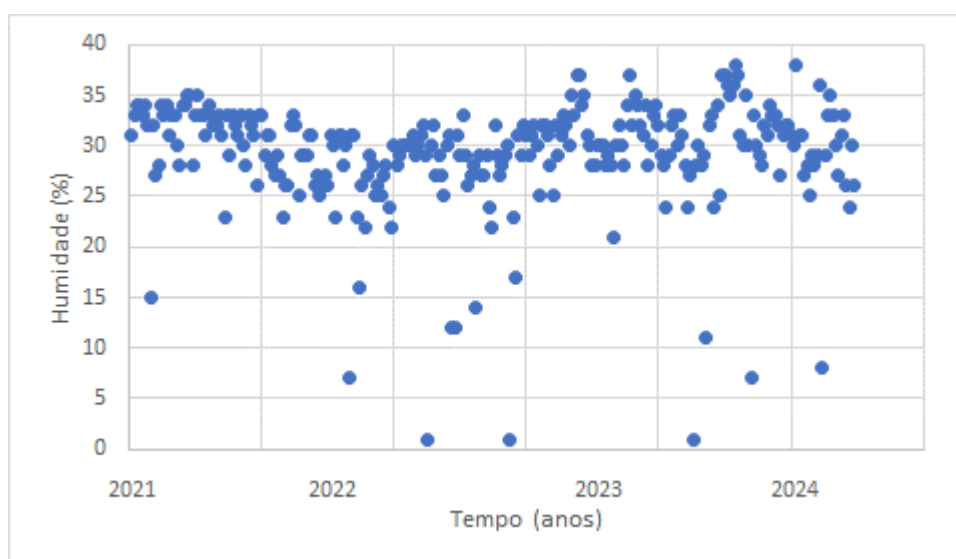


Figura 4.1.1. Gráfico da humidade das lamelas de carbonatação, em percentagem, ao longo do tempo, em anos

É importante esclarecer que estes dados são meramente informativos uma vez que não há uma periodicidade definida para a avaliação da humidade das lamelas de carbonatação, conforme listados no Anexo B. No entanto, com base nos dados utilizados para este gráfico, foi possível calcular uma média de 29% de humidade.

4.1.2 Recolha e Análise de Dados

A RAR pretendia encontrar uma solução simples, de fácil implementação e sustentável que gerasse lucro para a empresa e, ao mesmo tempo, explorar opções futuras.

Posto isto, foi iniciada uma pesquisa sistemática para identificar empresas que utilizam CaCO_3 nos seus processos industriais, determinando os diferentes setores onde seria possível implementar o subproduto em estudo. Após esta análise, sobre onde e como o CaCO_3 é aplicado, foram contactadas diversas empresas de diferentes áreas. No total, 153 empresas foram abordadas, incluindo fornecedoras de CaCO_3 , associações agrícolas, empresas de produção de borracha e plástico, de papel e cartão, construção civil e/ou cimenteiras, empresas de tintas e revestimentos, e empresas de gestão e tratamento de resíduos. A Tabela 4.1.4 apresenta o número total de empresas contactadas por setor.

Tabela 4.1.4. Número de empresas contactadas distribuído pelos diferentes setores.

Setor	Número de Empresas
Fornecedores de CaCO_3	15
Agricultura	26
Borracha e Plástico	28
Papel e Cartão	23
Construção Civil e Cimenteiras	11
Tintas e Revestimentos	14
Tratamento de Resíduos	36

A solução mais viável para uma atuação imediata foi o contacto com o setor agrícola. Com base nas observações das tabelas 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, aumentar o número de empresas e parceiros interessados no uso das lamas de carbonatação como corretivo alcalinizante foi identificado como a opção mais favorável e de rápida implementação. Entre as 26 empresas do setor agrícola contactadas, duas associações demonstraram interesse em utilizar este subproduto nos seus solos agrícolas, devido à predominância de solos ácidos em Portugal, que representam um dos principais fatores limitantes no desenvolvimento agrícola.

Foram realizados testes de aplicação das lamas nos solos destas associações e os comentários foram positivos, realçando a facilidade de aplicação das lamas. No entanto, o setor agrícola não pode ser o único destinatário deste subproduto, pois a produção diária em toneladas eventualmente saturará os agricultores. Portanto, é crucial estabelecer contactos com outros setores para garantir o escoamento contínuo das lamas de carbonatação.

Entre os outros setores contactados, houve considerável interesse inicial. No entanto, após várias reuniões com as empresas e a compreensão das especificações desejadas, percebeu-se que o estado atual das lamas de carbonatação não atende aos requisitos. Foram discutidos vários parâmetros, como granulometria, humidade, teor de CaCO_3 , cal disponível, pH, cor e quantidade de matéria orgânica. Dentre destes parâmetros, a humidade, a granulometria e a cor foram realmente os mais cruciais. Na Tabela 4.1.5, são apresentados dados de quatro empresas, destacando o teor de humidade, a granulometria e a brancura, comparados aos valores das lamas de carbonatação da RAR.

Tabela 4.1.5. Especificações do CaCO₃ presente na RAR e de 4 empresas.

Empresa		RAR	A	B	C	D
Teor de humidade (%)		29	< 1	< 0,05	≤ 0,20	< 0,20
Granulometria (%)	< 0,002 mm				23	40
	< 0,063 mm			84		
	< 0,1 mm	100				
	< 0,125 mm			98		
	< 2 mm		100	100		
Brancura (%)	Ry (C/2°)	Castanho			95	90,50
	R457				93,20	85,50

Para uma melhor compreensão do parâmetro de brancura, é, usualmente necessário esclarecer os termos Ry (C/2°) e R457. No entanto, estes parâmetros não foram necessários na análise das lamas, pois visualmente é possível verificar a sua cor acastanhada. Nos diferentes setores, as empresas utilizam a matéria-prima carbonato de cálcio, o que resulta em valores de humidade e brancura significativamente diferentes dos observados no subproduto em estudo. A granulometria também foi uma especificação que inviabilizou o uso do subproduto. Embora não tenha sido um fator diretamente decisivo, a incapacidade de obter uma distribuição granulométrica adequada influenciou também negativamente a sua aceitação.

Após a análise das características requisitadas, chegou-se à conclusão de que para haver uma maior rentabilidade do uso do subproduto seria necessário investir num pré-tratamento do mesmo. Para tal foram realizados alguns testes laboratoriais ao subproduto, nomeadamente, de secagem e moagem, de forma a ir de encontro aos valores do teor de humidade e granulometria que as empresas pediam. Na Tabela 4.1.6 estão apresentados os valores obtidos em escala laboratorial de um processo de secagem em estufa.

Tabela 4.1.6. Parâmetros avaliados e os respetivos resultados.

Parâmetros	Ensaio
Massa húmida (g)	834
Massa seca (g)	446
Teor de humidade inicial (%)	46,5

Observa-se que o valor de humidade, comparado com o valor da média de 29% anteriormente obtido, tem uma diferença de 17,5%. Isto pode ter sido pela diferença de equipamento utilizado, pela quantidade de amostra e pelas condições de secagem, como tempo e temperatura. Porém, o foco mais importante deste teste não era determinar o teor de humidade existente na matéria húmida, mas sim determinar o teor de humidade existente na

matéria seca. Para tal, de seguida foi necessário iniciar o processo de moagem que consistiu primeiramente numa trituração manual para quebrar os pedaços maiores de lama e depois é que foi colocada num triturador. Foi possível obter uma amostra em pó após trituração. No entanto, não foi viável avaliar a granulometria utilizando o equipamento presente no laboratório da RAR (Jenoptik CAMSIZER 0126) devido a esta ser inferior ao detetado pelo equipamento, e porque este tende a aglomerar-se facilmente, i.e., ao ser submetido à vibração no equipamento, ocorria a formação de aglomerados, impossibilitando a leitura precisa pelo leitor de partículas. O ideal seria obter uma leitura direta do pó, o que não foi possível nestas condições. Por isso, infelizmente não foi possível fazer uma observação mais detalhada sobre a granulometria, de forma a responder às exigências pedidas pelas empresas, nomeadamente, separação por tamanhos, em mm.

Após a etapa de moagem, procedeu-se então à leitura do teor de humidade do material seco tendo-se obtido um teor de humidade de 0,57%. Apesar de já ser um valor muito mais apelativo, comparando com os valores das empresas descritos na Tabela 4.1.5, é possível afirmar que não foi possível chegar ao teor de humidade desejado. No entanto, apesar destas dificuldades houve uma empresa do setor de materiais para construção, que realizou testes laboratoriais com uma amostra do nosso subproduto e obteve resultados promissores. Primeiramente, foi realizada uma secagem para reduzir o teor de humidade do material. Em seguida, o material foi incorporado numa cola. Informaram que todos os testes foram positivos, exceto o teste de aderência ao calor. Atualmente, estão conduzindo testes em betonilhas, que, até o momento, apresentam bons resultados de fluidez. Também realizaram a queima do material numa mufla a 550 °C, devido à influência da matéria orgânica nas características finais do produto, resultando num material preto. A cor acastanhada do material original não interferiu em nenhum desses testes. Até agora, estas são as informações disponíveis, uma vez que o projeto ainda se encontra em fase experimental.

4.1.3 Estudo do Processo de Pré-tratamento

O processo de pré-tratamento das lamas de carbonatação é uma etapa essencial com vista a melhorar a qualidade do material final e aumentar as possibilidades de venda. Como referido anteriormente, as lamas apresentam características que podem dificultar a sua aceitação no mercado, como a granulometria inadequada, alta humidade e coloração não

uniforme. Por isso, investir num pré-tratamento das lamas apresenta várias vantagens estratégicas para a RAR.

Com foco na redução da humidade, a secagem é uma etapa crucial no pré-tratamento das lamas, pois a redução para um teor de humidade menor que 1% não só facilita o manuseamento e o transporte, mas também melhora a qualidade do material para a aplicação final. Existem várias formas de secar um produto, e a escolha do método depende de vários fatores, incluindo, quantidade de material a ser processado, requisitos de qualidade do produto final, custos operacionais e de investimento, eficiência energética e espaço disponível. Para a seleção do equipamento, foram discutidas várias hipóteses de secagem, uma vez, que as lamas já vêm de um processo de prensagem, nomeadamente, de filtros de prensa.

Uma possibilidade considerada foi a secagem ao ar, ou seja, deixar as lamas expostas ao ar num ambiente com boa circulação. Este método pode ser eficaz se a humidade ambiente for baixa e as condições climáticas forem favoráveis. No entanto, pode não ser adequado em ambientes com alta humidade. De facto, é um processo simples de implementar e de baixo custo energético. No entanto, apresenta grandes desvantagens, pois depende das condições climáticas, requer uma grande área e é relativamente lento.

Agentes secantes também foram postos em hipótese, por serem substâncias que têm alta afinidade para absorver ou adsorver água. Estes são utilizados para remover humidade de gases, líquidos e sólidos em vários processos industriais. Para a secagem das lamas de carbonatação, a utilização de agentes secantes como sílica gel, zeólitas, cloreto de cálcio e alumina ativada pode melhorar significativamente a eficiência do processo. No entanto, apresentam várias desvantagens significativas. Primeiramente, a grande quantidade de agentes secantes necessários para processar toneladas de lama diariamente apresenta desafios logísticos de armazenamento e manuseio, bem como a necessidade de um espaço físico considerável. Além disso, o impacto ambiental é outra preocupação, pois o uso de agentes secantes pode gerar resíduos adicionais que precisam ser tratados ou descartados adequadamente. A eficiência do processo também é variável, dependendo das condições ambientais e da composição da lama, o que pode resultar em resultados inconsistentes e tempos de secagem prolongados.

Também se ponderou a inclusão de um método de secagem a vácuo, onde a humidade vaporizada é aspirada, e o aquecimento é indireto, ocorrendo por contacto com superfícies aquecidas e/ou por radiação. As suas principais vantagens incluem a secagem a temperaturas significativamente mais baixas, preservando a integridade do material, embora o carbonato de

cálcio não seja extremamente sensível ao calor. Pode ser uma secagem mais rápida em comparação com métodos que utilizam apenas calor. A ausência de oxigénio reduz a possibilidade de oxidação dos materiais sensíveis e oferece um controlo preciso sobre as condições de secagem, incluindo temperatura e pressão. No entanto, o equipamento e a operação de secagem podem ser caros, requer uma manutenção regular e especializada para as bombas de vácuo e sistemas associados e a capacidade do processo pode ser limitada pela dimensão das câmaras de vácuo.

Outra hipótese considerada foi a secagem por calor, na qual se concentrou maior atenção. Este método envolve a utilização de um forno ou outro equipamento de secagem para aplicar calor às lamas, auxiliando na evaporação da humidade presente no material. É essencial selecionar uma temperatura adequada que não degrade o material. Foram avaliados diversos tipos de secadores, incluindo secadores de leito fluidizado, secadores em túnel com correias transportadoras e secadores rotativos.

O secador de leito fluidizado utiliza uma corrente de ar quente para manter as partículas em suspensão, proporcionando um contacto uniforme e eficiente entre o material e o meio de secagem. Apresenta uma alta eficiência de secagem, entre 50 a 80%, boa uniformidade e controlo preciso de temperatura. No entanto, para as lamas de carbonatação, será necessário um pré-tratamento para desagregar os blocos em partículas menores. A Figura 4.1.2 mostra um esquema do funcionamento de um secador de leito fluidizado e uma fotografia do exterior do equipamento.



Figura 4.1.2. Secador de leito fluidizado a) esquema de funcionamento, b) fotografia do aspeto exterior [Marques, Paula & Silva, 2022]

O secador em túnel com correias transportadoras é mais adequado para sólidos granulados, como é o caso das lamas de carbonatação. Este método consiste num secador em

túnel onde os sólidos são colocados em correias transportadoras, que podem ser perfuradas obtendo-se nesse caso fluxo cruzado do ar. Este método é bom para materiais que precisam de um tempo de secagem mais longo e é capaz de lidar com blocos grandes se tiver capacidade de moagem. Porém, pode ser menos eficiente energeticamente. A Figura 4.1.3 mostra um esquema do funcionamento de um secador de túnel com correias transportadoras e uma fotografia do equipamento.

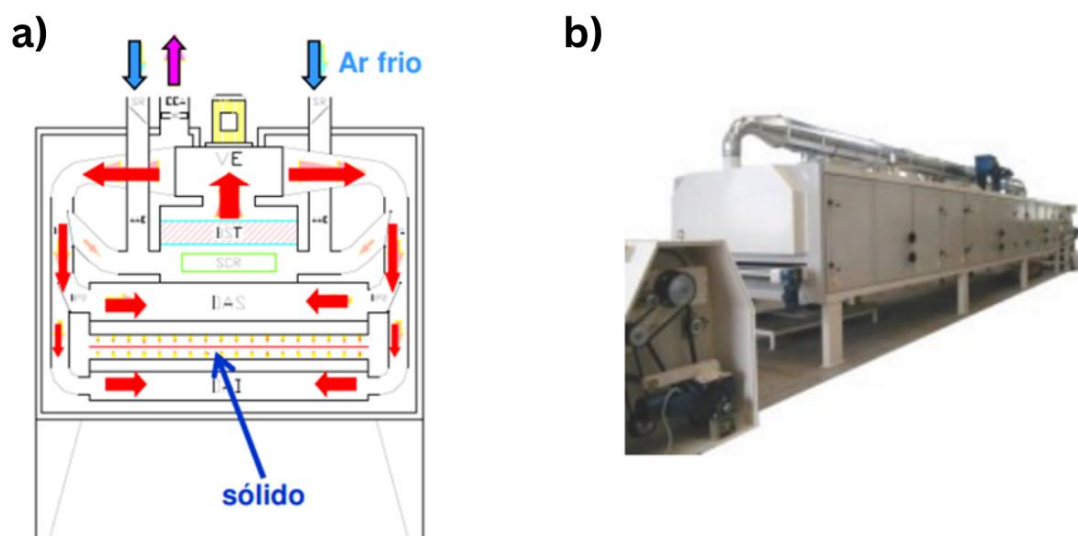


Figura 4.1.3. Secador de túnel com correias transportadoras a) esquema de funcionamento, visto de frente, b) fotografia do equipamento [Marques, Paula & Silva, 2022]

No caso de um secador rotativo, este apresenta uma vasta gama de aplicações como sais inorgânicos, areia e materiais refratários, carvão, fertilizantes, lamas e bolos de filtração e açúcar. O material é colocado dentro de um tambor cilíndrico que gira, permitindo que o material seja agitado e aquecido por uma corrente de ar quente que passa através do tambor. A câmara cilíndrica rotativa horizontal apresenta uma ligeira inclinação para ajudar a progressão do sólido dentro do secador e pás que movimentam o material a secar. O sólido desloca-se ao longo do cilindro e sai seco na sua extremidade. O secador rotativo é robusto e capaz de lidar com grandes quantidades de material e é relativamente simples de operar. Porém, pode requerer longos tempos de uso, mais espaço físico e um consumo energético relativamente alto. A Figura 4.1.4 mostra um esquema do funcionamento de um secador rotativo e um exemplo da forma das pás no interior do secador.

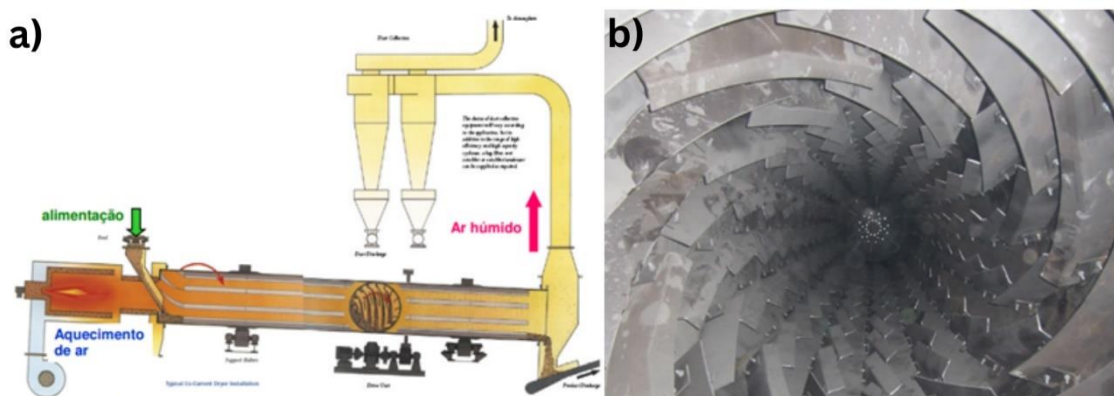


Figura 4.1.4. Secador rotativo a) esquema de funcionamento; b) exemplo da forma das pás no interior (Marques, Paula, and Silva 2022)

4.1.4 Estudo e Viabilidade Económica

Para uma melhor compreensão e tomada de decisão do tipo de processo de secagem a ser considerado realizou-se um estudo económico não só dos equipamentos, mas também das próprias lamas.

Anteriormente, a gestão das lamas de carbonatação era realizada por uma empresa externa, e o custo anual para a RAR era de 300 000 euros (€). Esta despesa representava um peso significativo no orçamento operacional da RAR. No entanto, com a cessação desta parceria, a RAR teve de procurar novas alternativas. As novas parcerias encontradas foram associações agrícolas e uma empresa pedreira. Após algumas negociações, as associações agrícolas propuseram um valor de 10 € por tonelada, enquanto a empresa pedreira ofereceu 40 € por tonelada. A produção diária de lamas não é constante, podendo variar entre 3 e 8 toneladas por dia (ton/dia). Para analisar economicamente estas propostas, considerou-se uma produção de 3 ton/dia, representando o cenário menos favorável. Considerando apenas os dias úteis, a quantidade anual de lamas seria de 783 toneladas (ton). Com base nisto, o ganho anual com as associações agrícolas seria de 7 830 €, enquanto o ganho anual com a empresa pedreira seria de 31 320 €. Esta nova abordagem resulta numa fonte de lucro pelas lamas, eliminando o custo anterior e concebendo um ganho anual adicional. No entanto, estes valores são representativos de uma proposta em que o custo de transporte é coberto pela empresa recetora do subproduto.

Foi proposto o aluguer de duas banheiras para armazenar as lamas. O custo diário do aluguer das duas banheiras é de 200 €. Além disso, é necessário contratar serviços de transporte e um motorista por cinco dias da semana, quatro horas por dia, com um custo diário de 330 €. O transporte também inclui um custo adicional de 0,60 € por quilómetro (km) percorrido,

considerando que as empresas estão localizadas a um raio de 50 km, como é possível visualizar na Figura 4.1.5.



Figura 4.1.5. Imagem do mapa com um raio de 50 km da localização da RAR [imagem adaptada de www.googlemaps.pt]

Assumindo uma média diária de 50 km, o custo diário de transporte será de 560 €, resultando num custo anual de 146 160 €. Com a subtração dos custos de transporte, a parceria com as associações agrícolas resultará num ganho anual total de 161 670 €, enquanto a parceria com a empresa pedreira proporcionará um ganho anual de 185 160 €. Mesmo após considerar os custos de transporte, a análise financeira revela que as novas propostas continuam a oferecer um ganho substancial para a RAR. Esta mudança não só elimina o custo significativo da gestão das lamas, mas também transforma esta atividade numa fonte de lucro, melhorando substancialmente a posição financeira da RAR.

A proposta anterior representa a solução imediata para as lamas sem qualquer tipo de pré-tratamento, apresentando-se, seguidamente, a viabilidade económica da instalação de um pré-processamento. Relativamente ao equipamento, considerando que as lamas saem do processo em blocos, o secador rotativo parece ser a melhor escolha, no entanto o secador em túnel com correias transportadoras também é uma boa opção. Por isso, foi feita a comparação económica dos dois equipamentos (Tabela 4.1.7). Considerou-se novamente a produção anual (menos otimista) de 780 ton. Primeiro, calculou-se a quantidade de água a ser removida para

se obter um teor de humidade inferior a 0,20% e consequentemente perceber a quantidade de energia necessária para a sua evaporação. Para tal, recorreu-se às seguintes equações (2-3):

$$m_{H_2O} = P \times (H_i - H_f) \quad (\text{Equação 2})$$

$$Q = m_{H_2O} \times \Delta H_v \quad (\text{Equação 3})$$

Em que m_{H_2O} é a quantidade de água removida, em quilogramas (kg) de água por dia, P é a produção diária, em toneladas por dia, H_i é o teor de humidade inicial e H_f é o teor de humidade final, ambos em percentagem. Na Equação 2, Q é a energia necessária para a evaporação da água, em quilojoule (kJ) por dia, e ΔH_v é o calor latente de vaporização da água (aproximadamente 2260 kJ por kg) (Datt, 2011).

Obteve-se uma quantidade de água a ser removida de 864 kg de água por dia e de energia necessária para a evaporação desta quantidade de, aproximadamente, $1,95 \times 10^6$ kJ por dia, correspondendo a 542,4 quilowatt hora (kWh) por dia. Assumindo um custo de eletricidade de 0,10 € por kWh, e considerando um ano de trabalho de 260 dias úteis, o custo anual de energia é cerca de 14 102 €.

A Tabela 4.1.7 apresenta uma análise comparativa detalhada dos custos e da viabilidade económica entre secadores de tambor rotativo e secadores de túnel com correias transportadoras. Os custos de investimento inicial para o secador de tambor rotativo variam de 50 000 a 200 000 €, enquanto para o secador de túnel com correias transportadoras oscilam entre 70 000 e 250 000 €, com custos adicionais de instalação. Os custos operacionais anuais, incluindo energia e manutenção, somam 20 352 € para o secador de tambor e 22 852 € para o de túnel. O custo total anual atinge 82 852 € e 110 352 €, respetivamente. A análise de viabilidade considera dois cenários de preço: 46 €/tonelada e 138 €/tonelada. No cenário de menor preço, o secador de tambor apresenta ganho anual de 15 527 €, enquanto o de túnel resulta num prejuízo de 9 472 €. Já no cenário de maior preço, ambos os equipamentos mostram ganhos significativos, 87 287 € para o de tambor e 62 288 € para o de túnel.

Tabela 4.1.7. Valores do estudo e viabilidade económica de secadores de tambor rotativo e de túnel com correias transportadoras.

		Secador de tambor rotativo		Secador de túnel com correias transportadoras	
Custos de Investimento	Custo do secador (€)	50 000	200 000	70 000	250 000
	Instalação (€)	12 500	50 000	17 500	62 500
	Total investimento inicial (€)	62 500	250 000	87 500	312 500

Custos Operacionais	Custo de energia (€/kWh)	0,10			
	Custo diário de energia (€/dia)	54,24			
	Custo anual de energia (€/ano)	14 102			
	Custo anual de manutenção e mão de obra (€/ano)	6 250	25 000	8 750	31 250
	Total operacional (€)	20 352	39 102	22 852	45 352
Ganho Anual (€)	46 €/tonelada	15 527	-3 222	13 028	-9 472
	138 €/tonelada	87 287	68 537	84 788	62 288
Índice de retorno do investimento (%)	46 €/tonelada	24,8	-1,3	14,9	-3,0
	138 €/tonelada	139,7	27,4	96,9	19,9
Payback (anos)	46 €/tonelada	4,0	*	6,7	*
	138 €/tonelada	0,7	3,6	1,0	5,0

* Quando a divisão do ganho anual sobre o custo total de investimento inicial é inferior a 0, o resultado é descartado

Pode-se observar que os secadores de túnel exigem um investimento inicial mais elevado, variando de 87.500€ a 312.500€, em comparação com os secadores de tambor rotativo, que variam de 62.500€ a 250.000€. Embora os custos de energia sejam equivalentes para ambos os tipos de secadores, os secadores de túnel apresentam custos de manutenção ligeiramente mais altos, resultando em maiores custos operacionais anuais.

No cenário de preço de venda mais alto, ambos os tipos de secadores são lucrativos, com o secador de tambor rotativo mantendo uma vantagem considerável. Os dados indicam que o preço de venda por tonelada tem um impacto significativo no retorno do investimento. Para ambos os tipos de secadores, o ROI aumenta substancialmente com o aumento do preço de venda.

No cenário de preço de venda mais baixo, com o custo mais elevado para o secador, ambos os tipos de secadores apresentam um ROI negativo, indicando que o investimento é inviável neste contexto. Em contrapartida, no cenário de preço de venda mais alto, mesmo com o custo mais elevado, o secador de tambor rotativo apresenta um ROI superior ao do secador de túnel. Isto sugere que, caso o produto possa ser vendido pelo preço mais alto, investir em um secador de tambor rotativo seria a opção mais favorável. No entanto, considerando um cenário mais realista de venda do produto pelo preço mais baixo, a viabilidade económica é mais desafiadora.

Esta análise evidencia que a viabilidade económica de ambos os tipos de secadores é altamente sensível ao preço de venda do produto, com o secador de túnel demonstrando maior vulnerabilidade a preços baixos. Portanto, a decisão entre os dois tipos de secadores deve

considerar não apenas os aspetos económicos apresentados, mas também fatores operacionais específicos, expectativas de mercado e a capacidade da empresa de absorver riscos financeiros em cenários de preços desfavoráveis.

Existe também a possibilidade de determinar o intervalo no qual exista retorno financeiro, para tal é necessário efetuar uma equação que represente o lucro anual em função das variáveis, nomeadamente, custo do secador, custo operacional anual, produção de lamas e preço por tonelada de lama. O ganho anual é dado pelo produto da produção anual de lamas pelo preço por tonelada. O custo anual é a soma do custo operacional e da depreciação anual do secador. Supondo que o secador tem uma vida útil comum de 10 anos, obtemos a seguinte equação:

$$C_t = C_o + \frac{C_s}{n} \Leftrightarrow C_t = C_o + \frac{C_s}{10}$$

Em que C_t é o custo total anual, em €, o C_o é o custo operacional anual, em €, o C_s é o custo do secador, em €, e o n é a vida útil do equipamento, em anos.

Sendo que o lucro anual é o ganho anual menos o custo total anual, obtém-se a seguinte equação:

$$L = R - C_t \Leftrightarrow L = (P \times V) - \left(C_o + \frac{C_s}{10}\right)$$

Em que L é o lucro anual, em €, R é o ganho anual, em €, P é a produção anual de lamas, em ton, e V é o preço por tonelada de lama, em €.

Para haver então retorno financeiro, o lucro anual deve ser maior que zero, consoante a seguinte equação:

$$(P \times V) - \left(C_o + \frac{C_s}{10}\right) > 0 \Leftrightarrow P \times V > C_o + \frac{C_s}{10}$$

Para garantir retorno financeiro, precisamos ter combinações específicas de P e V que satisfaçam a condição de lucro positivo. Em resumo, é necessário ajustar os valores de produção e preço, mantendo os custos controlados, para assegurar que o ganho anual ultrapasse sempre os custos totais.

5 Conclusões

A análise dos resultados obtidos neste estudo sobre o aproveitamento das lamas de carbonatação da RAR revela informações importantes sobre a sua caracterização, potenciais aplicações e viabilidade económica. A caracterização do resíduo demonstrou que as lamas atendem aos requisitos legais para uso em solos agrícolas e como corretivo alcalinizante, apresentando níveis de metais pesados abaixo dos limites estabelecidos e parâmetros como reatividade e valor neutralizante acima dos mínimos exigidos. No entanto, o teor médio de humidade de 29% limita sua aplicação em setores industriais, como na produção de tintas ou revestimentos.

Em termos de potenciais aplicações, o uso agrícola como corretivo de solos ácidos emergiu como a opção mais imediata e viável para escoamento das lamas. Embora setores industriais como produtores de materiais de construção ou de produção de borracha tenham demonstrado interesse, as características atuais das lamas, principalmente em termos de granulometria, humidade e cor, não atendem às especificações requeridas por esses potenciais compradores.

Com este estudo, identificou-se que um processo de pré-tratamento, especificamente a secagem, é essencial para aumentar as possibilidades de aplicação industrial das lamas. Testes laboratoriais de secagem conseguiram reduzir a humidade para 0,57%, aproximando-se do valor de 0,20% requerido por algumas indústrias, nomeadamente, de produção de tintas e colas. Considerando as características das lamas e a produção diária, um secador rotativo foi identificado como o equipamento mais adequado para este processo.

A análise de viabilidade económica revelou aspetos promissores e desafiantes. A nova abordagem de venda das lamas ao natural para uso agrícola e em pedreiras não só elimina o

custo anterior de 300 000€/ano com gestão de resíduos, como também gera ganhos anuais entre 161 670€ e 185 160€/ano. Por outro lado, a implementação de um processo de secagem requer investimentos significativos, variando entre 62 500€ e 250 000€, com custos operacionais anuais de 20 352€ a 39 102€. A viabilidade económica da secagem mostrou-se altamente dependente do preço de venda do produto final, variando de inviável (a 46€/ton) a potencialmente rentável (a 138€/ton).

Com base nestes resultados, recomenda-se manter e expandir as parcerias para uso agrícola das lamas como solução imediata. Paralelamente, é aconselhável realizar testes piloto de secagem para otimizar parâmetros e avaliar a qualidade do produto final. Aprofundar estudos de mercado para identificar setores que valorizem o carbonato de cálcio seco a preços que viabilizem o investimento em secagem também se mostra crucial. Adicionalmente, explorar possibilidades de integração energética e otimização de processos pode contribuir para reduzir os custos operacionais da secagem.

Em conclusão, há potencial para transformar as lamas de carbonatação de um passivo ambiental num produto com valor agregado. A implementação gradual, começando pelo uso agrícola e avançando para processos mais sofisticados conforme a procura de mercado, apresenta-se como a estratégia mais prudente para a RAR. Esta abordagem, não apenas resolve um problema de gestão de resíduos, mas também, abre possibilidades para um novo ramo de negócios, alinhando-se com os princípios de economia circular e sustentabilidade.

Para futuras pesquisas, recomenda-se realizar estudos de mercado mais aprofundados com o objetivo de avaliar a demanda por carbonato de cálcio pré-tratado em diferentes setores industriais. Este estudo deve mapear potenciais clientes e identificar oportunidades de negócio. Além disso, é crucial investigar alternativas para otimizar o processo de pré-tratamento das lamas de carbonatação, buscando reduzir custos e aumentar a eficiência energética. Para isso, a utilização de tecnologias inovadoras e a busca por parcerias com empresas especializadas são fundamentais. Outra recomendação é desenvolver estratégias de marketing e comunicação eficazes para promover o carbonato de cálcio valorizado como um produto inovador e sustentável para a indústria. Estas estratégias devem destacar os benefícios e vantagens do carbonato de cálcio em relação às alternativas tradicionais, enfatizando a sua sustentabilidade e inovação.

Por fim, é essencial estabelecer parcerias com empresas, instituições de pesquisa e entidades governamentais. Estas parcerias devem fomentar a adoção de práticas de valorização de resíduos e a implementação da economia circular na indústria. A troca de conhecimentos, a

colaboração em projetos de pesquisa e desenvolvimento, e a criação de políticas públicas de incentivo são fundamentais para promover um ambiente de inovação e sustentabilidade.

Referências

- Abas, Khadiga Mohamed, Amina Abdel Meguid Attia, Ahmed Ali Ahmed Nada, Mona Abdel Hamid Shouman, and Maged Shafik Antonious. 2020. "Fabrication and Characterization of Low Cost Electro-Spun Carbon Fibers from Organosolv Bagasse Lignin: Effect of Modification Conditions." *Desalination and Water Treatment* 204: 388–99. doi:10.5004/dwt.2020.26262.
- Abo, Bodjui Olivier, Ming Gao, Yonglin Wang, Chuanfu Wu, Hongzhi Ma, and Qunhui Wang. 2019. "Lignocellulosic Biomass for Bioethanol: An Overview on Pretreatment, Hydrolysis and Fermentation Processes." *Reviews on Environmental Health* 34(1): 57–68. doi:10.1515/reveh-2018-0054.
- Adriele. 2023. "Economia Circular, O Que é, Princípios Chaves e Benefícios ." <https://grupomuda.com/economia-circular/> (May 10, 2024).
- Ahmed, Tgarguifa, Abderafi Souad, and Bounahmidi Tijani. 2014. *Energetic Byproducts of Sugar Industry*. Morocco.
- Andreia, Smaira. 2019. "Sacarose." <https://www.passeidireto.com/arquivo/70558898/sacarose-o-acucar-de-cana> (April 23, 2024).
- Antunes, Filipa, Inês F. Mota, João da Silva Burgal, Manuela Pintado, and Patrícia Santos Costa. 2022. "A Review on the Valorization of Lignin from Sugarcane By-Products: From Extraction to Application." *Biomass and Bioenergy* 166. doi:10.1016/j.biombioe.2022.106603.
- Bajaj Hindusthan Sugar. "Bio-Compost / Bio-Manure." <https://www.bajajhindusthan.com/bio-compost.php> (June 12, 2024).
- Ball-Coelho, B, I H Salcedo, H Tiessen, and J W B Stewart. 1993. "Short- and Long-Term Phosphorus Dynamics in a Fertilized Ultisol under Sugarcane." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1027–34.
- Bernardino, C. A.R., C. F. Mahler, M. C.C. Veloso, G. A. Romeiro, and P. Schroeder. 2018. "Filter Cake, Residue of the Sugarcane Industry-a Evaluation by Slow Pyrolysis." *Revista Virtual de Quimica* 10(3): 551–73. doi:10.21577/1984-6835.20180042.
- Bessler, Karl E, and Laécio C Rodrigues. 2008. "OS POLIMORFOS DE CARBONATO DE CÁLCIO-UMA SÍNTESE FÁCIL DE ARAGONITA." *Quim. Nova* 31(1): 178–80. <http://www.mindat.org,>

- Bhatnagar, Amit, Kavindra Kumar Kesari, and Narasinha Shurpali. 2016. "Multidisciplinary Approaches to Handling Wastes in Sugar Industries." *Water, Air, and Soil Pollution* 227(1). doi:10.1007/s11270-015-2705-y.
- Blomsma, Fenna, and Geraldine Brennan. 2017. "The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity." *Journal of Industrial Ecology* 21(3): 603–14. doi:10.1111/jiec.12603.
- Bordonal, Ricardo de Oliveira, João Luís Nunes Carvalho, Rattan Lal, Eduardo Barretto de Figueiredo, Bruna Gonçalves de Oliveira, and Newton La Scala. 2018. "Sustainability of Sugarcane Production in Brazil. A Review." *Agronomy for Sustainable Development* 38(2). doi:10.1007/s13593-018-0490-x.
- Botha, Tyron, and Harro von Blottnitz. 2006. "A Comparison of the Environmental Benefits of Bagasse-Derived Electricity and Fuel Ethanol on a Life-Cycle Basis." *Energy Policy* 34(17): 2654–61. doi:10.1016/j.enpol.2004.12.017.
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2024. "Calcium Carbonate - Chemical Compound." *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/calcium-carbonate> (June 10, 2024).
- CAMEO, Chemicals. "Calcium Carbonate." <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/25005> (June 10, 2024).
- Carvalho, João Luís Nunes, Roberta Corrêa Nogueirol, Lauren Maine Santos Menandro, Ricardo de Oliveira Bordonal, Clovis Daniel Borges, Heitor Cantarella, and Henrique C. Junqueira Franco. 2017. "Agronomic and Environmental Implications of Sugarcane Straw Removal: A Major Review." *GCB Bioenergy* 9(7): 1181–95. doi:10.1111/gcbb.12410.
- Casanova, Francisca, Ricardo Freixo, Carla F. Pereira, Alessandra B. Ribeiro, Eduardo M. Costa, Manuela E. Pintado, and Óscar L. Ramos. 2023. "Comparative Study of Green and Traditional Routes for Cellulose Extraction from a Sugarcane By-Product." *Polymers* 15(5). doi:10.3390/polym15051251.
- de Castro, Rubens Eliseu Nicula, Rita Maria Brito Alves, and Claudio Augusto Oller Nascimento. 2021. "Assessing the Sugarcane Bagasse and Straw as a Biofuel to Propel Light Vehicles." *Sustainable Energy and Fuels* 5(9): 2563–77. doi:10.1039/d1se00129a.
- Cerri, Carlos Eduardo Pellegrino, Maurício Roberto Cherubin, Danielle Mendes Thame Denny, Heitor Cantarella, Luiz Augusto Horta Nogueira, Marília Ieda da Silveira Folegatti Matsuura, Mario Gandini, and Antonio Alberto Stuchi. 2022. "Carbon Balance in the Sugarcane Sector - Conference Report." In *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.jclepro.2022.134090.

- Chandel, Anuj K., and Silvio Silvério da Silva. 2013. Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass - Techniques, Applications and Commercialization *Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass - Techniques, Applications and Commercialization*. InTech. doi:10.5772/1490.
- Dante, Roberto C. 2016. "Abrasives, Ceramic, and Inorganic Materials." In *Handbook of Friction Materials and Their Applications*, Elsevier, 105–21. doi:10.1016/b978-0-08-100619-1.00008-0.
- Datt, Prem. 2011. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. eds. Vijay P. Singh, Pratap Singh, and Umesh K. Haritashya. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-90-481-2642-2.
- Edde, Peter A. 2022. "Chapter 5 Arthropod Pests of Sugarcane (*Saccharum Officinarum* L.)." In *Field Crop Arthropod Pests of Economic Importance*, Charlotte Cockle, 1–1004. doi:10.1016/B978-0-12-818621-3.00006-9.
- FAO. 2023. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023 *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023*. Rome: FAO. doi:10.4060/cc8166en.
- Fernández-Gutiérrez, David, Alejandra Argüelles, Gemma Castejón Martínez, José M. Soriano Disla, and Andrés J. Lara-Guillén. 2022. "Unlocking New Value from Urban Biowaste: LCA of the VALUEWASTE Biobased Products." *Sustainability (Switzerland)* 14(22). doi:10.3390/su142214962.
- Ferreira, Esvanio Édipo da Silva, Elisamara Caldeira Do Nascimento, Adeilson Nascimento da Silva, Keller Regina Soares, and Oscarlina Lúcia Dos Santos Weber. 2022. "Alteration of the Organic Matter Fractions in Soil Cultivated with Sugarcane in the Cerrado-Amazon Transition Zone." *Pesquisa Agropecuaria Tropical* 52. doi:10.1590/1983-40632022v5272513.
- Franco, Henrique Coutinho Junqueiro, Maria Teresa Borges Pimenta, João Luís Nunes Carvalho, Paulo Sérgio Graziano Magalhães, Carlos Eduardo Vaz Rossell, Oscar Antonio Braunbeck, André Cesar Vitti, Oriel Tiago Kölln, and João Rossi Neto. 2013. "Assessment of Sugarcane Trash for Argonomic and Energy Purposes in Brazil." *Scientia Agricola* 70(5): 305–12.
- Freitas, Juliana V., Stanley Bilatto, Paula Squinca, Ariane S.S. Pinto, Mariana G. Brondi, Thalita J. Bondancia, Gustavo Batista, Rodrigo Klaic, and Cristiane S. Farinas. 2021. "Sugarcane Biorefineries: Potential Opportunities towards Shifting from Wastes to Products." *Industrial Crops and Products* 172. doi:10.1016/j.indcrop.2021.114057.
- Gbadeyan, Oluwatoyin Joseph, Lindokuhle Sibiya, Linda Z. Liganiso, and Nirmala Deenadayalu. 2024. "Waste-to-Energy: The Recycling and Reuse of Sugar Industry Waste for Different Value-Added Products Such as Bioenergy in Selected Countries – a Critical Review." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. doi:10.1002/bbb.2579.

- Ge, Yu, Arwa Abdulkreem AL-Huqail, Zhaoxi Zhou, Esmat F. Ali, Adel M. Ghoneim, Mamdouh Eissa, Mahmoud S. El-Sharkawy, and Zheli Ding. 2022. "Plant Growth Stimulating Bacteria and Filter Mud Cake Enhance Soil Quality and Productivity of Mango (*Mangifera Indica* L.)." *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22(3): 3068–80. doi:10.1007/s42729-022-00868-y.
- Global Footprint Network. "Past Earth Overshoot Days." <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/> (April 12, 2024).
- Gomes, Ana. 2010. *Integração Da Análise Energética Na Gestão Industrial de Uma Refinaria de Açúcar*. Porto.
- González-Torres, Mariana, Francisco Hernández-Rosas, Neith Pacheco, Josafhat Salinas-Ruiz, José A. Herrera-Corredor, and Ricardo Hernández-Martínez. 2024. "Levan Production by *Suhomyces Kilbournensis* Using Sugarcane Molasses as a Carbon Source in Submerged Fermentation." *Molecules* 29(5). doi:10.3390/molecules29051105.
- Goyal, Mansi, and Ramandeep Kaur. 2022. "Optimization of Lignin Extraction and Isolation of Substituted Hydroxycinnamic Acids from Sugarcane (*Saccharum Officinarum*) Bagasse Lignin Hydrolysate." *Sugar Tech* 24(4): 1121–34. doi:10.1007/s12355-022-01138-y.
- Jin, Fei, Mingshan Zhao, Maochun Xu, and Liwu Mo. 2024. "Maximising the Benefits of Calcium Carbonate in Sustainable Cements: Opportunities and Challenges Associated with Alkaline Waste Carbonation." *npj Materials Sustainability* 2(1). doi:10.1038/s44296-024-00005-z.
- Kee, Seng Hon, Keisheni Ganeson, Noor Fazielawanie Mohd Rashid, Ain Farhana Mohd Yatim, Sevakumaran Vigneswari, Al Ashraf Abdullah Amirul, Seeram Ramakrishna, and Kesaven Bhubalan. 2022. "A Review on Biorefining of Palm Oil and Sugar Cane Agro-Industrial Residues by Bacteria into Commercially Viable Bioplastics and Biosurfactants." *Fuel* 321. doi:10.1016/j.fuel.2022.124039.
- Khoo, R. Z., W. S. Chow, and H. Ismail. 2018. "Sugarcane Bagasse Fiber and Its Cellulose Nanocrystals for Polymer Reinforcement and Heavy Metal Adsorbent: A Review." *Cellulose* 25(8): 4303–30. doi:10.1007/s10570-018-1879-z.
- Lee, Haeyoung, Yu Jung Sohn, Subeen Jeon, Hyoju Yang, Jina Son, Yu Jin Kim, and Si Jae Park. 2023. "Sugarcane Wastes as Microbial Feedstocks: A Review of the Biorefinery Framework from Resource Recovery to Production of Value-Added Products." *Bioresource Technology* 376. doi:10.1016/j.biortech.2023.128879.
- Lim, Huei Yeong, Suzana Yusup, Adrian Chun Minh Loy, Shafirah Samsuri, Sarah Siew Kheng Ho, Aida Syafiqah Abdul Manaf, Su Shiung Lam, et al. 2021. "Review on Conversion of Lignin Waste into Value-Added Resources in Tropical Countries." *Waste and Biomass Valorization* 12(10): 5285–5302. doi:10.1007/s12649-020-01307-8.

- Mallakpour, Shadpour, Farbod Tabesh, and Chaudhery Mustansar Hussain. 2023. "Water Decontamination Using CaCO₃ Nanostructure and Its Nanocomposites: Current Advances." *Polymer Bulletin* 80(7): 7201–19. doi:10.1007/s00289-022-04431-8.
- Marques, Margarida, Ribeiro Paula, and Cristina Silva. 2022. *PRSEP - Secagem*.
- Mattila, Hannu Petteri, and Ron Zevenhoven. 2014. "Production of Precipitated Calcium Carbonate from Steel Converter Slag and Other Calcium-Containing Industrial Wastes and Residues." In *Advances in Inorganic Chemistry*, Academic Press Inc., 347–84. doi:10.1016/B978-0-12-420221-4.00010-X.
- Mayer, Flávio Dias, Ronaldo Hoffmann, Michel Brondani, Paulo Roberto Dos Santos Salbego, Thiago Castro De Almeida, and Nicholas Islongo Canabarro. 2020. "Food and Energy Production from Small-Scale Sugar Cane Industry as an Option for Sustainable Development: A Case Study in Southern Brazil." *Environmental Engineering Science* 37(1): 53–63. doi:10.1089/ees.2019.0216.
- Meghana, Munagala, and Yogendra Shastri. 2020. "Sustainable Valorization of Sugar Industry Waste: Status, Opportunities, and Challenges." *Bioresource Technology* 303. doi:10.1016/j.biortech.2020.122929.
- Mehrizi, Ehsan Abouee, Ali Asghar Ebrahimi, Hasan Saadati, Amir Zahedi, Mahdi Ghorbanian, Zahra Soltanizadeh, and Kosar Salemi. 2023. "Investigating the Effectiveness of Anaerobic Digestion in the Treatment of Sugarcane Industry Wastewater: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 8. doi:10.1016/j.cscee.2023.100414.
- Meier, Elizabeth A., Peter J. Thorburn, Malcolm K. Wegener, and Kaye E. Basford. 2006. "The Availability of Nitrogen from Sugarcane Trash on Contrasting Soils in the Wet Tropics of North Queensland." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 75(1–3): 101–14. doi:10.1007/s10705-006-9015-0.
- Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. 2009. "Decreto-Lei N.º 276/2009, de 2 de Outubro." *Diário da República n.º 192/2009, Série I*: 7154–65. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/276-2009-490974> (June 16, 2024).
- Molina-Cortés, Andrea, Tatiana Sánchez-Motta, Fabian Tobar-Tosse, and Mauricio Quimbaya. 2020. "Spectrophotometric Estimation of Total Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Molasses and Vinasses Generated from the Sugarcane Industry." *Waste and Biomass Valorization* 11(7): 3453–63. doi:10.1007/s12649-019-00690-1.
- Dutenkefer, Raphael de Moraes, Pedro Gerber Machado, and Celma de Oliveira Ribeiro. 2022. "Lignin Chemical Derivatives in Brazilian Sugarcane Sector: An Alternative to Make 2G Ethanol Viable?" *Journal of Cleaner Production* 369. doi:10.1016/j.jclepro.2022.133286.

- Moraga, Gustavo, Sophie Huysveld, Fabrice Mathieux, Gian Andrea Blengini, Luc Alaerts, Karel Van Acker, Steven de Meester, and Jo Dewulf. 2019. "Circular Economy Indicators: What Do They Measure?" *Resources, Conservation and Recycling* 146: 452–61. doi:10.1016/j.resconrec.2019.03.045.
- Negrão, Djanira R., Adriana Grandis, Marcos S. Buckeridge, George J.M. Rocha, Manoel Regis L.V. Leal, and Carlos Driemeier. 2021. "Inorganics in Sugarcane Bagasse and Straw and Their Impacts for Bioenergy and Biorefining: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148. doi:10.1016/j.rser.2021.111268.
- Niu, Yu Qin, Jia Hui Liu, Cyril Aymonier, Simona Fermani, Damir Kralj, Giuseppe Falini, and Chun Hui Zhou. 2022. "Calcium Carbonate: Controlled Synthesis, Surface Functionalization, and Nanostructured Materials." *Chemical Society Reviews* 51(18): 7883–7943. doi:10.1039/d1cs00519g.
- Al Omari, M. M.H., I. S. Rashid, N. A. Qinna, A. M. Jaber, and A. A. Badwan. 2016. "Calcium Carbonate." In *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology*, Academic Press Inc., 31–132. doi:10.1016/bs.podrm.2015.11.003.
- Pandey, Ashok, Carlos R Soccol, Poonam Nigam, and Vanete T Soccol. 2000. "Biotechnological Potential of Agro-Industrial Residues. I: Sugarcane Bagasse." *Bioresource Technology*: 69–80.
- Panosso, Alan Rodrigo, Luciano Ito Perillo, Antônio Sérgio Ferraudo, Gener Tadeu Pereira, José Garcia Vivas Miranda, and Newton La Scala. 2012. "Fractal Dimension and Anisotropy of Soil CO₂ Emission in a Mechanically Harvested Sugarcane Production Area." *Soil and Tillage Research* 124: 8–16. doi:10.1016/j.still.2012.04.005.
- Parlamento Europeu, Conselho da União Europeia. 2019. "Regulamento (UE) 2019/1009 Do Parlamento Europeu e Do Conselho de 5 de Junho de 2019." *Jornal Oficial da União Europeia*, L 170: 1–114. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32019R1009#document1> (June 16, 2024).
- Pinheiro, Vanessa Elisa, Michele Michelin, Ana Claudia Vici, Paula Zaghetto de Almeida, and Maria de Lourdes Teixeira de Moraes Polizeli. 2020. "Trametes Versicolor Laccase Production Using Agricultural Wastes: A Comparative Study in Erlenmeyer Flasks, Bioreactor and Tray." *Bioprocess and Biosystems Engineering* 43(3): 507–14. doi:10.1007/s00449-019-02245-z.
- Quaresma, Joana. 2019. *Estudo Da Evolução Da Cor No Processo de Refinação de Ramas de Cana-de-Açúcar*. Lisboa.
- Raimondi, Isabela Monici, Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, Jacqueline Zanin Lima, Jéssica Pelinsom Marques, and Luiz Augusto Artimonte Vaz. 2020. "The Potential Use of Pressmud as Reactive Material for Cd²⁺ Removal: Adsorption Equilibrium, Kinetics,

Desorption, and Bioaccessibility.” *Water, Air, and Soil Pollution* 231(7).
doi:10.1007/s11270-020-04746-0.

Raízen. 2020. “Raízen Inicia Operação Comercial de Energia a Partir Do Biogás.”
<https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-inicia-operacao-comercial-de-energia-a-partir-do-biogas> (June 12, 2024).

Raízen. 2022. “Raízen Amplia Utilização de Resíduos Orgânicos Nos Canaviais e Reduz o Uso de Fertilizantes e Emissões de GEE.” <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-amplia-utilizacao-de-residuos-organicos-nos-canaviais-e-reduz-o-uso-de-fertilizantes-e-emissoes-de-gee> (June 12, 2024).

RAR, Açúcar. 2009a. “SGSA.030 – PRÉ-PRIMEIRA RECUPERAÇÃO.”

RAR, Açúcar. 2009b. “SGSA.ML.010 – PRIMEIRA RECUPERAÇÃO.”

RAR, Açúcar. 2009c. “SGSA.ML.011 – SEGUNDA RECUPERAÇÃO.”

RAR, Açúcar. 2009d. “SGSA.ML.012 – TERCEIRA RECUPERAÇÃO.”

RAR, Açúcar. 2017. *SGSA.021 - Estudo de Segurança Alimentar - Produção e Acondicionamento de Açúcar Areado Amarelo.*

RAR, Açúcar. 2018a. “SGSA.004 - Fluxograma Geral de Fabrico - Açúcar.” : 1–1.

RAR, Açúcar. 2018b. “SGSA.007 - Estudo de Segurança Alimentar - Carbonatação.” : 1–7.

RAR, Açúcar. 2018c. “SGSA.008 - Estudo de Segurança Alimentar - Descoloração.” : 1–3.

RAR, Açúcar. 2018d. “SGSA.009 - Estudo de Segurança Alimentar - Evaporação.” : 1–3.

RAR, Açúcar. 2018e. “SGSA.010 - Estudo de Segurança Alimentar - Cristalização.” : 1–4.

RAR, Açúcar. 2018f. “SGSA.011 - Estudo de Segurança Alimentar - Centrifugação.” : 1–3.

RAR, Açúcar. 2018g. “SGSA.012 - Estudo de Segurança Alimentar - Secagem.” : 1–3.

RAR, Açúcar. 2018h. “SGSA.013 - Estudo de Segurança Alimentar - Classificação.” : 1–3.

RAR, Açúcar. 2019a. “SGSA.005 - Estudo de Segurança Alimentar - Matéria-Prima.” : 1–13.

RAR, Açúcar. 2019b. “SGSA.006 - Estudo de Segurança Alimentar - Afinação.” : 1–6.

RAR, Açúcar. 2024. *MO.SGI.LI.005 - Analisador de Humidade.*

Rodrigues, Jaime. 2000. *Reutilização de Lamas de Carbonatação No Processo de Refinação Do Açúcar.* Porto.

Rossetto, Raffaella, Nilza Patricia Ramos, Regina Celia de Matos Pires, Mauro Alexandre Xavier, Heitor Cantarella, and Marcos Guimarães de Andrade Landell. 2022.

- "Sustainability in Sugarcane Supply Chain in Brazil: Issues and Way Forward." *Sugar Tech* 24(3): 941–66. doi:10.1007/s12355-022-01170-y.
- Santos Júnior, Edvaldo Pereira, Elias Gabriel Magalhães Silva, Maria Helena de Sousa, Emmanuel Damilano Dutra, Antonio Samuel Alves da Silva, Aldo Torres Sales, Everardo Valadares de Sa Barretto Sampaio, Luiz Moreira Coelho Junior, and Rômulo Simões Cezar Menezes. 2023. "Potentialities and Impacts of Biomass Energy in the Brazilian Northeast Region." *Energies* 16(9). doi:10.3390/en16093903.
- São Martinho. 2021. *PR.GSM.MAB.06.02 - Plano de Gestão Ambiental*.
- São Martinho. 2022. *RELATÓRIO ANUAL DE SUSTENTABILIDADE*.
- Saulat, Hammad, Mingli Cao, Muhammad Masood Khan, Mehran Khan, Muhammad Mahmood Khan, and Ali Rehman. 2020. "Preparation and Applications of Calcium Carbonate Whisker with a Special Focus on Construction Materials." *Construction and Building Materials* 236. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117613.
- Silalertruksa, Thapat, Patcharaporn Pongpat, and Shabbir H. Gheewala. 2017. "Life Cycle Assessment for Enhancing Environmental Sustainability of Sugarcane Biorefinery in Thailand." *Journal of Cleaner Production* 140: 906–13. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.010.
- Silalertruksa, Thapat, Chanipa Wirodcharuskul, and Shabbir H. Gheewala. 2022. "Environmental Sustainability of Waste Circulation Models for Sugarcane Biorefinery System in Thailand." *Energies* 15(24). doi:10.3390/en15249515.
- Da Silva, Daniel R., Marisa S. Crespi, Paula C.G.M. Crnkovic, and Clovis A. Ribeiro. 2015. "Pyrolysis, Combustion and Oxy-Combustion Studies of Sugarcane Industry Wastes and Its Blends." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 121(1): 309–18. doi:10.1007/s10973-015-4532-1.
- da Silva, R G, M Bortoletto, S A M Bigotto, J L Akasaki, L Soriano, and M M Tashima. 2021. "Effect of Wastes from Sugar Cane Industry on the Mechanical and Hydraulic Properties of Pervious Concrete." *Road Materials and Pavement Design* 23(9): 1981–98. doi:10.1080/14680629.2021.1927156.
- Soliwoda, Michał, Barbara Wieliczko, and Jacek Kulawik. 2020. "Circular Economy vs. Sustainability of Agribusiness." *Problems of Agricultural Economics* 362(1): 3–13. doi:10.30858/zer/110742.
- Tegethoff, F. Wolfgang., Johannes. Rohleder, and Evelyn. Kroker. 2001. *Calcium Carbonate : From the Cretaceous Period into the 21st Century*. Birkhauser Verlag.
- Ubando, Aristotle T., Charles B. Felix, and Wei Hsin Chen. 2020. "Biorefineries in Circular Bioeconomy: A Comprehensive Review." *Bioresource Technology* 299. doi:10.1016/j.biortech.2019.122585.

- de Vasconcelos, Romero Falcão Bezerra, José Ramon Barros Cantalice, Geber Barbosa de Albuquerque Moura, Mário Monteiro Rolim, and Carlos Eduardo de Vasconcelos Montenegro. 2012. "Compressibilidade de Um Latossolo Amarelo Distrocoeso Não Saturado Sob Diferentes Sistemas de Manejo Da Cana-de-Açúcar." *R. Bras. Ci. Solo* 36: 525–36.
- Vaz, Andreia. 2016. "Estudo de Segurança Alimentar Do Melaço - Provar Que o Melaço Produzido Na RAR Açúcar é Próprio Para Consumo Humano." Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho Escola de Engenharia.
- Vitor, João, Dos Santos, Laís Gomes Fregolente, Marcio Justi Laranja, & Altair, Benedito Moreira, & Odair, & Márcia, and Cristina Bisinoti. 2022. "Hydrothermal Carbonization of Sugarcane Industry By-Products and Process Water Reuse: Structural, Morphological, and Fuel Properties of Hydrochars." *Biomass Conversion and Biorefinery* 12: 153–61. doi:10.1007/s13399-021-01476-z/Published.
- Volpi, Maria Paula C., Livia B. Brenelli, Gustavo Mockaitis, Sarita C. Rabelo, Telma T. Franco, and Bruna S. Moraes. 2022. "Use of Lignocellulosic Residue from Second-Generation Ethanol Production to Enhance Methane Production Through Co-Digestion." *Bioenergy Research* 15(1): 602–16. doi:10.1007/s12155-021-10293-1.
- Walter, Arnaldo, Marcelo Valadares Galdos, Fabio Vale Scarpate, Manoel Regis Lima Verde Leal, Joaquim Eugênio Abel Seabra, Marcelo Pereira da Cunha, Michelle Cristina Araujo Picoli, and Camila Ortolan Fernandes de Oliveira. 2014. "Brazilian Sugarcane Ethanol: Developments so Far and Challenges for the Future." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 3(1): 70–92. doi:10.1002/wene.87.
- Zang, Joachim W., Kairo F. Martins, and Warde A. Da Fonseca-Zang. 2018. "Life Cycle Inventory for Biomethane as a Diesel Substitute for the Brazilian Ethanol Industry - Case Study." In *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 444–49. doi:10.1016/j.egypro.2018.10.048.
- Zhang, Qingyu, Amandeep Dhir, and Puneet Kaur. 2022. "Circular Economy and the Food Sector: A Systematic Literature Review." *Sustainable Production and Consumption* 32: 655–68. doi:10.1016/j.spc.2022.05.010.

Anexos

Anexo A. Conversão do valor neutralizante equivalente a CaCO_3 para equivalente a CaO .

Para comparar o valor neutralizante (VN) de 85,0% em CaCO_3 com o valor de 15 em equivalente CaO conforme o Regulamento (UE) 2019/1009, é necessário entender a conversão entre CaCO_3 e CaO , uma vez que estas duas unidades representam a capacidade neutralizante em diferentes formas químicas. A relação estequiométrica entre CaCO_3 e CaO é baseada nas massas molares:

- Massa molar do CaCO_3 (carbonato de cálcio) = 100,09 g/mol

- Massa molar do CaO (óxido de cálcio) = 56,08 g/mol

Assim, 100,09 g de CaCO_3 são equivalentes a 56,08 g de CaO .

$$\text{Equivalente CaO} = 85,0 \text{ g CaCO}_3 \times \left(\frac{56,08 \text{ g CaO}}{100,09 \text{ g CaCO}_3} \right) \approx 47,6 \text{ g CaO}$$

Portanto, um valor neutralizante de 85,0% em termos de CaCO_3 é aproximadamente equivalente a 47,6% em termos de CaO .

Anexo B. Valores, em percentagem, da humidade das lamas de carbonatação, medidas desde janeiro de 2021 até maio de 2024.

2021			
Mês	Data	Humidade (%)	Média
Janeiro	06/01/2021	31	30
	07/01/2021	33	
	11/01/2021	34	
	19/01/2021	34	
	20/01/2021	33	
	21/01/2021	34	
	22/01/2021	32	
	26/01/2021	15	
	27/01/2021	32	
	28/01/2021	27	
	29/01/2021	28	
Fevereiro	02/02/2021	34	33
	04/02/2021	33	
	11/02/2021	34	

	12/02/2021	31	
	17/02/2021	33	
	24/02/2021	33	
Março	24/03/2021	30	32
	25/03/2021	28	
	26/03/2021	34	
	30/03/2021	34	
	31/03/2021	35	
Abril	06/04/2021	35	32
	07/04/2021	28	
	08/04/2021	33	
	13/04/2021	35	
	14/04/2021	33	
	15/04/2021	33	
	16/04/2021	31	
	17/04/2021	34	
	19/04/2021	33	
	20/04/2021	32	
	21/04/2021	32	
	22/04/2021	33	
	29/04/2021	31	
Maió	04/05/2021	23	30
	05/05/2021	33	
	06/05/2021	29	
	07/05/2021	33	
	11/05/2021	32	
	12/05/2021	31	
	13/05/2021	33	
	14/05/2021	30	
	19/05/2021	28	
	21/05/2021	33	
	25/05/2021	32	
	26/05/2021	31	
	27/05/2021	26	
Junho	02/06/2021	33	30
	10/06/2021	33	
	17/06/2021	29	
	19/06/2021	31	
	20/06/2021	31	
	21/06/2021	28	
	22/06/2021	27	
Julho	01/07/2021	29	28
	13/07/2021	27	
	14/07/2021	23	
	15/07/2021	26	
	16/07/2021	26	
	21/07/2021	32	
	22/07/2021	33	

	23/07/2021	32	
	28/07/2021	25	
	30/07/2021	29	
Agosto	04/08/2021	29	28
	06/08/2021	29	
	10/08/2021	31	
	11/08/2021	31	
	12/08/2021	26	
	13/08/2021	27	
	17/08/2021	25	
	18/08/2021	26	
	19/08/2021	27	
	20/08/2021	26	
	27/08/2021	31	
Setembro	01/09/2021	30	28
	16/09/2021	23	
	22/09/2021	31	
	23/09/2021	31	
	30/09/2021	28	
Outubro	08/10/2021	30	23
	11/10/2021	7	
	12/10/2021	31	
	13/10/2021	31	
	14/10/2021	23	
	15/10/2021	16	
	21/10/2021	26	
	28/10/2021	22	
Novembro	10/11/2021	27	26
	17/11/2021	29	
	19/11/2021	28	
	22/11/2021	25	
	23/11/2021	26	
	24/11/2021	25	
	25/11/2021	27	
	26/11/2021	28	
	30/11/2021	24	
Dezembro	03/12/2021	22	28
	09/12/2021	30	
	15/12/2021	28	
	16/12/2021	29	
	17/12/2021	30	
	20/12/2021	30	
	21/12/2021	30	
	28/12/2021	30	
	29/12/2021	31	
2022			
Mês	Data	Humidade (%)	Média

Janeiro	04/01/2022	29	25
	06/01/2022	30	
	11/01/2022	31	
	12/01/2022	32	
	13/01/2022	29	
	26/01/2022	1	
Fevereiro	01/02/2022	30	28
	03/02/2022	32	
	15/02/2022	27	
	17/02/2022	29	
	18/02/2022	27	
	22/02/2022	25	
	23/02/2022	30	
	25/02/2022	31	
Março	02/03/2022	12	25
	03/03/2022	12	
	08/03/2022	31	
	09/03/2022	29	
	10/03/2022	33	
	14/03/2022	29	
	15/03/2022	26	
	16/03/2022	27	
	17/03/2022	28	
	18/03/2022	14	
	23/03/2022	29	
	24/03/2022	27	
	28/03/2022	27	
	29/03/2022	29	
	31/03/2022	24	
Abril	14/04/2022	22	28
	23/04/2022	32	
	24/04/2022	29	
	26/04/2022	27	
	27/04/2022	28	
	28/04/2022	29	
	29/04/2022	30	
Maiο	19/05/2022	1	13
	23/05/2022	23	
	25/05/2022	17	
Junho	08/06/2022	31	30
	14/06/2022	29	
	22/06/2022	32	
	29/06/2022	31	
Julho	13/07/2022	29	30
	26/07/2022	31	
	27/07/2022	32	
Agosto	10/08/2022	30	30
	11/08/2022	25	

	12/08/2022	32	
	16/08/2022	32	
	17/08/2022	31	
Setembro	01/09/2022	28	30
	02/09/2022	25	
	12/09/2022	32	
	20/09/2022	29	
	23/09/2022	31	
	27/09/2022	33	
	29/09/2022	32	
Outubro	04/10/2022	30	34
	06/10/2022	35	
	07/10/2022	33	
	10/10/2022	37	
	11/10/2022	37	
	13/10/2022	34	
	14/10/2022	35	
Novembro	07/11/2022	31	29
	11/11/2022	30	
	15/11/2022	28	
	16/11/2022	28	
	21/11/2022	30	
	22/11/2022	30	
	23/11/2022	30	
Dezembro	24/11/2022	28	28
	12/12/2022	29	
	14/12/2022	28	
2023			
Mês	Data	Humidade (%)	Média
Janeiro	05/01/2023	21	21
Fevereiro	24/02/2023	30	31
	28/02/2023	32	
Março	01/03/2023	30	32
	02/03/2023	28	
	07/03/2023	34	
	31/03/2023	37	
Maiο	02/05/2023	32	33
	03/05/2023	35	
	04/05/2023	34	
	23/05/2023	32	
	24/05/2023	31	
	25/05/2023	34	
Julho	05/07/2023	28	31
	06/07/2023	30	
	08/07/2023	33	

	11/07/2023	34	
	13/07/2023	32	
	28/07/2023	29	
Agosto	02/08/2023	28	26
	03/08/2023	24	
	08/08/2023	29	
	09/08/2023	32	
	10/08/2023	33	
	11/08/2023	30	
	16/08/2023	33	
	17/08/2023	31	
	22/08/2023	28	
	23/08/2023	24	
	24/08/2023	27	
		30/08/2023	
Setembro	22/09/2023	28	28
	28/09/2023	30	
	28/09/2023	28	
	29/09/2023	29	
Outubro	05/10/2023	11	26
	23/10/2023	32	
	25/10/2023	33	
	26/10/2023	24	
	27/10/2023	34	
	28/10/2023	25	
Novembro	01/11/2023	37	32
	02/11/2023	37	
	03/11/2023	36	
	04/11/2023	35	
	07/11/2023	36	
	08/11/2023	38	
	09/11/2023	37	
	15/11/2023	31	
	16/11/2023	30	
	17/11/2023	35	
	21/11/2023	30	
	30/11/2023	7	
Dezembro	01/12/2023	33	30
	06/12/2023	30	
	07/12/2023	29	
	08/12/2023	28	
2024			
Mês	Data	Humidade (%)	Média

Janeiro	03/01/2024	32	31
	04/01/2024	31	
	17/01/2024	34	
	18/01/2024	33	
	23/01/2024	33	
	24/01/2024	32	
	25/01/2024	27	
Fevereiro	01/02/2024	31	32
	08/02/2024	32	
	09/02/2024	32	
	10/02/2024	31	
	14/02/2024	30	
	15/02/2024	38	
Abril	02/04/2024	31	28
	03/04/2024	31	
	04/04/2024	27	
	05/04/2024	28	
	09/04/2024	25	
	10/04/2024	29	
	12/04/2024	28	
	24/04/2024	29	
Maio	10/05/2024	36	29
	11/05/2024	8	
	15/05/2024	29	
	16/05/2024	33	
	17/05/2024	35	
	18/05/2024	33	
	21/05/2024	30	
	23/05/2024	27	
	28/05/2024	31	
	29/05/2024	33	
	31/05/2024	26	
Média (%)		29	