



EDUCAÇÃO QUÍMICA PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL: DESVENDANDO A CINÉTICA QUÍMICA DA PIRÓLISE DO RESÍDUO DA CULTURA DE PIMENTA-DO-REINO (*Piper Nigrum* L.) PARA A POTENCIAL PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO

Gyovana L. Welsing^a, Bruna M. Damm^a, Maria F. F. Lelis^{a,*}, Marta A. Machado^a e Paulo R. G. Moura^a

^aDepartamento de Química, Centro de Ciências Exatas (DQUI/CCE), Universidade Federal do Espírito Santo, 29075-910 Vitória – ES, Brasil

Recebido: 14/03/2024; aceito: 14/05/2024; publicado online: 02/07/2024

CHEMICAL EDUCATION FOR A SUSTAINABLE FUTURE: UNRAVELING THE CHEMICAL KINETICS OF PYROLYSIS OF BLACK PEPPER (*Piper Nigrum* L.) CROP RESIDUE FOR THE POTENTIAL PRODUCTION OF BIO-OIL. The Sustainable Development Goals (SDGs) provide a comprehensive framework to guide actions towards a more sustainable future, emphasizing the need for sustainable production and consumption patterns (SDG 12), urgent measures to combat climate change and its impacts (SDG 13), and ensuring inclusive, equitable, and quality education (SDG 4). In this context, environmental education (EE) becomes crucial to empower present and future generations to address complex environmental challenges. Promoting EE can be enhanced through Chemistry education, encouraging the use of biomass as a primary energy source, a significant ally in addressing the SDGs. This study integrates experimental and educational chemical knowledge on the pyrolysis reaction of black pepper waste, aiming at higher education in Chemistry in an Environmental Chemistry class at Federal University of Espírito Santo. It aims to provide an in-depth understanding of chemical kinetics, connected to sustainable development through the theoretical-methodological strategy of problematized experimental activity (PEA). The developed PEA comprised five theoretical-experimental classes, including thermogravimetric analysis (TGA) simulation and pyrolysis furnace testing. The results indicate significant learning in Chemical Kinetics and themes related to the pyrolysis process associated with sustainable development, highlighting the contribution of the utilized PEA.

Keywords: problematized experimental activity (PEA); biomass; environmental chemistry; environmental education; chemistry education.

INTRODUÇÃO

O cenário global enfrenta desafios iminentes relacionados às mudanças climáticas, que emergem como uma ameaça à sustentabilidade do planeta. O aumento das concentrações de gases de efeito estufa, as alterações nos padrões climáticos e os eventos extremos associados a esse fenômeno demandam ações urgentes e uma compreensão aprofundada de suas raízes científicas. O impacto significativo das atividades humanas no clima terrestre, especialmente no contexto da geração e consumo de energia, impõe uma reavaliação crítica de nossas práticas cotidianas.¹⁻³

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Assembleia Geral das Nações Unidas,⁴ fornecem um quadro abrangente para orientar ações em direção a um futuro mais sustentável. Dentre esses objetivos, destaca-se para este trabalho, a necessidade de assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis, ODS 12, e tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos, ODS 13, ambos intrinsecamente ligados à compreensão dos princípios químicos subjacentes aos processos industriais e energéticos. Além disso, destaca-se o ODS 4 que trata sobre assegurar a educação inclusiva, equitativa e de qualidade, além de promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todas e todos.⁵

Nesse cenário, a educação ambiental (EA) torna-se um componente essencial para capacitar as gerações presentes e futuras a lidar com os complexos desafios ambientais. A EA vai além da mera transmissão de conhecimento, envolvendo os alunos em

práticas pedagógicas que promovam uma compreensão profunda das interconexões entre as atividades humanas, as mudanças climáticas e a sustentabilidade.^{6,7} No contexto das mudanças climáticas, a promoção da EA pode ser potencializada por meio do ensino de Química, investigando e avaliando a utilização da biomassa como fonte primária de energia, o que se configura como um aliado importante na abordagem dos ODS.⁸⁻¹⁰ A biomassa, definida como qualquer forma de matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal, destinada à produção de energia, é gerada por processos naturais, tais como a fotossíntese ou a digestão de animais, bem como por intervenção humana, a exemplo do processamento da biomassa natural.¹¹⁻¹³ Na conjuntura brasileira, a biomassa lignocelulósica, proveniente de fontes vegetais, emerge como opção viável para a matéria-prima, respaldada pela posição de liderança do país na produção agrícola e pela existência de diversos resíduos agroindustriais de elevado potencial energético que satisfazem todos os requisitos necessários.¹⁴

A composição primordial da biomassa lignocelulósica compreende, principalmente, celulose, hemicelulose e lignina, além de outras substâncias em proporções menores, como proteínas, óleos e ácidos graxos, entre outros. A distribuição relativa de cada componente varia nas plantas em função de diversos fatores, incluindo o tipo de tecido vegetal, a idade da planta e as condições de crescimento.¹⁴⁻¹⁶

No presente estudo, a biomassa escolhida consiste no resíduo proveniente da debulha da pimenta-do-reino, uma vez que essa cultura exhibe notável importância regional, especialmente devido ao fato de o Espírito Santo assumir atualmente o posto de maior produtor e exportador desse condimento. A pipericultura, no entanto, enfrenta desafios relacionados à geração de resíduos agrícolas.¹⁷ Durante

*e-mail: mfflelis@yahoo.com.br

Editor Associado responsável pelo artigo: Nyuara A. S. Mesquita

o beneficiamento da pimenta-do-reino, diversos processos são empregados, resultando na produção de resíduos em todas as fases. Estima-se que aproximadamente 30 a 50% da produção total seja descartado, totalizando numericamente 37 mil toneladas anuais no Brasil.¹⁸ O resíduo da pimenta-do-reino é composto de ramos, folhas e frutos de *Piper nigrum* L. e apresenta uma composição próxima da relatada para o fruto.^{18,19}

A conversão da biomassa em combustíveis, energia e produtos químicos pode ser realizada por meio de diversos processos físico-químicos ou biológicos. Nesse contexto, destaca-se a pirólise como uma alternativa, caracterizada como um método termoquímico que se sobressai por produzir combustíveis líquidos em uma única etapa química, dispensando a necessidade de pressão elevada.²⁰ Ademais, a pirólise, inserida na temática de Energias Renováveis, é relatada na literatura por sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases do efeito estufa e de poluentes atmosféricos. Segundo Yang *et al.*,²¹ na China, estima-se uma diminuição de até 61% das emissões até 2030 por meio da pirólise, além de apontar que os resíduos agrícolas submetidos a esse processo podem contribuir com entre 13 e 30% da meta global de redução de gases poluentes por meio da bioenergia, em apenas uma década. A pirólise, um processo de degradação térmica da matéria orgânica em uma atmosfera não-oxidante, resulta na formação de uma fração sólida e outra gasosa.²² O bio-óleo, um líquido complexo formado por água e numerosos compostos orgânicos oxigenados, pode ser utilizado como biocombustível, aditivo em outros combustíveis e insumo para a obtenção de produtos químicos. O biogás, composto principalmente por dióxido de carbono, monóxido de carbono, gás hidrogênio, metano, etano, etileno e propano, é frequentemente empregado na geração de energia para o processo. Adicionalmente, a fração sólida, conhecida como biocarvão, composta por cinzas e carbono, apresenta potencial utilização em diversas aplicações, como combustível, coque em processos metalúrgicos, matéria-prima para a produção de carvão ativado e fertilizante.^{22,24}

A qualidade e quantidade dos produtos gerados na pirólise, tais como bio-óleo, biocarvão e biogás, são influenciadas pelo tipo de pirólise empregada, classificada como lenta, moderada ou rápida, cujas variações são determinadas principalmente pelos parâmetros temperatura e tempo de residência dos vapores. Além disso, outros fatores operacionais, como taxa de aquecimento, natureza da biomassa, tipo de reator e tamanho da partícula, também desempenham papel significativo na obtenção dos produtos desejados na pirólise.^{25,26} Com o intuito de compreender e otimizar esse processo, e torná-lo mais sustentável, a realização de análises térmicas, como a análise termogravimétrica (do inglês, *thermogravimetric analysis*, TGA), pode ser empregada. A TGA é uma técnica que registra a variação de massa de uma amostra conforme a temperatura e o tempo, sob um programa de aquecimento controlado. Dentre as vantagens dessa técnica, destacam-se sua praticidade, a utilização de pequenas massas de amostra, a execução da medição em um único experimento, a dispensa de solventes e a não geração de resíduos tóxicos.^{27,28}

Diante das premissas anunciadas, a promoção da EA pode ser alcançada por meio de abordagens que enfatizem o uso da biomassa como matéria-prima para a geração de energia e por meio de estratégias educacionais que priorizem o engajamento e a mobilização das habilidades cognitivas dos alunos.²⁹⁻³¹ Uma estratégia teórico-metodológica de ensino que incorpora a experimentação, alinhada aos princípios de uma aprendizagem de natureza psicológica e oriunda do processo investigativo, é a Atividade Experimental Problematizada (AEP). Essa abordagem possui o potencial de fomentar autonomia e estimular a busca constante por soluções diante de problemas. A estrutura da AEP compreende três etapas principais: problema

proposto, objetivo experimental e diretrizes metodológicas, que incluem discussão prévia, organização e desenvolvimento, retorno ao grupo de trabalho, socialização e sistematização.^{32,33}

Dessa forma, o presente estudo busca integrar conhecimentos químicos experimentais e educacionais acerca da reação de pirólise da cultura de resíduos de pimenta-do-reino, direcionando-se ao ensino superior de Química, em uma turma de Química Ambiental, da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O objetivo é proporcionar uma compreensão aprofundada de conhecimentos de Cinética Química e verificar indícios de aprendizagem em diferentes esferas de inteligência, conectadas ao desenvolvimento sustentável.

PARTE EXPERIMENTAL

Local e participantes da pesquisa

A investigação foi conduzida no âmbito da disciplina de Química Ambiental, integrante do curso de Bacharelado em Química (UFES), contando com a colaboração de nove estudantes. O projeto foi submetido à análise do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP - UFES, Campus Goiabeiras), obtendo aprovação com o número de CAAE 73865423.5.0000.5542.

Planejamento e desenvolvimento da estratégia de ensino AEP

A estratégia pedagógica adotada, AEP, pressupõe, em sua fase de planejamento, a elaboração de eixos teóricos que abrangem a formulação do problema, o objetivo experimental e as diretrizes metodológicas. Os objetivos experimentais foram subdivididos em três perspectivas para a resolução do problema, cuja compreensão e alcance pelos estudantes eram esperados ao longo da execução do experimento. Na Figura 1, encontra-se uma descrição do eixo metodológico da AEP utilizada.

A AEP delineada na Figura 1 fundamentou-se nos eixos teóricos, especificamente na fase de planejamento. Nesse sentido, propôs-se o problema: “Quais são as limitações químicas que afetam a utilização do bio-óleo como biocombustível, quais parâmetros estão envolvidos em sua produção e, ao superar essas limitações, seria possível considerar o bio-óleo como uma alternativa viável de biocombustível?”, além de definir-se três objetivos experimentais: (1) simulação de TGA; (2) investigação de parâmetros de reação de pirólise e; (3) produção e coleta do bio-óleo. Em relação ao primeiro objetivo, o domínio e a aplicação eficaz dessa técnica possibilitam potenciais oportunidades de otimização em diversos processos. Já o segundo objetivo, trata-se da compreensão dos parâmetros cinéticos, ao familiarizar-se e aprofundar o estudo dos parâmetros inerentes à reação de pirólise, é factível reduzir o tempo de reação, otimizando, assim, o rendimento dos produtos gerados. Por fim, o terceiro objetivo demonstra o desenvolvimento de uma reação de pirólise. A pirólise é um processo para possível obtenção de biocombustíveis, isso porque resulta na produção de três produtos de alto potencial energético, são eles: bio-óleo, biocarvão e biogás. Portanto, ao compreender o processo de pirólise e sua relevância, os estudantes têm a oportunidade de conduzir experimentos que envolvem a variação de parâmetros cinéticos, visando otimizar o rendimento de um dos mencionados produtos.

Para satisfazer o eixo teórico da AEP, construiu-se diretrizes metodológicas, que vão de encontro com o procedimento da Figura 1. Contou-se com duas práticas experimentais: Prática I - Simulação de análise termogravimétrica utilizando resíduo da cultura de pimenta-do-reino, que atende ao objetivo experimental 1 e a Prática II - Teste de pirólise utilizando resíduo da cultura de pimenta-do-reino, que atende aos objetivos 2 e 3.

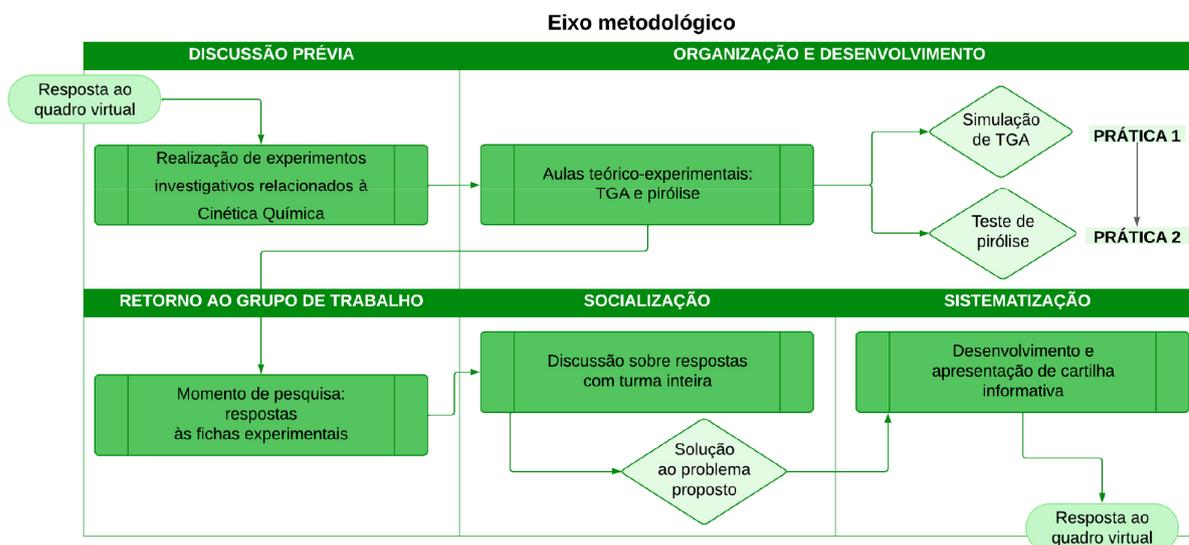


Figura 1. Eixo metodológico da AEP desenvolvida e aplicada (legenda: resposta ao quadro virtual refere-se aos formulários de conhecimentos prévios e feedback da intervenção)

Aulas experimentais

Para o desenvolvimento das aulas experimentais, que consistiram em simulação de TGA e testes de pirólise, os alunos foram organizados em dois grupos, permitindo-lhes escolher sua própria composição para a discussão e elaboração dos materiais. Esses grupos foram identificados como grupo 1 (G1) e grupo 2 (G2) ao longo das análises conduzidas neste estudo.

Simulação de TGA utilizando resíduo da cultura de pimenta-do-reino

Visando uma adaptação didática reproduzível para demonstrar como é realizada a análise termogravimétrica desenvolveu-se um simulador utilizando forno mufla. O procedimento realizado pode ser visualizado na Figura 2.

Inicialmente, os estudantes selecionaram uma quantidade personalizada de resíduo de pimenta-do-reino e realizaram a pesagem. Em seguida, transferiram o resíduo para um cadinho de porcelana e o colocaram em um forno mufla, definindo tanto as temperaturas iniciais quanto as finais para a reação. Além disso, estabeleceram um intervalo de temperatura para o controle das medições e a taxa de aquecimento desejada.

Em cada temperatura de medição, retiravam o cadinho, o submetiam a um dessecador para resfriamento e, uma vez resfriado, procediam com a pesagem, retornando-o para o forno em seguida. A quantidade de medidas realizadas foi deixada a critério dos estudantes, sendo recomendado realizar no mínimo cinco para permitir a construção de um perfil térmico do material. Esse procedimento possibilitou a criação de um gráfico de perda de massa em relação

à temperatura ou ao tempo, fornecendo uma representação visual do experimento. Após a prática, os estudantes receberam uma ficha experimental, disponível no Material Suplementar (Quadro 1S), onde havia questões teóricas e práticas em relação à TGA, cinética química e desenvolvimento sustentável.

Teste de reação de pirólise utilizando resíduo da cultura de pimenta-do-reino

A reação de pirólise do resíduo de pimenta-do-reino foi conduzida em uma unidade reacional, conforme ilustrado na Figura 3. O procedimento experimental, juntamente com a metodologia empregada, foi meticulosamente planejado pelos estudantes sob supervisão prévia.

Antes de iniciar o experimento, procedeu-se a uma minuciosa discussão acerca dos parâmetros da reação, abrangendo desde as temperaturas inicial e final até as taxas de aquecimento, tempo de reação e fluxo de gás. Após a definição desses parâmetros, os estudantes montaram o sistema de pirólise conforme representado na Figura 3 e deram início à reação. Uma vez completada, o reator foi resfriado gradualmente até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, os estudantes coletaram os produtos resultantes e calcularam os rendimentos de bio-óleo e biocarvão obtidos. O rendimento de bio-óleo foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$R_{\text{bio-óleo}} (\%) = \frac{M_{\text{bio-óleo}} - M_{\text{umidade}}}{M_{\text{biomassa seca}}} \times 100 \quad (1)$$

onde: R é o rendimento (%) e M a massa (g).

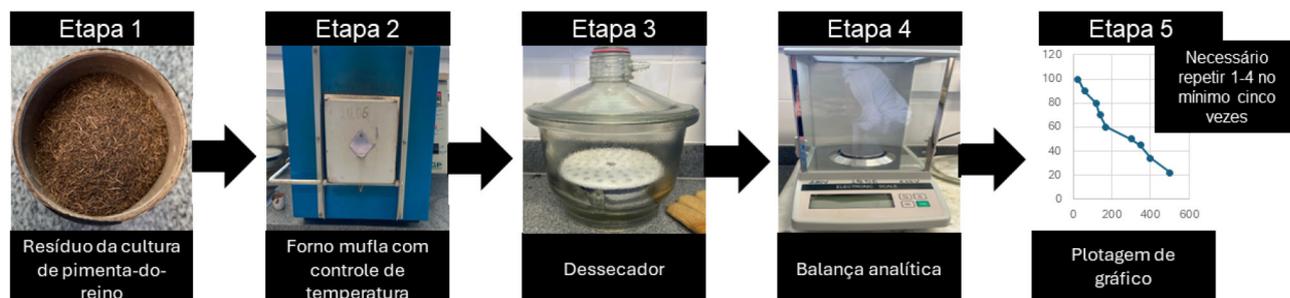


Figura 2. Procedimento experimental da simulação de TGA

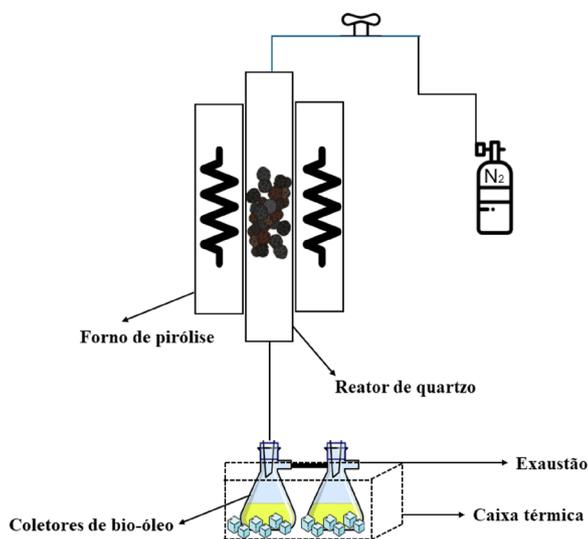


Figura 3. Diagrama esquemático da unidade de pirólise

Coleta e tratamento de dados

A coleta de dados foi diversificada com a aplicação de questionários, fichas ao longo das aulas, relatórios, mídias e cartilhas confeccionados pelos alunos para conscientização da sociedade sobre o desenvolvimento sustentável, caracterizando a fase de sistematização da AEP. A transcrição dos áudios das aulas complementou a análise dos dados, preenchendo eventuais lacunas identificadas.

A análise baseou-se na Análise de Conteúdo de Bardin (AC),³⁴ utilizando o software MAXQDA® Analytics Pro,³⁵ versão 24.2.0. Os procedimentos englobaram as etapas de: (i) organização do material; (ii) codificação - identificação de unidades de registro com base em elementos temáticos comuns; (iii) categorização - com base nos elementos emergentes do texto; (iv) inferências.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de bio-óleo como temática de desenvolvimento sustentável e as contribuições de estudo teórico-experimental

A apresentação e discussão dos resultados serão pautadas nas produções dos alunos durante estas atividades, por permitirem a detecção de indicadores de aprendizado em cinética química, estabelecendo correlações com o contexto do desenvolvimento sustentável. A partir de uma metódica análise dos materiais, foram estabelecidas categorias iniciais, intermediárias e finais para a

condução da análise de conteúdo referente as seguintes atividades: simulação de TGA e o teste de pirólise.

Simulação de TGA utilizando resíduo da cultura de pimenta-do-reino

O Quadro 1 ilustra as categorias organizadas a partir da análise das fichas experimentais produzidas pelos alunos referente ao experimento envolvendo a simulação de análise de TGA, em que foi possível identificar o perfil térmico da biomassa em atmosfera oxidante.

O nível I aborda os objetivos e parâmetros de operação ou cinéticos. Os estudantes enfrentaram dificuldades em distinguir claramente a diferença entre a definição de parâmetros de operação e/ou cinéticos. Nesta categoria, cerca de oito respostas dos estudantes foram segmentadas com o intuito de identificar possível aquisição de conhecimento. Como exemplo de trechos codificados:

“Sim, pois os rendimentos estão diretamente relacionados ao tipo de pirólise, podendo ser rápida, intermediária ou lenta. Temperaturas baixas e longos tempos de residência do vapor em contato com a biomassa geram maiores proporções de carvão, temperaturas altas e longos tempos de residência aumentam a conversão da biomassa em gás e temperaturas altas com tempos de residência inferiores a 2 segundos geram maiores rendimentos do bio-óleo.” P3G2

Esta análise revelou que os estudantes compreenderam satisfatoriamente os objetivos da técnica, bem como a determinação e interpretação dos parâmetros operacionais e/ou cinéticos. Além disso, é possível constatar que os estudantes do G1 demonstraram acurada identificação dos fatores que impactam a TGA. Entretanto, constatou-se uma compreensão restrita, focalizando exclusivamente aspectos físicos e instrumentais, sem estabelecer uma interconexão com a cinética química.

Alguns segmentos, como P3G2, foram empregados na análise das discussões relacionadas aos parâmetros de operação, sejam eles obtidos diretamente ou por meio da técnica em questão. Evidencia-se uma dissensão entre os grupos quanto à obtenção ou interferência nos parâmetros cinéticos pela TGA. Infere-se que o G2, de forma equivocada, atribuiu os resultados da análise exclusivamente ao processo de TGA. Embora a TGA possibilite o mapeamento dos processos de degradação térmica, otimizando a pirólise, e a variação de parâmetros permita a predição das melhores condições de operação, é crucial ressaltar que a TGA por si só não influenciará no rendimento dos produtos da pirólise.^{36,37}

O nível II, relacionada às aplicações de TGA e suas conexões com o desenvolvimento sustentável, teve as respostas dos estudantes analisadas de forma segmentada, visando identificar a percepção

Quadro 1. Categorias iniciais, intermediárias e finais para análise de fichas experimentais 1

Nível	Categorias iniciais	Categorias intermediárias	Categorias finais
I	1) Objetivos alcançados com equipamento usual 2) Objetivos alcançados com simulador 3) Fatores que podem afetar as análises de TGA 4) Atmosfera utilizada 5) Parâmetros cinéticos e parâmetros de operação	1) Objetivo da técnica 2) Parâmetros de operação e cinéticos 3) Fatores que afetam o funcionamento da técnica	1) Parâmetros de operação e cinéticos (n = 13) ^a
II	6) Sustentabilidade 7) Relação entre a TGA e a produção de bio-óleo	4) Desenvolvimento sustentável 5) Aplicações da TGA	2) Desenvolvimento sustentável e as aplicações da TGA (n = 2) ^a
III	8) Tratamento e interpretação de dados	6) Resultados e tratamento de dados	3) Tratamento de dados (n = 4) ^a

^aRefere-se à quantidade de segmentos analisados por categoria final.

destes em relação a um processo ambientalmente correto. Isso ocorreu devido ao fato de o simulador utilizado permitir a liberação de gases, o que o desqualifica como um processo sustentável.

“Em partes sim, porque há poucos resíduos, não há utilização de solventes. No entanto, o uso da mufla, muito em razão do equipamento “defasado”, há um gasto elétrico alto, é possível que a troca do equipamento contribua para o melhor desenvolvimento do experimento.” DSG1

“Não é sustentavelmente correta. A modificação seria utilizar um forno mufla com acompanhamento de taxa de aquecimento, e com isso evitaria que entrasse em contato com a atmosfera.” DSG2

A análise dos segmentos (DSG1 e DSG2) revela que os estudantes foram capazes de formular críticas. No G1, observa-se a consideração de que a sustentabilidade está intrinsecamente ligada ao uso de resíduos e à não utilização de solventes, uma vez que não foi necessário o preparo de amostras. No entanto, ambos os grupos ressaltaram o elevado consumo energético do simulador e o impacto ambiental decorrente do contato com a atmosfera.

Nesse sentido, a interação do gás oxigênio com a biomassa resulta na formação de produtos como monóxido e dióxido de carbono, bem como a possibilidade, em quantidades reduzidas, de dióxidos ou trióxidos de nitrogênio ou enxofre, gases contribuintes para o efeito estufa. Vale ressaltar que foram utilizadas quantidades entre 1 e 5 g de biomassa para a geração mínima de gases tóxicos, entretanto, caso fossem utilizadas grandes quantidades poderia resultar em um problema ambiental, similar ao liberado por automóveis e indústrias.

O G1 destaca que a TGA pode contribuir para a produção de bio-óleo mediante técnicas de caracterização da biomassa, as quais indicarão o potencial para a produção de biocarvão e/ou bio-óleo com base em suas propriedades físico-químicas. Enquanto, o G2 resalta a relação entre o potencial energético e os parâmetros cinéticos, uma interação crucial, dado que o propósito da prática é a correlação entre análises químicas e cinética química. Importa destacar que a TGA não contribui diretamente a produção de bio-óleo, assim, a técnica permite a compreensão do perfil térmico do material pirolizado e da reação de pirólise que permite a produção de bio-óleo. Além disso, apesar de os parâmetros de operação e cinéticos auxiliarem na previsão de um potencial energético elevado ou baixo, este será determinado principalmente pelas propriedades físico-químicas.^{38,39} Um termo inadequado empregado pelos estudantes é parâmetros cinéticos utilizados, quando, na verdade, esses são determinados.⁴⁰ Contudo, ao longo de toda a prática, observou-se uma confusão persistente entre parâmetros de operação e cinéticos.

O nível III refere-se ao tratamento de dados e concentra-se na aquisição de conhecimento prático computacional relacionado à técnica em questão. O segmento exposto a seguir, evidencia a adequada compreensão dos estudantes acerca dos dados e parâmetros passíveis de obtenção, destacando a relevância da simulação realizada nesse processo.

“A partir dos resultados e do conhecimento adquirido da técnica por meio do experimento, foi possível observar a semelhança entre o gráfico com o usual em uma TGA.” RTD2G2

Associada à categoria 5, essa compreensão permitiu a identificação da contribuição da técnica na produção de bio-óleo. Tal discernimento é claramente evidenciado pela Figura 4, na qual são apresentadas as curvas de TGA elaboradas pelos estudantes.

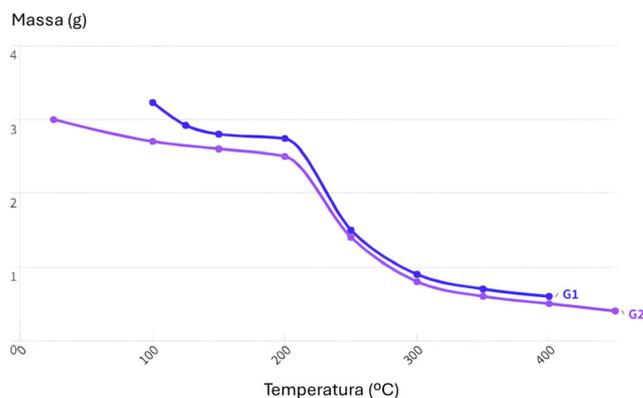


Figura 4. Gráficos de variação de massa em função da temperatura plotados por estudantes dos grupos G1 e G2

A Figura 4 proporciona uma análise do perfil térmico da combustão da biomassa pelos dois grupos participantes. Em relação ao número de pontos, não houve uma limitação prévia, permitindo que os grupos determinassem a quantidade a ser utilizada. Os estudantes construíram um perfil térmico com os parâmetros escolhidos por eles para a biomassa analisada e compararam-no com as curvas de TGA do resíduo da cultura de pimenta-do-reino na presença de gás nitrogênio, caracterizando uma atmosfera não oxidante. Entre outras observações, destacaram que a combustão na presença de oxigênio ocorre mais rapidamente e em temperaturas mais baixas do que na ausência de oxigênio, ou seja, durante a pirólise. Considerando isso, inferiu-se que esta atividade teórico-experimental evidencia a possibilidade de aprendizagem quando há a interação entre conhecimentos práticos e teóricos.

Ao concluir a análise da fase experimental de análise termogravimétrica, foram elaborados gráficos de frequência para as categorias intermediárias empregadas no presente estudo, por meio do software MAXQDA®. Estes gráficos estão detalhadamente expostos na Figura 5.

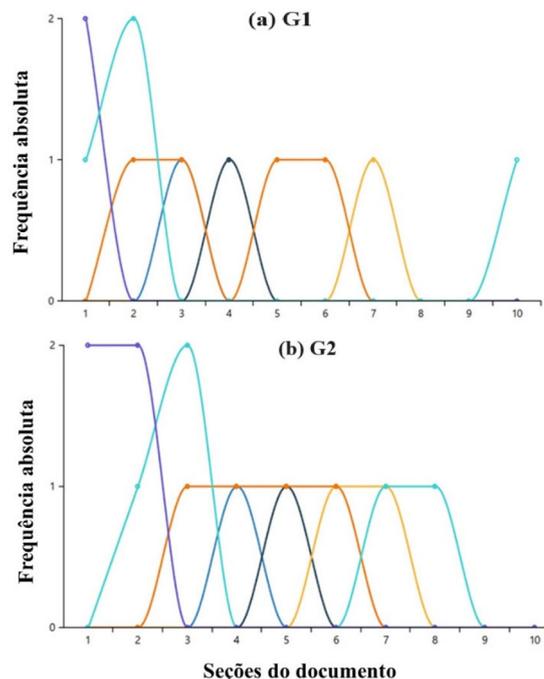


Figura 5. Gráficos de frequências de categorias intermediárias para análise de categorias 4-6: (a) refere-se ao gráfico do G1 e (b) refere-se ao gráfico do G2. ● Resultados e tratamento de dados; ● aplicações da TGA; ● desenvolvimento sustentável; ● fatores que afetam a técnica; ● parâmetros de operação/cinéticos; ● objetivos da técnica

A observação da Figura 5 permite constatar que ambos os grupos expressaram opiniões bastante convergentes em relação à frequência dos temas discutidos, sendo esta uma indicativa do conhecimento que foi mais eficientemente assimilado pelos estudantes. Torna-se perceptível que os parâmetros e objetivos da técnica foram os elementos mais recorrentemente mencionados e debatidos pelos participantes. Ao considerar o alcance do objetivo experimental 1, verifica-se que este foi alcançado pelos estudantes que demonstraram indícios de domínio de seus objetivos, manipulação adequada de parâmetros e identificação de possíveis aplicações. Tais constatações ganham maior clareza ao analisar a Figura 6, que apresenta a nuvem de palavras gerada pelo *software* a partir da análise dos materiais aqui investigados.



Figura 6. Nuvem de palavras gerada pelo software MAXQDA® sobre materiais produzidos por estudantes contendo TGA

A análise da Figura 6 revela que os estudantes incorporaram em suas respostas a aplicação da técnica de TGA para a realização da pirólise visando a produção de bio-óleo, juntamente com a obtenção de parâmetros cinéticos. Vale salientar que o termo parâmetros pode ter sido empregado de maneira imprecisa, especialmente ao diferenciar entre os parâmetros de operação e os cinéticos. No entanto, os conceitos vinculados à cinética química da pirólise, extrapolados a partir das curvas de TGA, tais como degradação, taxa de reação, aquecimento, fatores de influência, variação de temperatura e tempo, são identificados na análise da nuvem, constituindo um aspecto positivo para a construção do

conhecimento em cinética química aplicada a um tema de relevância socioambiental e tecnológica.

Teste de pirólise

Conforme exposto nas análises de conteúdo precedentes, foram estabelecidas categorias preliminares, intermediárias e conclusivas para a avaliação do conteúdo do ensaio de pirólise, as quais são delineadas no Quadro 2.

No Quadro 2, verifica-se a congruência entre as categorias finais resultantes da pirólise e as categorias finais obtidas por meio da TGA. Este alinhamento decorre da abordagem adotada na pesquisa, que se propôs a integrar os conhecimentos químicos aos domínios de desenvolvimento sustentável e cinética química. Essa abordagem visa não apenas a convergência de conceitos, mas também a facilitação da compreensão e visualização da relação intrínseca entre pirólise e TGA. A fim de aprimorar a análise, as categorias foram subdivididas em segmentos, sendo o nível I o ponto de partida, e exemplificações desses segmentos codificados estão apresentadas a seguir:

“Esse processo surge como alternativa potencial para valorizar a pimenta do reino, uma vez que promove a conversão de um resíduo em compostos de grande interesse.” B1G2

A análise do nível I aborda o forno de pirólise e seus parâmetros operacionais. Constata-se que os estudantes investigaram a existência de diferentes fornos de pirólise e como essas variações podem influenciar nos resultados dos produtos. Essa reflexão surgiu durante a prática experimental, quando questionaram se o forno utilizado, por ser de pequeno porte, representava a única opção viável de operação. Tal limitação poderia inviabilizar a produção em larga escala de biocombustíveis.

No segmento B1G2, dedicado à biomassa, destaca-se o potencial sustentável ao abordar a gestão de resíduos como um desafio significativo para o estado em estudo. Nesse contexto, surge uma alternativa promissora: a reciclagem química desses resíduos, visando à produção de bio-óleo, além da comercialização tradicional. Os segmentos focados nos parâmetros de operação, evidenciam a meticulosidade dos estudantes ao selecionarem e/ou determinarem tais parâmetros. Essa atenção detalhada demonstra a compreensão de

Quadro 2. Categorias iniciais, intermediárias e finais para análise de fichas experimentais 2

Nível	Categorias iniciais	Categorias intermediárias	Categorias finais
I	1) Tipo de forno empregado para o processo, englobando especificações e características 2) Controles de operação 3) Insumos e matéria-prima utilizados no processo	1) Forno utilizado 2) Parâmetros de operação 3) Atmosfera utilizada 4) Biomassa	1) Equipamento e parâmetros de operação (n = 18) ^a
II	4) Pirólise 5) Desenvolvimento sustentável 6) Limitações químicas do bio-óleo 7) Aplicações do bio-óleo	5) Processo de pirólise 6) Aspectos ambientais 7) Contribuições para o desenvolvimento sustentável 8) Composição química 9) Desafios técnicos e tecnológico 10) Usos industriais ou agrícolas 11) Potencial energético 12) Aplicações em produtos químicos e materiais	2) Pirólise e desenvolvimento sustentável (n = 13) ^a
III	8) Quantificação de produtos da pirólise obtidos 9) Avaliação dos rendimentos de bio-óleo e biocarvão 10) Avaliação de potencial energético	13) Obtenção do bio-óleo 14) Rendimentos do bio-óleo e biocarvão	3) Tratamento de dados da pirólise (n = 5) ^a

^aRefere-se à quantidade de segmentos analisados por categoria final.

que esses fatores exercem impacto significativo no rendimento final dos produtos obtidos por meio da pirólise.

Após a análise dos parâmetros estabelecidos para conduzir a pirólise, a atenção foi voltada para a avaliação do processo em si, especialmente considerando o nível II delineado, que aborda a pirólise e seu entrelaçamento com o desenvolvimento sustentável.

“Tendo em vista que a pirólise da biomassa parte de uma fonte renovável, resulta em menores emissões, possui um ciclo do carbono fechado, envolve geralmente o aproveitamento de resíduos e possui um potencial para energia descentralizada.”
A1G1

Para os objetivos experimentais e de pesquisa, o nível II emerge como uma das mais intrigantes e relevantes a serem analisadas. Isso se justifica pelo fato de que, por meio dessa categoria, torna-se viável explorar a interação entre a cinética química, o desenvolvimento sustentável e a pirólise. Evidencia-se a percepção dos estudantes em relação à granulometria da biomassa utilizada e ao conceito de superfície de contato. Já o segmento A1G1 aborda a temática da sustentabilidade envolvida no processo de pirólise, destacando que, devido à sua ocorrência em atmosfera não oxidante, há uma menor liberação de gases tóxicos causadores de efeito estufa, além de outros impactos ambientais. Isso ocorre paralelamente ao reaproveitamento de resíduos e à possibilidade de investigação energética.

Quando se trata especificamente do potencial energético, a análise demonstra que os estudantes assimilaram de maneira satisfatória o entendimento do potencial de pesquisa para os produtos de pirólise, com destaque para o bio-óleo. Além disso, os segmentos evidenciam que os estudantes buscaram explorar outras aplicações de cunho industrial e agrícola, as quais, assim como a pesquisa energética, encontram-se em fase de investigação laboratorial. Contudo, ano após ano, a biomassa revela-se como uma alternativa promissora. No contexto brasileiro, o país detém recursos extensivos de biomassa que têm o potencial de equilibrar as demandas totais de energia primária até 2030, prevendo-se que o Brasil se torne um exportador cada vez mais expressivo de recursos de biomassa para uso final de energia.⁴¹

Ademais, foram investigados os desafios associados ao uso do forno de pirólise disponível. Conforme mencionado, o equipamento atualmente não possui sistema de captura para biogás, o que pode acarretar em uma perda energética significativa. Finalmente, a análise abrange as restrições químicas associadas ao bio-óleo em sua aplicação energética. O relato dos estudantes consolida uma abordagem para a resolução do problema apresentado, indicando que a intervenção adotada foi satisfatória e eficaz na resposta a esse desafio.

O nível 3, concernente ao tratamento de dados relacionados ao processo de pirólise. Os segmentos analisados demonstraram como ocorre a fase final do processo de obtenção do bio-óleo, sendo descrito pelos estudantes como um momento de particular entusiasmo, considerado por eles como a concretização bem-sucedida do trabalho desenvolvido. Todos os procedimentos relativos à pirólise, incluindo coleta e quantificação, foram conduzidos pelos próprios estudantes. A Figura 7 apresenta o sistema utilizado sendo conduzido pelos estudantes participantes da pesquisa.

Dos segmentos codificados, emerge a análise do rendimento alcançado por eles. Devido às restrições temporais estabelecidas para a intervenção, apenas um teste de pirólise foi viável. Dessa forma, todas as decisões relativas aos parâmetros e resultados de rendimento foram tomadas de maneira colaborativa pela turma. A Tabela 1 apresenta os rendimentos obtidos e os parâmetros de operação empregados pelos estudantes.

A pirólise empregada, denominada pirólise intermediária ou convencional, naturalmente proporciona menor formação de bio-óleo

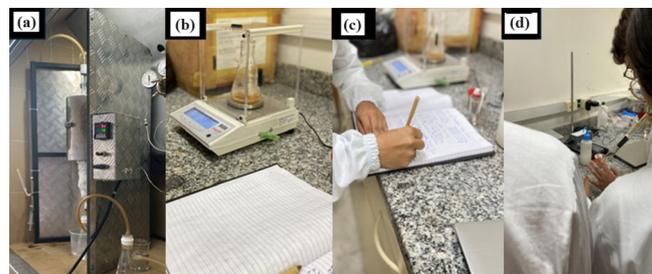


Figura 7. Reação de pirólise realizada por estudantes sob supervisão. (a) Sistema de pirólise utilizado para bio-óleo; (b) pesagem de bio-óleo; (c) estudantes anotando informações do experimento realizado; (d) coleta de biocarvão

Tabela 1. Rendimentos e parâmetros utilizados por estudantes em teste de pirólise

Massa inicial / g	Taxas de aquecimento / (°C min ⁻¹)	Fluxo de gás / (mL min ⁻¹)	Rendimento / %	
			Bio-óleo	Biocarvão
12,704	5 e 20	130	34,23	32,08

em comparação com a pirólise rápida, que poderia atingir em média 75% de produto líquido.⁴² Trabalhos recentes⁴³⁻⁴⁵ apresentam resultados semelhantes aos obtidos neste estudo para diferentes biomassas. Assim, os rendimentos de bio-óleo e biocarvão obtidos a partir da biomassa empregada neste estudo situam-se entre as expectativas e as observações em outras amostras de biomassa. Importa ressaltar que os rendimentos relativos aos produtos líquido e sólido são influenciados pela composição lignocelulósica específica de cada biomassa, conforme previamente abordado neste trabalho.

Finalmente, buscou-se identificar as categorias mais frequentes, atribuindo a elas os conhecimentos adquiridos em maior medida. Os resultados para os dois grupos são observáveis na Figura 8.

Observa-se que as categorias com maior frequência em ambos os grupos são aquelas relacionadas à “obtenção de bio-óleo”. Nesse contexto, é possível inferir que os conhecimentos químicos referentes à pirólise, especialmente no que diz respeito à produção de bio-óleo, foram os mais satisfatoriamente adquiridos. No G1, é evidente a emergência de outras categorias com frequência equiparada à mencionada anteriormente, destacando-se os parâmetros de operação e a atmosfera utilizada. Isso indica uma notável atenção às nuances dos processos experimentais na prática realizada pelo G1. Adicionalmente, ao examinar os materiais analisados, constata-se que o G1 apresenta descrições mais detalhadas em suas respostas, sugerindo uma considerável aquisição ou aprofundamento no uso da linguagem científica. Para fortalecer essas constatações, foi gerada uma nuvem de palavras com os materiais analisados relacionados à prática experimental de pirólise, conforme ilustrado na Figura 9.

A análise da nuvem de palavras revela que a expressão dominante, evidenciada pelo maior tamanho e frequência, é bio-óleo. Essa constatação alinha-se de maneira congruente com os dados apresentados nos gráficos de frequência. Adicionalmente, emergem, em seguida, conceitos cruciais para a interseção entre cinética química e pirólise, tais como parâmetros, limitações, temperatura, taxa, fluxo, entre outros. Destaca-se, ainda, que o termo biomassa se manifesta com maior recorrência na nuvem associada à pirólise do que na relacionada à análise TGA. Essa observação sugere a possibilidade de uma conexão mais acentuada entre a matéria-prima e o processo, conforme indicado pelos resultados da análise lexical.

Soluções ao problema proposto

O problema proposto demandou que a turma chegasse a um

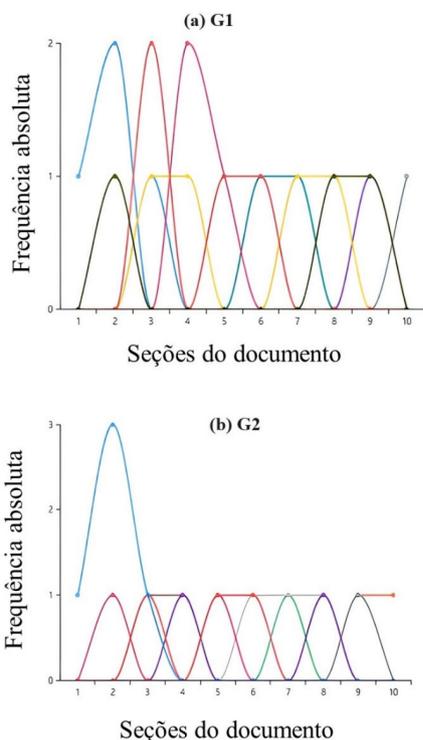


Figura 8. Gráficos de frequências de categorias intermediárias para análise de categorias 4-6: (a) G1 e (b) G2. ● Cinética química; ● rendimentos do bio-óleo; ● obtenção do bio-óleo; ● potencial energético; ● usos industriais ou agrícolas; ● desafios técnicos e tecnológicos; ● composição química; ● contribuições para o Desenvolvimento Sustentável; ● aspectos ambientais; ● processo de pirólise; ● biomassa; ● atmosfera utilizada; ● parâmetros de operação



Figura 9. Nuvem de palavras gerada pelo software MAXQDA® sobre materiais produzidos por estudantes contendo pirólise

consenso em relação à problemática, levando em consideração os diversos experimentos e discussões previamente realizados. Com o intuito de analisar o conteúdo, optou-se por transcrever o áudio correspondente à resposta coletiva, conforme apresentado nos trechos a seguir:

“Então, assim, [...] bio-óleo como um biocombustível, né [...] tem umas limitações, [...], ele é viscoso, tem bastante água e cinzas, o poder calorífico é baixo, e ele é instável e corrosivo, o que complica um pouco. Daí, se quiser usar ele como combustível líquido ou até como matéria-prima pras outras coisas, precisa dar uma melhorada, né.” A3

“[...] a composição dele é meio complexa, é instável pra guardar, tem muito oxigênio.” A7

“[...] temperatura, tempo e [...], olhando a reação, a taxa da temperatura com o tempo.” A4

“Olha [...] a gente tá vendo que, [...], daria sim, porque a biomassa é de resíduo, né? Ajudaria bastante na parte de reciclagem e, [...], não vem de fontes não renováveis [...] e também tem aquilo de não ter oxigênio lá dentro.” A1

Embora não tenha abordado diretamente a cinética química no contexto do problema proposto, a resposta à problemática em questão contempla a influência da temperatura e do tempo na reação, evidenciando uma compreensão da importância desses parâmetros na cinética química. Um destaque significativo na resposta elaborada pelos estudantes diz respeito aos vícios de linguagem observados. A presença desses vícios suscita preocupações, especialmente considerando que se trata de alunos nos estágios finais do curso de Química. Este comportamento potencialmente impacta sua competência profissional futura. É plausível que tais vícios sejam consequência do uso excessivo de mídias sociais, um fenômeno já documentado na literatura.^{46,47} Ademais, as respostas ressaltam aspectos positivos associados ao bio-óleo, como sua origem a partir de biomassa residual, contribuindo para a reciclagem e prescindindo de fontes não renováveis. Essas considerações denotam uma percepção dos benefícios ambientais advindos do uso desse recurso. Por fim, são abordadas as limitações do bio-óleo, principalmente relacionadas à pirólise.

Integração de conhecimentos químicos e responsabilidade socioambiental por meio de cartilha informativa

No momento de sistematização, propôs-se a elaboração de uma cartilha informativa pelos estudantes, abordando o tema do Desenvolvimento Sustentável em conjunção com a utilização de bio-óleo como biocombustível. O referido material foi meticulosamente planejado e desenvolvido pelos estudantes ao longo do período de intervenção. Conforme definido pelos estudantes, a população em geral é o público-alvo da cartilha. Esta pode ser empregada em ambientes escolares e ser disseminada por meio de mídias sociais ou espaços públicos. Apesar de abordar conteúdos químicos específicos, foi elaborada de maneira a promover a integração gradual do conhecimento ao longo dos capítulos. Inicia-se com temas amplos, progredindo para abordagens mais detalhadas, visando facilitar a compreensão, independentemente do nível de instrução do leitor e o Quadro 3 apresenta um resumo da cartilha elaborada.

Quadro 3. Resumo de apresentação da cartilha informativa

<p>Desenvolvimento Sustentável e a produção de bio-óleo</p> <p>A cartilha é uma obra composta por diversos capítulos que abrangem temas cruciais relacionados à sustentabilidade, energia renovável e a aplicação específica do bio-óleo como biocombustível. Esta cartilha busca fornecer uma abordagem abrangente e informada sobre o desenvolvimento sustentável, destacando o papel do bio-óleo como uma alternativa promissora na transição para uma matriz energética mais sustentável e ecologicamente responsável.</p>
--

A confecção e exposição da cartilha resultaram na evidenciação de uma significativa aquisição de conhecimento por parte dos estudantes, capacitando-os a extrapolar tais saberes e integrá-los de maneira aplicada ao contexto do mundo real. A Figura 10 ilustra algumas páginas da mencionada cartilha desenvolvida.

Com o intuito primordial de elaborar um material com potencial para difusão científica, notadamente no âmbito da temática do bio-óleo relacionada à cinética química vinculada ao desenvolvimento



Figura 10. Capa e páginas da cartilha informativa produzida pelos estudantes

sustentável, os alunos organizaram capítulos referentes a diversas temáticas, tais como:

- **Revolução Industrial:** este capítulo proporciona uma contextualização histórica da Revolução Industrial, delineando seu impacto no desenvolvimento tecnológico e as consequências ambientais, especialmente no que tange ao surgimento de combustíveis fósseis;
- **Combustíveis Fósseis:** aqui, são abordadas as características e a relevância dos combustíveis fósseis na matriz energética global, destacando os desafios associados às suas emissões de CO_2 e os impactos adversos no meio ambiente;
- **Emissão de CO_2 :** detalhando os efeitos da emissão de dióxido de carbono (CO_2), este capítulo explora as implicações para as mudanças climáticas e destaca a necessidade premente de transição energética para mitigar tais efeitos;
- **Transição Energética:** focado na busca por fontes de energia mais sustentáveis, este capítulo discute as estratégias e políticas necessárias para a transição energética, promovendo a redução das emissões de gases de efeito estufa;
- **Resíduos Agrícolas e Agroindustriais:** abordando a gestão sustentável de resíduos provenientes da agricultura e da agroindústria, este capítulo explora práticas que visam a maximização do aproveitamento desses resíduos para a produção de bio-óleo;
- **Desenvolvimento Sustentável:** este capítulo trata do conceito de desenvolvimento sustentável, enfatizando a integração equilibrada entre crescimento econômico, responsabilidade ambiental e equidade social;
- **ESG (Ambiental, Social e Governança):** abordando a importância dos critérios ESG, este capítulo destaca a relevância da incorporação de práticas sustentáveis nas esferas ambiental, social e de governança para empresas e organizações;
- **Energia Renovável:** explorando diversas formas de energia renovável, este capítulo destaca a contribuição fundamental dessas fontes na busca por uma matriz energética mais limpa e sustentável;
- **Biomassa:** enfocando a biomassa como uma fonte energética renovável, este capítulo destaca seu potencial na geração de energia, especialmente no contexto da produção de bio-óleo;
- **Bio-óleo e Parâmetros em prol de Melhorias da Qualidade do Bio-óleo:** o último capítulo concentra-se na produção de bio-óleo, explorando os parâmetros cinéticos da biomassa e as inovações visando a melhoria da qualidade desse biocombustível, promovendo avanços significativos na eficiência e sustentabilidade dessa fonte de energia renovável.

Na análise do material gerado na sistematização, adotaram-se as classificações: satisfatório e parcialmente satisfatório, a fim de examinar o conteúdo em quatro categorias distintas, a saber: Cinética Química, Desenvolvimento Sustentável, Pirólise e Parâmetros Cinéticos, bem como o Potencial de Divulgação Científica. Com o propósito de facilitar a mensuração, foram empregados os parâmetros delineados no Quadro 4.

A Figura 11 ilustra o gráfico que condensa a avaliação dos capítulos conforme o nível de satisfação, no qual valores inferiores a 8 denotam parcialmente satisfatórios, enquanto 8 ou superiores

Quadro 4. Categorias e parâmetros de avaliação para a cartilha informativa

Categorias	Parâmetros de avaliação	
	Satisfatório	Parcialmente satisfatório
Cinética química	Apresenta uma compreensão profunda dos princípios da cinética química, incluindo fatores que influenciam a velocidade das reações e aplicações práticas.	Demonstra compreensão básica dos conceitos de cinética química, mas pode ter lacunas na aplicação ou explicação dos princípios.
Desenvolvimento sustentável	Analisa de forma abrangente os princípios do desenvolvimento sustentável, considerando aspectos econômicos, ambientais e sociais, e propõe soluções viáveis.	Aborda os conceitos básicos de desenvolvimento sustentável, mas com falta de profundidade na análise ou nas soluções propostas.
Pirólise e parâmetros cinéticos	Apresenta uma análise detalhada dos processos de pirólise e dos parâmetros cinéticos do bio-óleo, incluindo suas implicações práticas e aplicações.	Aborda os conceitos de pirólise e parâmetros cinéticos, mas com limitações na profundidade da análise ou nas implicações práticas.
Potencial de divulgação científica	Apresenta uma abordagem clara e acessível para divulgar conceitos científicos complexos, utilizando linguagem adequada ao público-alvo e recursos visuais eficazes.	Tenta divulgar conceitos científicos, mas com linguagem confusa ou recursos visuais inadequados para o público-alvo.

indicam capítulos considerados satisfatórios com base nos parâmetros previamente delineados.

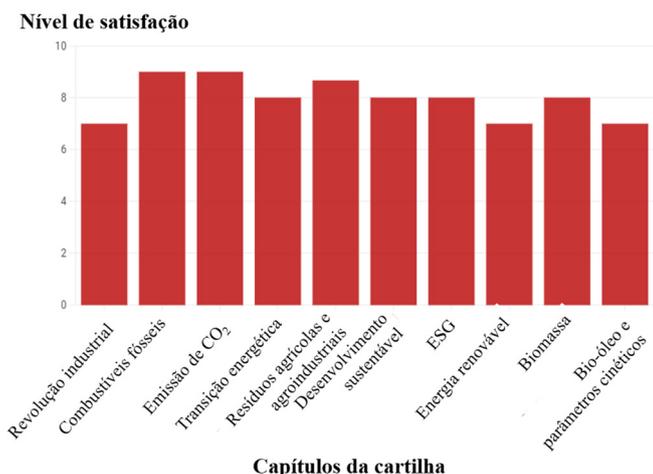


Figura 11. Gráfico com nível de satisfação do capítulo elaborado (legenda: abaixo de 8 - parcialmente satisfatório e 8 ou superior - satisfatório)

Os capítulos considerados parcialmente satisfatórios incluíram “Revolução Industrial”, o que forneceu uma contextualização histórica, porém careceu de profundidade na análise do impacto ambiental; embora os estudantes tenham delineado uma linha do tempo ao longo do capítulo, não exploraram os impactos associados a esse período histórico. “Energia Renovável” abordou as principais fontes de energia renovável e não renovável, destacando os potenciais das energias renováveis, mas não compararam o potencial energético de diferentes fontes. “Bio-óleo e Parâmetros Envolvidos” enfocou na produção, porém não estabeleceram os parâmetros de operação e cinéticos de forma acessível a diversos públicos.

Quanto aos capítulos considerados satisfatórios, “Combustíveis Fósseis” detalhou as características e desafios dos combustíveis fósseis de maneira clara e pertinente. “Emissão de CO₂” explorou os efeitos das emissões com profundidade, destacando a importância da transição energética ao longo do tempo. “Transição Energética” discutiu estratégias para uma transição energética sustentável, apresentando uma linha do tempo das fontes de energia mais utilizadas. “Resíduos Agrícolas e Agroindustriais” abordou a gestão sustentável de resíduos de forma abrangente, diferenciando resíduos agrícolas e agroindustriais, além de quantificar a porcentagem de resíduos gerados em diferentes tipos de biomassa. “Biomassa” destacou o potencial de utilização como matéria-prima para geração de energia, explorando algumas biomassas em diferentes aplicações, e mencionou as biorrefinarias, apresentando a pirólise como processo de conversão energética. “Desenvolvimento Sustentável” clarificou o conceito e apresenta uma linha do tempo de 1945 a 2015, abordando propostas para mudanças globais. Por fim, “ESG” enfatizou a importância dos critérios ESG, introduzindo os 17 objetivos atuais e discutindo metas relacionadas aos ODS 12 e 13.

Apontamentos finais e avaliação das contribuições da intervenção didática

Os ODS abordados neste estudo foram o 4, 12 e 13. A análise realizada sugere que estes foram contemplados e discutidos ao longo da intervenção. Isso se deve à promoção de uma educação de qualidade e inclusiva, englobando temas relacionados ao enfrentamento das mudanças climáticas. Além disso, a intervenção problematizou o uso de biomassa residual e os processos químicos associados, questionando sua viabilidade ambiental.

Durante a aplicação dos questionários, identificaram-se potenciais contribuições advindas da AEP adotada. Destaca-se, segundo os estudantes, a fundamental importância dos métodos teórico-experimentais para aprofundar a assimilação de conhecimentos, aliados à relevância de um tema de impacto sociotecnológico. A Figura 12 ilustra uma nuvem de palavras derivada das respostas ao questionário de *feedback*, evidenciando as percepções dos participantes.



Figura 12. Nuvem de palavras desenvolvida pelo software MAXQDA® em relação ao feedback recebido

Na Figura 12, evidencia-se que as palavras mais frequentes incluem “conceitos”, “oportunidades” e “didática”, juntamente com termos como “curiosidade”, “equipamento”, “proveitoso” e “cinética”. Tal observação não apenas reflete a eficácia positiva da AEP trabalhada, mas também indica a assimilação dos conceitos e temas abordados ao longo da intervenção e ressalta a importância de um processo de ensino-aprendizagem teórico-experimental centrado na autonomia do estudante e na aquisição contextualizada de conhecimentos químicos, com uma abordagem que inclui a discussão de sua relevância socioambiental. Além das narrativas dos discentes, os indicadores (apresentados no Material Suplementar, Quadro 2S) AMC1 (meu conhecimento a respeito do conteúdo químico aumentou gradativamente até o final da aula), AMC2 (a(s) metodologia(s) empregada(s) para o ensino de química contribuí/ram para o meu aprendizado), AMC3 (consegui obter informações químicas que posso aplicar a minha realidade) e AMC4 (precisei de assuntos químicos que já havia estudado para entender os temas ensinados na aula ou no curso) demonstraram consistentemente elevados valores de classificação média ao longo de toda a intervenção (variando entre 4,3 e 6,2). A recorrência elevada dos quatro indicadores mencionados sugere, de maneira abrangente, contribuições substanciais decorrentes da intervenção pedagógica associada à estratégia de ensino AEP implementada.

CONCLUSÕES

A intervenção pedagógica demonstra a importância da AEP sendo trabalhada com um viés teórico-experimental contextualizado, conforme evidenciado pela participação e pelos materiais elaborados pelos estudantes. Estes materiais incluíram o desenvolvimento de uma cartilha informativa sobre o desenvolvimento sustentável em relação à produção de bio-óleo.

A análise de conteúdo destacou a assimilação satisfatória, por parte dos estudantes, do propósito da técnica de TGA, crucial para representação gráfica e interpretação de dados futuros. Além disso, os alunos demonstraram preocupação e criticidade em relação ao impacto ambiental, questionando as situações vivenciadas. Na reação de pirólise, observou-se que os estudantes assimilaram os

conhecimentos químicos associados, estabelecendo conexões com o desenvolvimento sustentável e a cinética química.

O estudo realizado demonstra a aplicação de um processo químico gerador de combustíveis renováveis em um ambiente universitário inserido na temática do Desenvolvimento Sustentável, especialmente nas energias renováveis, devido à possibilidade de gestão correta de resíduos, como o resíduo da cultura de pimentado-reino. A conversão de biomassa em energia por meio da pirólise pode contribuir significativamente para as duas principais rotas de pesquisa energética do Brasil: geração elétrica (cogeração) – com a utilização do biocarvão e do biogás gerados na reação e; produção de combustíveis líquidos – bio-óleo, enfoque do presente trabalho.

Assim, é possível concluir que a utilização da produção de bio-óleo como tema em uma turma de ensino superior em Química motivou os alunos a se envolverem nos estudos, dada sua relevância socioambiental. Além disso, esse enfoque informativo e educativo pode capacitar futuros profissionais químicos para lidarem com situações relacionadas à mitigação das mudanças climáticas.

MATERIAL SUPLEMENTAR

O material suplementar desse trabalho está disponível em <http://quimicanova.s bq.org.br/>, na forma de arquivo PDF, com acesso livre.

REFERÊNCIAS

- Jacob, R. G.; Silva, M. S.; Hartwig, D.; Lenardão, E. J.; *Quim. Nova Esc.* **2022**, *44*, 173. [Crossref]
- Wuillda, A. C. J. S.; Oliveira, C. A.; Vicente, J. S.; Guerra, A. C. O.; Silva, J. F. M.; *Quim. Nova Esc.* **2017**, *39*, 268. [Crossref]
- Oliveira, N. C. R.; Oliveira, F. C. S.; Carvalho, D. B.; *Ciência & Educação (Bauri)* **2021**, *27*, 1. [Crossref]
- Gov.br, <https://www.gov.br/mma/pt-br/acao-a-informacao/informacoes-ambientais/historico-ods>, acessado em Junho 2024.
- Nações Unidas Brasil, <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>, acessado em Junho 2024.
- Moreira Junior, D. P.; Bueno, C.; Silva, C. M.; *RevBEA* **2022**, *17*, 169. [Crossref]
- Silva, E. M.; *RevBEA* **2019**, *14*, 388. [Crossref]
- Cunha, S.; Lustosa, D. M.; Conceição, N. D.; Fascio, M.; Magalhães, V.; *Quim. Nova* **2012**, *35*, 638. [Crossref]
- Almeida, B. C.; Porto, L. J. L. S.; Silva, C. M.; *RevBEA* **2020**, *15*, 229. [Crossref]
- Magalhães, P. P.; Bighetti, R. C.; Legendre, A. O.; Zuiliani, S. R. Q. A.; *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* **2020**, *13*, 281. [Crossref]
- Galembeck, F.; Abreu Filho, P. P.; *Rev. Virtual Quim.* **2017**, *9*, 274. [Crossref]
- Goldemberg, J.; *Rev. Virtual Quim.* **2017**, *9*, 15. [Crossref]
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); *Bioetanol da Cana-de-Açúcar: Energia para o Desenvolvimento Sustentável*, 1ª ed.; Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social: Rio de Janeiro, 2008. [Link] acessado em Junho 2024
- Ministério de Minas e Energia; *Nota Técnica EPE DEA 15/14: Inventário Energético de Resíduos Rurais*; EPE: Rio de Janeiro, 2014. [Link] acessado em Junho 2024
- Cortez, L. A. B.; Baldassin Junior, R.; Almeida, E.; Santos, F. A. Em *Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais*; Santos, F.; Colodette, J.; de Queiroz, J. H., eds.; UFV: Viçosa, 2013.
- Zhang, S.; Yang, X.; Zhang, H.; Chu, C.; Zheng, K.; Ju, M.; Liu, L.; *Molecules* **2019**, *24*, 2250. [Crossref]
- Dalazen, J. R.; Partelli, F. R.; *Campo & Negócios Online* **2022**. [Link] acessado em Junho 2024
- Lucas, D. R.; Bressiani, T. S. C.; Gomes, A. C. C.; Hayashide, I. M.; Simas, N. K.; Lelis, M. F. F.; Kuster, R. M.; Moura, P. R. G.; *J. Chem. Educ.* **2021**, *98*, 1397. [Crossref]
- Khorairi, A. N. S. A.; Sofian-Seng, N.; Othaman, R.; Razali, N. S. M.; Kasim, K. F.; *Sains Malays.* **2022**, *51*, 1061. [Crossref]
- Clements, L. D.; Van Dune, D. L. Em *Biorefineries, Industrial Processes and Products*; Kamm, B.; Gruber, P. R.; Kamm, M., eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2006.
- Yang, Q.; Zhou, H.; Bartocci, P.; Fantozzi, F.; Mašek, O.; Agblevor, F. A.; Wei, Z.; Yang, H.; Chen, H.; Lu, X.; Chen, G.; Zheng, C.; Nielsen, C. P.; McElroy, M. B.; *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 1. [Crossref]
- Lora, E. E. S.; Andrade, R. V.; Ángel, J. D. M.; Leite, M. A. H.; Rocha, M. H.; Sales, C. A. V. B.; Mendoza, M. A. G.; Coral, D. S. O. Em *Biocombustíveis*; Lora, E. E. S.; Andrade, R. V., orgs.; Interciência: Rio de Janeiro, 2012, cap. 6. [Link] acessado em Junho 2024
- Méier, D.; Faix, O.; *Bioresour. Technol.* **1999**, *68*, 71. [Crossref]
- Bridgwater, A. V.; *Biomass Bioenergy* **2012**, *38*, 68. [Crossref]
- Ahamed, T. S.; Anto, S.; Mathimani, T.; Brindhadevi, K.; Pugazhendhi, A.; *Fuel* **2021**, *287*, 119329. [Crossref]
- Wang, Z.; Burra, K. G.; Lei, T.; Gupta, A. K.; *Prog. Energy Combust. Sci.* **2021**, *84*, 100899. [Crossref]
- Speyer, R. F.; *Thermal Analysis of Materials*, 1ª ed.; CRC Press: Boca Raton, 1993.
- Silva, J. C. G.; *Estudo dos Parâmetros Cinéticos da Pirólise do Bagaço de Cana-de-Açúcar*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, Brasil, 2017. [Link] acessado em Junho 2024
- Damm, B. M.; Schaffel, I. F.; Santos, G. F. S.; Azevedo, L. E. S.; Ferreira, R. Q.; Moura, P. R. G.; *J. Chem. Educ.* **2023**, *100*, 4449. [Crossref]
- Santana, I. L.; Nascimento, L. R.; Damm, B. M.; Oliveira, M. L.; Freitas, M. B. J. G.; Moura, P. R. G.; *Quim. Nova Esc.* **2022**, *44*, 229. [Crossref]
- Victor, M. M.; Leite, J. L.; Ramos, G. S.; David, J. M.; Cardoso, K. V.; *Quim. Nova* **2020**, *43*, 1522. [Crossref]
- Silva, A. L. S.; Martins, D. G.; Moura, P. R. G.; Garcia, A. R. S. M.; *Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista* **2021**, *11*, 178. [Crossref]
- Silva, A. L. S.; Moura, P. R. G.; Del Pino, J. C.; *Revista Contexto & Educação* **2022**, *116*, 130. [Crossref]
- Bardin, L.; *Análise de Conteúdo*, 1ª ed.; Edições: Lisboa, 1977.
- MAXQDA® Analytics Pro, versão 24.2.0; Verbi Software GmbH, Berlim, Alemanha, 2024.
- Cavalheira, E. T. G.; Ionashiro, M.; Breviglieri, S. T.; Marino, G.; Chierice, G. O.; *Quim. Nova* **1995**, *18*, 305. [Link] acessado em Junho 2024
- Serrão, A. C. M.; Silva, C. M. S.; Assunção, F. P. C.; Ribeiro, H. J. S.; Santos, M. C.; Almeida, H. S.; Duvoisin Junior, S.; Borges, L. E. P.; Castro, D. A. R.; Machado, N. T.; *Brazilian Journal of Development* **2021**, *7*, 18200. [Crossref]
- Silva, M. F. F.; Silva, N. S.; Silva, J. V. F.; Caraschi, J. C.; Luna, C. M. R.; Campos, C. I.; Viana, R. S.; *Rev. Virtual Quim.* **2022**, *14*, 46. [Crossref]
- Santos, S. L. V.; Tomeleri, J. O. P.; Jesus, F. D.; Cunha, R. S.; Yamaji, F. M.; Pádua, F. A.; *Rev. Virtual Quim.* **2022**, *14*, 87. [Crossref]
- Stremel, D. P.; Cordeiro, L. A.; *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* **2023**, *16*, 1. [Crossref]
- Bondarik, R.; Pilatti, L. A.; Horst, D. J.; *Interciência* **2018**, *43*, 680. [Link] acessado em Junho 2024
- Pérez, J. M. M.; *Testes em uma Planta de Pirólise Rápida de Biomassa em Leito Fluidizado: Critérios para sua Otimização*; Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 2004. [Link] acessado em Junho 2024

43. Cuamba, A. R.: *Produção e Caracterização de Bio-Óleo por Pirólise Catalítica de Biomassa Lignocelulósica num Reactor de Leito Fixo*; Monografia de Graduação, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique, 2022. [Link] acessado em Junho 2024
44. Zubiolo, C.; Pereira, L. L.; Santana, H. E. P.; Freitas, L. S.; Ruzene, D. S.; Silva, D. P. Em *Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal*; Oliveira, R. J., org.; Editora Científica Digital: São Paulo, 2021, cap. 2. [Link] acessado em Junho 2024
45. Spirandeli, A. B. L.: *Análise Físico-Química e Pirólise da Fibra de Coco e da Casca de Cebola*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Minas Gerais, Brasil, 2021. [Link] acessado em Junho 2024
46. de Souza, J. C.; Silva, P. C. D.; Shitsuka, R.; Brito, M. L. A.; Shitsuka, D. M.; *Research, Society and Development* **2019**, 8, 6. [Crossref]
47. Ferreira, A.; *Revista Principia* **2014**, 25, 42. [Crossref]