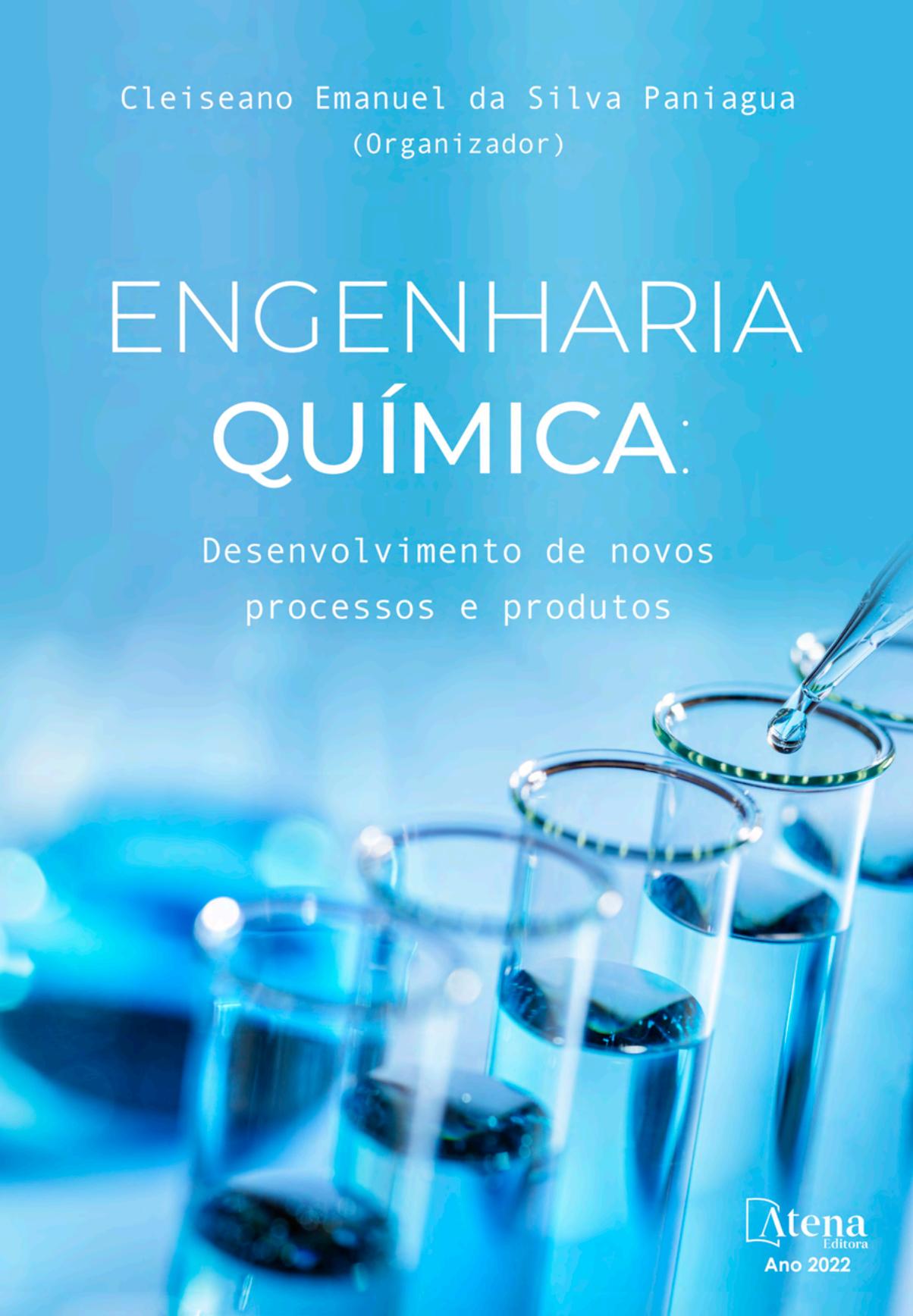


Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos



Atena
Editora
Ano 2022

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos



Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Engenharia química: desenvolvimento de novos processos e produtos

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia química: desenvolvimento de novos processos e produtos / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. - Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0198-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.988221306>

1. Engenharia química. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.

CDD 660

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos - CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa - Paraná - Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

O e-book: “Engenharia química: Desenvolvimento de novos processos e produtos” é constituído por nove capítulos de livros que apresentaram estudos aplicados a diferentes segmentos industriais e ambientais.

O primeiro capítulo avaliou as propriedades e capacidade de escoabilidade de materiais pulverulentos a base de celulose e lactose na fabricação de medicamentos na forma de comprimidos ou cápsulas, os resultados foram satisfatórios e possibilita a substituição da lactose pela celulose. O segundo trabalho avaliou o processo de cavitação no canal do bico injetor ao se substituir o tipo de combustível em motores que operam a diesel, a viscosidade do combustível e a pressão de injeção foram os fatores que mais influenciaram na cavitação. O terceiro capítulo avaliou diferentes modificações químicas no óleo de soja refinado a partir da reação de inúmeras reações com o intuito de melhorar as características lubrificantes, obtendo-se um lubrificante biodegradável a partir do óleo de soja. O capítulo 4 apresenta o estudo da incorporação do extrato de frutos – cupuaçu – e do mesocarpo do coco de babaçu a fim de conferir atividade antioxidante para biofilmes com potencial utilização em biopolímeros.

O capítulo 5 realizou uma análise bibliográfica de catalisadores e suas propriedades que viabilizam reações de transesterificação heterogênea a fim de obter biocombustíveis. Já o capítulo 6 realizou um estudo apresentando a importância da Espectroscopia Raman como técnica de caracterização de óxidos com propriedades catalíticas. O capítulo 7 apresentou um estudo de desenvolvimento de uma planta pirolítica de baixo custo utilizando resíduos de colheita de Eucalipto como biomassa para a combustão. O capítulo 8 apresentou uma técnica de conversão integral de gás metano em gás carbônico em um reator de leito fixo. Por fim, o estudo de potencialidade de biorremediação utilizando a biomassa de *Chlorella Vulgaris* em processos de tratamento de águas residuárias.

Nesta perspectiva, a Atena Editora vem trabalhando de forma a estimular e incentivar cada vez mais pesquisadores do Brasil e de outros países a publicarem seus trabalhos com garantia de qualidade e excelência em forma de livros, capítulos de livros e artigos científicos.

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FLUXO DE MISTURAS DE EXCIPIENTES FARMACÊUTICOS

Marlen Ussifati Rocha

Rodrigo Condotta

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213061>

CAPÍTULO 2..... 11

AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO EM INJETORES DO CICLO DIESEL OPERANDO COM BIODIESEL: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Luís Felipe Nunes Truta

Boniek Evangelista Leite

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213062>

CAPÍTULO 3..... 24

PREPARAÇÃO DE POTENCIAIS BIOLUBRIFICANTES A PARTIR DE MODIFICAÇÕES QUÍMICAS NO ÓLEO DE SOJA REFINADO

Paulo Roberto de Oliveira

Ana Flávia de Oliveira

Patrick Rodrigues Batista

Carlos Itsuo Yamamoto

Francisco de Assis Marques

Palimécio Gimenes Guerrero Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213063>

CAPÍTULO 4..... 37

INFLUÊNCIA DO MESOCARPO DE COCO BABAÇU NA FORMAÇÃO DE BIOFILMES ADITIVADOS COM COMPOSTOS ANTIOXIDANTES – CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*)

Meyrelle Figueiredo Lima

Dennys Correia da Silva

Audirene Amorim Santana

Harvey Alexander Villa Vélez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213064>

CAPÍTULO 5..... 44

CATALISADORES QUE VIABILIZAM A TRANSESTERIFICAÇÃO HETEROGÊNEA: UMA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Priscila Pereira Silva

Thaina Firmino Voltolini

Evandro Roberto Alves

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213065>

CAPÍTULO 6	60
ESPECTROSCOPIA RAMAN <i>IN SITU</i> OU OPERANDO NO ESTUDO DE REAÇÕES CATALISADAS POR ÓXIDOS	
Diego Rodrigues de Carvalho Rômulo Batista Vieira Luelc Souza da Costa	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213066	
CAPÍTULO 7	74
CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PLANTA PIROLÍTICA DE BAIXO CUSTO EM ESCALA LABORATORIAL PARA PROCESSAMENTO TÉRMICO	
Victor Hugo Andreis Sebben Fabiano Perin Gasparin Lúcia Allebrandt da Silva Ries	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213067	
CAPÍTULO 8	86
GENERALIZED INTEGRAL TRANSFORM TECHNIQUE APPLIED IN METHANE REFORMING PROCESS WITH CARBON DIOXIDE IN FIXED BED REACTOR	
Josiel Lobato Ferreira Emerson Cardoso Rodrigues Dilson Nazareno Pereira Cardoso Wenderson Gomes dos Santos Romero Moreira de Oliveira Bruno Maués Farias João Nazareno Nonato Quaresma Emanuel Negrão Macêdo	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213068	
CAPÍTULO 9	106
BIOREMEDIATION POTENTIAL OF <i>Chlorella vulgaris</i> (CHLOROPHYCEAE) IN CASSAVA-PROCESSING WASTEWATERS	
Verónica de Medeiros Carla Cristina Almeida Loures Conceição Fernandes	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.9882213069	
SOBRE O ORGANIZADOR	112
ÍNDICE REMISSIVO	113

ESPECTROSCOPIA RAMAN *IN SITU* OU OPERANDO NO ESTUDO DE REAÇÕES CATALISADAS POR ÓXIDOS

Data de aceite: 01/06/2022

Data de submissão: 04/04/2022

Diego Rodrigues de Carvalho

Faculdade de Irecê – FAI
Centro Territorial de Ensino Profissional de
Irecê – CETEP
Irecê – BA
<http://lattes.cnpq.br/7216399042471205>

Rômulo Batista Vieira

Universidade do Estado da Bahia – UNEB
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais
– DTCS – Campus III
Juazeiro – BA
<http://lattes.cnpq.br/7235526332495510>

Luelc Souza da Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo – IFSP – Campus
Avaré
Avaré – SP
<http://lattes.cnpq.br/5863988822917521>

RESUMO: Este trabalho apresenta a espectroscopia Raman como uma poderosa ferramenta para análise estrutural de catalisadores baseados em óxidos metálicos, que vem sendo utilizada para elucidar e estudar os sítios ativos presentes na estrutura dos catalisadores sólidos. A configuração *in situ* e *operando* da espectroscopia Raman poderá correlacionar os sítios ativos estruturais, como vacâncias de oxigênio e espécies oxigenadas do catalisador com o ambiente reacional, além de

realizar uma análise da influência da temperatura e de pré-tratamentos nos catalisadores baseados em óxidos. Nesse sentido, o presente trabalho traz uma revisão da literatura que aplicam a configuração *in situ* e *operando* da espectroscopia Raman para o estudo de catalisadores baseados em óxidos, além de apresentar os conceitos sobre a teoria Raman. Os detalhes teóricos e instrumentais sobre efeito Raman e suas abordagens clássica e quântica são de extrema importância para um melhor entendimento dos espectros Raman, tendo assim uma base sólida para a apresentação e discussão dos resultados obtidos por esta técnica de caracterização.

PALAVRAS-CHAVE: Catalise, caracterização, espectroscopia Raman.

IN SITU OR OPERANDO RAMAN SPECTROSCOPY IN THE STUDIES OF OXIDES-CATALYZED REACTIONS

ABSTRACT: This work presents Raman spectroscopy as a powerful tool for structural analysis of metal oxide-based catalysts, which has been used to elucidate and study the active sites present in the structure of solid catalysts. The *in situ* and *operando* configuration of Raman spectroscopy will be able to correlate structural active sites, such as oxygen vacancies and oxygenated species of the catalyst with the reaction environment, in addition to performing an analysis of the influence of temperature and pre-treatments on oxide-based catalysts. In this sense, the present work presents a literature review that applies the *in situ* and *operando* configuration of Raman spectroscopy to the study

of oxide-based catalysts, in addition to presenting the concepts about the Raman theory. The theoretical and instrumental details about the Raman effect and its classical and quantum approaches are extremely important for a better understanding of Raman spectra, thus providing a solid basis for the presentation and discussion of the results obtained by this characterization technique.

KEYWORDS: Catalysis, characterization, Raman spectroscopy.

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente uma importante ferramenta para o entendimento da catálise é a espectroscopia, tendo destaque entre elas a espectroscopia Raman devido as importantes informações sobre a estrutura dos catalisadores, dos sítios catalíticos e dos intermediários da reação e além disto é uma técnica de instrumentação simples quando comparadas com outras técnicas espectroscópicas. Tais informações sobre os catalisadores são importantes para o desenvolvimento de catalisadores com melhores desempenhos catalíticos (CALVINO-CASILDA; BAÑARES, 2012; LÓPEZ-LORENTE, 2021; LORIDANT, 2021).

Houve um aumento no interesse da investigação dos catalisadores através da espectroscopia Raman nos últimos anos, este aumento se deve ao desenvolvimento da técnica para análises *in situ* e *operando*. A espectroscopia Raman *in situ* consiste em medidas Raman do material em condições controladas de temperatura e ambiente, isto fornece informações estruturais do material em condições controladas, podendo simular uma condição de reação, porém informações mais completas sobre catalisadores são fornecidas pela espectroscopia Raman *operando* (GUERRERO-PÉREZ; BAÑARES, 2006; LI et al., 2021; LIANG et al., 2021).

A espectroscopia Raman *operando* é a obtenção de espectros Raman simultaneamente a medidas de atividade do catalisador, com isto pode se obter uma relação direta entre estrutura e atividade do catalisador durante a reação catalítica. Para a realização do experimento Raman *operando*, o espectrômetro Raman é acoplado com outra técnica para medir a atividade catalítica, geralmente cromatografia gasosa ou espectroscopia de massas. Este melhor entendimento da relação estrutura/atividade do catalisador será a chave para o desenvolvimento de novos catalisadores e do aprimoramento dos catalisadores já utilizados comercialmente (BAÑARES, 2005; ROGG; HESS, 2021; TERNERO-HIDALGO et al., 2022).

2 | EFEITO RAMAN

Na interação luz-matéria pode ocorrer os fenômenos de transmissão, absorção, reflexão e espalhamento. O fenômeno de espalhamento pode ser dividido em duas classes: (i) o espalhamento elástico, onde a luz incidente e luz espalhada possui a mesma frequência e (ii) o espalhamento inelástico, onde a luz incidente e luz espalhada possui

diferentes frequências.

O efeito Raman se deve ao espalhamento da luz após a interação com a matéria. O espalhamento Raman consiste na extinção da luz incidente (fóton incidente) e geração de uma luz espalhada (fóton espalhado), sendo que a luz espalhada possui uma frequência diferente da luz incidente, ou seja, um fenômeno de espalhamento inelástico. O fenômeno de espalhamento pode ser representado pela Equação 1, na qual w_i é a frequência da luz incidente, w_e é a frequência da luz espalhada e w_r é a frequência Raman que irá formar o espectro Raman.

$$w_i = w_e \pm w_r \quad (1)$$

A luz espalhada no espalhamento elástico possui a mesma energia da luz incidente ($E_e = E_i$) sendo denominado espalhamento Rayleigh. A luz espalhada no espalhamento inelástico possui energia diferente da luz incidente ($E_e \neq E_i$) sendo denominado espalhamento Raman Stokes quando a energia incidente for maior que a energia da luz espalhada ($E_i = E_e + E_r$) e denominada espalhamento Raman anti-Stokes quando a energia da luz incidente for menor que a energia da luz espalhada ($E_i = E_e - E_r$). Estas denominações são mais facilmente visualizadas na Figura 1 (SALA, 2008, 2011).

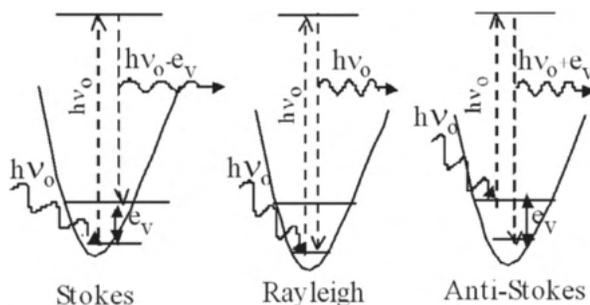


Figura 1: Representação do espalhamento Rayleigh, Stokes e Anti-Stokes.

No espalhamento Raman (Stokes e anti-Stokes) a variação de energia da luz incidente e luz espalhada é devido as transições de estados quânticos da matéria. No caso de moléculas o espalhamento Raman está relacionado com os níveis vibracionais dos átomos na molécula e no caso de sólidos o espalhamento Raman está relacionado com os fônons, que são as vibrações dos átomos na rede cristalina.

3 | TEORIA RAMAN

3.1 Abordagem Clássica

No espalhamento Raman a perda ou ganho de energia da luz incidente corresponde

às frequências de vibrações dos átomos na matéria. No mecanismo para o espalhamento Raman é associado à interação campo elétrico da luz incidente (\vec{E}) com o momento de dipolo induzido da matéria (\vec{P}), a relação entre os dois é representado na Equação 2, onde α é a polarizabilidade do meio incidente (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SALA, 2008, 2011; SMITH; DENT, 2019).

$$\vec{P} = \alpha \times \vec{E} \quad (2)$$

As vibrações dos átomos na molécula ou na estrutura cristalina são responsáveis pelo efeito Raman através da modulação da polarizabilidade. A polarizabilidade não será um escalar e sim uma entidade matemática chamada de tensor, que irá relacionar cada componente do vetor momento de dipolo induzido (\vec{P}) com cada componente do vetor do campo elétrico da luz incidente como na representação matricial da Equação 3 (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SMITH; DENT, 2019).

$$\begin{matrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{matrix} = \begin{matrix} \alpha_{xx} & \alpha_{yx} & \alpha_{zx} \\ \alpha_{xy} & \alpha_{yy} & \alpha_{zy} \\ \alpha_{xz} & \alpha_{yz} & \alpha_{zz} \end{matrix} \times \begin{matrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{matrix} \quad (3)$$

A polarizabilidade será modulada pelo campo elétrico da luz incidente em torno de uma posição de equilíbrio em termos de coordenadas atômicas (μ_j), esta modulação pode ser descrita em uma expansão em série (Equação 4) ((FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SALA, 2008, 2011).

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\delta\alpha}{\delta\mu_j} \mu_j + \frac{\delta^2\alpha}{\delta\mu_j\delta\mu_i} \mu_j\mu_i \dots \quad (4)$$

Considerando somente o espalhamento Raman de primeira ordem a Equação 4 é truncada no primeiro termo e substituindo μ_j por $\mu_0 \cos(w_r t)$, tem-se a Equação 5.

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\delta\alpha}{\delta\mu_j} \right) \cdot \mu_0 \cos(w_r t) \quad (5)$$

Substituindo o campo elétrico da luz incidente ($E = E_0 \cos(w_i t)$) e a polarizabilidade na Equação 2, obtém a Equação 6 (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SALA, 2008, 2011; SMITH; DENT, 2019).

$$P = \alpha_0 E_0 \cos(w_i t) + \frac{\mu_0 E_0}{2} \cdot \left(\frac{\delta\alpha}{\delta\mu_j} \right) [\cos(w_i + w_r)t + \cos(w_i - w_r)t] \quad (6)$$

A Equação 6 descreve muito bem o fenômeno de espalhamento na abordagem clássica. O primeiro termo da Equação 6 ($\alpha_0 E_0 \cos(w_i t)$) é dependente somente da frequência da luz incidente (w_i), sendo este termo correspondente ao espalhamento Rayleigh. O segundo termo da Equação 6 depende da frequência da luz espalhada, correspondendo ao espalhamento Raman anti-Stokes ($w_i + w_r$) e Stokes ($w_i - w_r$) (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SMITH; DENT, 2019).

A derivada da polarização em relação às coordenadas atômicas ($\delta\alpha/\delta\mu_j$) é chamada

de tensor Raman, este tensor é muito importante pois ele é responsável por uma regra de seleção da espectroscopia Raman, no qual somente ocorrerá o espalhamento Raman se algum componente do tensor Raman for diferente de zero. Esta regra de seleção, representada na Equação 7, é uma regra de seleção restrita pois foi obtida através de aproximações matemáticas (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SMITH; DENT, 2019).

$$\left(\frac{\delta\alpha}{\delta\mu_j}\right) \neq 0 \quad (7)$$

3.2 Abordagem Quântica

Como cada nível energético da matéria é caracterizado por uma função de onda ψ , então o momento de dipolo induzido devido à transição do nível energético A para o nível energético B é representado pela Equação 8, onde ψ_A e ψ_B são as funções de onda para cada nível energético e τ é o volume sobre qual é feita a integração (SALA, 2011).

$$\overrightarrow{P_{AB}} = \int \Psi_A \overrightarrow{P} \Psi_B d\tau \quad (8)$$

Substituindo as Equações 2 e 4 na Equação 8, origina-se a Equação 9.

$$\overrightarrow{P_{AB}} = \vec{E}\alpha_0 \int \Psi_A \Psi_B d\tau + \vec{E} \left(\frac{\delta\sigma}{\delta\mu_j}\right) \int \Psi_A \mu_j \Psi_B d\tau \quad (9)$$

Devido à ortonormalidade das funções de onda, a primeira integral da Equação 9 será nula quando houver uma transição de níveis energéticos ($A \neq B$) e esta integral terá um valor unitário quando não ocorrer a transição de níveis energético ($A=B$), que é o caso do espalhamento Rayleigh (SALA, 2011).

O segundo termo da Equação 9 representa o espalhamento Raman, para ocorrer o efeito Raman este termo tem que ser diferente de zero e para isto ocorrer é necessário ter as seguintes condições: (i) $(\delta\alpha/\delta\mu_j)$ tem que ser diferente de zero, ou seja, alguma componente do tensor Raman tem que ser diferente de zero e (ii) $\int \Psi_A \mu_j \Psi_B d\tau$ tem que ser diferente de zero, para que isto ocorra o produto $\Psi_A \mu_j \Psi_B$ tem que ser uma função par, como μ_j é uma função ímpar, então o produto $\Psi_A \Psi_B$ tem que ser uma função ímpar (SALA, 2011).

No espalhamento Raman Stokes a molécula está em um estado fundamental e depois da interação fóton-matéria, a molécula irá ficar em um estado excitado, pois houve uma transferência de energia do fóton para a molécula. Por outro lado, no espalhamento Raman anti-Stokes a molécula já se encontrado em um estado excitado e depois da interação fóton-matéria a molécula irá para um estado fundamental, pois houve uma transferência de energia da molécula para o fóton.

Como a intensidade Raman depende da probabilidade de transição e como a população de estados excitados segue a distribuição de Boltzmann, é esperada uma maior intensidade das bandas Stokes quando comparada com as bandas anti-Stokes no espectro

Raman. A relação entre as intensidades anti-Stokes e Stokes é dada pela Equação 10, em que I_A e I_S são as intensidades anti-Stokes e Stokes respectivamente, w_i e w_r são as frequências da luz incidente e frequência Raman respectivamente, h é a constante de Planck, K é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta. Através desta equação pode se encontrar a temperatura no *spot* do laser que está iluminando a amostra incidente (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003; SALA, 2011).

$$\frac{I_A}{I_S} = \left(\frac{w_i + w_r}{w_i - w_r} \right)^4 e^{\frac{hw_r}{KT}} \quad (10)$$

4 | INSTRUMENTAÇÃO DA ESPECTROSCOPIA RAMAN

4.1 Instrumentação Característica

A espectroscopia Raman normalmente é formada por quatro componentes: (i) a fonte de luz, (ii) o caminho ótico, (iii) o monocromador e (iv) o detector.

A fonte de luz mais utilizada por volta de 1950 era uma luz da radiação de mercúrio, outras lâmpadas foram testadas, porém devido à baixa intensidade elas foram deixadas de lado. Uma grande revolução ocorreu com a utilização de laser como fonte de luz. O laser é uma fonte de luz altamente monocromática com alta precisão de colimação e alta intensidade, os lasers mais utilizados atualmente são os de He:Ne (632.8 nm), íons de argônio (458.0, 488.0, e 514.5 nm), íons de criptônio (530.9 e 647.1 nm), He:Cd (441.6 nm), Nd:YAG (532 nm) e lasers diodo (630 e 780 nm). A escolha do laser é importante, pois com a escolha do laser adequado pode-se eliminar interferência de fluorescência da amostra, ou ter informações eletrônicas e aumento da intensidade das bandas nos espectros (ZHU et al., 2014).

Em espectroscopia Raman dispersiva utiliza grades ou monocromadores de múltiplos estágios para ter o sinal em suas componentes espectrais. O caminho ótico na espectroscopia Raman será responsável pelo transporte da radiação espalhada da amostra até o detector, o caminho ótico pode ser feito diretamente através de lentes e espelhos, ou pode ser feito por fibras óticas. A utilização fibra ótica confere uma maior mobilidade para o experimento, entretanto há uma maior perda de sinal quando comparado com ligação direta (ZHU et al., 2014).

Os primeiros detectores para a espectroscopia Raman foram placas fotossensíveis, mas o detector que tornou a espectroscopia Raman comercial foi os tubos fotomultiplicadores (PMT). Porém atualmente se utiliza como detector os dispositivos de carga acoplada (CCD – *charge-coupled device*), este detector possui uma maior sensibilidade e um maior limite de detecção do que os tubos fotomultiplicadores (ZHU et al., 2014).

A Figura 2 mostra a montagem comumente usada na espectroscopia Raman, esta montagem pode variar a depender da marca e do modelo. Há casos que o próprio laboratório

faz a montagem do espectrômetro Raman, isto deixa o equipamento mais maleável para o uso do laboratório.

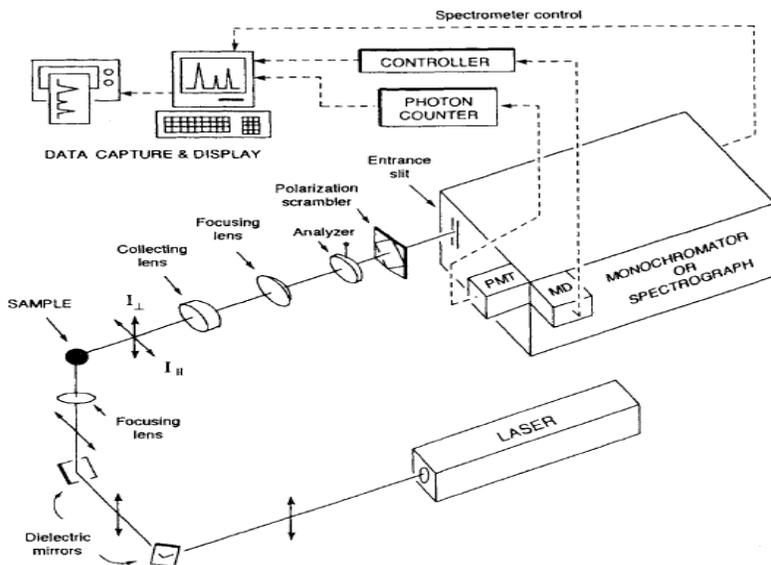


Figura 2: Representação da montagem de espectrômetro Raman (FERRADO; NAKAMOTO; BROWN, 2003).

4.2 Celas *in situ* e Reatores *operando*

Um componente adicional a montagem tradicional da espectroscopia Raman são as células *in situ* ou reatores *operando* para estudos de materiais em temperatura e ambientes reacionais. Para experimentos *in situ* com temperatura e ambiente controlados são utilizadas células *in situ* que já são bem comuns e existe comercialmente como mostrado na Figura 3 a cela *in situ* comercializada pela Horiba. Geralmente a cela *in situ* é utilizada no próprio espectrômetro Raman e é realizado estudo da estrutura de sólidos durante tratamentos térmicos e ou exposição a ambientes redutores ou oxidantes.

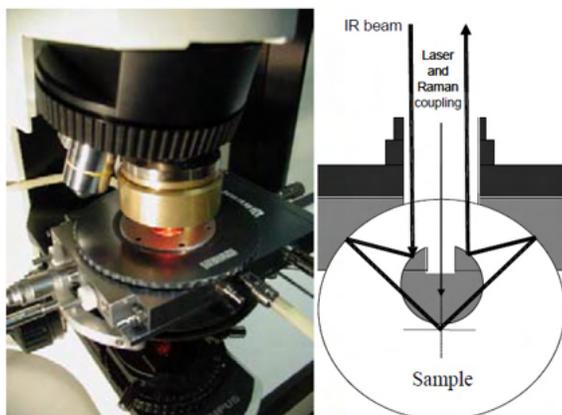


Figura 3: Foto e representação da cela *in situ* comercializada pela empresa Horiba (HORIBA, 2003).

Para experimentos de espectroscopia Raman *operando* em reações catalíticas são utilizados reatores *operando*, no qual são feitas as medidas Raman simultaneamente às medidas de atividade. As reações ocorridas nos reatores *operando* precisam apresentar conversão e seletividade próximas ou comparáveis as reações realizadas com os reatores convencionais. Como a técnica de espectroscopia Raman *operando* é razoavelmente nova, todos os reatores *operando* utilizados são montados nos próprios laboratórios no qual ocorre o experimento.

Geralmente os reatores *operando* são bem parecidos com os convencionais, como pode ser observado na Figura 4, diferenciando somente em uma pequena abertura no forno para que a amostra seja iluminada pelo laser.

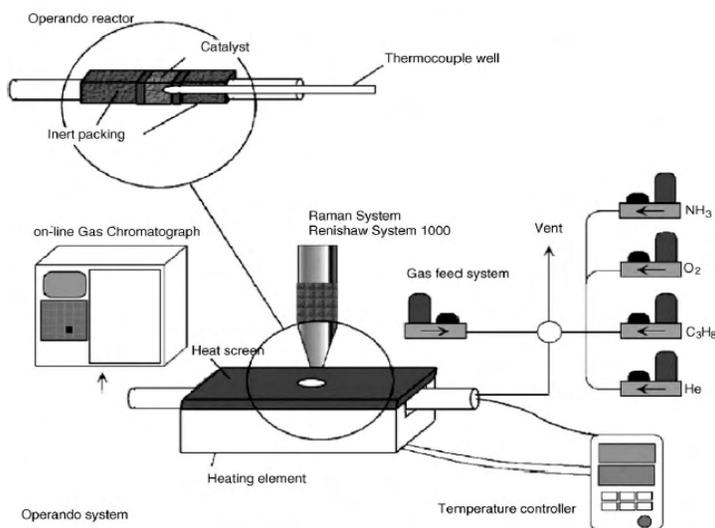


Figura 4: Representação da espectroscopia Raman *operando* (GUERRERO-PÉREZ; BAÑARES, 2006).

Utiliza-se também fibras óticas para o transporte do sinal espalhado da amostra durante a espectroscopia Raman *operando*, pois geralmente o reator *operando* é um reator volumoso ou o ambiente de reação é perigoso, por isto que para algumas configurações de experimento não é possível colocar o reator *operando* no espectrômetro Raman como é feito com a cela *in situ*.

5 | APLICAÇÕES DA ESPECTROSCOPIA RAMAN *IN SITU* E *OPERANDO*

A espectroscopia Raman *in situ* e *operando* são técnicas muito importantes na área de catálise heterogênea. A espectroscopia Raman *in situ* fornece informações sobre a estrutura do catalisador em condições controladas de temperatura, pressão e ambiente. Por outro lado, através da espectroscopia Raman *operando* pode-se relacionar estrutura do catalisador com a sua atividade catalítica para a reação estudada, obtendo informações sobre a natureza do sítio catalítico e dos intermediários reacionais de superfícies.

Xènia Garcia e colaboradores (GARCIA et al., 2021) testou catalisadores de céria nanoestrutura para a reação de oxidação de fuligem, particulados oriundos da combustão do diesel, a investigação da estrutura da céria durante a reação foi acompanhada pela espectroscopia Raman *operando*. Para obter as medidas da espectroscopia Raman foi utilizado equipamento comercial da marca *Renishaw* com laser de comprimento de onda de 532 nm com potência de 10 mW e as medidas *operando* foram coletadas em uma célula que contem controle de aquecimento e atmosfera. No artigo foram produzidos catalisadores de céria com diferentes formas, os nanocubos (CeO₂-c), nanobastões (CeO₂-r) e nanopolicristalina (CeO₂-p).

As medidas de Raman *operando* no trabalho de Xènia Garcia e colaboradores (GARCIA et al., 2021) foram realizadas com aquecimento em ambiente inerte e com pulsos de O₂, para avaliar a formação de defeitos de superfície e as espécies oxigenadas formada nas superfícies, estas duas características do catalizador de céria são importantes para a atividade catalítica na oxidação da fuligem. Entretanto, as bandas características da céria ocorrem no faixa de 830-860 cm⁻¹ e 1125-1139 cm⁻¹ e é exatamente nesta faixa que ocorre as bandas referente a fuligem com isso em condições reacionais da oxidação da fuligem há uma sobreposição das bandas dos espectros Raman da céria e da fuligem dificultando assim a utilização destas medidas para uma análise mais profunda sobre as estruturas do catalizador durante a reação. Como pode ser visto na Figura 5, no qual é apresentada o espectro da amostra CeO₂-r durante a reação de oxidação da fuligem ocorre uma sobre posição das bandas que caracteriza as céria e da absorção da própria fuligem, pode fazer uma deconvolução destas bandas sobreposta, com isso separando as bandas características da céria e da fuligem, com isso podendo realizar a análises das formações dos defeitos de superfícies e espécies oxigenadas formadas durante a reação.

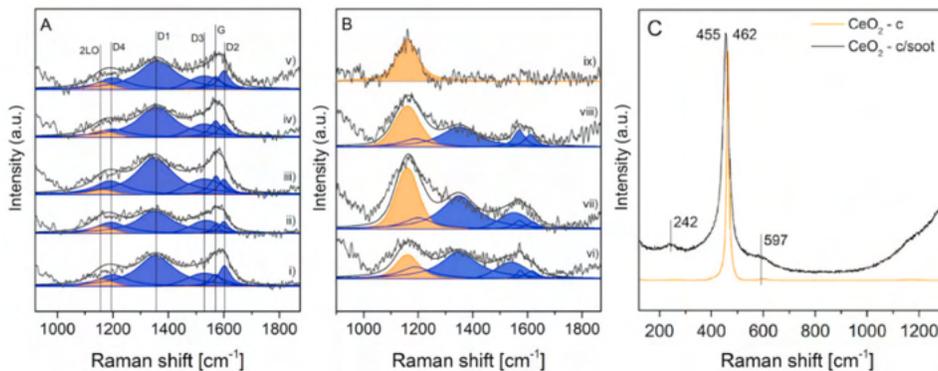


Figura 5: Espectro Raman da amostra antes da reação (CeO₂-c) e durante a reação de oxidação da fuligem (CeO₂-c/soot). Os espectros em A aquecidos em Argônio e B em pulso de oxigênio.

Guerrero-Pérez e colaboradores (GUERRERO-PÉREZ et al., 2011) utilizaram a espectroscopia Raman *operando* e *in situ* para estudo da reação de amoxidação de etano sobre catalisadores óxido de níquel e nióbio. O espectro Raman foi obtido em um equipamento da Renishaw, equipado com um detector CCD e utilizou um laser de argônio com comprimento de onda 514 nm, a potência utilizada do laser foi de 9 mW.

No trabalho de Guerrero-Pérez e colaboradores (GUERRERO-PÉREZ et al., 2011), foi analisado um catalisador de óxido de níquel com baixa quantidade de nióbio (Ni₉₀Nb₁₀) e um catalisador de óxido de níquel com um alto teor de nióbio (Ni₆₀Nb₄₀). A Figura 6 apresenta os espectros Raman do catalisador Ni₉₀Nb₁₀ durante a reação de amoxidação do etano e as medidas de conversão de etano e seletividade aos produtos para cada espectro Raman.

Pode-se notar na Figura 6 que todos os espectros apresentam uma banda Raman em torno de 505 cm⁻¹ que é característica do estiramento Ni-O presente do óxido de níquel. Para o catalisador Ni₉₀Nb₁₀ até a temperatura de 200 °C não apresenta nenhuma conversão de metano e não apresenta nenhuma banda na região de 700 a 1000 cm⁻¹.

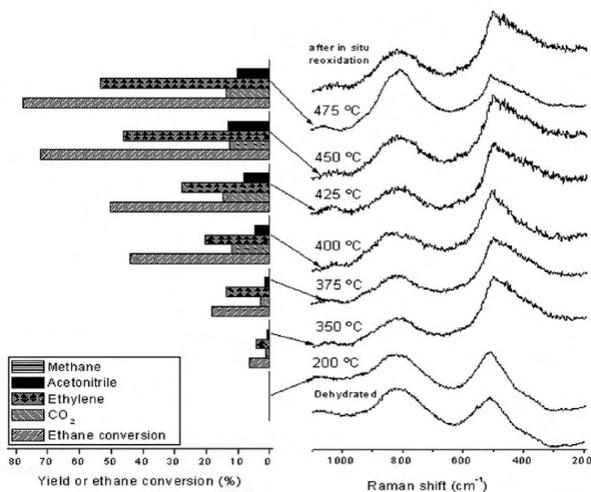


Figura 6: Espectro Raman *operando* e medidas catalíticas do catalisador Ni₉₀Nb₁₀ na reação de amoxidação do etano e espectro da reoxidação *in situ* do catalisador em ar (GUERRERO-PÉREZ et al., 2011).

Entre as temperaturas de 350 a 400 °C já ocorre uma baixa conversão de etano e baixa produção de acetonitrila e nos espectros nestas mesmas temperaturas começa aparecer bandas na região de 700 a 1000 cm⁻¹. Nas temperaturas acima de 400 °C já possui uma alta conversão de etano e nos espectros tornam notáveis as bandas em 950, 858 e 775 cm⁻¹, que são atribuídas às vibrações das ligações Ni-O-Nb, indicando que durante a reação há uma interação entre as espécies de nióbio e o óxido de níquel.

Após a reação o catalisador é reoxidado *in situ* e no espectro do catalisador reoxidado as bandas atribuídas à espécie Ni-O-Nb não são mais notadas. Através das informações fornecidas pela espectroscopia Raman *operando* pode-se sugerir que a espécie Ni-O-Nb seja o sitio ativo para a reação de amoxidação de etano.

Jing Xu e colaboradores (XU et al., 2013) estudaram através da espectroscopia Raman *in situ* e *operando* um nanocatalisador de óxido de manganês (α -Mn₂O₃) na reação de oxidação de CO. O experimento Raman *in situ* e *operando* foi feito num microscópio Raman da Horiba (LabRAM HR), a cela *in situ* e *operando* utilizada foi uma cela comercial da Linkam (CCR1000) e o laser utilizado foi o de Argônio (514 cm⁻¹).

O primeiro passo neste estudo foi realizar um experimento Raman *in situ*, com ambiente inerte (Ar) e aumentando a temperatura de 25 a 500 °C, todos os espectros nas diferentes temperaturas apresentam as mesmas bandas: 341 cm⁻¹ referente às vibrações fora do plano do Mn₂O₃, 563 e 455 cm⁻¹ referente ao estiramento assimétrico do oxigênio em ponte (Mn-O-Mn) e 635 cm⁻¹ atribuído ao estiramento simétrico do Mn₂O₃. Estas bandas não são afetadas durante o tratamento *in situ* em ambiente inerte, devido a isto pode afirmar que não há mudança estrutural do α -Mn₂O₃ devido a efeito de temperatura e do laser.

Os espectros Raman do estudo *in situ* do catalisador $\alpha\text{-Mn}_2\text{O}_3$ em um ambiente de 1% de CO em Ar durante o aquecimento de 25 até 500 °C, e o resfriamento para 25 °C sobre fluxo de Ar. Sobre o ambiente de CO, o espectro a 25 °C é bastante parecido com os espectros em ambiente inerte, porem nos espectros acima de 200 °C há uma diminuição e desaparecimento da banda em 647 cm^{-1} (estiramento assimétrico do Mn_2O_3) e o surgimento de uma nova banda em torno de 494 cm^{-1} . Porém, após o resfriamento para 25 °C sobre fluxo de Ar a banda em 647 cm^{-1} é restaurada e a banda em 495 cm^{-1} desaparece, indicando que há uma reversibilidade na transformação estrutural do catalisador devido à interação com o CO. Esta transformação estrutural do Mn_2O_3 em altas temperaturas na presença de CO se deve a oxidação do CO adsorvido pelo oxigênio da rede do óxido, por isto há a formação de espécies Mn_jO_k intermediárias. Ao trocar a alimentação de CO por Ar durante o resfriamento, ocorre a migração do oxigênio do *bulk* do óxido para a superfície, reconstruindo a superfície do Mn_2O_3 .

A Figura 7 apresenta os espectros Raman em condições *operando* para a reação de oxidação de CO, com uma mistura reação de composição 1% de CO, 20% O_2 em Ar, também nesta figura estão apresentadas as conversões de CO nas temperaturas que foram adquiridos os espectros Raman.

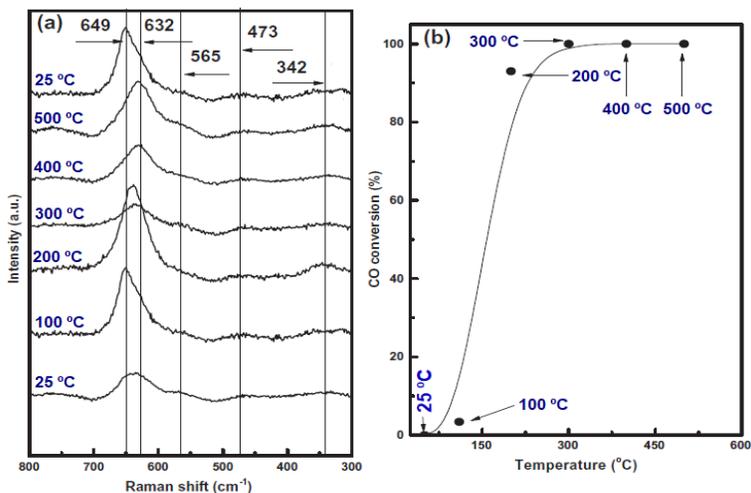


Figura 7: Espectros Raman *operando* na oxidação de CO com mistura reacional 1% de CO e 20% de O_2 em Ar e conversão de CO em diferentes temperaturas (XU et al., 2013).

Pode-se notar que os espectros nas temperaturas de 25 a 200 °C são bem parecidos com os espectros com um ambiente contendo somente de CO nas mesmas temperaturas, apresentando a banda em 649 cm^{-1} , esta banda desloca para 632 cm^{-1} quando a temperatura é maior que 200 °C, contudo esta banda retorna para 649 cm^{-1} quando o catalisador é resfriado a 25 °C sobre o mesmo ambiente da reação.

Os espectros nas temperaturas de 25 e 100 °C apresentam a banda em 649 cm⁻¹ e as conversões de CO nestas mesmas temperaturas são muito baixas. Entretanto, nas temperaturas de 200 °C, ou superiores, a conversão de CO é muito elevada e a banda de 649 cm⁻¹ é deslocada para aproximadamente 632 cm⁻¹, este deslocamento deve-se a perda de oxigênio da rede do óxido, por isto pode-se atribuir a elevada conversão da oxidação de CO à mobilidade do oxigênio da rede do Mn₂O₃.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a revisão de literatura sobre espectroscopia Raman e sua aplicação na caracterização estrutural de catalisadores heterogêneos, pode-se considerar esta técnica como uma ferramenta bastante útil para um pesquisador na área de Catálise Heterogênea, pois fornece valiosas informações sobre a estrutura molecular do catalisador, não destrutiva, além de possui uma rápida e fácil aquisição dos resultados.

Outra consideração importante que deve ser feita em relação à espectroscopia Raman na área de Catálise Heterogênea é que, apesar desta técnica já ser bem explorada e a utilização desta técnica em condições *in situ* ou *operando* ainda tem muito a ser desenvolvida, principalmente a espectroscopia Raman *operando*, é que há uma nova utilização desta espectroscopia que vem fornecendo informações muito importantes como a relação estrutura do catalisador, desempenho catalítico e natureza do sitio catalítico. Informações estas que levam a uma maior compreensão das reações catalíticas e conseqüentemente ao desenvolvimento de catalisadores com melhor desempenho que atingirão positivamente diversos setores da sociedade, desde o meio ambiente até a economia.

REFERÊNCIAS

BAÑARES, M. A. Operando methodology: Combination of in situ spectroscopy and simultaneous activity measurements under catalytic reaction conditions. **Catalysis Today**, v. 100, n. 1–2, p. 71–77, 2005.

CALVINO-CASILDA, V.; BAÑARES, M. A. Recent advances in imaging and monitoring of heterogeneous catalysts with Raman spectroscopy. In: **Catalysis**. [s.l.: s.n.]. v. 24p. 1–47.

FERRADO, J. R.; NAKAMOTO, K.; BROWN, C. W. **Introductory Raman Spectroscopy**. Second Edition. Amsterdam: Academic Press, 2003.

GARCIA, X. et al. X-ray photoelectron and Raman spectroscopy of nanostructured ceria in soot oxidation under operando conditions. **Carbon**, v. 178, p. 164–180, 2021.

GUERRERO-PÉREZ, M. O. et al. In situ Raman studies during sulfidation, and operando Raman-GC during ammoxidation reaction using nickel-containing catalysts: A valuable tool to identify the transformations of catalytic species. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 13, n. 20, p. 9260–9267, 2011.

GUERRERO-PÉREZ, M. O.; BAÑARES, M. A. From conventional in situ to operando studies in Raman spectroscopy. **Catalysis Today**, v. 113, n. 1–2, p. 48–57, 2006.

HORIBA, J. Y. **In Situ Characterisation of Heterogeneous Catalytic Reactions by Raman and IR Vibrational Spectroscopies on a single Instrument**, 2003.

LI, W. Q. et al. Identification of the molecular pathways of RuO₂ electroreduction by in-situ electrochemical surface-enhanced Raman spectroscopy. **Journal of Catalysis**, v. 400, p. 367–371, 2021.

LIANG, X. et al. Shape control of exposed planes in ceria-zirconia based electrocatalysts for methanol oxidation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 54, p. 27483–27494, 2021.

LÓPEZ-LORENTE, Á. I. Recent developments on gold nanostructures for surface enhanced Raman spectroscopy: Particle shape, substrates and analytical applications. A review. **Analytica Chimica Acta**, v. 1168, 2021.

LORIDANT, S. Raman spectroscopy as a powerful tool to characterize ceria-based catalysts. **Catalysis Today**, v. 373, n. November 2019, p. 98–111, 2021.

ROGG, S.; HESS, C. CO₂ as a soft oxidant for propane oxidative dehydrogenation: A mechanistic study using operando UV Raman spectroscopy. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 50, n. May, p. 101604, 2021.

SALA, O. Uma molécula didática. **Química Nova**, v. 31, n. 4, p. 914–920, 2008.

SALA, O. **Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho**. 2ª ed. São Paulo: Editora UNESP, 2011.

SMITH, E.; DENT, G. **Modern Raman Spectroscopy – a practical approach**. 2nd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd Edition, 2019.

TERNERO-HIDALGO, J. J. et al. A simultaneous operando FTIR & Raman study of propane ODH mechanism over V-Zr-O catalysts. **Catalysis Today**, v. 387, n. January, p. 197–206, 2022.

XU, J. et al. Operando Raman spectroscopy and kinetic study of low-temperature CO oxidation on an α -Mn₂O₃ nanocatalyst. **Journal of Catalysis**, v. 300, n. x, p. 225–234, abr. 2013.

ZHU, X. et al. Technical development of raman spectroscopy: From instrumental to advanced combined technologies. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 49, n. 1, p. 64–82, 2014.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acetilação 24, 25, 28, 32, 33
Ácidos graxos 28, 30, 45, 52
Adsorb 88
Aeração 2, 4, 5, 7
Agência Nacional de Petróleo (ANP) 29, 34
Alimentos 37, 39, 43, 44, 86
Análise da fluidez 2
Antioxidante 37, 38, 40, 41
Atividade catalítica 46, 47, 49, 52, 53, 54, 61, 68

B

Bico injetor 11, 14, 15, 16, 19, 20, 22
Biochar 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84
Biocombustíveis 12, 23, 34, 44, 45, 59, 76
Biodegradáveis 24, 26, 37, 38, 43
Biodiesel 11, 12, 13, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 34, 35, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 106, 107
Biofarmacêuticas 2
Biofilmes 37, 40, 42
Biolubrificantes 24, 26, 28, 33, 34, 36
Biomassa 12, 45, 74, 75, 79, 80, 83, 84, 85, 106, 107
Bio-óleo 74, 75, 76, 80, 82, 83, 84
Biopolímeros 37, 43
Bioremediation 106, 107, 109, 110
Boudouard 86, 88

C

Carbon dioxide 86, 87, 90, 98, 101, 102, 104, 105
Catalisadores 27, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 68, 69, 72
Catálise 44, 47, 48, 49, 51, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 68, 72
Cavitação 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23
Chlorella vulgaris 106, 107, 110
Cisalhamento 2, 4, 5, 7, 8

Combustíveis 11, 12, 24, 25, 26, 36, 45, 56
Coupled Integral Equations Approach (CIEA) 86, 93
Cupuaçu 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43

D

Densidade relativa 26, 29, 30, 31, 32, 33
Diesel 11, 12, 13, 16, 20, 22, 23, 34, 35, 36, 44, 45, 68

E

Efeito Raman 61
Epoxidação 24, 27, 29
Escoabilidade 1, 3
Espalhamento Raman 62, 63, 64
Espectroscopia Raman 60, 61, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73
Excipientes farmacêuticos 1, 2, 6

F

Fármacos 1, 2, 3, 37, 38, 39
Fóton 62, 64

G

Gás de arraste 74, 75, 77, 80
Generalized Integral Transform Technique (GITT) 86, 87, 95

H

Hidroxilação 24, 31

I

Injeção 4, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 23

L

Lactuca sativa 106, 107, 108

M

Materiais pulverulentos 1, 2
Matrizes energéticas 44
Microcelulose 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 3
Modelo de Schnner e Sauer 11, 16
Monocromadores 65

Motores 11, 12, 13, 32, 35, 45

N

Não-renováveis 11

O

Óleos vegetais 12, 24, 26, 45, 47, 49, 58

Óxidos 44, 46, 47, 50, 52, 54, 60

P

Petróleo 12, 25, 29, 34, 44, 45

Phytotoxicity 106

Pirólise 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85

Ponto de fluidez 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34

Ponto de fulgor 26, 29, 30, 31, 32

Porosidade 2, 3, 5, 6, 48, 50, 54

Propriedades fenomenológicas 2

R

Renováveis 11, 12, 25, 44

Reômetro 4

Resíduos 34, 53, 55, 57, 75, 84, 85, 112

Reutilização 49, 52, 54, 75, 112

T

Termoconversão 75

Toxicidade 26, 45, 106, 107

Transesterificação heterogênea 44

Triglicerídeos 29, 45, 47, 48, 51, 55

V

Viscosidade 11, 12, 13, 16, 19, 20, 22, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 47

W

Wastewaters 106

Z

Zeólitas 44, 46, 47, 54, 56, 57, 58

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos



**Atena**
Editora
Ano 2022

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos