Encontro Nacional do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP – 2026

Valorização de moléculas renováveis por catálise heterogênea

Aplicações catalíticas de carvões sulfonados na isomerização de terpenos

Dra.Gabrielle Mathias Reis
Orientador: Prof. Dr. Wagner Alves Carvalho
Coorientador: Prof. Dr. Dalmo Mandelli

Gestão:

A transição energética também é uma transição do carbono

Quando falamos em transição energética, normalmente pensamos em:

- Eletrificação
- Biocombustíveis
- Energia solar
- Energia eólica



Mas existe outra questão: a indústria química também precisa de carbono.

Hoje, grande parte das matérias-primas químicas ainda está associada a recursos fósseis.

MUNDO

14%

da matriz energética **é renovável**

BRASIL

50%

da matriz energética **é renovável**

Se o Brasil possui uma enorme disponibilidade de recursos renováveis, podemos utilizar esse carbono renovável não apenas para produzir energia, mas também para produzir moléculas e **produtos químicos de maior valor?**

↳ É nesse ponto que entram os **terpenos.**



TERPENOS

Carbono renovável para a indústria química

Limoneno

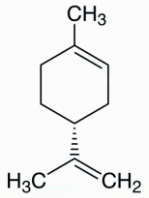
Terpenos: moléculas naturais com grande potencial

Presentes em plantas e óleos essenciais, os terpenos são mais do que uma fonte natural: **são plataformas químicas** para a indústria.



TERPENOS

Moléculas plataforma



Limoneno

Uma ampla gama de aplicações

Fragrâncias

Perfumes, cosméticos e aromatizantes



Fármacos

Intermediários para medicamentos



Flavorizantes

Alimentos e bebidas



Combustíveis renováveis

Bioquerosene, biocombustíveis e outros



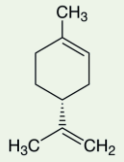
Produtos químicos

Solventes, plásticos, adesivos e muito mais



O desafio é transformar

essa molécula em produtos com propriedades e aplicações diferentes, e, consequentemente, **maior valor agregado.**



Terpenos

Catálise

Produtos de maior valor agregado

Brasil: uma base renovável com potencial para gerar muito mais valor

O Brasil possui uma das **matrizes energéticas mais renováveis do mundo.**
E essa base pode ir além da geração de energia: pode ser a base para a produção de **matéria-prima química.**



Matriz energética brasileira
(energia renovável)

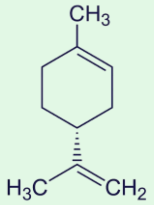


Cadeia de cítricos

≈ 13 milhões de toneladas
de laranja por safra
(USDA 2024/25)



Correntes ricas em limoneno



Limoneno



Moléculas químicas de maior valor agregado

- Solventes
- Intermediários
- Bioprodutos

A matriz energética brasileira



da matriz **energética é renovável** (2024)



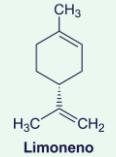
da matriz **élétrica é renovável** (2024)

A grande oportunidade

Transformar parte de uma **matéria-prima de menor valor em moléculas químicas de maior valor agregado**, aproveitando essa base renovável do Brasil.



Laranja
(materia-prima)



Limoneno
(molécula de alto valor)

Do campo à química:
o Brasil tem energia renovável, tem cítricos e tem a oportunidade de gerar mais valor com a química verde.

O catalisador: carvão sulfonado

Um material renovável, ácido e heterogêneo para a transformação de terpenos.

Da biomassa ao catalisador



Cana-de-açúcar
(maior produtor mundial)

↓



Glicose
(precursor renovável)

↓



Carbonização + + sulfonação
(*in situ*)

Carvão sulfonado

Catalisador sólido ácido



Fonte renovável | **Sem metal** | **Heterogêneo** | **Alinha com a química verde**

Por que funciona?

Alta acidez superficial
Devido à presença de grupos sulfônicos, carboxílicos, fenólicos e lactônicos.

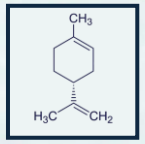
Matéria-prima brasileira
A glicose da cana-de-açúcar é amplamente disponível no Brasil, um dos maiores produtores mundiais.

Fácil separação
Por ser um catalisador heterogêneo, pode ser facilmente removido do meio reacional.



CATALISADOR DE CARBONO SULFONADO

Prepara o caminho para a transformação dos terpenos.



Terpenos
(moléculas plataforma)

\+



Carvão sulfonado
(catalisador)

→ **Produtos de maior valor agregado**

Do campo para a química: o carvão sulfonado conecta **recursos renováveis, alto desempenho catalítico** e **sustentabilidade.**

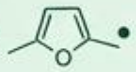
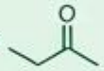
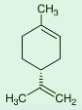
Aplicações dos carvões sulfonados

Catalisadores sólidos ácidos para a transformação de moléculas renováveis

01 | Conversão de biomassa renovável

Transformação de moléculas derivadas de recursos recursos renováveis em plataformas químicas de interesse.

Exemplos de Plataformas Químicas de Alto Valor

-  5-HMF (5-hidroximetilfurfural)
-  Ácido Levulínico
-  Furfural
-  Terpenos

02 | Rotas para combustíveis

Transformação catalítica de moléculas renováveis com potencial para aplicações energéticas.

Exemplos de Rotas para Combustíveis

- **Biodiesel (FAME):** óleos/gorduras + álcool → biodiesel, por esterificação/transesterificação catalisada por carvão sulfonado.
- **Bio-jet fuel:** biomassa/resíduos → hidrocarbonetos na faixa de C8–C16, adequados à faixa de combustível de aviação.
- **Bio-óleo:** biomassa → pirólise → bio-óleo → upgrading catalítico para obtenção de combustíveis.
- **Biocombustíveis a partir de açúcares:** carboidratos/biomassa → moléculas plataforma → intermediários para combustíveis renováveis.

Nosso foco: Isomerização de terpenos

Direcionar a molécula de limoneno para produtos
Biomassa → moléculas plataforma → intermediários para combustíveis renováveis.



Estratégia do trabalho

Uma abordagem integrada para o desenvolvimento e aplicação do catalisador.

1 Desenvolvimento do catalisador

Síntese do carbono sulfonado a partir de fonte renovável e avaliação de como as condições de síntese influenciam suas propriedades.



Glicose / Biomassa

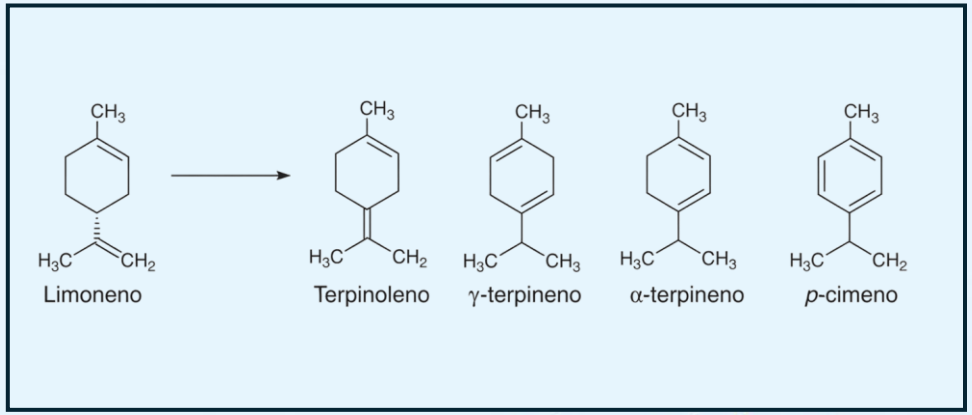


Carbono sulfonado

- Fonte renovável
- Sem metal
- Heterogêneo

2 Aplicação no limoneno

Avaliação da performance catalítica e otimização das condições de reação.



- Condições otimizadas (DCCR / DoE)
- 150 °C 2 h
- 15% catalisador

A proposta

Não foi apenas uma busca por um catalisador que funcionasse. A proposta foi estabelecer uma relação entre **preparação do material, propriedades do catalisador, condições de processo e desempenho catalítico.**

Preparação do material + Propriedades do catalisador + Propições de processo + Desempenho catalítico

UMA VISÃO INTEGRADA

Metodologia experimental

Síntese do carvão sulfonado a partir de glicose

Carbonização e sulfonação *in situ*:
formação da estrutura carbonácea e a funcionalização ácida em uma única etapa.

1 Precursores



Mistura de glicose e ácido sulfúrico concentrado.

2 Reação



A mistura foi colocada em um reator de aço inox revestido com Teflon e aquecida em banho de óleo por 6 horas, promovendo a carbonização e a sulfonação simultaneamente.

3 Resfriamento e lavagem



Após o resfriamento, o sólido foi lavado com água destilada e acetona para remover as impurezas.

4 Secagem e trituração



O material foi seco, triturado e preparado para caracterização e aplicação catalítica.

5 Carvão sulfonado



Resultado: carvão sulfonado com propriedades adequadas para o processo.

Planejamento experimental
Otimização das condições de síntese e garantia da reprodutibilidade do material.

- Fonte renovável (glicose / cana-de-açúcar)
- Sem metal
- Heterogêneo
- Alta acidez superficial



Carvão sulfonado
Catalisador sólido ácido e renovável

Como encontramos o melhor catalisador?
Planejamento experimental

Utilizamos um planejamento experimental para entender como a **temperatura** e a **quantidade de ácido** influenciam o desempenho do catalisador.

Fatores avaliados

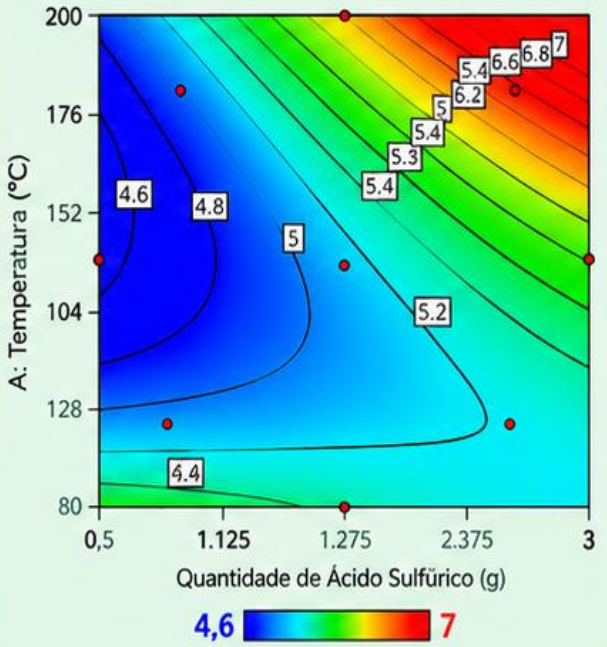
Temperatura
(°C)
80 – 200

Quantidada de H_2SO_4
(g)
0,5 – 3,0

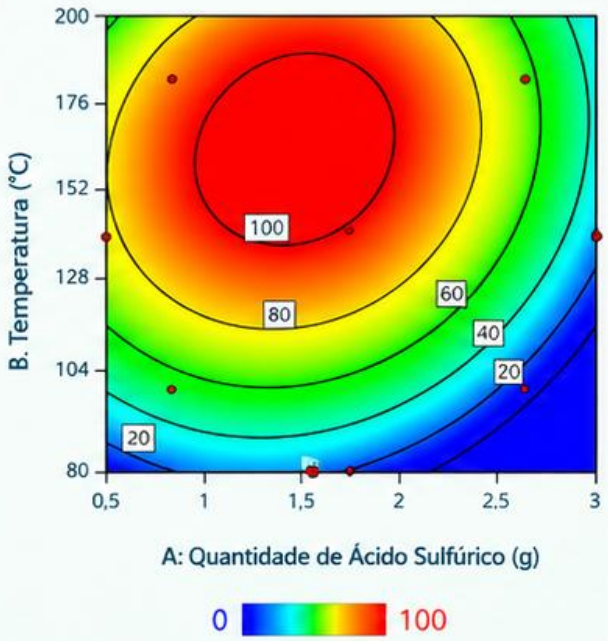
Resposta

Conversão do terpeno
(limoneno e α-pineno)

Grupos Ácidos totais (mmol/g)



Conversão do Limoneno (%)



O que os resultados mostraram?

O desempenho depende do **equilíbrio entre temperatura** e quantidade de ácido.

É preciso obter **acidez suficiente**, mas também uma estrutura com **área superficial** e **porosidade** adequadas.

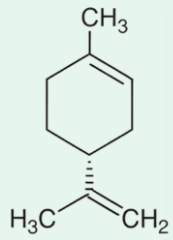
Esse equilíbrio favorece a conversão dos terpenos e a formação dos produtos desejados.

Com o planejamento experimental, identificamos as condições ideais para o desenvolvimento do catalisador.

Resultado: um material com a **combinação** ideal de acidez, área superfícial e porosidade para a reação de isomerização.

Isomerização do limoneno: direcionada para produtos de interesse

Utilizamos o carvão sulfonado **ótimizadô** e foi possível direcionar o limoneno para produtos de interesse, principalmente **α-terpineno, γ-terpineno** e **terpinoleno**.

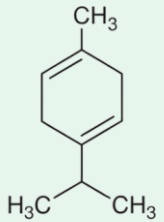


Limoneno
(matéria-prima renovável)

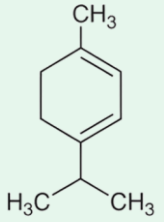


Carvão sulfonado (otimizado)

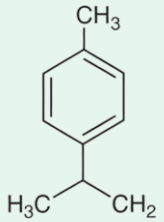
Produtos de interesse



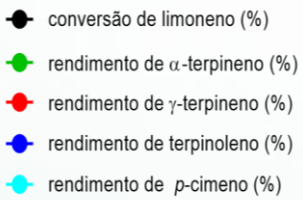
γ-terpineno

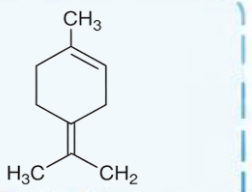


α-terpineno



p-cimeno



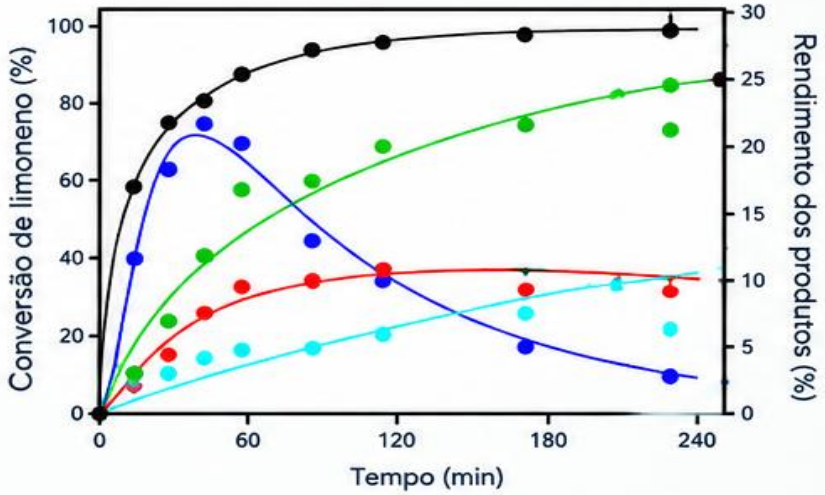


Terpinoleno
(intermediário)

Outros produtos

- p-cimeno
- peróxidos
- compostos oxigenados
- entre outros

Evolução da reação



Condições reacionais
- 150 °C
- 2 h
- 15% de catalisador

O aumento da carga de catalisador acelerou a reação, e 7,5% atingiu 100% de conversão em 6 h, enquanto 10–15% atingiram 100% em 2 h.

O catalisador permite agregar valor ao limoneno,
direcionando sua transformação para diferentes produtos de interesse.

Conclusão: do laboratório à aplicação, conectando energia, biomassa e química

A transição para uma economia de baixo carbono não significa apenas mudar a **fonte de energia**.
Também é repensar a **origem do carbono** que utilizamos para produzir materiais e produtos químicos.

O que mostramos neste trabalho



Terpenos de origem renovável
(ex.: limoneno e α-pineno)



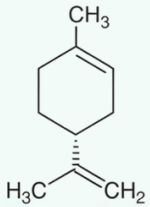
Catalisador de carbono sulfonado
(de origem renovável)



Produtos de maior valor agregado
(via catálise)

Resultados principais

Limoneno





de conversão em 2 horas



Por que isso é importante para o Brasil?



Biomassa
(recursos renováveis)

+



Agroindústria
(ex.: cadeia de cítricos)

+



Matriz energética
(altamente renovável)



Desenvolvimento tecnológico e agregação de valor



O Brasil tem tudo para liderar essa nova cadeia de valor sustentável.

Próximos passos



Da prova de conceito para a **aplicação tecnológica**



Estabilidade do catalisador



Regeneração do material



Redução da carga catalítica



Separação do produto



Avaliação técnico-econômica



Uma rota para transformar o potencial renovável do Brasil
em química de alto valor, com menor pegada de carbono.

Muito obrigada!

Referências

- 1. REIS, G.M; MANDELLI, D.; CARVALHO, W.A. Isomerization of limonene over sulfonated carbono. 45ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química: Química para o Desenvolvimento Sustentável e Soberano, 2022.

- 2. REIS, G.M; MANDELLI, D.; CARVALHO, W.A. Síntese e caracterização de carvão sulfonado aplicado na isomerização do limoneno a produtos de alto valor agregado. 28º Congresso Ibero-americano de Catálise, 2022.

- 3. REIS, G.M; NUNES, R.S; MANDELLI, D.; CARVALHO, W.A. Isomerization of limonene to high added value products over optimized sulfonated carbons. CQEdays, 2023.

- 4. REIS, G.M; NUNES, R.S; MANDELLI, D.; CARVALHO, W.A. Optimization of the in situ carbonization and sulfonation process in the production of sulfonated carbons applied in the isomerization of limonene to high added value products. Congresso Brasileiro de Catálise, 2023.

- 5. REIS, G. M.; NUNES, R. S.; XAVIER, G. T. M.; KIRILLOVA, M. V.; KIRILLOV, A. M.; MANDELLI, D.; CARVALHO, W. A. . Isomerização de limoneno para produtos de alto valor agregado sobre carbonos sulfonados otimizados. XIV Encontro Regional de Catálise, 2024

- 6. REIS, G.M; XAVIER, G.T; MANDELLI, D.; CARVALHO, W.A. Aplicação de carvão sulfonado na isomerização do óxido de α-pineno para obtenção de produtos de alto valor Agregado. Congresso Brasileiro de Catálise, 2025

Artigos

- **PUBLICADO**

- 1. REIS, G. M.; NUNES, R. S.; XAVIER, G. T. M.; KIRILLOVA, M. V.; KIRILLOV, A. M.; MANDELLI, D.; CARVALHO, W. A. From Citrus Waste To Value: Optimizing Sulfonated Carbons For Limonene Upcycling Into Value-added Products. *Rsc Sustainability* **2024**.

- **SUBMETIDO**

- 2. REIS, G. M.; XAVIER, G. T. M.; KIRILLOVA, M. V.; KIRILLOV, A. M.; MANDELLI, D.; CARVALHO, W. A. Optimization limonene isomerization to high-added-value products over sulfonated carbon.

- **EM DESENVOLVIMENTO**

- 3. REIS, G. M MANDELLI, D.; CARVALHO, W. A. Upgrading α-Pinene Oxide with Optimized Sulfonated Carbons: A Route to Value-Added Products

Minha Experiência de Doutorado Sanduíche

2023.1 | Instituto Superior Técnico
Universidade de Lisboa







Obrigada!

Dúvidas?

prh anp

Gestão:

anp | FAPESP

prh anp 49/UFABC

CAPES

TÉCNICO LISBOA

CEM
CENTRAIS EXPERIMENTAIS MULTIUSUÁRIO
Universidade Federal do ABC

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

U LISBOA | UNIVERSIDADE DE LISBOA



prh anp
49/UFABC

Gabrielle Mathias Reis

Dados para contato

Email: gabriellemathiasr@gmail.com

Linkedin: www.linkedin.com/in/gabriellemathiasreis

Ultra-Fast Selective Fructose Dehydration Promoted by a Kraft Lignin Sulfonated Carbon Under Microwave Heating

Renan S. Nunes[1] · Gabrielle M. Reis[1] · Lígia M. Vieira[2] · Dalmo Mandelli[1] · Wagner A. Carvalho[1]

Received: 28 April 2020 / Accepted: 26 June 2020
© Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2020

RSC Sustainability

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY

PAPER

View Article Online
View Journal | View Issue

Check for updates

Cite this: *RSC Sustainability*, 2024, 2, 1456

Tailored sulfonated carbons: unraveling enhanced catalytic dynamics for fructose dehydration under conventional and microwave heating†

Gabrielle Mathias Reis, Letícia Ferreira Lima Machado, Renan Silva Nunes, Dalmo Mandelli and Wagner Alves Carvalho *

RSC Sustainability

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY

PAPER

View Article Online
View Journal | View Issue

Check for updates

Cite this: *RSC Sustainability*, 2025, 3, 1122

From citrus waste to value: optimizing sulfonated carbons for limonene upcycling into value-added products†

Contents lists available at ScienceDirect

Next Energy

journal homepage: www.sciencedirect.com/journal/next-energy

Research article

Synthesis and performance evaluation of dextrose-derived sulfonated carbon solid acid catalyst for efficient biodiesel production

Krishnagopal Dhar[a], Kankana Saikia[a], Siddhartha S. Dhar[a], Sanjay Basumatary[b], Baskar Gurunathan[c], Gopinath Halder[d], Samuel Lalthazuala Rokhum[a,*]

Contents lists available at ScienceDirect

Bioresource Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/biortech

Synthesis and characterization of sulfonated activated carbon as a catalyst for bio-jet fuel production from biomass and waste plastics

Wendy Mateo[a,b], Hanwu Lei[a,*], Elmar Villota[a,b], Moriko Qian[a], Yunfeng Zhao[a], Erguang Huo[a], Qingfa Zhang[a], Xiaona Lin[a], Chenxi Wang[a], Zhiyang Huang[a]

Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene

Enhancing jet fuel production from catalytic co-pyrolysis of biomass and low-density polyethylene over sulfonated activated carbon catalysts

Pan Li[a,b,c], Yu Zhao[a], Hai Chen[c], Xingguo Wu[a], Kai Zhao[a,*], Wei Chen[c], Chun Chang[a], Shusheng Pang[a,c], Junhao Hu[a,d,**]