

Química Verde: Rota Alternativa e Sustentável para a Produção do Compósito Pani-Magnetita

Green Chemistry: Alternative and Sustainable Route to Prepare the Pani-Magnetite Composite

Caroline Zanotto,^a Patrícia T. Marques,^b Eryza G. de Castro^{a,*} 

^aUniversidade Estadual do Centro-Oeste, Departamento de Química, Campus CEDETEG, CEP 85040-080, Guarapuava-PR, Brasil.

^bUniversidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Química, CEP 85503-390, Pato Branco-PR, Brasil.

*E-mail: eryza.castro@gmail.com

Recebido: 12 de Outubro de 2020

Aceito: 17 de Fevereiro de 2021

Publicado online: 14 de Abril de 2021

Cleaner chemical procedures, with low waste generation, less consumption of raw materials and energy, has been a critical challenge towards the development of technologically sophisticated materials or devices, including electrochemical sensors, adsorbents of environmental contaminants or electronic capacitors. This study was devoted to the development of an alternative synthetic route to obtain a composite based on polyaniline (Pani) and magnetite. The synthetic route was also considered from an economical perspective, under the green chemistry principles, to show how environmentally sustainable and economically interesting this new material can be. An analysis of production costs was also carried out. The composite presents spectroscopic, structural, and morphological characteristics of a Pani-Fe₃O₄ composite, well evidenced from X-ray diffractometry and magnetic measurement data. The magnetization value at the non-saturating field $B = 20$ kOe is 1.57 emu g⁻¹ is potentially suitable for applications in electrochemical devices, adsorption of ionic contaminants or capacitors. Constructing the metric tables for the synthesis, according to the Green Star criteria, to classify all the chemical substances, regarding their risks to the environment, human health, and physical risks, led to an IPE star fill index of 60 %, which complies with the safety principles and indicates which aspects are still open to further improve this synthetic route.

Keywords: Sustainability; polyaniline; magnetite; green synthesis.

1. Introdução

A polianilina (Pani) é um polímero que reúne boas propriedades estruturais, químicas e físicas, para fins tecnológicos, por apresentar condutividade elétrica e estabilidade físico-química, nas condições ambientais.¹ São propriedades que podem ser potencializadas, se a Pani formar compósito híbrido com a magnetita (Fe₃O₄), resultando em um acoplamento sinérgico entre as fases orgânica e inorgânica do material. São características que tornam tais compósitos materiais adequados a aplicações, como em capacitores/supercapacitores,^{2,3} baterias de armazenamento,⁴ catálise,⁵ sensores eletroquímicos,⁶ células solares⁷ e adsorção de contaminantes ambientais iônicos.⁸

Diante da vasta aplicabilidade, surge o interesse em se sintetizar materiais compósitos sob um planejamento de sustentabilidade da rota sintética, dos pontos de vista econômico e ambiental, na medida em que, na perspectiva da produção industrial, vigoram o baixo custo de obtenção e o relativamente baixo consumo de energia e de reagentes. O foco principal são os materiais que apresentam notáveis características elétricas e ópticas e evidenciem que, em perspectiva futura, sejam tecnologicamente promissores e ambientalmente sustentáveis, para a exploração comercial.⁹

A menor geração de resíduos e com mais baixo consumo de matérias primas, como água e energia, sustentam a cadeia de produção ambientalmente favorável e com bom retorno econômico.¹⁰

A rota sintética, com a perspectiva das ferramentas da química verde, sustenta a preservação ambiental e serve de base conceitual à prática nos laboratórios, desde escolas da educação básica até universidades e centros de pesquisa, para se chegar, em escala maior, à produção industrial.^{11,12}

O objetivo do trabalho ora em relato foi valer-se de uma síntese verde, conduzida em uma única etapa, mais prática, fácil, rápida e eficaz, buscando a formação do compósito de Pani-Fe₃O₄, com estabilidade química, com acoplamento químico entre os componentes, e de menor custo. Buscou-se identificar quais parâmetros mensuráveis efetivamente seguem os princípios da química verde.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Reagentes analíticos: ácido dodecilbenzenosulfônico (DBSA); mistura de isômeros com pureza $\geq 95\%$, Sigma-Aldrich); cloreto de ferro III anidro P.A (FeCl_3 , Êxodo Científica); cloreto de ferro(II) tetra hidratado ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich); anilina ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ 99 %, Sigma-Aldrich); persulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 98,0 %, Vetec); hidróxido de amônio (Vetec).

2.2. Síntese do composto Pani- Fe_3O_4

A síntese foi realizada em única etapa, com o tempo total de agitação reduzido em 50 %, em relação à metodologia convencional,¹³ que serviu de base a este estudo.

Para o preparo do composto Pani- Fe_3O_4 , foi adaptado o protocolo originalmente descrito por Basavaiah e colaboradores,¹³ conforme esquema mostrado da Figura 1. Obteve-se a Pani, para posterior adição dos cloretos de ferro(II) e formação do composto Pani- Fe_3O_4 , conforme descrição a seguir. A anilina (1 mL) foi adicionada na dispersão de DBSA em água (1 mL DBSA em 100 mL de água) e a temperatura foi ajustada a 0 °C. Em seguida, adicionou-se o agente oxidante persulfato de amônio (1 mL da solução a 1 mol L⁻¹), para obtenção da Pani, de coloração verde, mantendo-se a agitação por 2 h. Uma mistura dos cloretos de ferro (FeCl_2 e FeCl_3 10 mL de cada, nas concentrações 0,5 mol L⁻¹ e 1 mol L⁻¹, respectivamente) foram adicionados lentamente ao sistema, com a temperatura aferida para 65 °C, por 30 minutos. Em seguida, adicionaram-se 5 mL de NH_4OH (25 % v/v), que, ao ser lentamente gotejada no sistema, levou à formação de magnetita diretamente na estrutura das cadeias poliméricas em um material composto.

2.3. Caracterizações estruturais

A estrutura molecular do composto foi analisada dos dados coletados com FTIR (espectroscopia no infravermelho),

em espectrofotômetro Shimadzu Prestige-21, no intervalo de 4000-400 cm⁻¹, com as amostras em pastilhas de KBr, modo de transmissão; a estrutura cristalográfica foi acessada pelos dados de difração de raios X (DRX), método do pó, coletados em equipamento Rigaku Miniflex 600, em tensão de 40 kV e corrente de 15 mA, com taxa de varredura 2° minuto⁻¹, modo 2 θ , no intervalo de 10° a 60° 2q; as medidas magnéticas foram realizadas em magnetômetro VSM (*vibrating sample magnetometer*): utilizaram-se 25 mg de amostra à temperatura ambiente, com variação de campo magnético B variando de -20 kOe a 20 kOe, com sensibilidade de 20 mV. A curva termogravimétrica (TG) foi obtida em equipamento SDT Q-600, no intervalo de temperatura de 30 °C a 500 °C, atmosfera de ar sintético, com fluxo de 100 mL min⁻¹ e taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. A imagem eletrônica por varredura (MEV) foi obtida em um microscópio Hitachi TM3000, com a amostra afixada em fita de carbono.

Para a definição dos parâmetros da métrica da química verde, seguiram-se os doze princípios da construção da estrela verde (EV), que se apresenta como uma métrica de natureza gráfica, mediante critérios pré-definidos, capazes de cobrir toda a situação do estudo, no qual se obtém um grau de verde para o experimento. Dessa estrela, é possível obter a porcentagem de área verde, em relação à área de uma estrela totalmente verde, que se denomina IPE (índice de preenchimento máximo da estrela).^{11,12,14}

Utilizaram-se planilhas prontas para a construção automática e para a ferramenta de análise, que são disponibilizadas pela página da Pedagogia da Química Verde – Educação e Sustentabilidade.¹⁵

Por fim, uma análise dos custos de produção foi apresentado, a fim de estimar as despesas em pequena escala.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterizações espectroscópicas e estruturais

Da Figura 2, do espectro de infravermelho do composto Pani- Fe_3O_4 , é possível destacar as bandas mais intensas na região de 1031 a 1444 cm⁻¹ que indicam modos vibracionais característicos da Pani e das suas interações com o DBSA.¹⁶

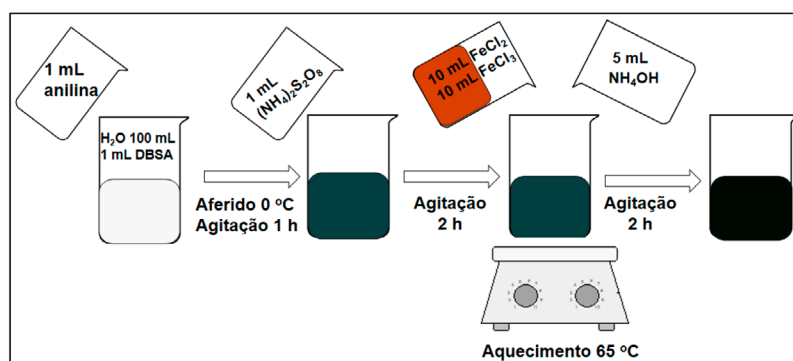


Figura 1. Esquema da rota sintética para a produção do composto Pani- Fe_3O_4 .

Essa interação indica que as cadeias do polímero foram obtidas com melhor organização estrutural, na medida em que o DBSA age como dopante. Na região entre 483 a 683 cm^{-1} , aparecem bandas correspondentes aos modos vibracionais característicos da magnetita,¹⁷ que confirmam a formação do compósito, pela interação da fase inorgânica nas cadeias do polímero. Nas regiões entre 2822 a 3142 cm^{-1} , correspondentes às vibrações N-H da Pani, surgiram em uma banda intensa e larga, com desdobramentos em novos modos vibracionais, que são atribuídos a novas ligações na formação do compósito.¹⁸

O difratograma de raios X (Figura 3) é característico e tem picos de reflexão indexáveis à magnetita, em 21° (111), 36° (311), 40° (400), 55° (511) em 2θ , segundo carta cristalográfica JCPDS # 19-0629. Os picos de reflexão em $22,8^\circ$; $32,0^\circ$; $46,0^\circ$ e $58,0^\circ$ 2θ podem ser atribuídos a outras fases de ferro incrustadas, que se mantêm unidas na estrutura do compósito por interações químicas.¹⁹ O polímero Pani é identificável das reflexões entre 15° a 25° 2θ , com halo englobando essa região, em menor intensidade.¹⁸

Da Figura 4(A), o valor lido da magnetização abaixo da saturação, para um campo aplicado de 20 kOe, foi de 1,57 emu g^{-1} . O campo coercitivo é de 0,032 kOe. Mesmo assim, a curva indica um comportamento de magneto com baixo valor de magnetização de saturação, que se magnetiza/desmagnetiza com facilidade (baixa coercividade) em presença de um campo externo, um comportamento que pode ser devido a defeitos na superfície dessas partículas, vacâncias e/ou ligações rompidas, que provocam alterações nas propriedades magnéticas.^{20,21,24} O baixo valor de magnetização de saturação pode ser um indicativo de que as pequenas partículas de magnetita envolvidas na matriz polimérica estão em pequena quantidade e que a massa do polímero predomina no compósito.

A curva termogravimétrica, Figura 4(B), mostra três eventos de perda de massa. O primeiro até 103°C com 4,82 % em massa, atribuído a perda de água; o segundo evento é iniciado em 103 e vai até 252°C , com 16,12 % em massa, e pode ser atribuído à transições de fase do óxido na estrutura da magnetita, e o terceiro, de 252 até 425°C , com 38,39 %

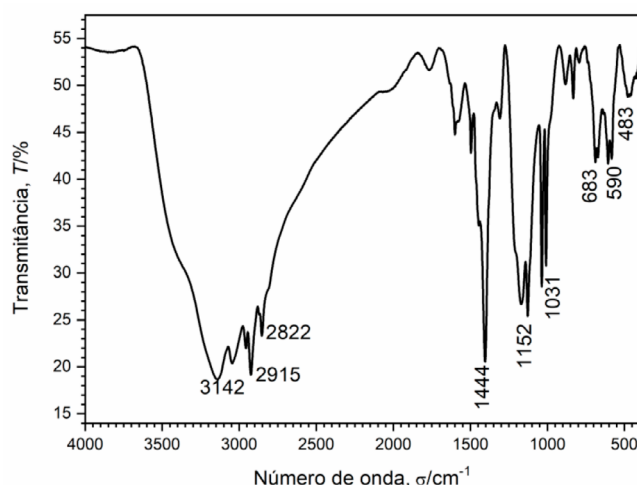


Figura 2. Espectro de infravermelho do compósito Pani- Fe_3O_4

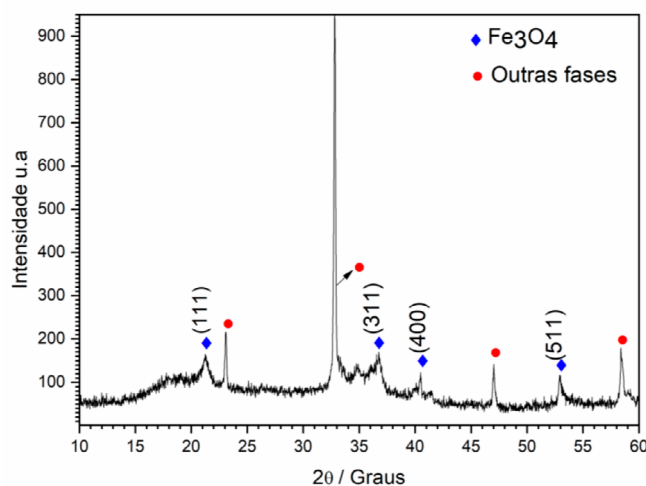


Figura 3. Difratograma de raios X do compósito Pani- Fe_3O_4

em massa, corresponde a degradação do polímero.^{22,13} Ao final, restaram 40,67 % de material sem sofrer degradação, até a temperatura de 500 °C.

Da imagem (Figura 5(A)) por MEV da amostra do compósito Pani-magnetita, houve a formação de uma grande massa polimérica fibrosa envolvendo as partículas de magnetita. A imagem polímero Pani (Figura 5(B)) permite comparar o ambiente da matriz suporte, por incorporação das partículas de magnetita. De inspeção visual, a matriz do polímero tem aparência nitidamente mais homogênea do que a do compósito Pani-magnetita.

As caracterizações físicas e morfológicas aqui apresentadas mostram a obtenção de Pani-magnetita, com um acoplamento estrutural entre as fases orgânica e inorgânica, como, de fato, indica o espectro de FTIR, que apresentou novas bandas, relacionadas ao aparecimento de novos modos vibracionais, no compósito. Os resultados de MEV confirmaram as mudanças morfológicas provocadas pela síntese, ao mostrar imagens distintas, com diferenças em tamanho e forma, entre o polímero e o compósito. Do difratograma, também, a formação de um compósito pela mistura das fases cristalográficas. A medida termogravimétrica evidenciou a estabilidade térmica do compósito, que é fundamental para aplicações tecnológicas em adsorção, biosensores, capacitores e dispositivos eletroquímicos.

A relativamente baixa magnetização a 20 kOe pode limitar a sua utilização em separação magnética, por exemplo. Otimizar o uso em aplicações que requerem respostas mais efetivas a um campo magnético aplicado, requer ainda algum controle da síntese, a fim de incorporar maior proporção de partículas de magnetita na estrutura polimérica.

3.2. Análise da rota sintética na perspectiva da Química Verde

A metodologia para construção da estrela verde, EV segue critérios de fichas de segurança de produtos químicos, (SDS – Safety Data Sheet), fornecidas pelos fabricantes, que contêm informações da classificação dos riscos das substâncias. O Sistema Global Harmonizado de Classificação e Rotulagem de produtos químicos, (GHS – Global Harmonized System - 1272/2008) foi usado.

A Tabela 1 apresenta os critérios utilizados para classificar, quanto aos riscos, os reagentes, os solventes e outras substâncias, que foram subordinadamente usados, bem como os resíduos formados no processo de síntese. Para cada substância atribui-se um valor de p, que vai de 1 a 3, de acordo com os riscos físicos, à saúde humana e ao meio ambiente. Ao maior grau de benignidade atribui-se o valor de p = 1, e para os máximos riscos e perigos o valor de p = 3, seguindo os códigos de GHS.¹²

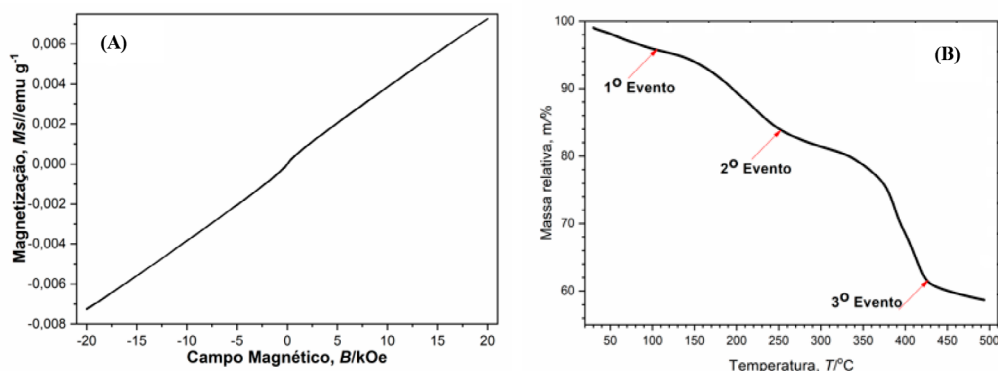


Figura 4. Curvas de (A) magnetização e (B) termogravimétrica com taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹, do compósito Pani-Fe₃O₄

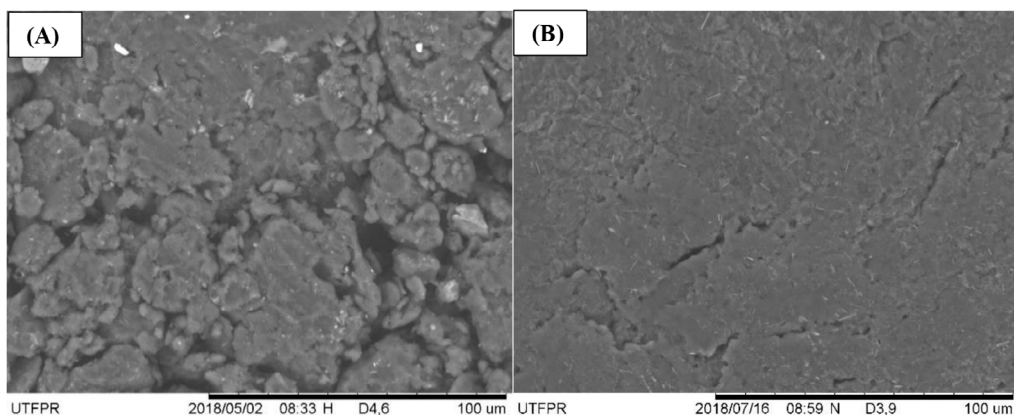


Figura 5. Imagem de MEV (A) do compósito Pani-Fe₃O₄ e (B) do polímero Pani (ampliação 1000 vezes)

Tabela 1. Critérios de classificação de perigos das substâncias envolvidas na síntese, quanto a saúde, ambiente e riscos físicos

Reagentes	Perigos		
	Saúde (p)	Ambiente (p)	Físico (p)
Reagentes estequiométricos			
Anilina	3	3	3
DBSA	3	2	1
Cloreto de ferro II	2	1	1
Cloreto de ferro III	2	1	1
Hidróxido de amônio	3	3	2
Solventes e outras substâncias auxiliares			
Água	1	1	1
Persulfato de amônio	2	2	2
Produto			
Polianilina	1	1	1
Óxidos de ferro	1	1	1
Resíduos			
Água de lavagem	1	1	1
Resíduos de DBSA	2	1	1
Resíduos sólidos	1	1	1

Com as informações descritas na Tabela 1, preencheu-se a Tabela 2, que contempla critérios de prevenção, economia, sínteses menos perigosas, solventes mais seguros, eficácia, uso de matérias primas renováveis, redução de derivações, catalisadores, degradação e prevenção de acidentes visando o cuidado e a atenção aos aspectos de saúde, meio ambiente e riscos físicos. Com os princípios e critérios pontuados, tem-se a estrela verde (EV), obtida para a rota sintética, observada na Figura 6.

Os parâmetros P4 (desenho de produtos seguros) e P11 (análise em tempo real de prevenção de poluição) não se aplicam nesta avaliação.

Com a EV construída, foi possível obter o índice de verde 60 % (IPE), para a síntese dos componentes e a formação do compósito Pani-Fe₃O₄. Este índice é em relação

a uma estrela com máxima área verde preenchida (100 % IPE). Quanto maior a porcentagem de verde obtido, mais satisfatório aos princípios.

O nível máximo de verde é obtido para cada parâmetro, quando se obtém a classificação máxima de 3 na tabela de princípios (Tabela 2). Quando, para um parâmetro, se obtém o nível 1, tem-se uma área nula, com mínimo de verde, pois toda a sua área correspondente ficará em vermelho. Esse critério requererá ser melhorado em uma síntese, para deixá-la mais sustentável.¹²

Após trabalhar na ferramenta da química verde, pode-se observar que a síntese do compósito ram-Fe₃O₄ foi satisfatória para alguns princípios da química verde em seu nível máximo, como em P2, economia atômica; P7, matérias primas renováveis; P8, derivações e P9, catalisadores. Não se

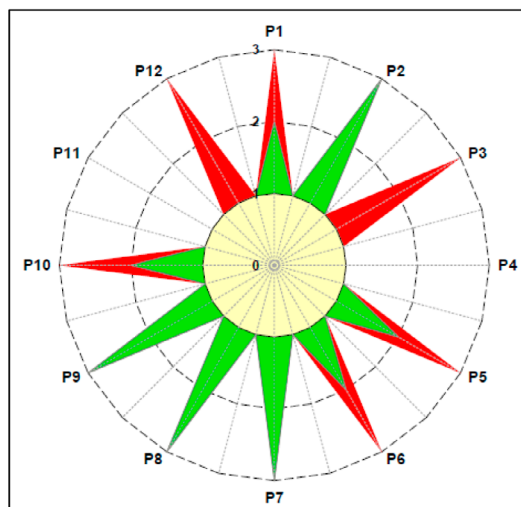
**Figura 6.** Estrela verde (EV) para a rota sintética alternativa de produção do compósito Pani-Fe₃O₄

Tabela 2. Pontuação dos princípios da Química Verde e critérios para a construção da estrela verde (EV)¹¹

Princípios da	Pontuação (p)	Critérios	Pontuação a preencher
Química verde			
	3	Todos os resíduos são inócuos (p = 1; Tabela 1)	2
P1 - Prevenção	2	Formação de pelo menos um resíduo que envolva perigo moderado para a saúde e ambiente (p = 2 (Tabela 1), sem nenhum que envolva p = 3)	
	1	Formação de pelo menos um resíduo que envolva perigo elevado para a saúde e ambiente (p = 3; Tabela 1)	
P2 – Economia atômica	3	Reações sem reagentes em excesso ($\leq 10\%$) e sem formação de coprodutos	3
	2	Reações sem reagentes em excesso ($\leq 10\%$) e com formação de coprodutos	
	2	Reações com reagentes em excesso ($> 10\%$) e sem formação de coprodutos	
	1	Reações com reagentes em excesso ($> 10\%$) e com formação de coprodutos	
	3	Todas substâncias envolvidas são inócuas (p = 1; Tabela 1)	1
P3 – Sínteses menos perigosas	2	As substâncias envolvidas apresentam perigo moderado para a saúde e o ambiente (p = 2; Tabela 1, pelo menos para uma substância, sem substâncias com p = 3)	
	1	Pelo menos uma substância envolvida apresenta perigo elevado para a saúde e ambiente (p = 3; Tabela 1)	
	3	Os solventes e as substâncias auxiliares não existem ou são inócuas (p = 1; Tabela 1)	2
P5 – Solventes e substâncias auxiliares mais seguras	2	Os solventes e substâncias auxiliares usadas envolvem perigo moderado para a saúde e ambiente (p = 2; Tabela 1, pelo menos para uma substância, sem substâncias com p = 3)	
	1	Pelo menos um dos solventes ou uma das substâncias auxiliares usadas envolve perigo elevado para a saúde e ambiente (p = 3; Tabela 1)	
	3	Temperatura e pressão ambiente	2
P6 – Planificação para conseguir eficácia energética	2	Pressão ambiente e temperatura entre 0 °C e 100 °C que implique arrefecimento ou aquecimento	
	1	Pressão diferente da ambiente e/ou temperatura $> 100\text{ °C}$ ou $< 0\text{ °C}$	
	3	Todos reagentes/matérias-primas envolvidos são renováveis	3
P7- Uso de matérias primas renováveis	2	Pelo menos um dos reagentes/matérias-primas envolvidos é renovável, não se considera a água	
	1	Nenhum dos reagentes/matérias-primas envolvidos é renovável, não se considera a água	
	3	Sem derivações ou com uma etapa	3
P8 – Reduzir derivações	2	Usa-se apenas uma derivação ou duas etapas	
	1	Usam-se várias derivações ou mais do que duas etapas	
	3	Não se usam catalisadores ou os catalisadores são inócuos (p = 1; Tabela 1)	3
P9 – Catalisadores	2	Utilizam-se catalisadores com perigo moderado para a saúde e ambiente (p = 2; Tabela 1)	
	1	Utilizam catalisadores com perigo elevado para a saúde e ambiente (p = 3; Tabela 1)	
	3	Todas as substâncias envolvidas são degradáveis com os produtos de degradação inócuos	2
P10- Planificação para a degradação	2	Todas as substâncias envolvidas que não são degradáveis podem ser tratadas para degradação, sendo esses produtos inócuos	
	1	Pelo menos uma das substâncias envolvidas não é degradável nem pode ser tratado para obter a sua degradação com produtos de degradação inócuos	
	3	As substâncias envolvidas apresentam perigo baixo de acidente químico (p = 1; Tabela 1, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos)	1
P12- Química inerentemente mais segura quanto à prevenção de acidentes	2	As substâncias envolvidas apresentam perigo moderado de acidente químico (p = 2; Tabela 1, pelo menos para uma substância, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos, e sem substâncias p = 3)	
	1	As substâncias envolvidas apresentam perigo elevado de acidente químico (p = 3; Tabela 1, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos)	

mostrou satisfatória para os critérios P3, sínteses perigosas e P12, mais segurança na prevenção de acidentes. Estes resultados demonstraram que adotar essa metodologia é eficaz, pois mesmo trabalhando com reagentes com perigo potencial para a saúde e meio ambiente, foi possível realizar uma síntese verde mais sustentável e analisar quais pontos poderão ser aprimorados, como os critérios P1, prevenção; P5, solventes e substâncias auxiliares mais seguras; P6, catalisadores e P10, degradação, em que se obteve um nível intermediário para princípios sustentáveis.

3.3. Análise de estimativa de custos

A análise dos custos estimados para a produção do compósito em pequena escala, incluindo reagentes e processo, como tempo de agitação e aquecimento, é mostrada na Tabela 3. Como parâmetros de comparação, foram analisados os custos de uma rota de síntese muito utilizada na literatura,²³ em que o compósito Pani-Fe₃O₄ é produzido em duas etapas: primeiramente, obtém-se a magnetita pura, para, depois, incorporá-la, em segunda etapa, na síntese do compósito, comparativamente aos custos da rota sintetizada, que é feita em etapa única.

Foi possível comprovar que o compósito obtido tem menor custo de produção, inclusive quando se compara com a metodologia de base deste estudo, pois foi reduzido o tempo total de agitação da síntese em 50 %, - de 10 h para 5 h – obtendo-se um material com características espectroscópicas, cristalográficas estruturais e morfológicas próprios do compósito Pani-Fe₃O₄. Rotas realizadas em

duas etapas apresentaram um custo elevado, com maiores gastos de reagentes e de processamento que acarretam em maior custo total.

Os parâmetros analisados para o custo global foram estimados, levando-se em consideração as potências dos equipamentos e o custo médio da tarifa local de eletricidade, além dos preços médios de reagentes de cada fabricante, podendo sofrer pequenas variações. Uma redução de custos em pequena escala, pode ser muito significativa, na projeção em larga escala, viabilizando-se a produção do compósito, em bases economicamente favoráveis.

4. Considerações Finais

A rota sintética proposta para a produção do compósito Pani-Fe₃O₄ mostrou ser simples e de baixo custo, atributos essenciais para se tornar economicamente viável, na produção em maior escala. O compósito tem propriedades distintas das dos componentes e potencial para aplicações tecnológicas modernas diversas, como em dispositivos eletroquímicos. Dos parâmetros de análise da métrica da química verde, a rota sintética é promissora e com um bom percentual de área verde, revelando-se própria aos princípios ambientalmente sustentáveis. A estrela verde mostrou ser uma métrica analítica eficaz para protocolos de sínteses de novos materiais, para otimizar o processo, reduzir, evitar excessos e desperdícios, sem prejuízo das características estruturais e espectroscópicas do compósito formado.

Tabela 3. Análise de custos de produção

Parâmetros para 100mL	Rota literatura ²³	Rota literatura ¹³ base –	Rota sintetizada
	2 etapas	1 etapa	1 etapa
Reagentes (mL)			
Anilina	1	1	1
DBSA	10	1	1
(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	25	1	1
FeCl ₃	25	10	10
FeCl ₂ .4H ₂ O	25	10	10
NH ₄ OH	50	5	5
Metodologia			
1ª etapa	síntese de Fe ₃ O ₄	Pani-Fe ₃ O ₄	Pani-Fe ₃ O ₄
2ª etapa	síntese Pani-Fe ₃ O ₄		
Tempo de agitação (h)			
1ª etapa	2	10	5
2ª etapa	10		
Tempo de aquecimento (min)	-	30	30
Custos de reagentes (R\$)	41,63	6,54	6,54
Custos processo (R\$)	1,68	1,4	0,7
agitação/aquecimento			
Custo médio Global (R\$)	43,31	7,94	7,24

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento: CAPES, CNPq, FINEP e Fundação Araucária. À Central de Análises da UTFPR e ao Laboratório Multiusuário de Caracterização Magnética da UFSC, Campus Florianópolis.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Referências Bibliográficas

- Wang, H.; Shi, P.; Rui, M.; Zhu, A.; Liu, R.; Zhang, C.; The green synthesis rGO/Fe₃O₄/Pani nanocomposites for enhanced electromagnetic waves absorption. *Progress in Organic Coatings* **2020**, *139*, 105476. [CrossRef]
- Eftekhari, A.; Li, L.; Yang, Y.; Polyaniline supercapacitors. *Journal of Power Sources* **2017**, *347*, 86. [CrossRef]
- Radhakrishnan, S.; Chepuri, R.; Vijayan, M.; Performance of conducting Polyaniline-DBSA and Polyaniline-DBSA/Fe₃O₄ composites as electrode materials for aqueous redox supercapacitors. *Journal of Applied Polymer Science* **2011**, *122*, 510. [CrossRef]
- Ballarin, B.; Boanini, E.; Montalto, L.; Mengucci, P.; Nanni, D.; Parise, C.; Rinaldi, D.; Pani/Au/Fe₃O₄ nanocomposite materials for high performance energy storage. *Electrochimica acta* **2019**, *322*. [CrossRef]
- Misurovic, J.; Mojovic, M.; Marjanovic, B.; Magnetite nanoparticles-catalysed synthesis of conductive polyaniline. *Synthetic Metals* **2019**, *257*, 116. [CrossRef]
- Song, H.; Xue, G.; Zhang, J.; Wang, G.; Sun, S.; Tian, L.; Li, Y.; Simultaneous voltammetric determination of dopamine and uric acid using carbon-encapsulated hollow Fe₃O₄ nanoparticles anchored to an electrode modified with nanosheets of reduced graphene oxide. *Microchimica Acta* **2017**, *184*, 843. [CrossRef]
- Junior, L. O. D.; Ramoni, M. C.; Menezes, L. C. W.; Bagnis, D.; Roman, L. S.; Células solares orgânicas, a energia que vem dos polímeros. *Revista Virtual de Química* **2020**, *12*, 583. [CrossRef]
- Pomarolli, L. C.; Royer, B.; Lima, A. F.; Cerqueira, D. A.; Produção de Nanocompósitos poliméricos magnetizados visando adsorção de íons Chumbo (II) de solução aquosa. *Revista Virtual de Química* **2020**, *12*, 616. [CrossRef]
- Iqbal, S.; Ahmad, S.; Recent development in hybrid conducting polymers: Synthesis, applications and future prospects. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* **2018**, *60*, 53. [CrossRef]
- Ferreira, A. M.; Silva, G. C.; Duarte, H. A.; Materiais funcionais para a proteção ambiental. *Química Nova na Escola* **2014**, *8*, 30. [Link]
- Ribeiro, G. T. C.; Machado, A. A. S. C.; Costa, D. A.; Uma métrica gráfica para avaliação holística da veracidade de relações laboratoriais – estrela verde. *Química Nova* **2010**, *33*, 759. [Link] [CrossRef]
- Ribeiro, G. T. C.; Duarte, R. C. C.; Machado, A. A. S. C.; Avaliação da “microverdures” de sínteses com a estrela verde. *Química Nova* **2014**, *6*, 1085. [Link] [CrossRef]
- Basavaiah, K.; Kumar, P. Y.; A facile one-pot synthesis of polyaniline/magnetite nanocomposites by micelles-assisted methods. *Applied nanoscience* **2013**, *3*, 409. [CrossRef]
- Magela, M. F.; Oliveira, A. K. M.; Silva, V. J.; *Resumos da XVIII ENEQ Encontro Nacional de Ensino de Química*, Florianópolis, Brasil, 2016. [Link]
- Pedagogia da química verde – Educação para sustentabilidade. Disponível em: <http://educa.fc.up.pt/catalogo_pt/home>. Acesso em: 2 julho 2020.
- Kumar, V.; Yokezeki, T.; Goto, T.; Synthesis and characterization of Pani-DBSA/DVB composite using roll-milled PANI-DBSA complex. *Polymer* **2016**, *86*, 129. [CrossRef]
- Zang, Y. J.; Lin, W. Y.; Chang, C. C.; Wu, T. M.; Conducting and magnetic behaviors of polyaniline coated multi-walled carbon nanotube composite containing monodispersed magnetite nanoparticles. *Synthetic Metals* **2011**, *161*, 937. [CrossRef]
- Gu, H.; Huang, Y.; Zhang, X.; Wang, Q.; Zhu, J.; Shao, L.; Young, D. P.; Wei, S.; Guo, Z.; Magnetoresistive polyaniline-magnetite nanocomposites with negative dielectrical properties. *Polymer* **2012**, *53*, 801. [CrossRef]
- Silva, J. R.; Guilherme, L. R.; Braga, M. G.; Pres, M. A. L.; Silva, J.; Preparação de fluido magnético a base de nanopartículas magnéticas. *Ensaio Ciência, biologia, saúde* **2014**, *18*, 19. [CrossRef]
- Diniz, V. C. S.; Dantas, B. B.; Figueiredo, A. R.; Cornejo, D. R.; Costa, A. C. F. M.; Avaliação microestrutural e magnética de Fe₃O₄ sintetizada pelo método de reação de combustão. *Cerâmica* **2015**, *61*, 298. [CrossRef]
- Araujo, A. C. V.; Oliveira, R. J.; Alves, J. S.; Rodrigues, A. R.; Machado, F. L. A.; Cabral, F. A. O.; Azevedo, W. M.; Synthesis, characterization and magnetic properties of polyaniline-magnetite nanocomposites. *Synthetic Metals* **2010**, *160*, 685. [CrossRef]
- Guo, J.; Gu, H.; Wei, H.; Zhang, Q.; Li, Y.; Yonug, D. P.; Magnetite-Polypyrrole metacomposites: Dielectric Properties and magnetoresistance behavior. *The Journal of Physical Chemistry* **2013**, *117*, 1191. [CrossRef]
- Radhakrishnan, S.; Chepuri, R.; Vijayan, M.; Performance of conducting Polyaniline-DBSA and Polyaniline-DBSA/Fe₃O₄ composites as electrode materials for aqueous redox supercapacitors. *Journal of Applied Polymer Science* **2011**, *122*, 1510. [CrossRef]
- Ferreira, R. V.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. [Link]