



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

EMILLY MIRANDA SILVA

**HIDROGENAÇÃO DA LACTOSE PARA PRODUÇÃO DE LACTITOL UTILIZANDO
CATALISADOR DE Ni E Ru SUPORTADOS EM ALUMINA**

Recife

2025

EMILLY MIRANDA SILVA

**HIDROGENAÇÃO DA LACTOSE PARA PRODUÇÃO DE LACTITOL UTILIZANDO
CATALISADOR DE Ni E Ru SUPORTADOS EM ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientador (a): Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho

Coorientador (a): Paulo Henrique Miranda de Farias

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Emilly Miranda.

Hidrogenação da lactose para produção de lactitol utilizando catalisador de Ni e Ru suportados em alumina / Emilly Miranda Silva. - Recife, 2025.
48 p. : il., tab.

Orientador(a): Nelson Medeiros de Lima Filho

Coorientador(a): Paulo Henrique Miranda de Farias

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Catalisador heterogêneo. 2. Hidrogenação. 3. Lactose. 4. Níquel. 5. Rutênio. I. Lima Filho, Nelson Medeiros de. (Orientação). II. Farias, Paulo Henrique Miranda de . (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

EMILLY MIRANDA SILVA

**HIDROGENAÇÃO DA LACTOSE PARA PRODUÇÃO DE LACTITOL UTILIZANDO
CATALISADOR DE Ni E Ru SUPORTADOS EM ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Aprovado em: 09/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rafael Araújo Melo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me guiar e fortalecer em cada etapa desta caminhada e por não ter me deixado desistir ou perder a esperança em mim mesma, por ter me sustentado e me concedido a força e resiliência para seguir meus sonhos.

À minha família, principalmente, minha mãe, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida acadêmica, por sempre acreditar em mim e tornar tudo possível. Sem vocês, nada disso seria possível.

Um agradecimento especial a Marcus Vitor, meu namorado, por estar ao meu lado, sempre presente e muito paciente, por sempre acreditar em mim e me motivar, por sempre me dar suporte e incentivar nos momentos mais desafiadores dessa reta final.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Nelson Medeiros de Lima Filho, pela disponibilidade e acolhimento, pela atenção e por contribuir imensamente para meu desenvolvimento acadêmico.

Ao meu coorientador, Paulo Henrique Miranda de Farias, meu mais sincero e profundo agradecimento, por ter me guiado com paciência e dedicação durante toda minha trajetória no laboratório, por sempre me dar suporte, me ensinar e contribuir para meus conhecimentos, e por ter sido um pilar essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos de curso e aos integrantes do Laboratório de Processos Catalíticos, que além de momentos de aprendizado e descontração, me proporcionaram momentos que facilitaram e tornaram mais leve essa jornada.

Ao Laboratório de Combustíveis da UFPE e seus integrantes que tanto me moldaram como profissional, me ensinando e me possibilitando adquirir tanto conhecimento e experiência, jamais esquecerei dessa etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Pernambuco e aos professores que, ao longo dos anos, contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa trajetória e contribuíram para a realização deste trabalho e dessa etapa da minha vida.

Muito obrigada!

RESUMO

A hidrogenação de açúcares, como a lactose, é um processo fundamental na indústria alimentícia, e a catálise heterogênea desempenha um papel crucial devido à sua eficiência e seletividade. Este trabalho tem como objetivo estudar um catalisador heterogêneo bimetálico de níquel (Ni) e rutênio (Ru) suportados em alumina, avaliando sua eficiência catalítica sob diferentes condições reacionais. O catalisador foi sintetizado pelo método de impregnação por umidade incipiente e caracterizado por difração de raios X (DRX), termogravimetria (TGA) e absorção atômica (AAS). Foi realizado um planejamento fatorial com 8 experimentos, variando os parâmetros de temperatura (100°C e 140°C), pressão (400 e 600 psi) e carga de catalisador (5 e 10%). A cinética da reação foi modelada com base na teoria da reação pseudo-homogênea. Os resultados experimentais mostraram que a preparação do catalisador foi eficiente, com boas propriedades de dispersão e estabilidade térmica. O catalisador bimetálico apresentou alta atividade, com conversão de lactose superior a 85%, destacando-se em relação a catalisadores monometálicos. Dentre os parâmetros avaliados, a temperatura foi o fator que mais influenciou a conversão e o rendimento da reação. Além disso, o modelo cinético ajustou-se bem aos dados experimentais, com um erro absoluto inferior a 5%, conferindo maior confiabilidade à análise e interpretação dos resultados.

Palavras-chave: Catalisador heterogêneo, Hidrogenação, Lactose, Níquel, Rutênio.

ABSTRACT

The hydrogenation of sugars, such as lactose, is a fundamental process in the food industry, and heterogeneous catalysis plays a crucial role due to its efficiency and selectivity. This study aims to investigate a bimetallic heterogeneous catalyst of nickel (Ni) and ruthenium (Ru) supported on alumina, evaluating its catalytic efficiency under different reaction conditions. The catalyst was synthesized using the incipient wetness impregnation method and characterized by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), and atomic absorption spectroscopy (AAS). A factorial design was conducted with eight experiments, varying temperature (100°C and 140°C), pressure (400 and 600 psi), and catalyst loading (5% and 10%). The reaction kinetics were modeled based on the pseudo-homogeneous reaction theory. The experimental results showed that the catalyst preparation was efficient, with good dispersion properties and thermal stability. The bimetallic catalyst exhibited high activity, achieving lactose conversion above 85%, outperforming monometallic catalysts. Among the evaluated parameters, temperature was the most influential factor in conversion and reaction yield. Furthermore, the kinetic model fitted well to the experimental data, with an absolute error below 5%, providing greater reliability in the analysis and interpretation of results.

Keywords: Heterogeneous Catalyst, Hydrogenation, Lactose, Nickel, Ruthenium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Hidrogenação catalítica da lactose.	21
Figura 2 - Estrutura química do lactitol.	23
Figura 3 - Esquema da conversão da lactose em lactitol.	27
Figura 4 - Análise termogravimétrica obtido na síntese do catalisador.	28
Figura 5 – Análise de difratometria de Raios X para o catalisador.	29
Figura 6 - Gráfico de cubo para o rendimento.	31
Figura 7 - Diagrama de Pareto para o Rendimento.	32
Figura 8 - Gráfico normal dos efeitos padronizados.	33
Figura 9 - Gráfico normal dos efeitos padronizados por parâmetro para o rendimento.	34
Figura 10 - Conversão da lactose em lactitol ao longo do tempo reacional.	35
Figura 11 - Modelo reacional proposto.	36
Figura 12 - Ajuste do modelo cinético com os dados experimentais.	37
Figura 14 - Curva de calibração para a lactose	45
Figura 15 - Curva de calibração para o lactitol	45
Figura 16 - Curva de calibração para o galactitol	46
Figura 17 - Curva de calibração para o sorbitol	46
Figura 18 - Ajuste da equação linearizada de Arrhenius	47
Figura 19 – Ajuste do modelo para $T = 100^{\circ}\text{C}$	48
Figura 20 – Ajuste do modelo para $T = 120^{\circ}\text{C}$	48
Figura 21 – Ajuste do modelo para $T = 140^{\circ}\text{C}$	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição metálica do catalisador.	24
Tabela 2 - Valores dos parâmetros reacionais estudados.	27
Tabela 3 - Quantificação da fase metálica no catalisador.	30
Tabela 4 - Valores de rendimento para os experimentos estudados.	30
Tabela 5 - Erro percentual do modelo cinético.	37
Tabela 6 - Coeficientes da linearização da equação de arrhenius e energia de ativação.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAS	Espectroscopia de Absorção Atômica
DRX	Difração de Raios X
ICP-MS	Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado
IV	Infravermelho
LITPEG	Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia
Ni	Níquel
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Nitrato de níquel hexahidratado
PARR	Reator de alta pressão da marca Parr Instruments
Pd	Paládio
Ru	Rutênio
$\text{RuCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Cloreto de rutênio monohidratado
TGA	Análise Termogravimétrica
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Beta
k_1	Constante de velocidade
C_{Lac}	Concentração da lactose
C_{LT}	Concentração do lactitol

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. Produção da lactose.....	16
2.2. Uso da lactose.....	16
2.3. Lactose como resíduo industrial	17
2.4. Produtos derivados da lactose.....	18
2.5. Reação de hidrogenação da lactose para produção de lactitol	20
2.6. Lactitol.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1. Materiais	24
3.2. Métodos	24
3.2.1. Preparação do catalisador	25
3.2.2. Caracterização do catalisador	25
3.2.6. Análise Experimental para Reação de hidrogenação.....	27
3.2.7. Análise Reacional.....	28
4. RESULTADOS	28
4.1. Caracterização do catalisador	28
4.2. Planejamento fatorial dos experimentos	30
4.3. Modelagem cinética reacional	36
5. CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	41
APÊNDICE A – Determinação da curva de calibração	45
APÊNDICE B – Ajuste da equação linearizada de Arrhenius	47
APÊNDICE C – Modelagem cinética reacional	48

1. INTRODUÇÃO

Os carboidratos, sintetizados nos vegetais através da fotossíntese, são classificados de acordo com o número de unidades de açúcar em suas moléculas, podendo ser monossacarídeos, dissacarídeos, oligossacarídeos ou polissacarídeos. Conhecidos também como sacarídeos, esses compostos são valiosos como matéria-prima devido à sua origem renovável e ampla aplicação em produtos químicos, alimentos e fármacos (Lima, 2016).

A lactose, um dissacarídeo encontrado principalmente no soro do leite, em cerca de 4% de sua composição, é um açúcar de alto valor agregado e de ampla utilização industrial, composto por D-glicose e D-galactose, unidas por uma ligação glicosídica β -1,4 (Cheng; Martínez-Monteagudo, 2019). Destaca-se que nos últimos anos, a lactose tem enfrentado desafios comerciais devido à intolerância crescente, baixo poder fermentescível, solubilidade e adoçante, assim como a inadequação dos usos tradicionais para atender à demanda de resíduos lácteos (Lima, 2011).

Além disso, a indústria de laticínios, responsável por uma considerável geração de efluentes, enfrenta desafios ambientais significativos devido ao descarte inadequado do soro de leite, um subproduto rico em lactose. Cerca de metade do soro produzido no Brasil é descartado sem tratamento adequado, resultando em sérias preocupações ambientais devido à presença acentuada de lactose e proteínas. Esse descarte inadequado destaca a necessidade urgente de explorar alternativas sustentáveis para aproveitar integralmente o potencial nutricional do soro, incluindo a lactose (Souza et al., 2021).

Assim sendo, uma das maneiras de utilizar carboidratos a fim de transformá-los em produtos de alto valor é através do processo de hidrogenação. A hidrogenação catalítica de dissacarídeos, como a lactose, oferece vantagens significativas, como a eficiente conversão em produtos desejados, a seletividade de produto controlada por catalisadores específicos, e a possibilidade de ajustar as condições de reação para otimizar eficiência e seletividade (Mishra, 2018). O estudo dessas reações não apenas abre caminho para a produção eficiente de compostos valiosos, mas também proporciona entendimentos sobre os mecanismos de reação envolvidos, impulsionando avanços na área de catálise e na compreensão dos processos bioquímicos associados.

Nos processos de hidrogenação catalítica, normalmente são utilizados

catalisadores heterogêneos para converter os carboidratos. Os catalisadores podem ser suportados ou não, neste caso, são chamados de catalisadores mássicos (Lima, 2016). Os catalisadores heterogêneos costumam ser mais vantajosos devido a algumas características, como elevada área superficial e facilidade de recuperação. Para a hidrogenação da lactose, os metais de transição mais utilizados como catalisadores são Ni, Pd ou Ru, em concentrações variadas, suportados em carvão ativado ou alumina (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

Os produtos obtidos da hidrogenação de carboidratos encontram uma ampla gama de aplicações em processos industriais. No caso específico da lactose, além do produto principal, o lactitol, outros subprodutos, como sorbitol e galactitol, podem surgir do processo de hidrogenação das moléculas provenientes da hidrólise da lactose, ou seja, glicose e galactose (Mishra et al., 2018).

Nesse trabalho, busca-se seletividade na produção de lactitol, um álcool de açúcar derivado da redução da parte de glicose da lactose. O lactitol é adequado para o desenvolvimento de produtos sem açúcar, com baixas calorias e baixo índice glicêmico, demonstrando propriedades não cariogênicas e prebióticas (Ribeiro; Pirolla; Nascimento-Júnior, 2020). Desde a década de 1980, a aplicabilidade do lactitol nos campos de higiene e medicina foi demonstrada com sucesso. Foi incorporado com êxito em pastas de dente, enxaguantes bucais e no tratamento de doenças hepáticas. Além disso, o lactitol passou a ser utilizado em formulações de limpeza e em produtos para estilização capilar, como shampoos hidratantes, condicionadores e máscaras de tratamento, devido à sua estabilidade e capacidade de atrair umidade (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

Embora haja a possibilidade de eventuais desativações catalíticas que podem ocorrer durante a conversão de carboidratos em produtos de maior valor agregado (Lima, 2016), inviabilizando o processo, a hidrogenação por catálise heterogênea apresenta como vantagem uma facilidade ao separar o catalisador do meio reacional, sendo assim, um processo altamente benéfico. Além disso, devido ao aproveitamento de resíduos, o processo de hidrogenação desses carboidratos contribui para a busca de alternativas mais ecológicas e sustentáveis, quando comparado aos processos baseados em petroquímicos. Desta forma, essa abordagem não apenas impulsiona a ciência, mas também cria oportunidades de negócios e soluções para desafios industriais. Esses avanços resultam em produtos inovadores, sustentabilidade na indústria química, diversificação na indústria

alimentícia e contribuições para os setores de cosméticos e energias renováveis (Santos et al., 2015).

A partir dessa perspectiva, procura-se obter materiais catalisadores com boa estrutura e atividade, capazes de garantir uma boa conversão e seletividade dos produtos de interesse durante a reação de hidrogenação da lactose. Para isso, deve-se manter-se controlados e ajustados os parâmetros envolvidos na realização das etapas referentes ao trabalho, e, utilizar-se das técnicas conhecidas para as caracterizações e quantificações dos produtos obtidos.

Foram utilizados catalisadores à base de Ni e Ru, metais frequentemente utilizados na produção de álcoois de açúcar, como o lactitol (Cordeiro; Chagas; Dala-Paula, 2021). Além disso, de acordo com Kuusisto et al., 2007, catalisadores de rutênio suportados em diversos materiais demonstraram atividades significativas e, sob as condições adequadas, obtiveram boas conversões de açúcares por meio de processos de hidrogenação. Por outro lado, o níquel é amplamente utilizado na indústria devido ao seu baixo custo e aos resultados satisfatórios de atividade e estabilidade (Meloni; Martino; Palma, 2020).

O objetivo geral do presente trabalho consiste em sintetizar e caracterizar um catalisador heterogêneo bimetálico suportado em alumina para aplicação em reação de hidrogenação da lactose.

Desta forma, os objetivos específicos estão elencados a seguir:

- Sintetizar um catalisador heterogêneo bimetálico, utilizando níquel (Ni) e rutênio (Ru), suportados em alumina;
- Caracterizar o catalisador utilizando as técnicas de análise termogravimétrica (TGA), difração de raios-x (DRX) e espectroscopia de absorção atômica (AAS);
- Realizar triagem de parâmetros reacionais como temperatura, pressão e carga de catalisador, por meio de um planejamento fatorial de experimentos;
- Modelar a cinética reacional do sistema trifásico por meio do modelo pseudo-homogêneo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Produção da lactose

A lactose, um dissacarídeo composto por glicose e galactose, é a principal fonte de energia no leite de mamíferos (Paterson, 2022) e é predominantemente encontrada em produtos lácteos, sendo o leite de mamíferos, como vacas, cabras e ovelhas, a principal fonte dessa substância.

A produção de lactose começa com a coleta de soro de leite. É crucial manipular o soro de leite corretamente nesta fase, pois o tratamento inadequado pode resultar na fermentação do soro por diferentes cepas de bactérias. Realiza-se o processo de concentração para aumentar a proporção de lactose, seguido por etapas de purificação para remover impurezas indesejadas. Posteriormente, a lactose é cristalizada e seca para garantir estabilidade durante o armazenamento (Paterson, 2017).

Desafios surgem durante as etapas de concentração e cristalização. Tanto a nucleação quanto o crescimento dos cristais de lactose podem ser influenciados por variáveis de processamento, adicionando complexidade a essas etapas. Uma compreensão aprofundada das complexidades tanto da etapa de concentração quanto da secagem é crucial para alcançar uma produção consistente e de alta qualidade de lactose, como apontado por Paterson (2017).

O soro de leite, sendo o ponto de partida, apresenta desafios próprios. Com uma considerável quantidade de água livre, proteínas solúveis, lactose e quantidades variáveis de minerais, seu processamento exige especial atenção. A cristalização inadequada da lactose pode resultar na redução das propriedades funcionais, como observado por Teixeira (2014). Assim, garantir a qualidade em todas as fases do processo é essencial para a produção eficiente e consistente de lactose.

2.2. Uso da lactose

Os carboidratos fornecem a maior parte da energia necessária para a manutenção das atividades dos indivíduos e são classificados de acordo com a complexidade de suas estruturas. Os monossacarídeos e os dissacarídeos são algumas das formas em que os carboidratos podem se apresentar (Junior; Carvalho,

2018).

Um dissacarídeo amplamente utilizado, principalmente em indústrias de laticínios, é a lactose. Trata-se de um subproduto na indústria de laticínios originado do soro do queijo, que se destaca como um dos carboidratos mais valiosos, disponível de maneira acessível, abundante e renovável. No entanto, grande parte da produção anual de lactose é desperdiçada na forma de soro (Endres et al., 2016).

O uso atual da lactose na indústria alimentícia é amplamente baseado em suas características físico-químicas distintas em comparação com outros açúcares. Sua capacidade de realçar sabores e alterar as características de cristalização de outros açúcares resultou em diversas aplicações na produção de alimentos, como na indústria de confeitaria, de panificação, produtos fermentados, e produtos lácteos no geral. Além disso, a lactose encontra uso como substrato na produção de materiais como a penicilina e até para a produção de certos produtos químicos (Endres et al., 2016). Na indústria farmacêutica, a lactose é frequentemente empregada como um agente de volume em formulações de medicamentos, tanto para produtos destinados a humanos quanto para produtos veterinários (Dwevedi, 2016).

Apesar de ser amplamente empregada na indústria alimentícia, a lactose apresenta limitações em termos de benefícios específicos para os fabricantes de alimentos, devido a características como baixa doçura e solubilidade reduzida. Assim, a expansão no uso da lactose é mais provável através da sua aplicação como matéria-prima em processos adicionais, especialmente na produção de diversos produtos químicos (Oliveira, 2021).

2.3. Lactose como resíduo industrial

O setor de alimentos se destaca como uma das atividades industriais que mais geram efluentes, conforme destacado por Tikariha e Sahu (2014). A indústria de laticínios, em particular, contribui significativamente para essa estatística, gerando um volume considerável de efluentes com alta carga orgânica. No Brasil, por exemplo, o descarte inadequado do soro de leite, especialmente por pequenos e médios laticínios, resulta em sérios problemas ambientais devido à sua alta carga orgânica, rica em lactose e proteínas. Estima-se que cerca de 40% do soro produzido no país seja descartado de forma imprópria, contribuindo para a eutrofização de corpos d'água e outros impactos ambientais (Rohlfes et al., 2011).

A indústria da lactose tem uma longa história, existindo há mais de 100 anos (Paterson, 2017). No entanto, muitas empresas envolvidas na produção de lactose ao redor do mundo podem não compreender completamente os processos e os fatores ambientais que afetam esses processos. A análise de opções de destinação ambientalmente sustentáveis não apenas contribui para a preservação do meio ambiente, mas também pode melhorar a imagem institucional das empresas, marcas e produtos perante seus públicos de interesse (Marquardt et al., 2011).

Apesar de a indústria de laticínios ter como opção principal para o aproveitamento do soro de leite a produção de bebidas lácteas, essa abordagem representa apenas uma parcela reduzida do potencial do soro. Destaca-se, portanto, a necessidade premente de estudos científicos que busquem criar alternativas economicamente viáveis para aproveitar integralmente o potencial nutricional do soro. Isso inclui não apenas as proteínas e a gordura residual, mas principalmente a lactose, que pode ser uma valiosa matéria-prima. Essa abordagem não só atende às demandas crescentes por sustentabilidade na indústria alimentícia, mas também abre caminho para a inovação e o desenvolvimento de produtos que utilizem plenamente os recursos disponíveis, minimizando o impacto ambiental (Nunes et al., 2018).

2.4. Produtos derivados da lactose

A lactose pode ser convertida em vários derivados por meio de processos laboratoriais ou industriais, mesmo que apenas um número limitado dessas aplicações seja específico para a lactose. Diversos derivados de lactose são conhecidos, incluindo adoçantes, aditivos alimentares, agentes quelantes, acidulantes, surfactantes e polímeros (Dominici et al., 2022).

Industrialmente, os derivados da lactose mais importantes são o Lactitol, obtido por hidrogenação, a lactulose, obtida por isomerização, e o ácido lactobiônico, obtido pela oxidação da lactose. Há também derivados obtidos da hidrólise da lactose, como a tagatose, e a epilactose, obtida pela epimerização da lactose (Hassan et al., 2022).

A indústria de laticínios concentra seus esforços na utilização da lactose como matéria-prima para a fabricação de produtos mais valiosos, visto que, um aumento significativo na produção poderia resultar em uma redução acentuada no preço. Por essa razão, diversos estudos e avanços estão sendo realizados em áreas como a produção de ácido lactobiônico, de lactulose, e ésteres de lactitol de ácidos graxos,

evidenciando a constante busca por novas aplicações e processos na utilização desse componente lácteo (Rocha; Guerra, 2020).

O ácido lactobiônico é recomendado como agente complexante para íons metálicos e como acidulante alimentar. A lactulose é obtida por isomerização alcalina da porção de glicose em um grupo frutose. Supõe-se que ela poderia reprimir bactérias coliformes e estimular *B.bifidum*, espécie de bactéria probiótica, nos intestinos de bebês. Os ésteres de lactitol de ácidos graxos foram descritos como agentes de superfície ativos (Karim; Aider, 2022).

A lactose apresenta um potencial significativo como matéria-prima para a síntese do ácido láctico, utilizado no setor alimentício como acidulante e agente aromatizante, além de ser empregado na produção de polímeros, como o ácido polilático (PLA). Apesar da possibilidade de obter ácido láctico estereoespecífico D(-) para aplicações particulares por meio de um processo especial, é lamentável que a produção predominante desse ácido ocorra por meio da conversão microbiológica da sacarose em vez da lactose. Isso ocorre devido à maior viabilidade econômica da sacarose como matéria-prima (Hassan et al., 2022).

A tagatose é um monossacarídeo obtido pela isomerização da galactose, que, por sua vez, resulta da hidrólise da lactose. Apesar de ter uma doçura semelhante à da sacarose, possui um baixo valor calórico. Seu método de produção pode envolver a adição de hidróxido de cálcio à solução de galactose. Além de suas propriedades adoçantes, a tagatose exibe efeitos prebióticos e tem sido objeto de estudos para possíveis aplicações no tratamento do diabetes tipo 2 (Roy et al., 2018).

A epilactose é um dissacarídeo que consiste em galactose e manose, sendo produzido por meio da epimerização da lactose. Embora presente em pequenas quantidades no leite, tem ganhado atenção devido aos avanços na sua produção e aos estudos sobre seus potenciais benefícios à saúde. Está associada especialmente no contexto da microbiota intestinal e efeitos probióticos, promovendo a absorção de cálcio no intestino delgado e evitando condições como a arteriosclerose (Jameson et al., 2021).

2.5. Reação de hidrogenação da lactose para produção de lactitol

A obtenção de álcoois de açúcar como sorbitol, manitol e lactitol teve um avanço significativo com os estudos de Kasehagen (1953), que desenvolveu um processo

contínuo para essa conversão através do processo de hidrogenação direta de açúcares redutores na presença de catalisadores sólidos, possibilitando posteriormente o uso do lactitol para pesquisas no campo da nutrição, ciência dos materiais e biotecnologia (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

A principal vantagem da hidrogenação em fase heterogênea é a fácil separação do substrato e do sistema catalítico. Entretanto a hidrogenação em fase homogênea torna-se mais atraente por não apresentar problemas do processo heterogêneo como a baixa atividade e dificuldade de realizar a hidrogenação quantitativamente (Mishra et al., 2018).

A hidrogenação de aldeídos de açúcar é reconhecida como um dos melhores processos químicos para produzir álcoois de açúcar (Hernandez-Mejia et al., 2016). Apesar disso, a hidrogenação específica da lactose, um dos dissacarídeos mais abundantes, para lactitol, recebe menos atenção. O lactitol, no entanto, é um álcool de açúcar versátil e reconhecido entre vários outros álcoois de açúcar. Sua produção a partir da hidrogenação da lactose, principalmente derivada do processo de fabricação de queijo e de recursos naturais, é valorizada devido à sua utilidade como ingrediente alimentar e matéria-prima para a indústria alimentícia, farmacêutica e baseada em biotecnologia (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

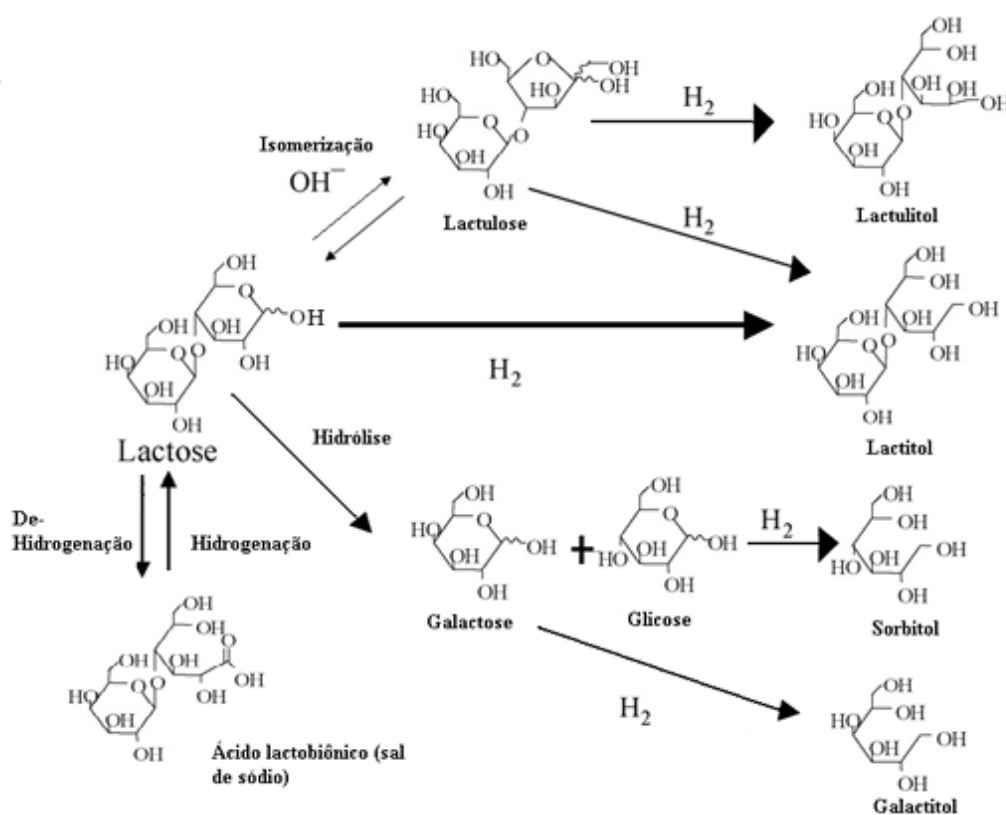
Esse processo químico ocorre de tal forma que o hidrogênio é adicionado ao grupo carbonila da molécula de glicose. Durante essa operação, a lactose pode ser hidrolisada em glicose e galactose ou sofrer epimerização, resultando na formação de lactulose (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019). Ambas as reações ocorrem sob diferentes condições de temperatura e pressão.

A ocorrência de reações de epimerização e hidrólise ocorrem apenas em condições severas superiores a 403K e 90bar. Além disso, os produtos da hidrólise e da epimerização também podem ser hidrogenados, gerando sorbitol, dulcitol e lactulitol, respectivamente. Esses aspectos adicionam complexidade ao processo de hidrogenação da lactose (Lima, 2011).

Estudos sobre a hidrogenação catalítica de carboidratos consideram diversos fatores, incluindo o tipo e a concentração do catalisador, pressão, temperatura, pH, sais precursores e solventes. A temperatura é um parâmetro importante que influencia no rendimento da reação de hidrogenação da lactose, sendo normalmente conduzida em temperaturas abaixo de 150°C (Zhang et al., 2020). Além disso, o pH ideal para a

hidrogenação da lactose fica entre 5,5 e 6,5, pois valores mais alcalinos favorecem reações competitivas, como a isomerização da lactose, reduzindo a eficiência da conversão seletiva para lactitol (Lima, 2011). Este processo apresenta desafios complexos que exigem compreensão e controle cuidadosos para garantir sua eficácia e segurança. O esquema da Figura 1 relaciona as reações a partir da lactose e seus respectivos produtos.

Figura 1 - Hidrogenação catalítica da lactose.



Fonte: Lima (2011).

2.6. Lactitol

O lactitol, composto cuja estrutura química está apresentada na Figura 2, é um álcool açucarado dímero, não encontrado na natureza e produzido industrialmente por meio de hidrogenação catalítica da lactose (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019). Descrito como um adoçante alternativo de sabor doce suave e limpo, o lactitol tem em média 40% do poder adoçante da sacarose, por isso, costuma ser

combinado com outros edulcorantes para buscar um sabor mais equilibrado. O lactitol fornece cerca de metade das calorias por grama da sacarose. Além disso, tem um índice glicêmico baixo, o que significa que tem pouco impacto nos níveis de glicose no sangue. (Cordeiro; Chagas; Dala-Paula, 2021). O lactitol é um dos laxantes mais prescritos para tratar a constipação crônica devido ao seu mecanismo de ação no intestino. Por não ser hidrolisado pela lactase, ele é minimamente absorvido no intestino delgado e segue para o intestino grosso, onde é fermentado pela microbiota intestinal. Nesse processo, cria um gradiente osmótico, responsável por seu efeito laxativo, ao aumentar a retenção de água nas fezes e facilitar sua passagem (Prasad; Abraham, 2017).

Há mais de 100 anos, Senderens (1920) relatou pela primeira vez o lactitol, obtido através da hidrogenação da lactose na presença de níquel ativo. Nos primórdios dos anos 1990, Kivikoski et al. (1992) elucidaram as várias formas cristalinas do lactitol e caracterizaram seus pontos de fusão distintos. A fortificação de alimentos infantis, a síntese de poliéteres à base de lactitol, agente adoçante, alimentação animal e fermentação são exemplos notáveis das aplicações industriais do lactitol (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

Pode-se encontrar o lactitol no estado sólido em diferentes formas cristalinas. A difração de raios-X (DRX) e os espectros de infravermelho (IV) revelaram três formas hidratadas, duas formas anidras e uma forma amorfa. A forma mais comum de lactitol é o monohidratado, que é obtido através da cristalização lenta da suspensão de lactitol. O di-hidrato de lactitol é formado a partir da forma amorfa a uma umidade relativa de 90%. A forma amorfa de lactitol pode converter-se em estado deliquescente, di-hidrato e monohidratado quando a umidade relativa está em torno de 93%, 90% e 53-84%, respectivamente (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

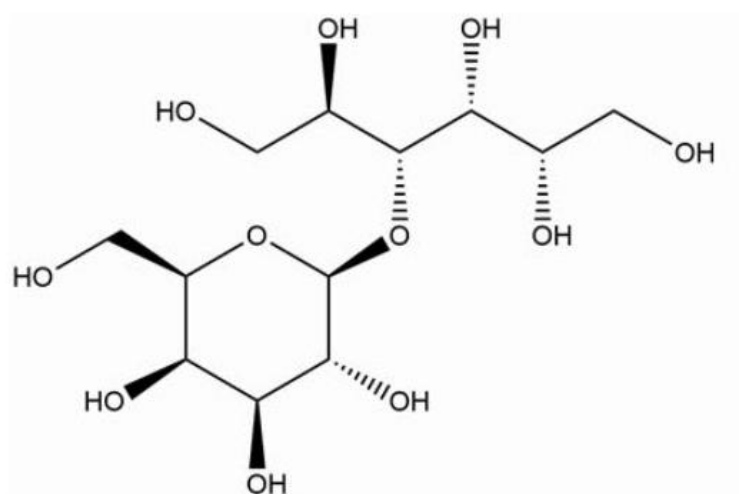
Empregado na preservação de artefatos arqueológicos, o lactitol revelou-se uma opção viável. Uma pesquisa acerca da estabilidade da madeira arqueológica saturada de água demonstrou que a impregnação com lactitol antes da liofilização proporcionou propriedades higroscópicas superiores em comparação com a impregnação com polietileno glicol (Majka; Babiński; Olek, 2017).

Psimouli e Oreopoulou (2012) investigaram o uso do lactitol como substituto do açúcar em receitas de bolo. Os resultados mostraram que a substituição na mesma proporção manteve características importantes da massa. Além disso, não foram

identificadas diferenças significativas durante a análise sensorial no quesito textura e sabor (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

Comparado aos dissacarídeos relacionados, como lactose e sacarose, o lactitol exhibe uma maior estabilidade química. Essa estabilidade é atribuída à sua estrutura molecular, que carece de um grupo carbonila, proporcionando-lhe estabilidade em uma ampla faixa de pH (3-9). As diversas propriedades do lactitol abriram uma janela para aplicações não convencionais, incluindo a síntese de surfactantes, emulsificantes e hidrogéis (Martínez-Monteagudo; Enteshari; Metzger, 2019).

Figura 2 - Estrutura química do lactitol.



Fonte: Cordeiro; Chagas; Dala-Paula (2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Para a realização das etapas de preparação do catalisador e testes reacionais foram utilizados alguns materiais como gama-alumina (Al_2O_3 , 100%, Sasol), nitrato de níquel hexahidratado ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 97%, Vetec), cloreto de rutênio hidratado ($\text{RuCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 99%, Merck), Lactose (99%, Vetec).

3.2. Métodos

A seguir, há o detalhamento das metodologias de preparação e caracterização dos catalisadores, bem como o planejamento fatorial e a descrição para realização dos experimentos e sua quantificação.

3.2.1. Preparação do catalisador

Foi preparado um catalisador bimetálico suportado em 15 g de gama-alumina, previamente calcinada a 900°C por 4 horas, pelo método de impregnação por umidade incipiente. A Tabela 1 apresenta os metais e seus respectivos teores para o catalisador.

Tabela 1 - Composição metálica do catalisador.

Catalisador
Níquel (Ni) – 10%
Rutênio (Ru) – 3%
Fonte: A autora (2025).

Inicialmente, foram pesadas as massas, previamente calculadas, dos sais a serem utilizados nas impregnações. São eles:

- Nitrato de níquel hexahidratado ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$);
- Cloreto de Rutênio ($\text{RuCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Após pesado, o sal de níquel foi dissolvido em um volume equivalente ao volume de poros previamente calculado do suporte de alumina. Posteriormente, essa solução foi adicionada a buma bureta e foi gotejando, lentamente, sobre a alumina contida em um cadinho. A mesma foi sendo homogeneizada com a ajuda de uma espátula. Em seguida, o suporte impregnado foi submetido a secagem em estufa a 105°C, seguida de calcinação em mufla a 530°C para a formação do óxido de níquel. Da mesma forma, o sal de rutênio foi dissolvido, adicionado gota a gota, no material anterior, seguido por nova secagem na estufa. Posteriormente, realizou-se a redução em um forno aquecido a 500°C, com um fluxo de gás hidrogênio de 50 mL.min⁻¹, onde os

metais presentes no catalisador foram reduzidos à sua forma metálica.

3.2.2. Caracterização do catalisador

Para fins de quantificação e estudo dos catalisadores preparados e do método utilizado para a preparação, foram aplicadas técnicas de caracterização que fossem capazes de trazer informações a respeito da composição, estrutura e atividade dos catalisadores. Para esse entendimento, serviram de base as técnicas de Difração de Raios-x (DRX), Análise Termogravimétrica (TGA) e Espectroscopia de Absorção Atômica (AAS).

Os equipamentos para as técnicas de DRX, TGA foram disponibilizados pelo LATECLIM, Laboratório de Tecnologias Limpas, localizado no LITPEG-UFPE. Além disso, a espectroscopia de absorção atômica foi conduzida no LAMSA, Laboratório de Análises Minerais, Solos e Água, localizado no departamento de engenharia química da UFPE.

3.2.3. Análise termogravimétrica (TGA)

Na célula TGA, foi aquecida, de forma controlada, uma massa conhecida do catalisador, antes da etapa de calcinação, enquanto era monitorada a perda de massa. Após isso, foi possível avaliar o comportamento do material com a elevação da temperatura e obteve-se informações acerca de sua estabilidade. Nessa análise, as amostras foram submetidas a uma atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL.min⁻¹, com uma taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹ até 900°C, em um equipamento NETZSCH STA 449 JUPITER.

3.2.4. Difração de Raios-X (DRX)

Por meio da técnica de Difração de Raios-x, pode-se observar picos referentes aos planos cristalográficos dos metais presentes, bem como a cristalinidade do material. A técnica de difração de Raios-X consiste na irradiação de um feixe de raios X na amostra sob diferentes ângulos. O detector capta os raios X difratados pela amostra e converte esses sinais em um padrão elétrico que pode ser analisado para

identificar características estruturais do material. A caracterização foi realizada pelo equipamento Rigaku SmartLabSE, voltagem de 40 kV, com uma corrente de 30 mA. A análise foi conduzida na faixa de 2θ de 5° a 80°, com um passo de 0,01 e um intervalo de aquisição de 2 segundos.

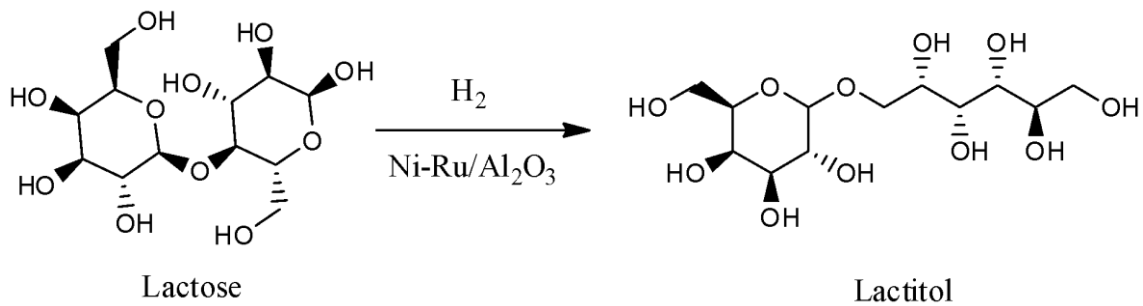
3.2.5. Espectroscopia de absorção atômica (AAS)

A análise por AAS foi realizada com o objetivo de quantificar a carga metálica de níquel (Ni) e rutênio (Ru) depositada no suporte de alumina. Para isso, uma amostra do catalisador será submetida à digestão em água régia (mistura de ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção volumétrica de 3:1) sob aquecimento, garantindo a completa dissolução dos metais. Após a digestão, a solução resultante foi filtrada e diluída em meio adequado antes da análise. Em seguida, a solução obtida foi analisada em um espectrofotômetro de absorção atômica Shimadzu AA-6300 equipado com lâmpadas específicas para os elementos em questão.

3.2.6. Análise Experimental para Reação de hidrogenação

Os experimentos de hidrogenação da lactose foram conduzidos em um reator de alta pressão, modelo PARR. As condições reacionais estudadas estão relacionadas na Tabela 2 e o mecanismo global de reação apresentado na Figura 3. Inicialmente, o reator foi carregado com a massa de catalisador para cada experimento, 2,5 ou 5 g, adicionado 50 g de lactose e 750 ml de água destilada. O reator foi, então, fechado e a reação foi iniciada ao atingir a temperatura de reação, 100°C ou 140°C, e pressurizados com hidrogênio, 400 psi ou 600 psi. Após isso, foram coletadas as amostras para posterior análise no cromatógrafo.

Figura 3 - Esquema da conversão da lactose em lactitol.



Fonte: A autora (2025).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros reacionais estudados.

Experimento	Parâmetros		
	Temperatura (°C)	Pressão (psi)	Carga do catalisador (%)
1	140	600	10
2	140	600	5
3	140	400	10
4	140	400	5
5	100	600	10
6	100	600	5
7	100	400	10
8	100	400	5

Fonte: A autora (2025).

3.2.7. Análise Reacional

As alíquotas reacionais foram analisadas através de um cromatógrafo líquido de alta eficiência HPLC Varian ProStar. Foi utilizada uma coluna AMINEX HPX87-P, com uma fase móvel formada por água ultrapura. A coluna foi aquecida a uma temperatura de 80°C, com uma vazão de 0,8 ml.min⁻¹.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

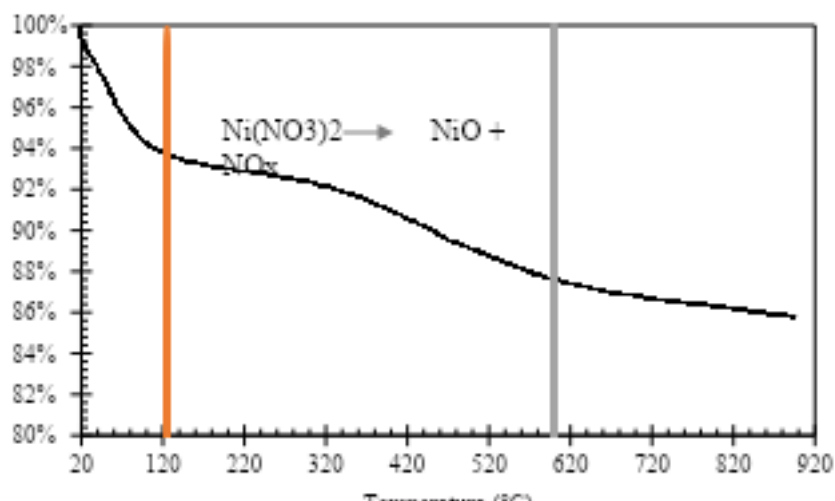
4.1. Caracterização do catalisador

Para a caracterização, foram realizados ensaios de análise termogravimétrica, difratometria de Raios-X e absorção atômica.

Com os dados do experimento de análise termogravimétrica, foi possível plotar o gráfico ilustrado pela Figura 4. Pode-se observar uma perda de massa inicial até uma temperatura de 125°C. Essa perda de massa pode ser descrita relacionada com a perda de umidade e de água de cristalização.

Posteriormente, entre 125°C e 600°C, há uma perda de massa significativa. Essa região é característica da decomposição térmica do nitrato de níquel, formando, assim, o óxido de níquel, durante a etapa de calcinação.

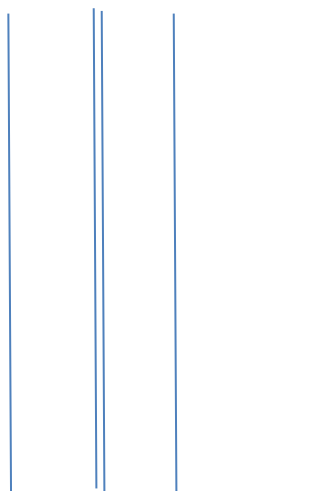
Figura 4 - Análise termogravimétrica obtido na síntese do catalisador.



Fonte: A autora (2025).

Os resultados da análise de difratometria de Raios X podem ser observados abaixo. De acordo com a Figura 5, é possível observar um pico de difração em $2\theta = 45^\circ$ e $2\theta = 51,7^\circ$ correspondentes ao plano cristalográfico do níquel (111) e (200), respectivamente, e um pico em torno de $2\theta = 38^\circ$ e $2\theta = 68^\circ$ relativo a óxido de níquel. Pode-se, ainda, observar a presença de picos correspondentes ao rutênio metálico, observado entre $2\theta = 44^\circ$ e $2\theta = 45$, indicando o empacotamento hexagonal de nanopartículas de rutênio.

Figura 5 – Análise de difratometria de Raios X para o catalisador.



Fonte: A autora (2025).

A Tabela 3 a seguir apresenta os resultados das análises de absorção atômica do catalisador após a digestão ácida. É possível observar que a porcentagem final do níquel (9,57%) ficou muito próxima da porcentagem teórica (10%). Esse comportamento é esperado, uma vez que a metodologia por impregnação por umidade incipiente garante a adição de 100% do metal. Essa diferença de 0,43% pode ser explicada por alguns motivos, dentre eles, o material pesado inicialmente pode ter uma porcentagem de umidade considerável, reduzindo, assim, a porcentagem de níquel adicionada, ou ainda, essa diferença pode ser explicada apenas pela variação na metodologia de análise, onde uma análise de ICP-MS possa ter uma melhor sensibilidade. No entanto, esse resultado não apresenta nenhum prejuízo, visto que 0,43% não é uma diferença significativa na concentração.

Tabela 3 - Quantificação da fase metálica no catalisador.

% Teórica (Ni)	% Experimental (Ni)
10	9,57

Fonte: A autora (2025).

4.2. Planejamento fatorial dos experimentos

Como dito anteriormente, foi realizado um planejamento fatorial para o estudo dos parâmetros reacionais. O rendimento para formação do lactitol para cada experimento está descrito na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Valores de rendimento para os experimentos estudados.

Experimento	Conversão (%)	Seletividade (%)	Rendimento (%)
1	96	90	86
2	76	90	68
3	92	83	76
4	73	88	65
5	30	100	30
6	24	100	24
7	29	100	29
8	27	100	27

Fonte: A autora (2025).

A partir dos resultados acima apresentados, pode-se observar que o aumento da temperatura nos experimentos de 1 a 4 influenciou significativamente a conversão e o rendimento, aumentando a taxa de reação e promovendo uma maior transformação dos reagentes. No entanto, as temperaturas mais elevadas reduziram a seletividade, possivelmente devido à ocorrência de reações secundárias que formam subprodutos indesejados, comportamento também observado por Mishra et al., (2018) em estudo semelhante com catalisadores bimetálicos.

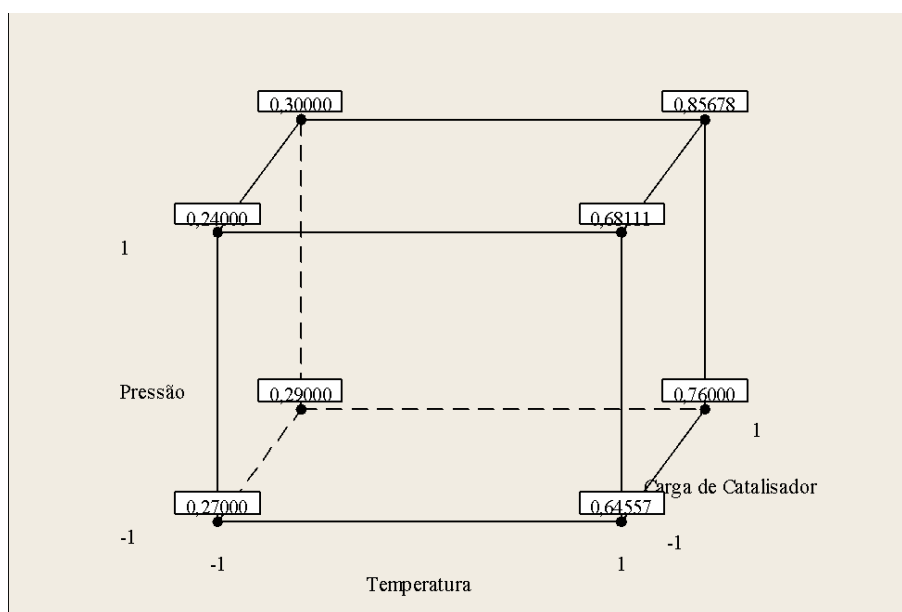
Comparando os experimentos 1 e 2 com os experimentos 3 e 4, onde houve uma variação de pressão a que o sistema foi submetido, pode-se observar que o aumento da pressão favoreceu a seletividade para o lactitol. Esse resultado está em concordância com os dados reportados por Jerônimo e Souza., 2003, efeito que pode estar relacionado a uma melhor dissolução dos gases na fase líquida, favorecendo a formação do produto desejado.

Entre os experimentos 1 e 3 e os experimentos 2 e 4, houve uma variação da carga de catalisador utilizado. Desse modo, pode-se observar que nos casos em que a carga foi maior, houve uma melhora da conversão e rendimento. Esse mesmo

resultado foi observado por Kuusisto et al., 2008. Isso sugere que um maior número de sítios ativos disponíveis aumentou a eficiência da reação.

Para melhor compreender a variação do rendimento reacional com a variação de algum parâmetro, foi construído um gráfico de cubo, sendo ilustrado pela Figura 6.

Figura 6 - Gráfico de cubo para o rendimento.



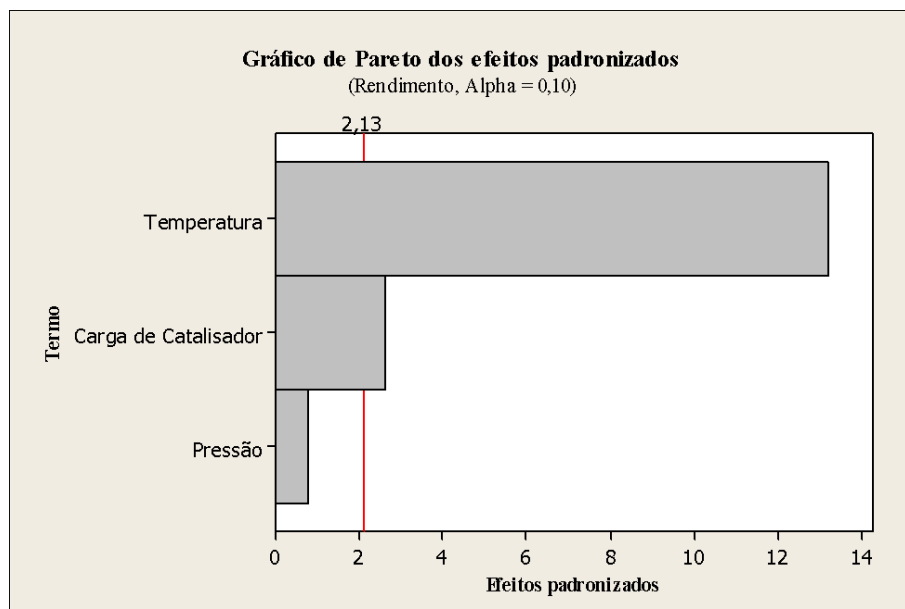
Fonte: A autora (2025).

A partir do gráfico de cubo, algumas informações podem ser extraídas. Em termos de rendimento, o maior valor ocorre na condição de alta temperatura, alta pressão e alta carga de catalisador, com um valor de 0,85678 ou aproximadamente 86%. Além disso, o menor valor de rendimento aparece na condição de baixa temperatura, baixa pressão e baixa carga de catalisador, com um valor de 0,27000 ou 27%. Logo, indica-se que o aumento da temperatura e da carga de catalisador são os fatores mais relevantes para melhorar o rendimento.

Para identificar qual parâmetro teve um efeito significativo nos valores de rendimento, foi construído o diagrama de Pareto. Na Figura 7 é possível observar o efeito padronizado de cada parâmetro reacional. Esses efeitos são valores de estatísticas T que testam a hipótese nula de que tal efeito é nulo. O efeito padronizado é diretamente proporcional à intensidade de seu parâmetro. É importante notar que o diagrama de Pareto ilustra uma resposta de intensidade de significância.

Portanto, nota-se que a temperatura possui o maior efeito na conversão da lactose, seguido pela carga do catalisador.

Figura 7 - Diagrama de Pareto para o Rendimento.



É importante notar que o diagrama de Pareto ilustra uma resposta de intensidade de significância. É preciso, portanto, analisar se a influência é positiva ou negativa para o rendimento reacional.

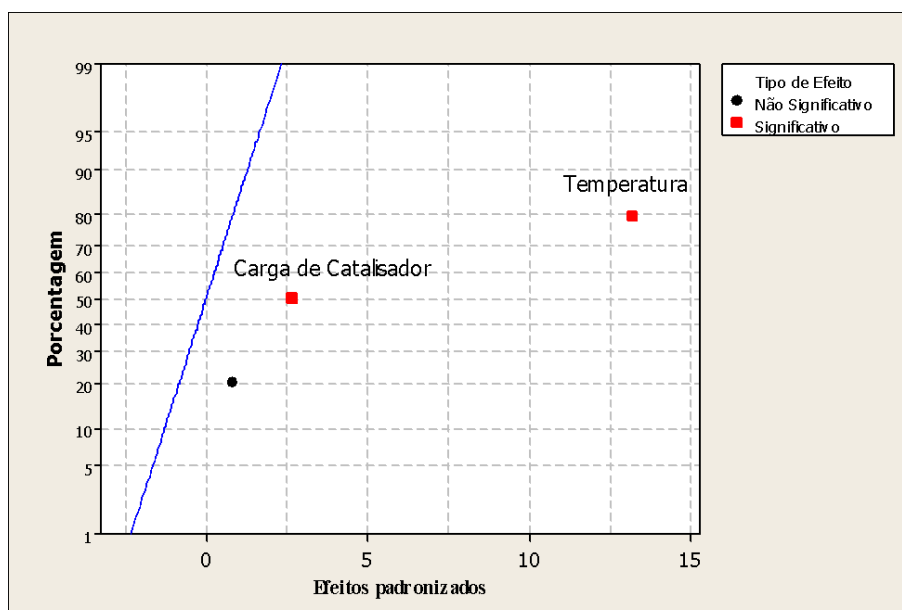
A temperatura está diretamente ligada à energia de ativação da reação. Logo, é um efeito que interfere diretamente na reação.

A carga de catalisador também se demonstrou significativa. Ela é fundamental na etapa catalítica, diminuindo a energia de ativação. Observa-se, no entanto, que esse parâmetro não foi tão significativo. Isso pode ser um resultado de uma baixa variação da carga de catalisador, não sendo uma variação tão significativa. No entanto, não demonstrou ser um ponto negativo no estudo reacional.

A pressão não foi um efeito significativo nas condições reacionais estudadas. A pressão está relacionada com a solubilidade do gás hidrogênio na solução. Esse comportamento pode significar que a variação de hidrogênio solubilizado não foi significativa, uma vez que todas as moléculas estavam dispostas nos sítios ativos. Com isso, uma pressão relativamente baixa já seria o suficiente.

O gráfico representado na Figura 8 permite identificar os fatores que têm impacto significativo no rendimento da reação.

Figura 8 - Gráfico normal dos efeitos padronizados.

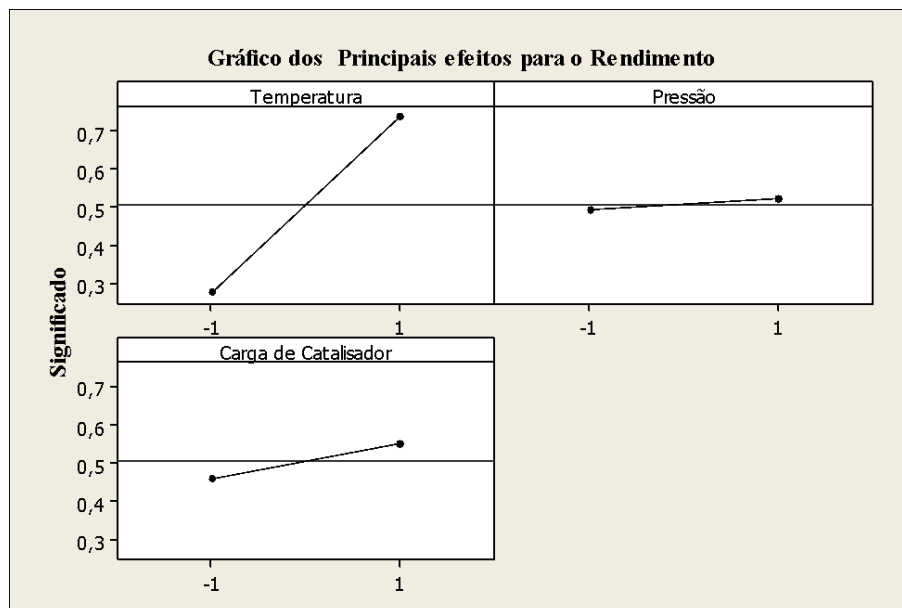


Fonte: A autora (2025).

Observa-se que a variação da temperatura tem uma influência substancial no rendimento. A carga do catalisador também é significativa, mas com um efeito menor em comparação à temperatura. Por outro lado, a pressão está próxima à linha de referência, o que sugere que seu efeito não é estatisticamente relevante dentro das condições testadas. Esses resultados indicam que a otimização do rendimento se concentra, principalmente, na temperatura e na carga do catalisador, enquanto a pressão pode ser mantida constante sem impacto significativo na resposta.

O gráfico apresentado na Figura 9 possibilita avaliar como cada fator influencia o rendimento individualmente. Dessa forma, os resultados mostram que a temperatura é o fator mais influente, seguida pela carga do catalisador, enquanto a pressão tem impacto pouco significativo. Essas interpretações foram feitas ao observar as inclinações de cada um dos três gráficos, visto que, uma maior inclinação do ponto mais baixo para o ponto mais alto, implica em maior impacto na resposta analisada, nesse caso, o rendimento. Os resultados obtidos neste estudo apresentaram um comportamento semelhante ao encontrado por Mishra et al., 2018, onde também foi observado um aumento na conversão com o incremento da temperatura, indicando a influência desse parâmetro na atividade catalítica.

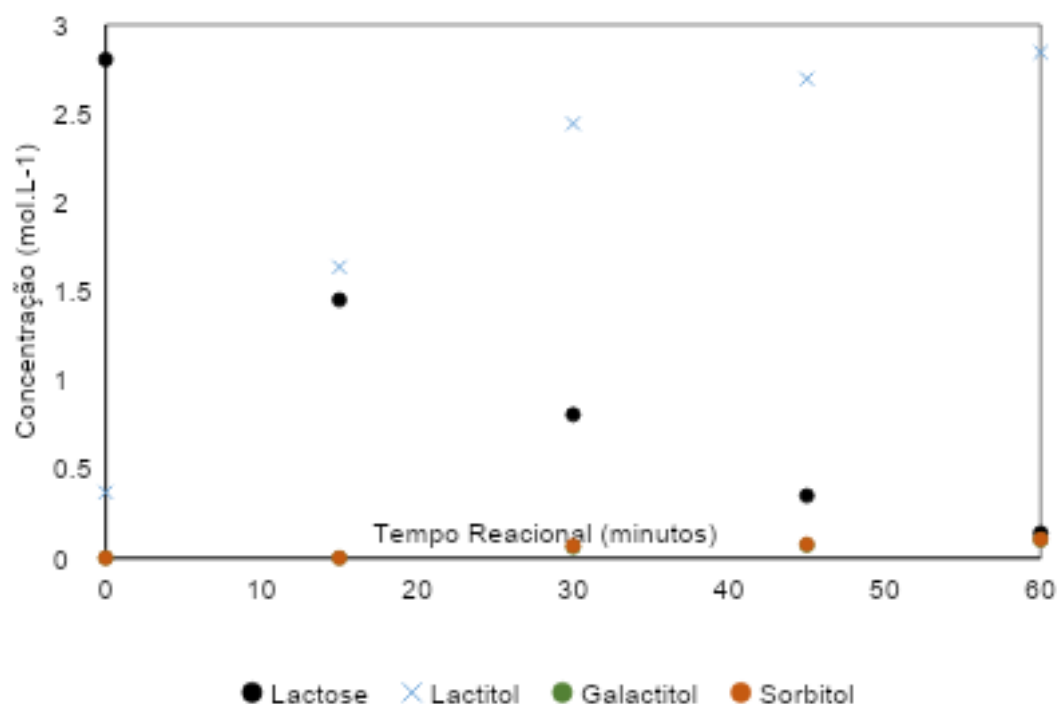
Figura 9 - Gráfico normal dos efeitos padronizados por parâmetro para o rendimento.



Fonte: A autora (2025).

Seguindo para uma avaliação do processo reacional como um todo, o gráfico apresentado na Figura 10 é referente à variação de concentração da lactose, lactitol, galactitol e sorbitol, ao longo do tempo reacional, evidenciando a redução gradual da concentração de lactose, enquanto a de lactitol aumenta até se estabilizar próximo aos 60 minutos. Esse comportamento indica uma conversão eficiente, com o lactitol sendo o principal produto formado, comportamento também observado por Mishra et al., 2018. A curva da lactose sugere uma cinética de primeira ordem, com consumo exponencial ao longo do tempo. Além disso, as concentrações de galactitol e sorbitol permaneceram baixas e praticamente constantes, indicando que as condições reacionais utilizadas minimizaram a produção de subprodutos.

Figura 10 - Concentração da lactose, lactitol, galactitol e sorbitol ao longo do tempo reacional.



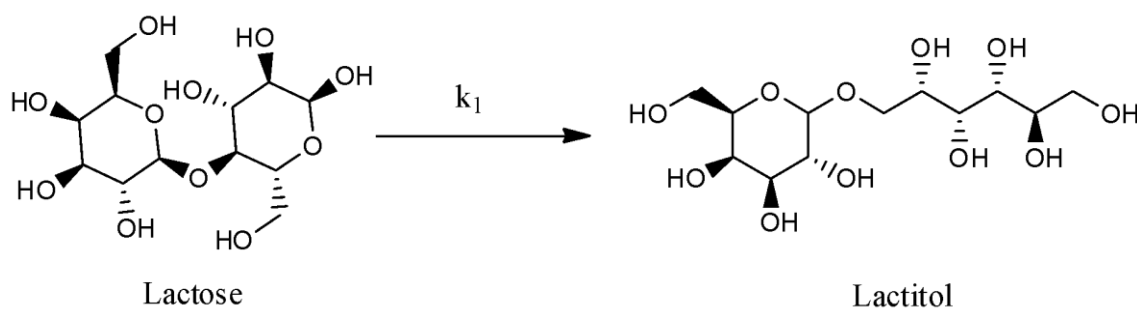
Fonte: A autora (2025).

4.3. Modelagem cinética reacional

De posse dos resultados experimentais, foi realizado uma modelagem cinética. Esta modelagem foi realizada com base numa reação pseudo-homogênea, na qual admite-se um sistema homogêneo, mesmo sendo trifásico. Essa simplificação facilita o modelo, propiciando uma resolução mais simples.

Dito isto, o modelo proposto segue o caminho reacional ilustrado pela Figura 11.

Figura 11 - Modelo reacional proposto.



Fonte: A autora (2025).

Diante do mecanismo, é possível escrever as equações cinéticas a seguir:

$$\frac{dC_{Lac}}{dt} = -k_1 C_{Lac}$$

$$\frac{dC_{LT}}{dt} = k_1 C_{Lac}$$

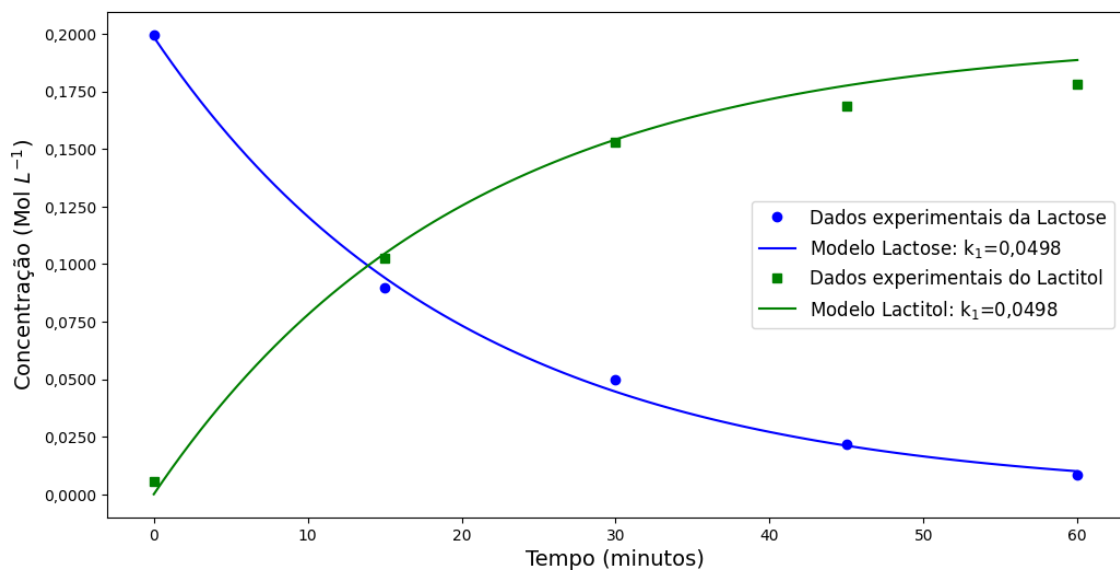
Diante do sistema de equações diferenciais de trivial solução, tem-se as seguintes equações que descrevem as concentrações da lactose e lactitol ao longo do tempo:

$$C_{Lac} = C_{Lac_0} e^{-k_1 C_{Lac}}$$

$$C_{LT} = C_{Lac_0} (1 - e^{-k_1 C_{Lac}})$$

O modelo foi ajustado para os dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados, por meio da minimização da função objetivo, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Ajuste do modelo cinético com os dados experimentais.



Fonte: A autora (2025).

Inicialmente, como uma análise primária de avaliação do ajuste, observa-se visualmente que o modelo conseguiu se ajustar com os dados experimentais. No entanto, para validar o modelo criteriosamente, foram calculados os erros percentuais dos ajustes para as três temperaturas avaliadas. Esses valores encontram-se na Tabela 5. É possível observar que o erro médio obtido para o ajuste foi inferior a 10% em todos os casos, refletindo em um bom ajuste. A validação do modelo pseudo-homogêneo traz consigo uma simplificação no processo, uma vez que um modelo pseudo-homogêneo é formado por reações mais simples, de fácil resolução, e que não existe um gasto computacional considerável para a resolução dos sistemas de equações diferenciais.

Tabela 5 - Erro percentual do modelo cinético.

Temperatura (°C)	Erro (%)	
	Lactose	Lactitol
100	1,0	1,0
120	3,0	6,0
140	7,0	3,0

Fonte: A autora (2025).

Após a validação do modelo pelo cálculo dos erros médios do ajuste e com os valores das constantes cinéticas obtidas para as temperaturas de 100°C ($k_1=0,0059 \text{ min}^{-1}$), 120°C ($k_1=0,0153 \text{ min}^{-1}$), 140°C ($k_1=0,0498 \text{ min}^{-1}$), (os ajustes e as constantes podem ser encontrados no apêndice C), foi possível estimar a energia de ativação da reação por meio da linearização da equação de Arrhenius, cujos coeficientes estão apresentados na Tabela 6. O valor de energia de ativação encontrado neste estudo (76,93 kJ/mol) está em conformidade com aqueles reportados na literatura para sistemas catalíticos semelhantes. Um estudo conduzido por Lima, 2011 determinou um valor de 68,42 kJ/mol para a hidrogenação da lactose utilizando um catalisador de níquel suportado em carvão ativado (Ni/C). Além disso, outro estudo realizado por Mishra et al, 2018 encontrou uma energia de ativação de 66,2 kJ/mol ao utilizar um catalisador bimetálico 5Ru–5NiO/TiO₂.

Tabela 6 - Coeficientes da linearização da equação de Arrhenius e energia de ativação.

1/T (K ⁻¹)	ln(k)	Equação do ajuste	Energia de ativação
0,002421	-2,99974	Y=-9253x+19,391	76,93 Kj.mol ⁻¹
0,002545	-4,1799		
0,002681	-5,40368		

Fonte: A autora (2025).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar catalisadores heterogêneos bimetálicos de níquel (Ni) e rutênio (Ru) suportados em alumina, avaliando seu desempenho sob diferentes condições reacionais e modelando a cinética pelo modelo pseudo-homogêneo. Os resultados de caracterização indicaram boa estabilidade térmica e eficiente impregnação dos metais no suporte, com formação de estruturas cristalinas adequadas.

Os experimentos demonstraram que a maior conversão e rendimento ocorreram sob alta temperatura, pressão e carga catalítica, com a temperatura se destacando como o parâmetro mais influente. A modelagem cinética apresentou boa correlação com os dados experimentais, com desvio médio inferior a 10% e uma constante cinética de primeira ordem ($k_1 = 0,0498$), confirmando a eficiência do modelo na descrição da conversão da lactose e formação do lactitol.

Apesar dos bons resultados, o estudo apresenta limitações, como a ausência de testes prolongados em condições operacionais reais. Para pesquisas futuras, recomenda-se investigar diferentes suportes, variações na composição metálica e o uso de reatores de fluxo contínuo, com o objetivo de ampliar a aplicabilidade dos catalisadores desenvolvidos em contextos industriais como biocombustíveis e química sustentável.

REFERÊNCIAS

- CHENG, Shouyun; MARTÍNEZ-MONTEAGUDO, Sergio I. **Hydrogenation of lactose for the production of lactitol**. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, v. 14, n. 1, p. e2275, 2019;
- CORDEIRO, Mírian Megda; CHAGAS, Thaynan Aparecida Bueno; DALA-PAULA, Bruno Martins. **Polióis como substitutos à sacarose: obtenção, características químicas e implicações à saúde Polyols as substitutes for sucrose: production, chemical characteristics, and health implications**, 2021;
- DOMINICI, Simona et al. **Lactose: Characteristics, food and drug-related applications, and its possible substitutions in meeting the needs of people with lactose intolerance**. Foods, v. 11, n. 10, p. 1486, 2022;
- DWEVEDI, A. **Enzyme Immobilization: Advances in Industry, Agriculture, Medicine, and the Environment**. Springer, 2016;
- ENDRES, Creciana Maria et al. **Produção de xarope hidrolisado de lactose do permeado de soro de leite e aplicação em bebida láctea fermentada**. 2016;
- FOREZI, Luana da Silva Magalhães et al. **Aqui tem Química: Supermercado. Parte III: Carboidratos**. Revista Virtual de Química, v. 14, n. 4, 2022;
- HASSAN, Laila Khaled; ABD-WAHHAB, Khaled G.; ABD EL-AZIZ, Mahmoud. **Lactose derivatives: properties, preparation and their applications in food and pharmaceutical industries**. Egyptian Journal of Chemistry, v. 65, n. 6, p. 339-356, 2022;
- HERNANDEZ-MEJIA, Carlos et al. **Ru/TiO₂-catalysed hydrogenation of xylose: the role of the crystal structure of the support**. Catalysis Science & Technology, v. 6, n. 2, p. 577-582, 2016.
- JAMESON, John Kristian et al. **Biochemical characterization of two cellobiose 2-epimerases and application for efficient production of lactulose and epilactose**. Current Research in Biotechnology, v. 3, p. 57-64, 2021;
- JERÔNIMO, C. H. M.; SOUSA, J. F. **Valorização e Aproveitamento de Subprodutos Lácticos: Extração de Proteínas e Hidrogenação Catalítica da Lactose**. 2003. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado, Dpto de Eng. Química, UFRN, Natal, Brasil.
- JUNIOR, Wenceslau Fernandes Neves; CARVALHO, Anderson Cargnin. **Influência da ingestão prévia de carboidratos com alto e baixo índice glicêmico sobre o potencial aeróbico de corredores de rua**. Revista Brasileira de Nutrição Esportiva, v. 12, n. 72, p. 419-430, 2018;
- KARIM, Ahasanul; AIDER, Mohammed. **Production of prebiotic lactulose through isomerisation of lactose as a part of integrated approach through whey and whey permeate complete valorisation: A review**. International Dairy Journal, v. 126, p. 105249, 2022;
- KUUSISTO, Jyrki et al. **From renewable raw materials to high value-added fine chemicals—catalytic hydrogenation and oxidation of D-lactose**. Catalysis Today, v. 121, n. 1-2, p. 92-99, 2007.
- KUUSISTO, Jyrki et al. **Kinetics of the catalytic hydrogenation of D-lactose on a carbon supported ruthenium catalyst**. Chemical Engineering Journal, v. 139, n. 1, p. 69-77, 2008.
- LIMA, Ana Cassia Cabral de. **Valorização de meios de lactose via processos de hidrogenação e oxidação catalíticos em reator de leito gotejante**. 2011;
- LIMA, Fabiana S. **Oxidação catalítica de açúcares**. 2016;
- MAJKA, Jerzy; BABIŃSKI, Leszek; OLEK, Wiesław. **Sorption isotherms of**

waterlogged subfossil Scots pine wood impregnated with a lactitol and trehalose mixture. *Holzforschung*, v. 71, n. 10, p. 813-819, 2017;

MARQUARDT, L. et al. **Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental.** *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2011;

MARTÍNEZ-MONTEAGUDO, Sergio I.; ENTESHARI, Maryam; METZGER, Lloyd. **Lactitol: Production, properties, and applications.** *Trends in Food Science & Technology*, v. 83, p. 181-191, 2019;

MELONI, Eugenio; MARTINO, Marco; PALMA, Vincenzo. **A short review on Ni based catalysts and related engineering issues for methane steam reforming.** *Catalysts*, v. 10, n. 3, p. 352, 2020;

MISHRA, Dinesh Kumar et al. **Ru–NiOx nanohybrids on TiO2 support prepared by impregnation-reduction method for efficient hydrogenation of lactose to lactitol.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 68, p. 325-334, 2018;

NUNES, Luane Alcântara et al. **O soro do leite, seus principais tratamentos e meios de valorização.** *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, p. 301-326, 2018;

OLIVEIRA, Karolayne Silva de. **Estudo da frequência de não conformidades na matéria prima em um laticínio e propostas de ações corretivas.** 2021;

PATERSON, A. H. J. **Lactose processing: From fundamental understanding to industrial application.** *International Dairy Journal*, 67, 80 90, 2017;

PATERSON, A. H. J. **Lactose: Production, Applications.** *Encyclopedia of Dairy Sciences (Third Edition)*. Pages 764-770, 2022;

PRASAD, V. G. M.; ABRAHAM, Philip. **Management of chronic constipation in patients with diabetes mellitus.** *Indian Journal of Gastroenterology*, v. 36, p. 11-22, 2017;

RIBEIRO, T. R.; PIROLLA, N. F. F.; NASCIMENTO-JÚNIOR, N. M. **Adoçantes artificiais e naturais: Propriedades químicas e biológicas, processos de produção e potenciais efeitos nocivos.** *Revista virtual de Química*, v. 12, n. 5, p. 1-41, 2020.;

ROCHA, João M.; GUERRA, Alexandra. **On the valorization of lactose and its derivatives from cheese whey as a dairy industry by-product: an overview.** *European Food Research and Technology*, v. 246, n. 11, p. 2161-2174, 2020;

ROHLFES, Ana Lúcia Becker et al. **Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental.** *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2011;

ROY, Sohini et al. **Tagatose as a potential nutraceutical: Production, properties, biological roles, and applications.** *Journal of Food Science*, v. 83, n. 11, p. 2699-2709, 2018;

SANTOS, Regiane Ribeiro et al. **Proteína do soro de leite: Aproveitamento e aplicações na produção de embalagem biodegradável.** *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, n. 5, p. 9, 2015;

SOUZA, Camila Favretto de et al. **Pós tratamento por eletrocoagulação de efluente do processamento do soro de leite tratado por reator anaeróbio.** 2021;

TEIXEIRA, Gustavo Araújo et al. **Cristalização em leite vibrado: uso de soro de queijo purificado na separação de lactose.** 2014;

TIKARIHA, Ashish; SAHU, Omprakash. **Study of characteristics and treatments of dairy industry waste water.** *Journal of applied & environmental microbiology*, v. 2, n. 1, p. 16-22, 2014;

ZHANG, Wenli et al. **Sugar alcohols derived from lactose: lactitol, galactitol, and sorbitol**. Applied microbiology and Biotechnology, v. 104, p. 9487-9495, 2020;

APÊNDICES

APÊNDICE A – Determinação da curva de calibração

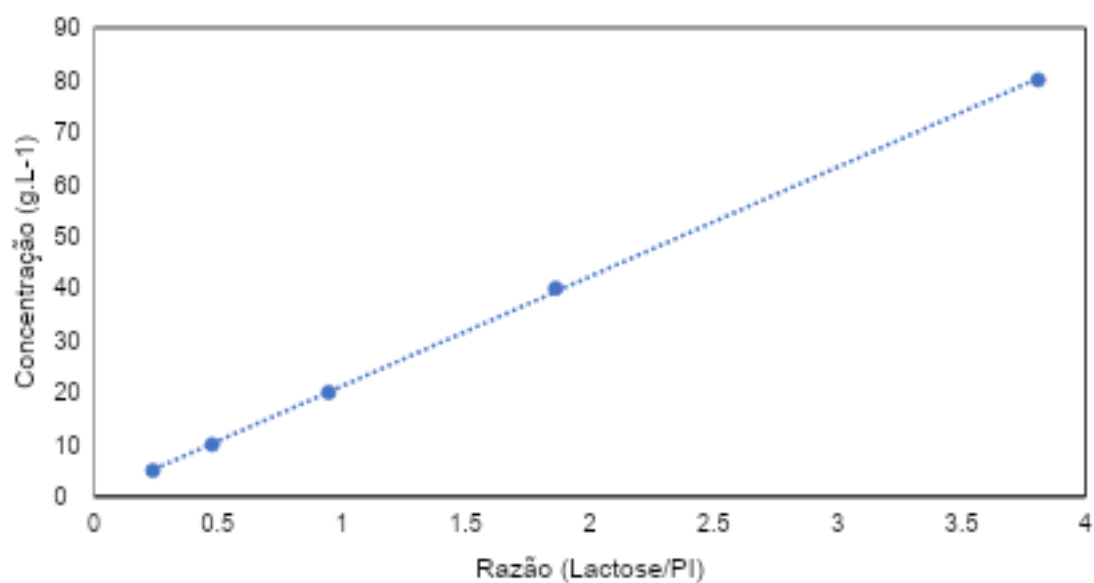


Figura 13 - Curva de calibração para a lactose

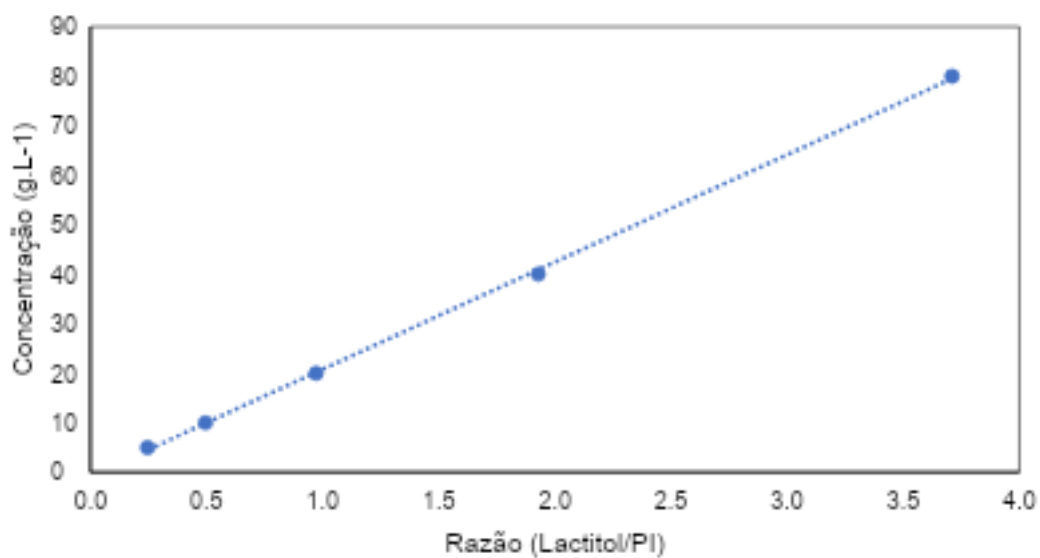


Figura 14 - Curva de calibração para o lactitol

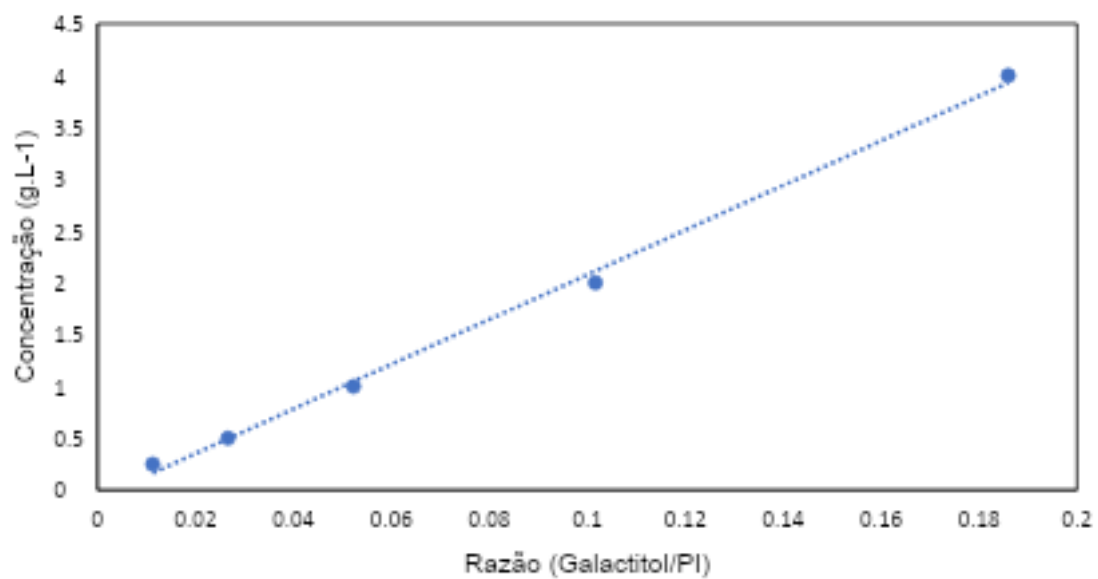


Figura 15 - Curva de calibração para o galactitol

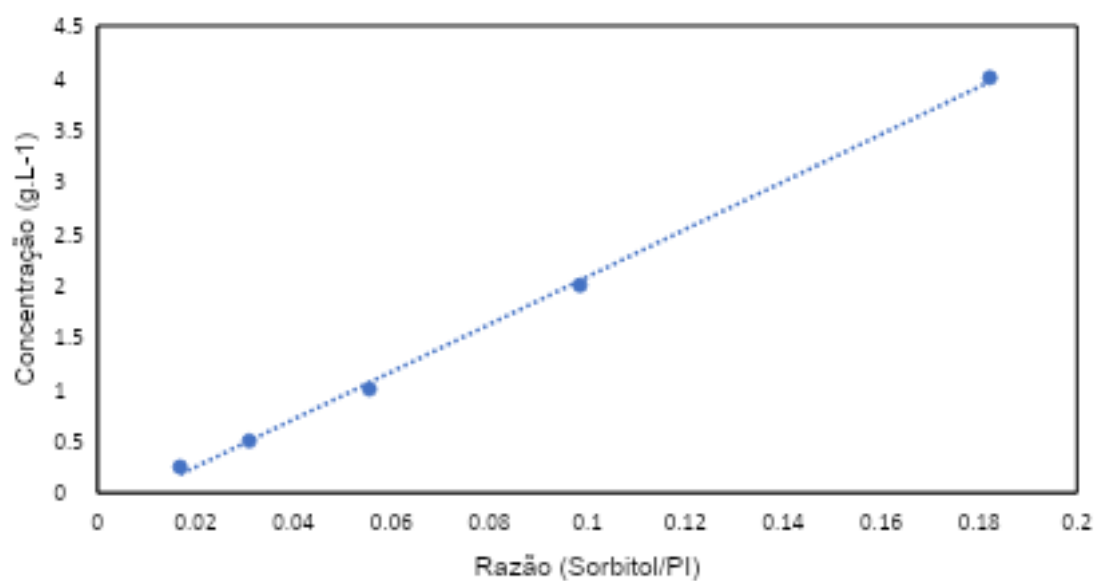


Figura 16 - Curva de calibração para o sorbitol

APÊNDICE B – Ajuste da equação linearizada de Arrhenius

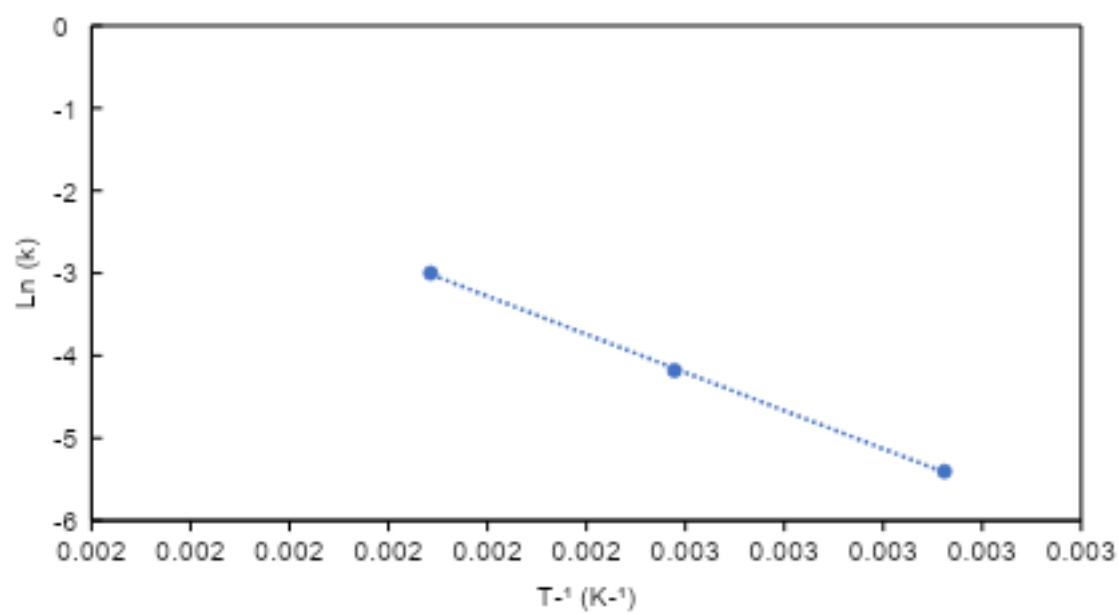


Figura 17 - Ajuste da equação linearizada de Arrhenius

APÊNDICE C – Modelagem cinética reacional

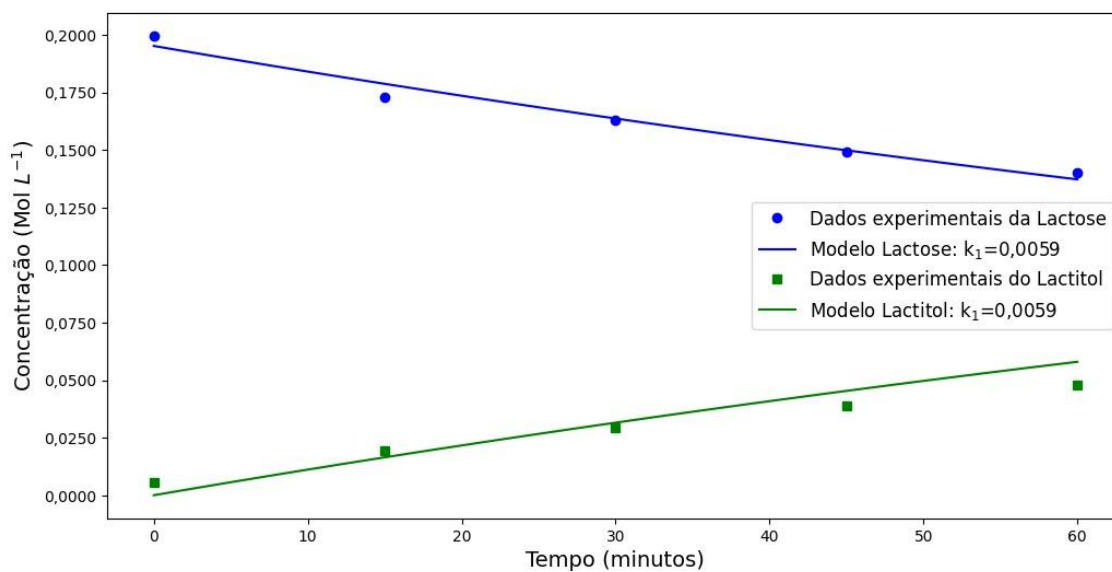


Figura 18 – Ajuste do modelo para T = 100°C

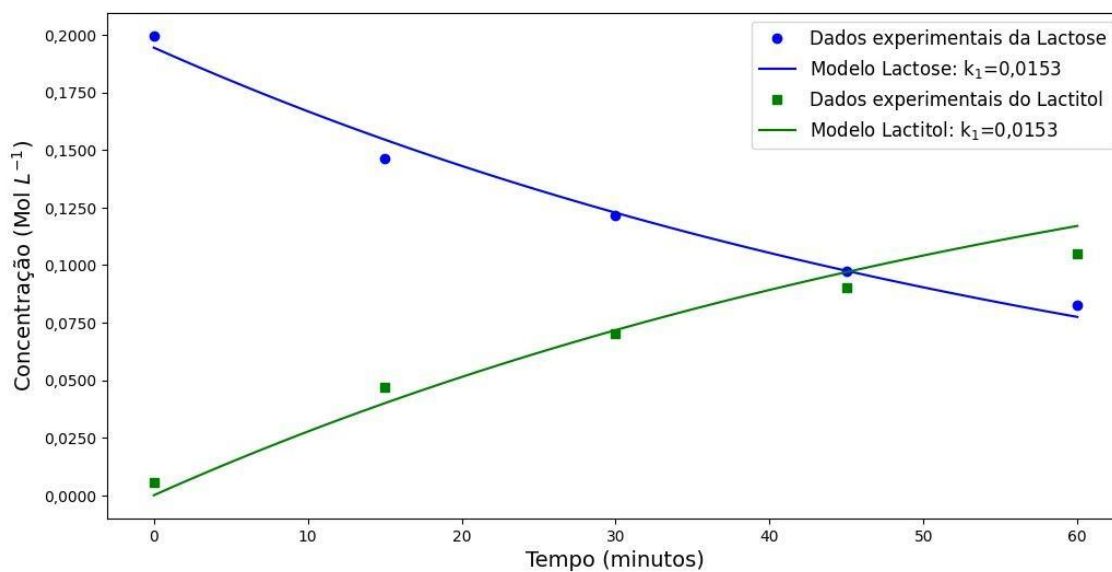


Figura 19 – Ajuste do modelo para T = 120°C

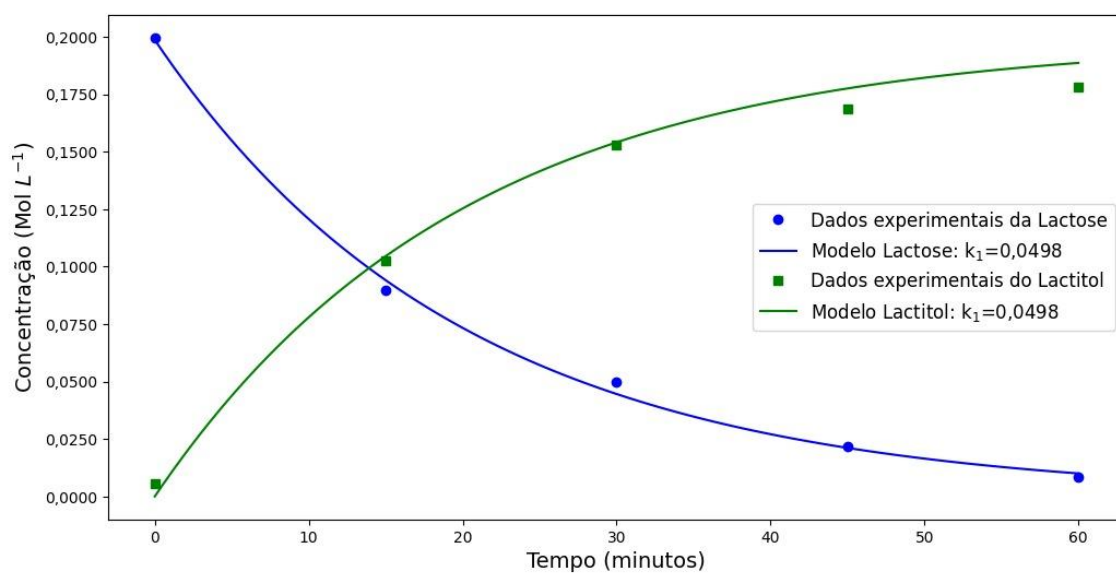


Figura 20 – Ajuste do modelo para $T = 140^{\circ}\text{C}$