

ABORDAGENS TEÓRICAS E PRÁTICAS EM PESQUISA

COORDENADORES

Patricia Bieging

Raul Inácio Busarello

ISBN 978-85-7221-557-2

2026

*Ana Paula Ineichen
Claudio Michel Poffo
Silmar José Spinardi Franchi*

SAIS DE TUTTON BASEADOS EM NI(II):

SÍNTSE, CARACTERIZAÇÕES
ESPECTROSCÓPICAS, TÉRMICAS
E MICROESTRUTURAIS¹

RESUMO:

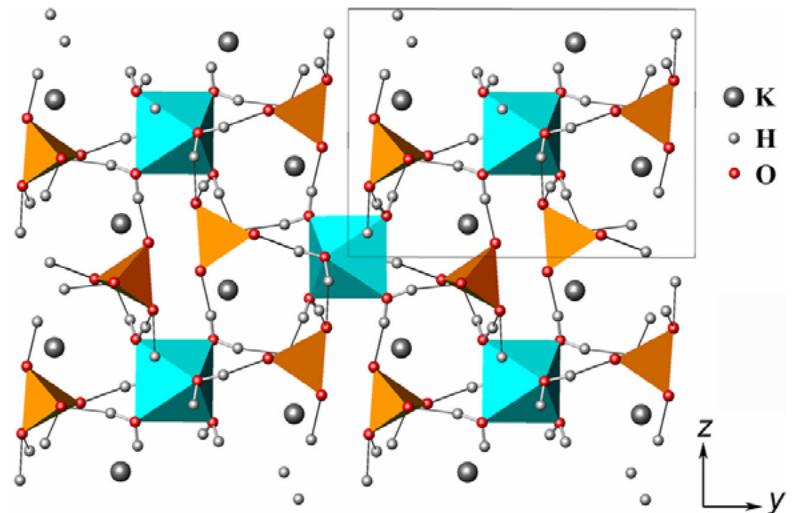
O crescente interesse na família de cristais de Sais de Tutton tem o objetivo de analisar suas propriedades físicas e químicas, e seu potencial de aplicação em componentes tecnológicos, com destaque para sistema termoquímicos para armazenamento de energia. Esses cristais possuem fórmula química geral $M_2M'(XO_{4/2})_2 \cdot 6H_2O$, em que M representa um íon monovalente, M' um íon bivalente e X pode ser S ou Se. Apesar da ampla combinação de compostos possível, os cristais bivalente e X pode ser S ou Se. Apesar da ampla combinação de compostos possível, os cristais dessa família apresentam a mesma estrutura cristalográfica, no sistema monoclínico. No presente trabalho, o sal de Tutton $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ foi sintetizado a partir de $Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ e K_2SO_4 . O método mais empregado para a síntese de cristais da família dos Sais de Tutton é a cristalização em solução aquosa por evaporação isotérmica. O crescimento de cristais por solução, embora lento, é amplamente utilizado na produção de cristais para aplicações tecnológicas, pois o crescimento lento reduz defeitos estruturais. Neste estudo, serão apresentados resultados referentes à sua síntese, espectroscopia no infravermelho e UV-Vis, análise térmica via termogravimetria e calorimetria diferencial de varredura (DSC), além de caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de Raios X.

Palavras-chave: Sais de Tutton; sais de Ni(II); novos materiais; caracterizações microestruturais.

1 INTRODUÇÃO

A família de sais de Tutton foi assim nomeada por Alfred Edwin Howard Tutton, que constatou e caracterizou estes cristais isomórficos no final do século XIX, constituindo uma família de sais hidratados, representados pela fórmula geral $M_2M'(XO_4)_2 \cdot 6H_2O$, em que M é um cátion monovalente como K^+ , NH^{4+} , Tl^+ , Rb^+ ou Cs^+ , M' é um cátion bivalente Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , V^{2+} , etc., e X é um átomo do grupo 16 (BELOGUB, 2015; LOPES, 2021, OLIVEIRA, 2015). Com o passar dos anos esta família têm sido estudada com a finalidade de elucidar suas propriedades físicas e químicas, métodos de crescimento e transições de fases envolvidas; essa família de compostos pode exibir diferentes combinações de composição química (cátions M e M' diferentes, inclusive em composições mistas), mantendo, contudo, a mesma estrutura cristalina, dada a característica microestrutural relevante de todos os sais de Tutton pertencerem ao sistema monoclinico e aos grupos espaciais $P2_{1/a}$ e $P2_{1/c}$, com duas fórmulas químicas na sua célula unitária (PIETRASHKO, 2000; OLIVEIRA NETO, 2022). Na Figura 1, observa-se o arranjo tridimensional do sal de Tutton, no estado sólido.

Figura 1 - Representação da estrutura do Sal de Tutton



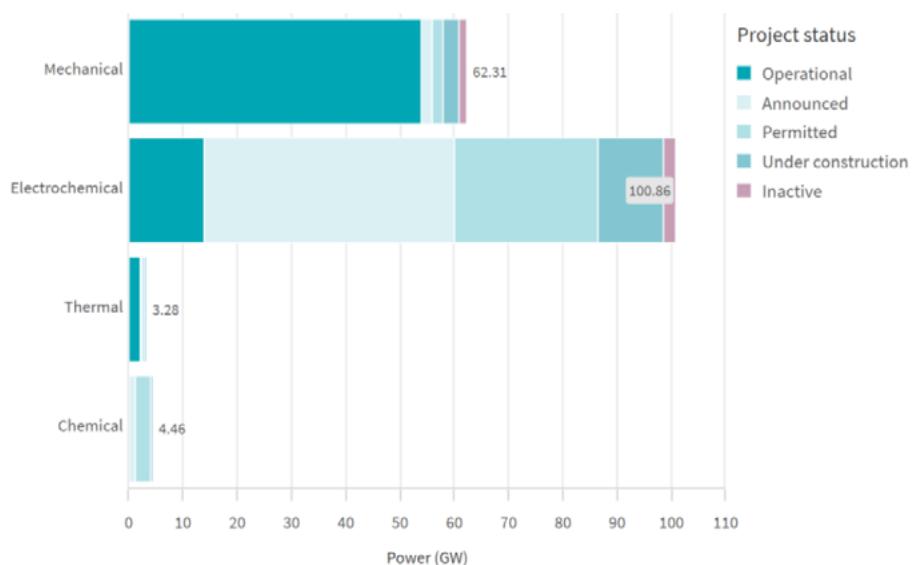
Fonte: adaptado de: BELOGUB, 2015.

De acordo com a Figura 1, o íon metálico bivalente apresenta número de coordenação igual a 6, formando complexos octaédricos do tipo $[\text{M}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$. De acordo com a Teoria do Campo Cristalino, nessa geometria de coordenação, os orbitais d semipreenchidos do íon metálico central se dividem em dois grupos de energia: t_{2g} - menor energia - d_{xy}, d_{yz}, d_{zx} e e_g - maior energia - $d_{x^2-y^2}, d_{z^2}$. A diferença de energia (Δ_{oct}) entre esses conjuntos determina propriedades ópticas, magnéticas e eletrônicas do composto (BRITO, 2023).

O potencial tecnológico associado à utilização de Sais de Tutton relaciona-se às suas aplicações em filtros de luz ultravioleta (UV), tecnologia cego-solar, sistemas de armazenamento de calor termoquímico, eletrodos para pilha de estado sólido, dentre outros.

De acordo com o European Energy Storage Inventory², em particular, sistemas de armazenamento de calor termoquímico (e as tecnologias associadas a esses sistemas) ocupam uma pequena porcentagem do atual status de armazenamento de energia na Europa, com grande potencial de expansão, conforme exposto na figura a seguir (Figura 2):

Figura 2 - Distribuição de energia armazenada, de acordo com as atuais tecnologias de armazenamento e seus *status*, Europa, 2025

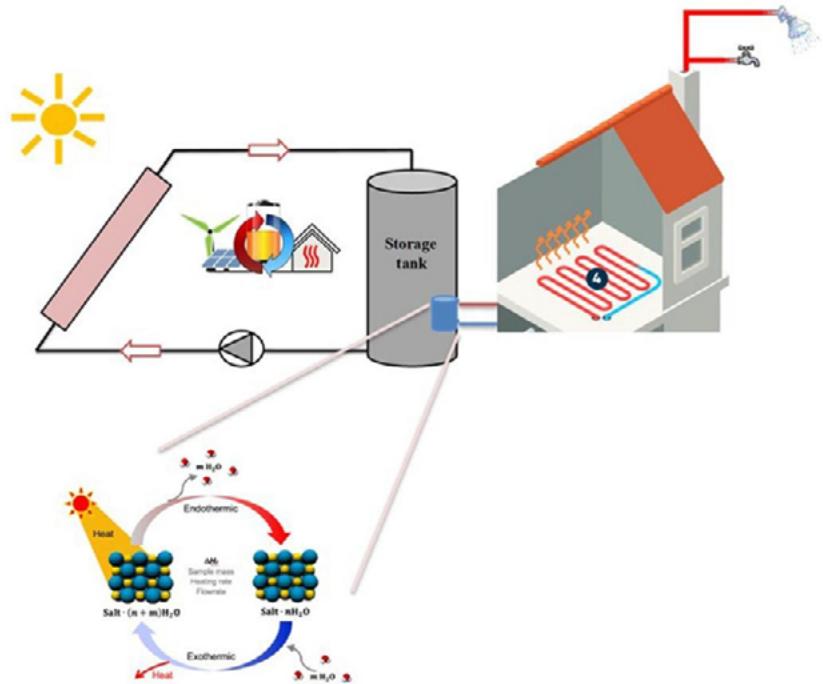


Fonte: adaptado de European Commission, 'European energy storage inventory', European Commission website, p. 18, 2025.

Sais de Tutton podem ser utilizados em sistemas de armazenamento termoquímico de energia (*Thermochemical Energy Storage-TCES*), que vêm ganhando relevância por sua capacidade de armazenar energia proveniente de fontes renováveis por meio de reações reversíveis de hidratação e desidratação.

Uma das implementações dessa tecnologia é o aquecimento de edificações, ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Aquecimento em edifícios por meio de TCES a base de sais hidratados



Fonte: adaptado de MOULAKHNIF et al. 2024.

De modo complementar, diversos estudos têm evidenciado o potencial de sais de Tutton, dentre eles os baseados em amônio, como materiais eficientes para armazenamento termoquímico de energia, tendo em vista sua boa estabilidade estrutural e desempenho térmico (OUSALEH et al., 2020). Além disso, sistemas baseados em sais hidratados apresentam vantagens importantes, como possibilidade de armazenamento a longo prazo com perdas mínimas de energia, alta densidade energética e contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Com isso, pesquisas recentes têm se dedicado não apenas ao estudo das propriedades dos materiais, mas também ao desenvolvimento de soluções de engenharia aplicadas ao projeto de dispositivos TCES, ampliando o potencial dos sais de Tutton como base para tecnologias de armazenamento de energia de alto desempenho.

Além disso, os sais de Tutton também se destacam por aplicações tecnológicas, especialmente como materiais para filtros de radiação ultravioleta (Venkatachalam *et al.*, 2025). Em decorrência da sua estabilidade térmica, seletividade espectral e temperatura de desidratação, cristais como o KNiSH têm sido utilizados com sucesso em sensores e dispositivos de alerta de aproximação de mísseis instalados em aeronaves e helicópteros. Esses materiais atuam permitindo a transmissão controlada de radiação UV, possibilitando a detecção precisa de fontes emissoras e garantindo desempenho confiável mesmo em ambientes operacionais severos (ABDULWAHAB; GAFFAR; EL-FADL, 2023).

Considerando a ampla aplicação da família de Sais de Tutton na área de desenvolvimento e fabricação de novos materiais e dispositivos, facilidade de síntese, arranjo isoestrutural, cristais faces naturais, poucos defeitos estruturais, e baixo custo associado, essa classe de materiais desperta interesse.

O objetivo geral deste trabalho foi sintetizar cristais da família do sal de Tutton de Ni(II), pelo método de evaporação isotérmica de solução aquosa. Em seguida, procedeu-se às caracterizações espectroscópicas, térmicas e microestruturais do composto $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$. Os cristais foram obtidos no Laboratório de Química Inorgânica do Departamento de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Blumenau.

METODOLOGIA

O procedimento sintético do Sal de Tutton foi adaptado de (BOSI *et al.*, 2009). Para o preparo da solução foram utilizados os reagentes abaixo, na razão estequiométrica de 1:1.

Tabela 1 - Reagentes utilizados no preparo da solução

Reagentes	Fórmula	Massa Molar (gmol ⁻¹)	Massa (g)
Sulfato De Níquel II 6H ₂ O P.A. - Synth	NiSO ₄ ·6H ₂ O	262,85	2,63
Sulfato de Potássio Anidro P.A. - Synth	K ₂ SO ₄	174,26	1,74

Fonte: autores, 2025

Cada reagente foi dissolvido em 10,0 mL de água deionizada sob agitação magnética e aquecimento controlado. Em seguida, a solução de NiSO₄·6H₂O foi adicionada lentamente sobre a solução de K₂SO₄, com manutenção do pH da solução abaixo de 4,0 – via adição de H₂SO₄ 0,10 mol.L⁻¹ – para prevenir processos de hidrólise.



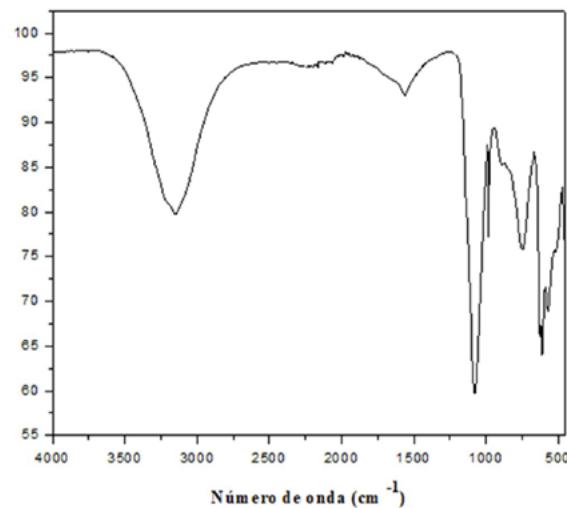
Assim que finalizada a reação, transferiu-se ainda quente para um béquer identificado, deixada solução resultante em resfriamento e em repouso absoluto por uma semana, onde ocorreu o processo de cristalização pela evaporação lenta do solvente. Após filtração e lavagem com água gelada, obteve-se o rendimento 67%, após secagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O espectro de infravermelho obtido para o composto K₂Ni(SO₄)₂·6H₂O conforme Figura 4, apresenta bandas características

associadas tanto às moléculas de água de hidratação quanto ao ânion sulfato, compatíveis com a estrutura dos sais de Tutton (BELOGUB *et al.*, 2014; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2025; MORALES *et al.*, 2018).

Figura 4 - Espectro de FTIR referente ao cristal $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ e suas atribuições



Número de onda (cm^{-1})	Atribuição
3151	$\nu_1(\text{O-H})$
1560	$\delta(\text{H-O-H})$
1079	$\nu_{21}(\text{SO}_4^{2-})$
984	$\nu_3(\text{SO}_4^{2-})$
898	$\rho(\text{H}_2\text{O})$ - <i>rocking</i>
755	$\tau(\text{H}_2\text{O})$ - <i>twisting</i>
611	$\delta(\text{O-S-O})$
566	$\omega(\text{H}_2\text{O})$ - <i>wagging</i>

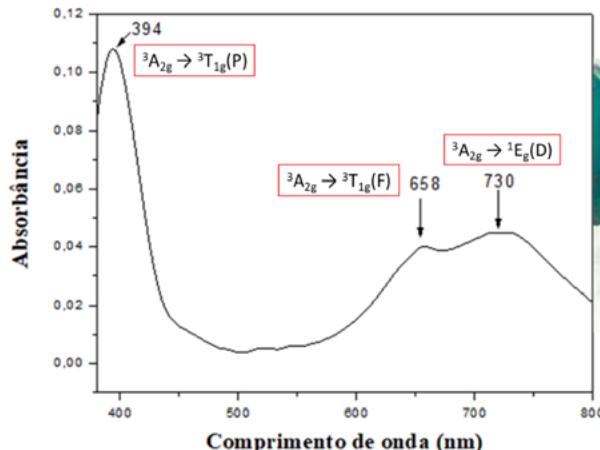
Fonte: autores, 2025.

De forma geral, a coloração em soluções ou sólidos em que existem íons de metais de transição está relacionada à configuração eletrônica do íon metálico central, ao seu número de coordenação, e pela identidade dos ligantes, seus vizinhos imediatos. Nos sais de Tutton contendo Ni^{2+} , como $\text{K}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, a cor observada no cristal está relacionada à configuração eletrônica $3d^8$, e ao formar o complexo octaédrico $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, seus cinco orbitais d, inicialmente degenerados, sofrem separação de energia devido à ação eletrostática dos seis ligantes (seis moléculas de água).

Na simetria octaédrica, os orbitais d se dividem em dois grupos de energia: t_{2g} - menor energia - d_{xy} , d_{xz} , d_{yz} e e_g - maior energia - d_{z^2} , e $d_{x^2-y^2}$. A diferença de energia (Δ_{oct}) entre esses conjuntos é responsável pelas absorções observadas no Espectro UV-Vis (BRITO, 2023). Como a solução de Ni(II) apresenta coloração, as transições eletrônicas entre os novos subníveis energéticos absorvem energia na região do visível do espectro eletromagnético.

As três absorções na região do visível (espectro obtido no intervalo de 380 nm – 800 nm, na região do visível, usando-se concentração de $1,00 \times 10^{-2}$ mol.L⁻¹, caminho óptico de 1,0 cm e cubetas de vidro, solução preparada usando-se água deionizada, a 25°C.) concordam com a literatura (MANOMENOVA, V. L.; RUDNEVA, E. B.; VOLOSHIN A. E., 2016), indicando transições eletrônicas para o íon Ni(II) com número de coordenação 6 – geometria octaédrica – cujos ligantes são moléculas de água, conforme esperado, na Figura 5.

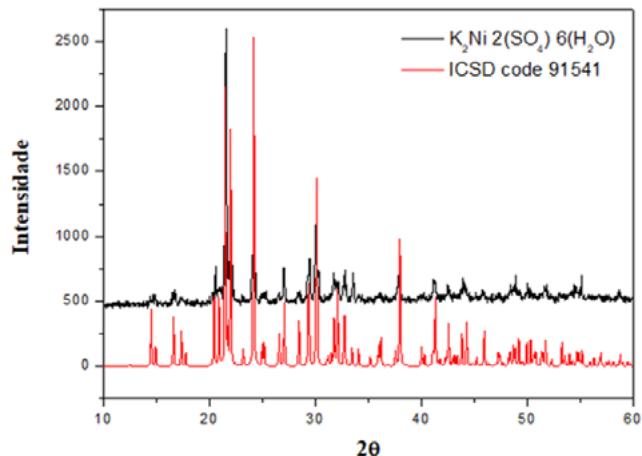
Figura 5 - Espectro de UV-Vis referente à solução de $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, e suas atribuições



Fonte: autores, 2025.

Como apresentado na Figura 5, a absorção em 394 nm corresponde ao comprimento de onda associado à cor violeta; e as absorções em 658 e 730 nm correspondem aos comprimentos de onda associados às cores laranja/vermelho. Logo, a cor transmitida pelos cristais é coerente com a cor verde, obtida pela síntese dos cristais de sais de Tutton de $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$.

A estrutura cristalina do sal de Tutton $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ identificada como monoclinica, pertencente ao grupo espacial $P2_{1/c}$, contendo duas unidades formulares por célula unitária ($Z = 2$). A análise por difração de raios X (DRX) apresentou excelente concordância com os dados-padrão disponível no arquivo ICSD nº 91541 conforme ilustrado na Figura 6. Os parâmetros de rede e volume da célula unitária com base no ICSD também estão dispostos na Figura 6.

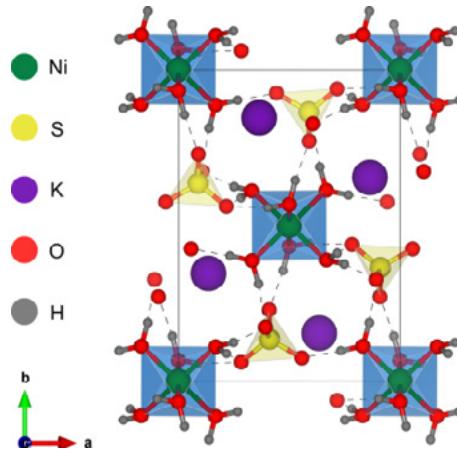
Figura 6 - Difração de raios X dos cristais de $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, e parâmetros de rede.

Parâmetros de rede	a	6,12
	b	12,16
	c	8,98
	$\alpha = \gamma (^{\circ})$	90
	$\beta (^{\circ})$	105,60
	V	645,81
Densidade	$g.cm^{-3}$	2,25
Parâmetros estruturais	Simetria	Monoclínico
	Grupo espacial	P ₂ /c
	Z	2

Fonte: autores, 2025.

A célula unitária representada na Figura 7, ilustra o arranjo em escala atômica marcado pelos Ni^{2+} como centros de coordenação de octaedros coordenados por seis moléculas de H_2O . O complexo $[Ni(H_2O)_6]^{2+}$ interage com ânions tetraédricos de sulfato e átomos de oxigênio coordenados ao potássio $[KO_8]^{15-}$, formando uma rede tridimensional ligada por ligações hidrogênio (JUCÁ *et al.*, 2025).

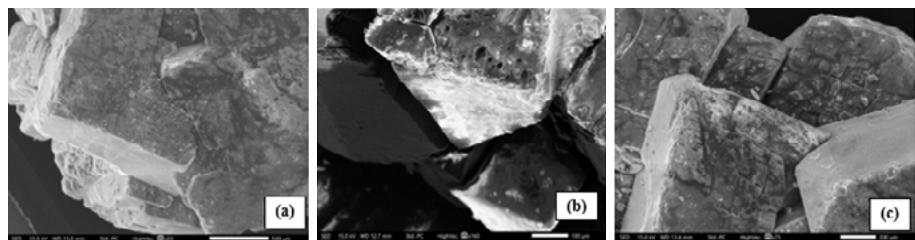
Figura 7 - Célula unitária do cristal.



Fonte: adaptada de OLIVEIRA NETO et al., 2025.

As micrografias de MEV apresentadas na Figura 8 do sal de Tutton $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ revelam cristais com morfologia prismática bem definida. Os cristais apresentam dimensões micrométricas e superfícies lisas, o que indica crescimento ordenado durante o processo de cristalização em solução com evaporação isotérmica.

Figura 8 - Imagens de MEV 50x(a), 160x(b) e 75x(c)



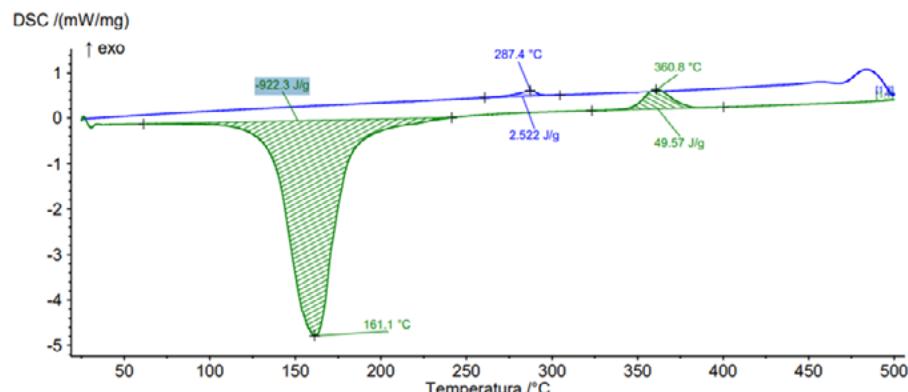
Fonte: Autores, 2025.

A análise DSC foi conduzida para determinar o calor envolvido no processo de desidratação, a partir da entalpia da reação (ΔH). A maior estabilidade térmica observada para o sal de Tutton contendo Ni^{2+} em temperaturas acima de 100 °C está diretamente

relacionada à estabilidade estrutural promovida pelos complexos de coordenação na rede cristalina. O íon Ni^{2+} apresenta menor raio iônico e maior densidade de carga, resulta em maior polarização das ligações Ni–O estabelecidas com as seis moléculas de água coordenadas no complexo $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, maior energia de estabilização do campo cristalino no arranjo octaédrico (VOIGT *et al.*, 1994).

O aumento da temperatura de fusão ao longo da série 3d acompanha o aumento da Energia de Estabilização do Campo Ligante, que atinge valores máximos para Ni^{2+} , resultando em maior estabilidade da rede cristalina (VOIGT *et al.*, 1994; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2023; LOPES; OLIVEIRA NETO; SANTOS; LANG, 2024). A curva de DSC obtida para o cristal de $\text{K}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pode ser vista na Figura 9 que evidencia o pico endotérmico em 161°C e exotérmico em 360°C.

Figura 9 - Curva de DSC com valores de entalpias para $\text{K}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



Fonte: autores, 2025.

A análise DSC do sal $\text{K}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ evidencia dois eventos térmicos. O primeiro pico, centrado em 161,1 °C (434,5 K) com entalpia de -922 J/g, é atribuído ao processo de desidratação, aos quais envolve a ruptura de ligações Ni–O das moléculas de água coordenadas no complexo $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, e consequentemente as ligações hidrogênio no cristal em uma única etapa, como apresentado na Figura 9.

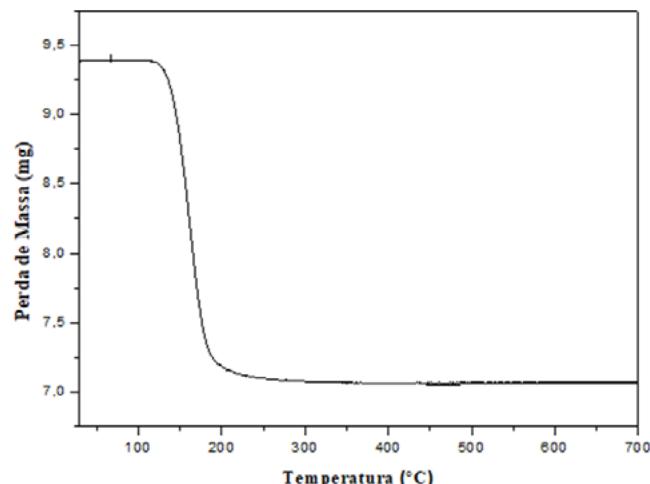
O segundo pico exotérmico, em 360,8 °C (634 K) com $\Delta H = +49,57 \text{ J/g}$, está associado à transições de fases estruturais, uma vez que inexiste perda de massa associada a este evento (ABDULWAHAB A.M. ABDULWAHAB, A. M., GAFFAR, M. A., ABU EL-FADL, A., 2024; MORALES *et al.*, 2018; MORALES *et al.*, 2022) conforme exposto na Figura 9.

A amostra em pó de $\text{K}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ submetida à análise termogravimétrica para avaliar o comportamento térmico deste cristal na faixa de temperatura de 30 a 700°C. O gráfico resultante é mostrado na Figura 10.

Na curva de TGA, a perda de massa na faixa de temperatura de 100 a 250°C corresponde à perda das seis moléculas de água coordenadas ao Ni^{2+} (MARZOUGUI; ATTIA-ESSAIES; HASSEN-CHEHIMI, 2016). Logo, a decomposição térmica no intervalo de temperatura considerada pode ser representada pela seguinte reação:



Figura 10 - Curva de TGA para amostra $\text{K}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



Fonte: Autores, 2025.

Na Figura 11, o eixo Y representa a massa absoluta, iniciando em 9,3813 mg. Após o primeiro evento térmico, a massa final registrada foi de 7,05073 mg, correspondendo a uma perda de 2,33057 mg (ou perda de 24,84%) da massa inicial. A perda de massa obtida 24,84% e a teórica de 24,7% são compatíveis (MORALES *et al.*, 2018; MORALES *et al.*, 2022), no evento associado ao processo de desidratação do sal $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, ocorrendo em uma única etapa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, o sal de Tutton $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ foi sintetizado com sucesso pelo método de solução, com elevada cristalinidade e estabilidade térmica. A caracterização por FTIR confirmou a presença de moléculas de água de hidratação e dos ânions sulfato em geometria tetraédrica, conforme indicado pelas bandas de estiramento O-H e pelos modos vibracionais característicos de SO_4^{2-} . Esses resultados demonstram que a estrutura formada é coerente com a estrutura cristalina de sais de Tutton.

A análise por UV-vis revelou transições d-d características do cátion Ni^{2+} em ambiente octaédrico. As absorções observadas justificam a coloração verde do cristal sintetizado, refletindo a intensidade do campo ligante exercido pelas moléculas de água coordenadas e a influência estrutural do cátion K^+ nas interações moleculares.

A análise térmica indicou que o sal apresenta maior estabilidade estrutural acima de 100°C, atribuída ao menor raio iônico e maior densidade de carga do Ni^{2+} , que intensificam as interações metal-ligante e aumentam a energia de estabilização do campo cristalino. O processo de desidratação ocorre com absorção significativa de energia, compatível com a forte coordenação das moléculas de água na esfera de coordenação do íon metálico.

Os resultados de difração de raios X confirmaram que o material cristaliza no sistema monoclínico, grupo espacial $P2_1/c$, com excelente concordância em relação aos parâmetros de rede descritos na literatura. A célula unitária apresenta uma rede tridimensional formada por octaedros $[Ni(H_2O)_6]^{2+}$ conectados a tetraedros SO_4^{2-} , em que estes átomos de oxigênio estão coordenados ao K^+ , estabilizados por ligações hidrogênio.

Dessa forma, o conjunto das técnicas empregadas permitiu caracterizar de forma abrangente o sal de Tutton Ni-K, demonstrando que o método de solução produz cristais bem definidos, estáveis e com baixa densidade de defeitos, a estrutura obtida é compatível com o modelo cristalográfico da família dos Sais de Tutton. O Ni^{2+} atua como agente estabilizante na rede cristalina, influenciando diretamente as propriedades térmicas, espectroscópicas e ópticas do composto.

O trabalho evidencia, portanto, que o composto $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ apresenta excelente reprodutibilidade sintética, propriedades estruturais coerentes com a literatura e potencial para aplicações futuras em áreas que envolvam estabilidade térmica e óptica.

REFERÊNCIAS

ABDULWAHAB, A.M.; GAFFAR, M.A.; ABU EL-FADL, A. Crystallization and characterization of $K_2Ni_xCo_{1-x}(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ mixed crystals for ultraviolet light filters and sensors. **Solid State Sciences**, [S.L.], v. 143, p. 107261, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107261>.

ABDULWAHAB, A.M.; GAFFAR, M.A.; ABU EL-FADL, A. Change of crystallinity and optical transmittance of $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ single crystal by heat treatment. **Inorganic Chemistry Communications**, Vol. 170, Part 2, December 2024, p.113402. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113402>.

BELOGUB, E. V.; KRIVOVICHEV, S. V.; PEKOV, I. V.; KUZNETSOV, A. M.; YAPASKURT, V. O.; KOTLYAROV, V. A.; CHUKANOV, N. V.; BELAKOVSKIY, D. I.. Nickelpicromerite, $K_2Ni(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$, a new picromerite-group mineral from Slyudorudnik, South Urals, Russia. **Mineralogy And Petrology**, [S.L.], v. 109, n. 2, p. 143-152, 26 nov. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-014-0360-4>.

BOSI, F.; BELARDI, G.; BALLIRANO P. **American Mineralogist**, vol. 94, p. 74-82, 2009. <https://doi.org/10.2138/am.2009.2898>.

BRITO, M. A. de. **Química de coordenação: Série didática para o apoio à formação de professores de química** - Volume 4. Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

EUROPEAN COMMISSION, 'European energy storage inventory' European Commission website, accessed 24 July 2025, <https://ses.jrc.ec.europa.eu/storage-inventory>.

JUCÁ, R. F.; PACHECO, T. S.; OLIVEIRA NETO, J. G. de; SILVA, L. F. L. da; SILVA, J. A. S. da; LIMA, J. A. de; FREIRE, P. de T. C.; GHOSH, S.; PAIVA, E. C.; SOARES, J. M. Low-temperature and pressure-induced conformational change in Tutton salt $K_2Ni(H_2O)_6(SO_4)_2$: structural, vibrational and magnetic properties combined with dft calculations. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [S.L.], v. 343, p. 126486, dez. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2025.126486>.

LEOCÁDIO, R. R. V. **Caracterização de cristais mistos com Ni e Co da família do Sal de Tutton**. 2015. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

LEOCÁDIO, R. R. V.; PERPÉTUO, G. J.; FRANCO, C. J.; BATISTA, A. C. Growth and structural characterization of Tutton salt mixed of Co and Ni. **Rem - International Engineering Journal**, [S.L.], v. 76, n. 1, p. 55-62, mar. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672020760009>.

LOPES, J. B. de O. e outros. e Engenharia do Maranhão. Anais... São Luís (MA) IFMA, 2021. Disponível em: [https://www.even3.com.br/anais/2ndicaic2ndimmsem2020/439520-CRESCIMENTO-E-CARACTERIZACAO-ESTRUTURAL-DE-SAIS-DE-TUTTONS-\(\(NH4\)X\(K1-X\)\)2Ni\(SO4\)2\(H2O\)6-\(X=0, 0,5 e 1\)](https://www.even3.com.br/anais/2ndicaic2ndimmsem2020/439520-CRESCIMENTO-E-CARACTERIZACAO-ESTRUTURAL-DE-SAIS-DE-TUTTONS-((NH4)X(K1-X))2Ni(SO4)2(H2O)6-(X=0, 0,5 e 1).). Acesso em: 09/11/2025.

LOPES, J. B. de O.; OLIVEIRA NETO, J. G.; SANTOS, A. O. dos; LANG, R. Evaluation of mixed Tutton salts $(\text{NH}_4\text{K})\text{M}^{\text{II}}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_6$, ($\text{M}^{\text{II}} = \text{Co or Ni}$) and their corresponding Langbeinite phases as thermochemical heat storage materials: dehydration/hydration behavior and reversibility of structural phase transformation. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 98, p. 113114, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2024.113114>.

MANOMENOVA, V. L. RUDNEVA, E. B., VOLOSHIN, A. E. **Russian Chemical Reviews**, n. 85, v. 6, p.585-609, 2016. <https://doi.org/10.1070/rctr4530>.

MARZOUQUI, H.; ATTIA-ESSAIES, S.; HASSEN-CHEHIMI, D. Ben. Synthesis, thermal, XRD and spectroscopic studies characterization of Tutton salt $\text{K}_2\text{M}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M} = \text{Mg, Ni}$). **Journal Of Molecular Structure**, [S.L.], v. 1120, p. 234-238, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.05.040>.

MOULAKHNIF, K.; *et al.* Renewable approaches to building heat: exploring cutting-edge innovations in thermochemical energy storage for building heating. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 318, p. 114421, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114421>.

MORALES, A. C.; COOPER, N. D.; REISNER, B. A.; DEVORE, T. C. Variable temperature PXRD investigation of the phase changes during the dehydration of potassium Tutton salts. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry**, [S.L.], v. 132, n. 3, p. 1523-1534, 14 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-018-7107-0>.

MORALES, A.; COOPER, N.; REISNER, B.A.; DEVORE, T. C.. Enthalpies of formation and standard entropies for some potassium Tutton salts. **Chemical Thermodynamics And Thermal Analysis**, [S.L.], v. 8, p. 100085, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ctta.2022.100085>.

OLIVEIRA, M. **CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MORFOLÓGICA DE CRISTais PUROS E MISTOS DE SULFATO DE AMÔNIO HEXAHIDRATADO COM Ni E Co DA FAMÍLIA DOS SAIS DE TUTTON OBTIDOS PELO MÉTODO DE EVAPORAÇÃO ISOTÉRMICA**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Departamento de Física, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

OLIVEIRA NETO, J. G. de. **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SAIS DUPLOS SULFATADOS PARA USO EM DISPOSITIVOS ÓPTICOS E TERMOQUÍMICOS**. 2022. 228 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Maranhão, Imperatriz, 2022.

OLIVEIRA NETO, J. G. de; CARVALHO, J. de O.; MARQUES, J. V.; SOUZA, G. D. dos S.; SILVA, L. F.L. da; SOUSA, F. F. de; FAÇANHA FILHO, P. F.; SANTOS, A. O. dos; LANG, R.. Tutton $K_2Zn(SO_4)_2(H_2O)_6$ salt: structural-vibrational properties as a function of temperature and ab initio calculations. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [S.L.], v. 306, p. 123611, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2023.123611>.

OLIVEIRA NETO, J. G. de; SANTOS, F. M. dos; SANTOS, A. O. dos; LOPES, J. B. de O.; CARVALHO, J. O.; JUCÁ, R. F.; LANG, R.. Effects of $DyCl_3$ and $Sm_2(SO_4)_3$ doping on the optical properties of the $K_2Ni(SO_4)_2(H_2O)_6$ Tutton crystal. **Journal Of Molecular Structure**, [S.L.], v. 1348, p. 143530, dez. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143530>.

OLIVEIRA NETO, J. G. de; VIANA, J. R.; LIMA, A. D. da S. G.; LOPES, J. B. O.; AYALA, A. P.; LAGE, M. R.; STOYANOV, S. R.; SANTOS, A. O. dos; LANG, R.. Assessing the Novel Mixed Tutton Salts $K_2Mn_{0.03}Ni_{0.97}(SO_4)_2(H_2O)_6$ and $K_2Mn_{0.18}Cu_{0.82}(SO_4)_2(H_2O)_6$ for Thermochemical Heat Storage Applications: an experimental - theoretical study. **Molecules**, [S.L.], v. 28, n. 24, p. 8058, 13 dez. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules28248058>.

VENKATACHALAM, N.; RHODA, J. C.; NAGARAJA, K. S. et al. Análises estruturais, espectrais e térmicas e efeito da radiação do cristal de sal de Tutton não estequiométrico: $[(NH_4)_2Co_{0.65}Zn_{0.31}](SO_4)_2 \cdot 6H_2O$. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 36, 266 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10854-025-14342-9>.

VOIGT, W., GÖRING, S. Melting of Tutton's salts studied by DSC. **Thermochimica Acta**, abril 1994. p. 13-26. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(94\)85179-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(94)85179-4)

Ana Paula Ineichen

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação, Coordenadoria Especial de Engenharia de Materiais. GESMat – Grupo de Estudos e Síntese de Materiais. 89065-200, Blumenau – SC. Graduanda do Curso de Engenharia de Materiais.

E-mail: ineichenanapaula@gmail.com

Prof. Dr. Claudio Michel Poffo

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação, Coordenadoria Especial de Engenharia de Materiais. GESMat – Grupo de Estudos e Síntese de Materiais. 89065-200, Blumenau – SC. Professor associado.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6270-3121>

E-mail: claudio.poffo@ufsc.br

Prof. Dr. Silmar José Spinardi Franchi

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação, Departamento de Ciências Exatas e Educação. GESMat – Grupo de Estudos e Síntese de Materiais. 89065-200, Blumenau – SC. Professor associado.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0376-0366>

E-mail: silmar.franchi@ufsc.br