



ARTIGO DE PESQUISAS

Perspectivas em iluminação de estado sólido: o papel da codopagem no desenvolvimento de compostos YAG para LEDs brancos

Perspectives on solid-state lighting: the role of doping in the development of YAG compounds for white LEDs

Santos Silveira, W^{1,*}; Sousa Silva, A. Jr² e Soares Santos, R. D²

¹Laboratório de Instrumentação em Física, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, 44036-900 - Feira de Santana - Bahia - Brasil, *E-mail: wssilveira@uefs.br

²Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 49100-000, Brasil.

Resumo: As propriedades estruturais e luminescentes de compostos do tipo granada (garnet), em especial a granada de ítrio e alumínio (YAG – Y₃Al₅O₁₂), foram investigadas na forma pura, dopada e co-dopadas com íons terras raras, Eu³⁺ e Tb³⁺. O estudo teve como foco o potencial desses materiais para aplicações em diodos emissores de luz branca (WLEDs – White Light Emitting Diodes), visando aprimorar a eficiência e a qualidade da iluminação de estado sólido. A síntese dos materiais foi realizada através do método sol-gel modificado, que emprega glicose como agente polimerizante, resultando em pós eficientes. A caracterização estrutural por difratometria de raios X (DRX) e refinamento Rietveld confirmou a formação da fase desejada e permitiu a determinação precisa dos parâmetros de rede e do tamanho médio do cristalito, os quais variaram em função das concentrações de dopantes. A espectroscopia de absorção de raios X (XAS) e luminescência óptica excitada por raios X (XEOL) confirmou que o Eu³⁺ se manteve no estado de oxidação trivalente, sem indícios de redução para Eu²⁺, atestando a estabilidade da matriz, mesmo sob excitação com radiação ionizante. As medidas de fotoluminescência (PL) revelaram as transições típicas dos íons terras raras presentes e demonstraram que as intensidades de emissão são influenciadas pelas concentrações dos dopantes Eu, Tb. Os espectros de emissão obtidos possibilitaram a determinação dos diagramas de cromaticidade, essenciais para a calibração de cor em dispositivos de iluminação. Além disso, os espectros indicaram uma forte dependência com a concentração dos íons, fornecendo informações valiosas sobre a simetria local em torno dos íons Eu³⁺, fundamentais para otimizar o desempenho destes materiais. Os resultados comprovam o sucesso da síntese e a adequação destes materiais para aplicações em WLEDs.

Palavras-Chaves: Y₃Al₅O₁₂; terra rara; sol-gel; luminescência; Wled.

Abstract: The structural and luminescent properties of garnet-type compounds—specifically yttrium aluminum garnet (YAG – Y₃Al₅O₁₂), were investigated in their pure, doped, and co-doped forms using the rare-earth ions Eu³⁺ and Tb³⁺. The study focused on the potential of these materials for white light-emitting diode (WLED) applications, aiming to enhance the efficiency and quality of solid-state lighting. Material synthesis was carried out via a modified sol-gel method employing glucose as a polymerizing agent, resulting in efficient powders. Structural characterization using X-ray diffraction (XRD) and Rietveld refinement confirmed the formation of the desired phase and allowed for the precise determination of lattice parameters and average crystallite size, which varied according to dopant concentrations. X-ray absorption spectroscopy (XAS) and X-ray excited optical luminescence (XEOL) confirmed that Eu³⁺ remained in the trivalent oxidation state, with no signs of reduction to Eu²⁺, thereby demonstrating the stability of the host matrix even under ionizing radiation excitation. Photoluminescence (PL) measurements revealed the characteristic transitions of the rare-earth ions present and demonstrated that emission intensities are influenced by Eu and Tb dopant concentrations. The obtained emission spectra enabled the determination of chromaticity diagrams, which are essential for color calibration in lighting devices. Furthermore, the spectra indicated a strong dependence on ion concentration, providing valuable insights into the local symmetry surrounding Eu³⁺ ions—information crucial for optimizing the performance of these materials. The results confirm the success of the synthesis and the suitability of these materials for WLED applications.

Keywords: Y₃Al₅O₁₂; rare earth; sol-gel; luminescence; WLED.

1. Introdução

O avanço da iluminação de estado sólido (*solid-state lighting* - SSL) é um dos campos mais dinâmicos da física aplicada e da engenharia de materiais no século XXI, pois a iluminação é essencial na vida moderna e corresponde a cerca de 20% do consumo global de eletricidade (Chen & Huang, 2026). Reduzir o consumo de energia com iluminação é essencial e, essa busca por novas fontes de luz mais eficientes, duráveis e ambientalmente sustentáveis, posicionou os diodos emissores de luz branca (WLEDs) como uma alternativa promissora para as novas iluminações de estado sólido do futuro, por combinarem alta

Citação: Soares Santos, R. D et. al., Perspectivas em iluminação de estado sólido: o papel da codopagem no desenvolvimento de compostos YAG para LEDs brancos. (2026). *Cad. Fís. UEFS*, 24(01):1401.1-13.

Recebido: 14/03/2026

Aceito: 15/04/2026

Publicado: 22/05/2026



Copyright: © 2026 pelos os autores. Submetido para possível publicação em acesso aberto sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

eficiência luminosa, longa vida útil, boa qualidade e fidelidade de cor, baixo gasto energético e menor impacto ambiental em relação às lâmpadas incandescentes e fluorescentes tradicionais (Silveira & dos S. Rezende, 2021).

Os WLEDs têm sido amplamente aplicados em quase todos os sistemas de iluminações gerais ao longo dos anos, interno e externamente, como em casas e automóveis, telas de aparelhos, decorações arquitetônicas, sinalização de tráfego e ferroviária, imagens médicas, entre outros (He et al., 2016; Nandanwar et al., 2025a, 2025b). Frequentemente há três formas comuns de gerar luz branca em dispositivos luminosos, como mostrado na figura 1:

- utilizando um chip de LED azul combinado com fósforo amarelo (YAG:Ce³⁺), no qual a mistura da luz azul remanescente com a amarela gera luz branca. Essa técnica é eficiente e de baixo custo, mas resulta em luz fria (CCT > 6000 K) e baixo índice de reprodução de cor (CRI < 75) devido à ausência de componentes vermelhos no espectro (Huang et al., 2021; Wang et al., 2019).
- combinando um chip azul com fósforos verde e vermelho, cuja emissão misturada à luz azul residual produz luz branca mais equilibrada, com melhor qualidade de cor (CRI alto) e faixa ajustável de temperatura de cor (3000–5000 K), ideal para iluminação interna (Wang et al., 2019).
- empregando um chip de LED de ultravioleta ou próximo (UV) que excita fósforos tricolores (azul, verde e vermelho), resultando em luz branca de excelente qualidade e amplo espectro de cores. Por esse motivo, as pesquisas atuais se concentram em fósforos do tipo granada excitados por LEDs azuis para aplicações em pc-WLEDs.

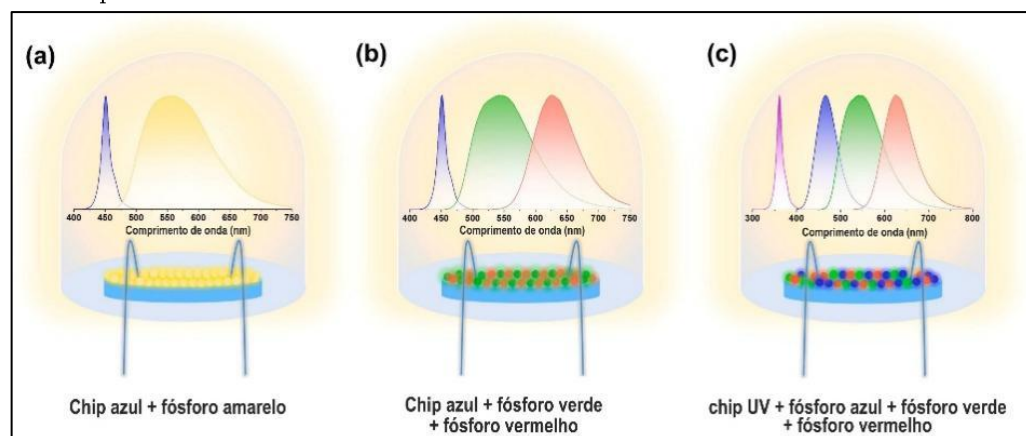


Figura 1: formas de produzir WLEDs. Adaptada: (Chen & Huang, 2026)

O YAG¹(Y₃Al₅O₁₂) é um material com propriedades intrínsecas notáveis, como alta estabilidade térmica, mecânica e química, que o tornam atrativo para diversas aplicações, principalmente como lasers de estado sólido (Lupei & Lupei, 2016). Quando dopado com íons terras raras forma fósforos amplamente utilizado em WLEDs devido à sua excelente absorção de luz azul e alta eficiência quântica. Este composto quando dopado com Ce³⁺, por exemplo, emite predominantemente luz amarela e, ao ser combinado com chips emissores de luz azul de InGaN/GaN, produz luz branca (He et al., 2016). No entanto, uma desvantagem significativa deste sistema é o baixo índice de renderização de cor (CRI), resultante da ausência de uma componente de emissão vermelha no seu espectro, como já foi apontado anteriormente (Huang et al., 2021; Wang et al., 2019).

¹Uma abreviação do inglês, Yttrium Aluminum Garnet, composto de ítrio e alumínio da A₃B₂C₃O₁₂, estrutura cristalina ccc (cúbica de corpo centrado).

Uma alternativa ao uso do YAG:Ce³⁺, que apresenta deficiência na emissão vermelha, é o desenvolvimento de fósforos capazes de emitir nas três regiões principais do espectro visível: azul, verde e vermelho. Estudos mostram que o YAG:Tb³⁺ pode emitir luz do violeta/azul ao verde, conforme a concentração do dopante, sendo promissor para dispositivos de exibição com alto contraste (Silveira et al., 2020). Por outro lado, o YAG:Eu³⁺ exibe emissão vermelha intensa entre 590 e 720 nm, o que o torna adequado para diversos dispositivos ópticos e aplicações em iluminação, complementando assim a limitação espectral do YAG:Ce³⁺ (Silveira et al., 2019).

Tradicionalmente, a síntese convencional de fósforos YAG é feita por reação em estado sólido, mas apresenta limitações significativas, como a necessidade de temperaturas excessivamente altas (>1600 °C) e etapas de moagem que podem comprometer a pureza do produto final com a introdução de impurezas, como YAM e YAP (Ikeshue, Furusato, & Kamata, 1995). Em contrapartida, rotas químicas alternativas como coprecipitação, hidrotérmico e Pechini surgem para contornar esses obstáculos (Tucureanu, Matei, & Avram, 2015). Dentre várias alternativas, o método sol-gel modificado² se mostrou mais vantajoso para a síntese, posicionando-se como uma opção de baixo custo que produz materiais com alta cristalinidade e ausência de fases secundárias indesejadas. Reconhecido na química e na física de materiais, esse método destaca-se como uma alternativa favorável no que diz respeito a eficiência, por demandar tempos de processamento e temperaturas de calcinação consideravelmente mais baixos do que os métodos tradicionais e outras rotas químicas. Sua principal vantagem reside no controle estequiométrico e morfológico superior, além de uma distribuição uniforme dos íons, o que favorece a homogeneidade e a obtenção de partículas nanométricas (Silva et al., 2025; Silveira et al., 2019).

O presente estudo, fruto de uma pesquisa de doutorado, concentra-se na otimização de materiais baseados em YAG através da codopagem com os íons Eu³⁺ (responsável pela emissão vermelha) e Tb³⁺ (responsável pela emissão do ultravioleta ao verde) (Silveira, 2022). O principal objetivo desta investigação foi entender como a síntese controlada e a incorporação desses íons lantanídeos na estrutura cristalina YAG influenciam as propriedades estruturais e, principalmente, as propriedades luminescentes do material, com ênfase na otimização de tais propriedades para sua aplicação na produção de WLEDs eficientes, com tonalidades e características cromáticas ajustáveis. Logo, a consecução de emissão branca através do balanceamento de dopantes representou o ápice desse estudo, oferecendo perspectivas promissoras para o avanço em dispositivos de iluminação geral com parâmetros cromáticos customizáveis.

2. Metodologia: síntese e caracterização

2.1. Síntese controlada pelo método sol-gel modificado (SGM)

Para a preparação de todas amostras puras e dopadas (YAG: Eu, Tb) foi empregado o método químico sol-gel modificado. A chave para o sucesso desta rota química foi a utilização da glicose anidra, que desempenhou o papel essencial como agente polimerizante na formação dos compostos. Seus grupos hidroxila promovem a complexação e polimerização dos íons metálicos, contribuindo para uma dispersão homogênea durante as etapas iniciais do processo. A formação de uma rede polimérica estável a partir da glicose garantiu a distribuição homogênea dos íons Y, Al e dos dopantes (Eu, Tb) no nível atômico antes da calcinação. Além disso, a glicose influencia o pH da solução e auxilia na cristalização do composto à medida que o solvente evapora. Estudos indicam que menores quantidades de glicose exigem temperaturas mais elevadas para obtenção da fase única do YAG, reforçando sua importância na estabilidade e eficiência da síntese.

² O nome "sol-gel modificado" é usado porque o método tradicional foi alterado pela substituição do agente polimerizante convencional (o álcool polivinílico - PVA) por outro agente, neste caso, a glicose anidra.

A figura 2 mostra, de forma esquemática, as etapas de produção. Inicialmente as soluções precursoras foram preparadas utilizando nitrato de ítrio hexahidratado, nitrato de alumínio nonahidratado, nitrato de európio pentahidratado, nitrato de térbio hexahidratado e a glicose anidra. A rota química se dividiu em três etapas principais:

- **Etapa 1:** a realização dos cálculos estequiométricos para determinar as massas dos reagentes, baseados nas massas molares e na formação do composto $Y_3Al_5O_{12}$. As quantidades calculadas de cada reagente foram adicionadas, simultaneamente, em 20 ml de água destilada para formar a solução precursora. As quantidades³ de glicose e de água foram mantidas fixas para todas as amostras, tomando como referência a produção de 1g de YAG, isto é, uma razão molar de glicose igual a 1:2 (YAG/glicose). A estequiometria seguiu a seguinte regra com x e y varia entre 0,00 e 0,03:

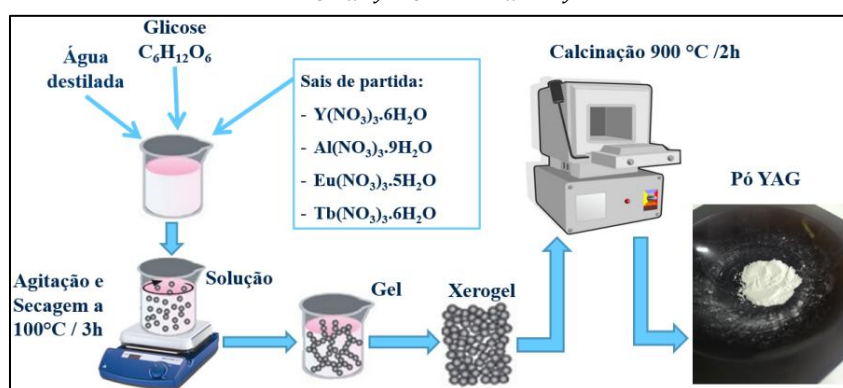


Figura 2: Etapas do processo de síntese das amostras de YAG: Eu, Tb.

- **Etapa 2:** a solução foi colocada sob agitação e aquecimento a 100 °C para a eliminação da água por vaporização e formação do gel, marcando a transição de sol para gel. Após 3h a solução se tornou mais viscosa e consistente, caracterizada como xerogel, finalizando esta etapa e preparando o gel precursor para a calcinação.
- **Etapa 3:** o xerogel foi submetido a um tratamento térmico, realizando a calcinação em 900°C durante 2h sob atmosfera aberta, com uma taxa de aquecimento de 3 °C por minuto, com o objetivo de eliminar as partes orgânicas e obter a formação da fase cristalina do YAG. Após a retirada do forno, as amostras foram maceradas utilizando um almofariz para formar um pó uniforme, pronto para as caracterizações estruturais e luminescentes.

Na figura 3 (a) é ilustrada a célula unitária da estrutura cristalina do YAG, que foi gerada através do *software VESTA*⁴. Nela é possível observar que o YAG apresenta diferentes sítios de simetria que podem ser ocupados por íons dopantes. O cátion Y^{3+} ocupa o sítio que apresenta simetria dodecaédrica e está coordenado a oito íons oxigênio (O^{2-}). Já os íons de alumínio Al^{3+} localizam-se nos sítios com simetria octaédrica e tetraédrica, com coordenação de seis e quatro oxigênios, respectivamente (Lupei & Lupei, 2016).

³ Um estudo prévio investigou como essas quantidades influenciam as propriedades estruturais e luminescentes do YAG:Eu. Com base nesse trabalho, a proporção de glicose considerada ideal foi adotada neste estudo para a síntese de todas as amostras (Silveira, 2018).

⁴ Disponível em: <<http://jp-minerals.org/vesta/en/>>. Acessado em: outubro de 2022.

Em geral, os íons dopantes tendem a se incorporar preferencialmente no sítio do ítrio (Y^{3+}), devido à semelhança dos raios iônicos. A figura 3 (b) mostra de forma esquemática a proposta de inserção dos íons Tb^{3+} e Eu^{3+} na rede cristalina. Essa hipótese baseia-se nos princípios da química dos cristais, considerando principalmente a proximidade entre os raios iônicos dos elementos envolvidos ($Y^{3+} = 1,019 \text{ \AA}$, $Tb^{3+} = 1,04 \text{ \AA}$ e $Eu^{3+} = 1,066 \text{ \AA}$) (SHANNON, 1976). Além dessa correspondência dimensional, outros fatores, como a semelhança química e o número de coordenação dos íons, reforçam a suposição de que a substituição ocorre predominantemente no sítio do ítrio.

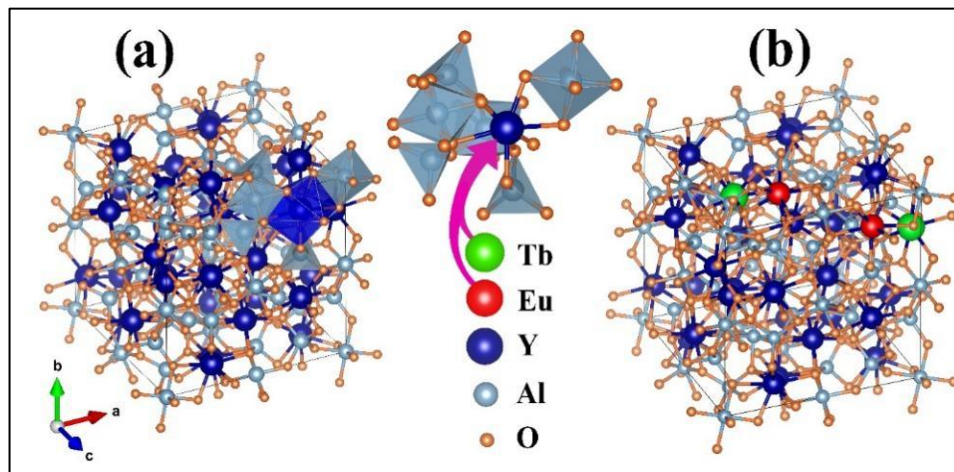


Figura 3: (a) Célula unitária cúbica de YAG. (b) Demonstração meramente ilustrativa da incorporação dos íons de Tb^{3+} e Eu^{3+} no sítio dodecaédrico do Y^{3+} .

Após a síntese de todas as amostras necessárias para o presente estudo, iniciou-se a etapa de caracterização das amostras. A análise foi conduzida em duas etapas: inicialmente, uma caracterização estrutural, seguida de uma avaliação luminescente. Para isso foram empregadas as seguintes técnicas:

- I. Difração de raios X (DRX), conduzida em uma faixa de 2θ variando de 20° a 80° , utilizando um difratômetro de pó *EMPYREAN SERIES 2* da *Panalytical*, equipado com tubo de cobre (Cu) e radiação Cu- $K\alpha$ de $\lambda=1,5419 \text{ \AA}$. Os padrões de DRX foram ajustados por meio da função *pseudo-Voigt* e do método de refinamento de *Rietveld*, implementado no *software FullProf* (Rodríguez-Carvajal, 1993), com o objetivo de obter parâmetros estruturais quantitativos e estimar o tamanho dos cristallitos por meio da equação de Scherrer (He, 2009).
- II. Fotoluminescência (PL), em que os espectros de excitação e emissão, bem como os tempos de decaimento, foram obtidos utilizando um espectrofluorímetro FP-8600 da *Jasco*, equipado com uma lâmpada de xenônio de 150 W. As coordenadas de cromaticidade da luz emitida pelo material foram determinadas segundo as normas da Comissão Internacional de Iluminação (CIE).

3. Resultados e Discussões

3.1. Análises de DRX

A técnica de DRX foi utilizada principalmente para analisar a composição e as características estruturais das amostras. Na figura 4 mostra os resultados obtidos dessas medidas para diferentes concentrações de Eu^{3+} e Tb^{3+} , juntamente com os ajustes através do refinamento *Rietveld*. Com base nos dados do YAG (ICSD:67103) de *Simonov et al.* verificou-

se ausência de diferenças significativas entre os padrões de difração, indicando que a utilização dos dopantes não modificou a estrutura cristalina a ponto de formar outra estrutura ou mesmo indicar a presença de fases secundárias (Simonov et al., 1989). Essa é uma análise qualitativa feita com o *software X'Pert High Score Plus*, que confirma que o método sol-gel modificado possibilitou a formação da fase pura YAG, com alta cristalinidade⁵ e uma boa incorporação dos dopantes, mesmo em temperaturas relativamente mais baixas. Por outro lado, alguns estudos relataram a formação de fases indesejáveis, como YAM ($Y_4Al_2O_9$) e YAP ($YAlO_3$), em sínteses realizadas a temperaturas inferiores a 1500 °C (Chen et al., 2021; Kosyanov et al., 2018; Owoseni et al., 2021).

A análise do ajuste das curvas demonstrou resultados altamente satisfatórios. A concordância entre os dados experimentais e a curva ajustada é evidente, uma vez que se observa uma sobreposição significativa entre as curvas, com discrepâncias mínimas. Ademais, essa conclusão é respaldada numericamente pelos fatores de qualidade, em especial pelos valores de χ^2 próximos à 1, que se encontram discriminados na Tabela 1.

Tabela 1: Informações cristalográficas extraídas através do refinamento Rietveld.

Amostra	<i>a, b, c</i> (Å)	Volume (Å ³)	Tamanho do cristalito (nm)	χ^2
ICSD: 67103	12.016	1734.92		
YAG: PURA	12.106	1774.20	32.8	1.77
YAG: 0.0%Tb, 0.3%Eu	11.997	1726.70	23.3	1.16
YAG: 0.3%Tb, 0.3%Eu	12.014	1734.06	57.7	1.16
YAG: 0.5%Tb, 0.3%Eu	12.030	1740.99	60.1	1.22
YAG: 0.3%Tb, 0.0%Eu	12.024	1738.39	40.8	1.87
YAG: 0.5%Tb, 0.5%Eu	12.036	1743.60	54.5	1.35
YAG: 1.0%Tb, 1.0%Eu	12.030	1740.99	56.9	1.10

Conforme esses dados da Tabela 1, os gráficos Figura 4(a)-(b) revelam que a dopagem com Eu^{3+} induziu uma contração na rede cristalina da YAG, refletida na diminuição de seus parâmetros de rede e, conseqüentemente, no volume da célula unitária. Esse fenômeno é contraintuitivo, uma vez que o raio iônico do Eu^{3+} (1,066 Å) supera o do íon Y^{3+} (1,019 Å) (SHANNON, 1976). Uma explicação plausível para essa aparente contradição pode residir em deslocamentos sutis dos picos de difratometria em direção a ângulos mais elevados. Observações análogas foram documentadas na literatura, como no trabalho de (He et al., 2016). Nos gráficos (b–d), que mantêm fixa a concentração de Eu^{3+} e variam apenas a de Tb^{3+} , verifica-se que a adição progressiva de Tb^{3+} (raio iônico = 1,04 Å [134]) promove uma expansão da rede cristalina, refletida no aumento sistemático dos parâmetros de rede. Esta tendência de expansão, amplamente documentada na literatura, está em consonância com a lei de *Vegard* para soluções sólidas (Denton & Ashcroft, 1991). Já nos gráficos (e–g), como ambas as proporções molares de Eu^{3+} e Tb^{3+} foram alteradas, não foi possível definir uma relação direta entre os dopantes e os parâmetros de rede. Ainda assim, de forma geral, os resultados sugerem uma tendência compatível com a lei de *Vegard*.

Com base na Tabela 1, foi possível estimar o tamanho médio dos cristalitos por meio da equação (1.2) de Scherrer:

$$\tau = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1.2)$$

Observa-se uma relação direta entre a concentração dos íons dopantes e codopantes e o tamanho dos cristalitos, aspecto relevante para as propriedades luminescentes dos materiais.

⁵ Materiais com alta cristalinidade são de grande importância para a aplicação em W-LEDs, pois podem influenciar diretamente na eficiência de emissão de luminescência, conforme observado por (Yang, Lee, & Kim, 2009).

O aumento da concentração de dopantes resultou em um crescimento no tamanho, resultado em concordância com estudos anteriores (Silveira et al., 2019, 2021; Silveira & dos S. Rezende, 2021). Em cenários específicos, essa tendência pode sugerir um crescimento no tamanho de grão, um fator crucial para o desempenho luminescente desses compostos em dispositivos de iluminação. Partículas com dimensões maiores reduzem os eventos de espalhamento de luz devido à sua menor densidade de interfaces e à propensão reduzida à aglomeração, conforme descrito na literatura (Song et al., 2013). Por fim, esses resultados corroboram a eficiência do método químico utilizado na produção dos materiais nanométricos com alta Pureza.

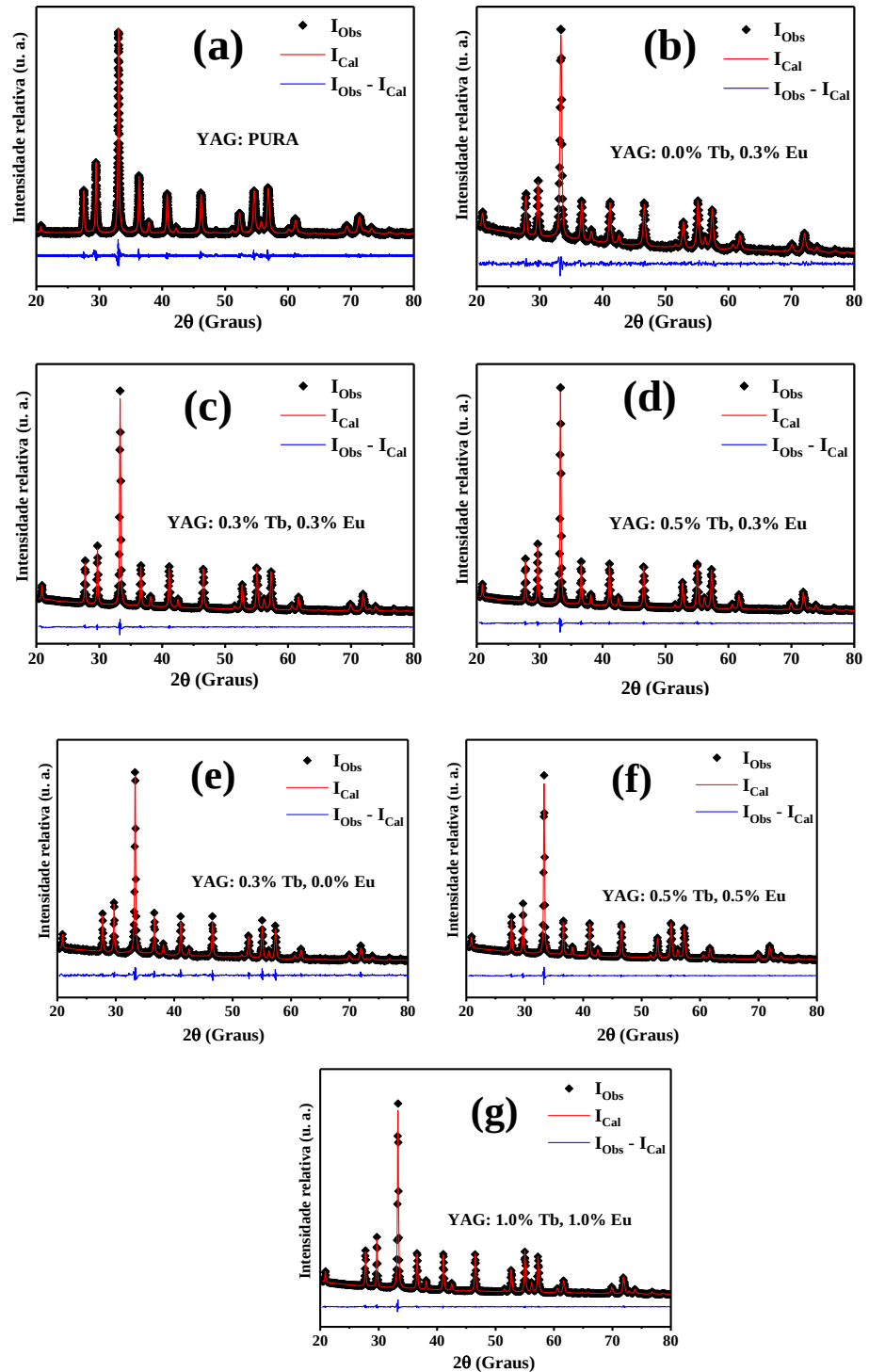


Figura 4: Difratogramas observados e calculados através do refinamento *Rietveld*. (a) amostra pura; (b – d) amostras variando a concentração de Tb^{3+} ; (e – f) amostras com diferentes concentrações de Tb^{3+} e Eu^{3+} .

3.2. Análises de PL

A figura 5 exibe os espectros de excitação das amostras YAG:Tb,Eu, monitorados em dois comprimentos de onda característicos: 385 nm, correspondente à intensa transição azul $^5D_3 \rightarrow ^7F_6$ do Tb^{3+} , e 592 nm, associado à transição $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ do Eu^{3+} nesta matriz. A seleção desses comprimentos de onda está alinhada com a literatura (Orehova, Tomala, & Zamoryanskaya, 2021a; Santos et al., 2018).

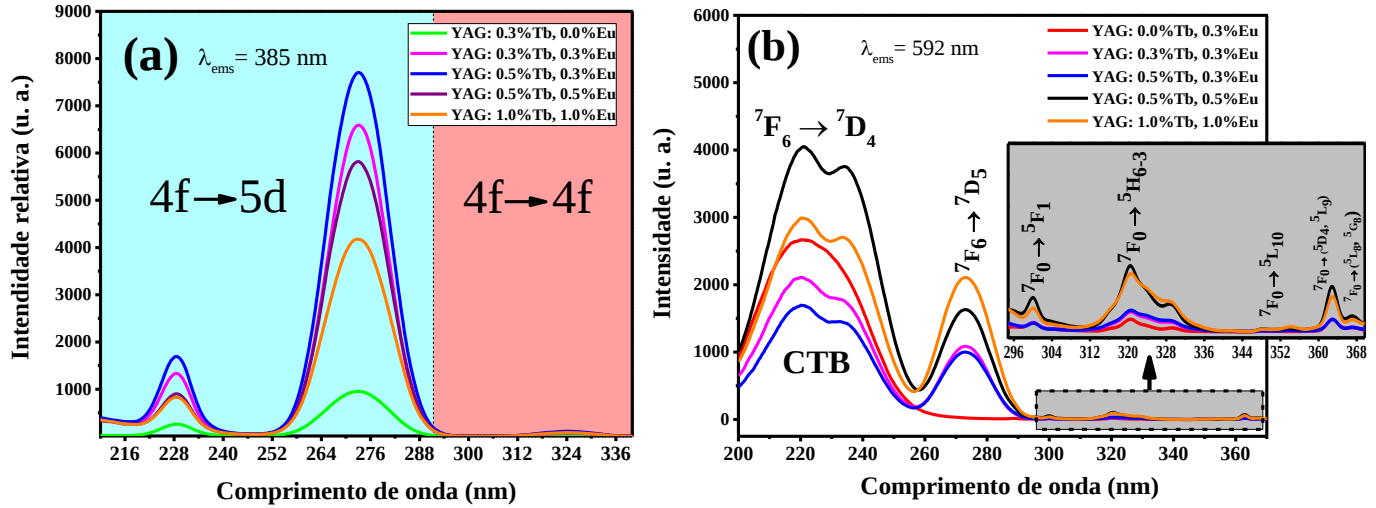


Figura 5. Espectros excitação PL das amostras YAG: Tb, Eu: (a) monitoradas em 385 nm; (b) monitoradas em 592 nm.

Conforme evidenciado na figura 5 (a), os espectros de excitação do Tb^{3+} são caracterizados por três bandas principais na região de 210–340 nm, em consonância com relatos prévios (Upasani, 2017). Para uma análise mais detalhada, essa faixa foi segmentada em duas regiões: i) 210–290 nm, associada a transições do tipo $4f \rightarrow 5d$, e ii) 290–340 nm, correspondente a transições $4f \rightarrow 4f$. Essas transições são associadas aos íons de Tb^{3+} . As bandas de maior intensidade, localizadas em aproximadamente 230 nm e 273 nm, são atribuídas às transições spin-permitidas $^7F_6 \rightarrow ^7D_4$ e $^7F_6 \rightarrow ^7D_5$, respectivamente. Vale destacar que, diferentemente do reportado por (Nyalosaso et al., 2020), transições proibidas do tipo $^7F_6 \rightarrow ^9D_j$ não foram detectadas no presente estudo. Um sinal de baixa intensidade adicional na faixa de 317–333 nm, característico de pós YAG:Tb, é atribuído a uma transição intraconfiguracional $4f \rightarrow 4f$, proibida pela regra de Laporte ($\Delta l=0$) (Bünzli, 2016). Essa banda pode resultar da superposição de múltiplas transições (Xue et al., 2015). A variação na concentração dos dopantes não alterou as posições das bandas, mas sim suas intensidades, sugerindo que a modificação nos parâmetros da rede unitária afeta o campo cristalino local, influenciando a intensidade das transições que envolvem o nível 5d, sensível a esse ambiente.

A Figura 5 (b) exibe uma banda larga e intensa entre 200–255 nm, identificada como a banda de transferência de carga (CTB) do par $Eu^{3+} - O^{2-}$. A energia desta banda é sensível ao ambiente químico do íon, como a covalência da ligação e a natureza dos cátions vizinhos (Y^{3+}/Al^{3+}). Embora estudos relatem deslocamentos da CTB com a variação da concentração de Eu^{3+} ou do comprimento de onda monitorado, neste trabalho apenas a intensidade da banda foi afetada pela dopagem com Tb^{3+} e Eu^{3+} , corroborando observações anteriores (Santos et al., 2019a). Além disso, nas amostras que contêm Tb^{3+} , a CTB apresenta um ombro próximo a 230 nm, resultante da sobreposição com a transição $^7F_6 \rightarrow ^7D_4$ do Tb^{3+} . Também se observa um pico em ~273 nm, atribuído à transição $^7F_6 \rightarrow ^7D_5$ do mesmo íon. Conforme esperado, a intensidade dessas bandas características mostrou dependência direta com a concentração de Tb^{3+} . Esses espectros também exibem uma série de picos estreitos e de baixa intensidade entre 294–370 nm, atribuídos a transições f-f

proibidas do Eu^{3+} . Sua baixa intensidade, comparada à da CTB, deve-se justamente à quebra da regra de Laporte. Conforme ilustrado, os picos em aproximadamente 300, 320, 348, 363 e 367 nm correspondem a transições a partir do nível fundamental $^7\text{F}_0$ para níveis de energia superiores específicos: $^7\text{F}_0 \rightarrow ({}^5\text{F}_1, {}^5\text{H}_6-3, {}^5\text{L}_{10}, {}^5\text{D}_4 + {}^5\text{L}_9, {}^5\text{L}_8 + {}^5\text{G}_8)$, respectivamente (Binnemans & Görller-Walrand, 1997; Pereira et al., 2015).

Com base nos resultados das medidas de excitação, o comprimento de onda de 230 nm foi selecionado para excitar as amostras e registrar os espectros de emissão. Esta escolha deve-se ao fato de que 230 nm corresponde tanto à transição $^7\text{F}_6 \rightarrow ^7\text{D}_4$ do Tb^{3+} quanto à região da banda de transferência de carga (CTB) do Eu^{3+} , permitindo a excitação simultânea de ambos os íons. Na figura 6 são mostradas três curvas: a amostra pura (curva preta) exibe luminescência desprezível, confirmando a necessidade de dopagem para atividade óptica; a amostra com Tb^{3+} (curva verde) apresenta emissões características em duas regiões: abaixo de 480 nm (azul/violeta), atribuída a transições do nível $^5\text{D}_3$, e acima de 480 nm (verde), proveniente do nível $^5\text{D}_4$. A emissão azul, observável apenas em baixas concentrações de Tb^{3+} , inclui picos em 385, 418, 438, 462 e 472 nm (transições $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_J$), enquanto a emissão verde é dominada pelo pico em 544 nm ($^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_5$) (Terra et al., 2020). Já a amostra dopada com Eu^{3+} (curva vermelha) mostra emissões na faixa de 575–730 nm, correspondentes às transições $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_J$. As transições observadas foram: $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ (585–604 nm), $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ (605–643 nm), $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_3$ (645–660 nm) e $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$ (694–722 nm), que são típicas do íon Eu^{3+} , sendo a intensidade da transição $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ (por dipolo elétrico forçado) particularmente sensível a ambientes de baixa simetria, enquanto que a $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ (permitida por dipolo magnético) é insensível a essa mudança na simetria (Orehova, Tomala, & Zamoryanskaya, 2021b). Com isso, uma análise do ambiente químico em torno do íon Eu^{3+} é possibilitada pelo fator de assimetria (FAss), calculado a partir da razão de intensidades entre a transição hipersensível $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ e a transição $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$. Em compostos com simetria inversa, como o YAG, a transição $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ geralmente apresenta maior intensidade, conforme visto em estudos anteriores.

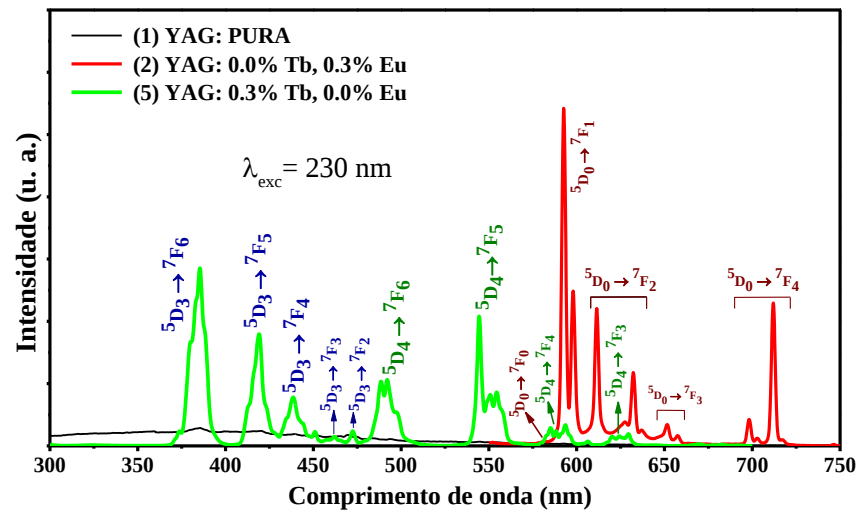


Figura 6: Espectros de emissão PL para YAG: Pura, YAG: Tb^{3+} e YAG: Eu^{3+} , excitadas em 230 nm.

Os espectros de emissão para as amostras dopadas e codopadas, variando as concentrações molares de Tb^{3+} e Eu^{3+} , estão apresentados na figura 7. Analisando esses espectros obtidos sob excitação de 230 nm, observa-se um padrão característico relatado na literatura. Na figura 7(a), para a região de emissão do Tb^{3+} , observa-se que com o aumento da concentração desses íons ocorre uma transferência de intensidade das emissões do nível $^5\text{D}_3$ (transições azuis, $^5\text{D}_3 \rightarrow ^7\text{F}_J$) para o nível $^5\text{D}_4$ (transições verdes, $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_J$), fenômeno atribuído ao mecanismo de relaxamento cruzado entre esses níveis (Santos et al., 2019b). Paralelamente, para a região de emissão do Eu^{3+} , verifica-se um fenômeno de

quenching luminescente em concentrações mais elevadas, resultante de processos não radiativos como transferência de energia entre íons e recombinação não radiativa de pares elétron-buraco. Esses mecanismos levam a uma saturação da intensidade luminescente seguida de atenuação (Bouremani et al., 2021; Han et al., 2014). Esses resultados observados neste trabalho indicam que a intensidade de fotoluminescência nas três regiões (azul, verde e vermelho) pode ser ajustada usando diferentes concentrações de Tb³⁺ e de Eu³⁺, permitindo otimizar o equilíbrio entre as três componentes de cor. Este controle é fundamental para equilibrar as emissões das três componentes de cor do sistema RGB.

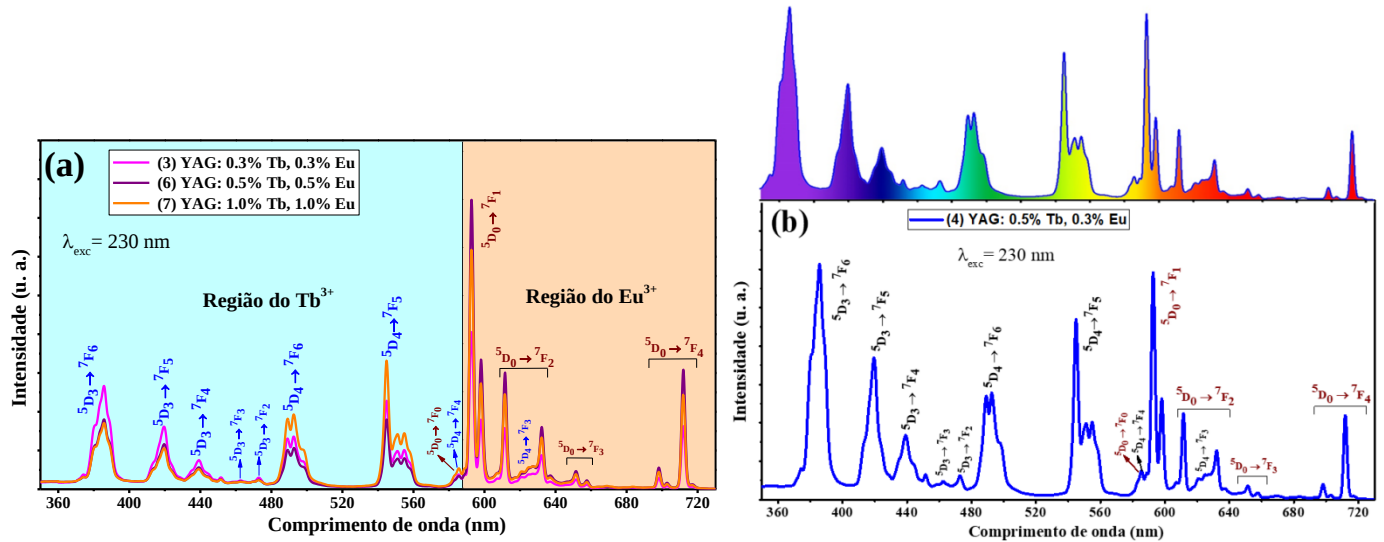


Figura 7: Espectros de emissão PL das amostras YAG: Tb³⁺ e YAG:Eu³⁺, com a indicação das cores que cada transição contribui no espectro emissão.

Na figura 7(b) é apresentado o espectro de emissão do material YAG codopado com 0,5% Tb³⁺ e 0,3% Eu³⁺, também excitado a 230 nm, onde as transições específicas de cada íon envolvido são atribuídas às suas respectivas cores no espectro, conforme dados fornecidos por (McLaren, 1985). O gráfico exibe picos de intensidade em comprimentos de onda correspondentes às três cores fundamentais do sistema RGB: azul (por volta de 440-450 nm), verde/amarelo (entre 550-560 nm) e vermelho (próximo a 600-650 nm), confirmando que esta codopagem estratégica produziu uma distribuição espectral intensa e equilibrada nessas regiões, constituindo uma técnica eficaz para obtenção de emissão de luz branca, sendo as transições do Eu³⁺ mais determinantes e as principais responsáveis para a componente vermelha. Essa obtenção de luz branca exigiu uma cuidadosa otimização da proporção molar Tb³⁺/Eu³⁺, um desafio metodológico significativo conforme foi destacado por (Ali et al., 2021), cuja confirmação quantitativa final é complementada pelo diagrama de cromaticidade, complementando esta análise espectral, que será apresentado posteriormente na figura 8.

A cor de emissão integral das amostras foi investigada através do diagrama de cromaticidade, que está mostrado na figura 8, cujas coordenadas foram calculadas a partir dos espectros de fotoluminescência previamente discutidos. A literatura reporta que essas coordenadas podem ser moduladas por diversos parâmetros experimentais, incluindo variações no comprimento de onda de excitação, na temperatura e na concentração de dopantes (Ali et al., 2021; Liu et al., 2020).

No presente estudo, a estratégia adotada consistiu em ajustar as concentrações de Tb³⁺ e Eu³⁺, obtendo-se coordenadas de cromaticidade (x=0,3078; y=0,3031) muito próximas ao ponto teórico de luz branca (x=0,3300; y=0,3300) estabelecido pela CIE (Comissão Internacional de Iluminação). O valor mais próximo do branco ideal foi alcançado especificamente para a amostra YAG:0,5%Tb³⁺,0,3%Eu³⁺ (amostra 4), como evidenciado na figura e detalhado na tabela de coordenadas, alcançando assim, o objetivo deste estudo.

As variações observadas nas coordenadas cromáticas entre as amostras sugerem uma influência de mecanismos de transferência de energia entre os íons Tb^{3+} e Eu^{3+} . À medida que as concentrações são alteradas, a eficiência desses processos é modulada, impactando a intensidade relativa das emissões azul, verde e vermelha e, consequentemente, deslocando a cor resultante no diagrama CIE. Esse mapeamento cromático corroborou a assinatura espectral característica de cada íon, demonstrando que a coordenada no eixo azul é majoritariamente determinada pelas transições do Tb^{3+} , enquanto a contribuição vermelha é dominada pelas transições do Eu^{3+} .

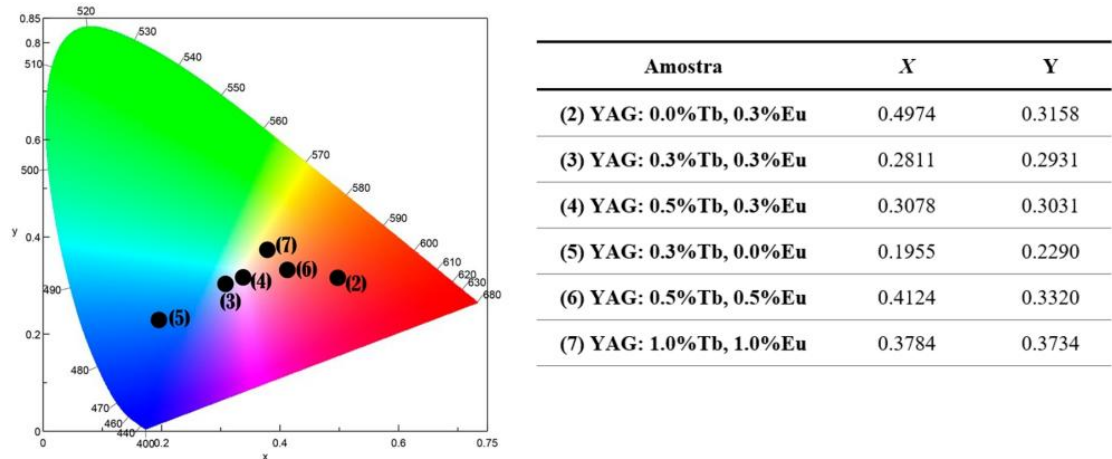


Figura 8: Diagrama de cromaticidade das amostras YAG: $\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$, excitadas com $\lambda_{\text{exc}} = 230$ nm, juntamente com as coordenadas de cores extraídas para todas elas.

Nas análises das medidas de Espectroscopia de Absorção de Raios X (XAS) e de Luminescência Óptica Excitada por Raios X (XEOL), relatadas no artigo (Silveira et al., 2020), demonstraram a estabilidade do estado de oxidação Eu^{3+} na matriz YAG sob radiação de alta energia, com espectros de absorção idênticos ao padrão Eu_2O_3 . Isso comprovou a alta resistência da matriz mesmo quando submetida a radiações ionizantes. As medidas de XEOL mostraram uma excitação simultânea de Tb^{3+} e Eu^{3+} mesmo sob energia específica na borda do európio, revelando eficiente transferência de energia entre os centros luminescentes (Silveira, 2022).

4. Conclusões

Este estudo demonstrou o sucesso na síntese via sol-gel e no controle das propriedades ópticas do YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) codopada com Eu^{3+} e Tb^{3+} . As análises estruturais por DRX confirmaram a formação da fase cúbica pura, cujos parâmetros de rede e volume da célula unitária variaram sistematicamente com a concentração dos íons, enquanto o tamanho dos cristalitos, entre 23 e 60 nm, mostrou-se diretamente influenciado pela dopagem. A espectroscopia de absorção de raios X (XAS) atestou a estabilidade do estado de oxidação Eu^{3+} na matriz, mesmo sob excitação com radiação ionizante. Os estudos de fotoluminescência revelaram que o comprimento de onda de 230 nm é eficiente para excitar simultaneamente ambos os íons, produzindo espectros de emissão característicos das transições 4f-4f do Tb^{3+} ($^5\text{D}_3$, $^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_J$) e do Eu^{3+} ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_J$). A intensidade relativa dessas emissões pôde ser modulada pela variação das concentrações, permitindo o ajuste fino da cor de saída. Como resultado, a proporção molar ideal de YAG:0,5%Tb,0,3%Eu, foi identificada como a mais eficiente, atingindo coordenadas de cromaticidade que resultam na emissão de luz branca, o que coroa o principal objetivo deste trabalho.

Referências

- Ali, H., Masschelein, P., Bruyere, S., Pigeat, P., Dauscher, A., Rinnert, H., Horwat, D., Khedr, M. A., & Giba, A. E. (2021). White light emission from Sm-doped YAG ceramic controlled by the excitation wavelengths. *Optics and Laser Technology*, 142, 107223. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107223>
- Binnemans, K., & Görrler-Walrand, C. (1997). Optical absorption spectra of Eu³⁺ in Y₃Ga₅O₁₂ (YGG). *J. Phys.: Condens. Matter*, 9, 1637–1648.
- Bouremani, A., Kadri, D., Kadari, A., & Dubey, V. (2021). Modeling of thermoluminescence in SrY₂O₄:Eu³⁺ and their concentration quenching effect. *Optik*, 232, 166607. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2021.166607>
- Bünzli, J. C. G. (2016). Lanthanide Luminescence: From a Mystery to Rationalization, Understanding, and Applications. In *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* (Vol. 50, pp. 141–176). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2016.08.003>
- Chen, L., Luo, Y., Xia, Y., Kang, B., & Yu, S. (2021). Densification, microstructure and optical properties of YAG transparent ceramics prepared by dry-pressing and gelcasting. *Optical Materials*, 121(July). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111509>
- Chen, X., & Huang, X. (2026). A review of recent advances in Ce³⁺-activated garnet phosphors for blue-chip-pumped pc-WLEDs. *Progress in Materials Science*, 155, 101535. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2025.101535>
- Denton, A. R., & Ashcroft, N. W. (1991). Vegard's "law." *BRIEF REPORTS*, 43(6), 3161–3164. <https://doi.org/10.1002/pssb.19660180251>
- Han, B., Zhang, J., Wang, Z., Liu, Y., & Shi, H. (2014). Investigation on the concentration quenching and energy transfer of red-light-emitting phosphor Y₂MoO₆:Eu³⁺. *Journal of Luminescence*, 149, 150–154. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.01.018>
- He, B. B. (2009). Two-dimensional X-ray Diffraction. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470502648>
- He, X., Liu, X., Li, R., Yang, B., Yu, K., Zeng, M., & Yu, R. (2016). Effects of local structure of Ce³⁺ ions on luminescent properties of Y₃Al₅O₁₂:Ce nanoparticles. *Scientific Reports*, 6(1), 22238. <https://doi.org/10.1038/srep22238>
- Huang, J., Ni, Y., Ma, Y., Li, Y., Sun, Z., Zhu, X., Wang, R., Li, T., Xi, X., Huang, G., Zhou, T., Li, M., Ren, H., Zhang, L., & Chen, H. (2021). Composite structure Cr:YAG/Ce:YAG and (Ce,Cr):YAG/Ce:YAG transparent ceramics with high color rendering index for white LEDs/LDs. *Ceramics International*, 47(8), 11415–11422. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.268>
- Ikesue, A., Furusato, I., & Kamata, K. (1995). Fabrication of Polycrystal line, Transparent YAG Ceramics by a Solid-State Reaction Method. In *Journal of the American Ceramic Society* (Vol. 78, Issue 1, pp. 225–228). <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08389.x>
- Kosyanov, D. Y., Yavetskiy, R. P., Tolmachev, A. V., Vornovskikh, A. A., Pogodaev, A. V., Gridasova, E. A., Shichalin, O. O., Kaidalova, T. A., & Kuryavyi, V. G. (2018). Fabrication of highly-doped Nd³⁺:YAG transparent ceramics by reactive SPS. *Ceramics International*, 44(18), 23145–23149. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.123>
- Liu, J., Wang, Y. T., Lin, C. Y., & Yang, C. F. (2020). Effect of Synthesis Temperature on the Crystalline Structures and Photoluminescence Properties of the Green-light Ca_{1.975}Eu_{0.025}MgSi₂O₇ Phosphors. *Crystal Growth and Design*, 20(5), 3154–3162. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00027>
- Lupei, V., & Lupei, A. (2016). Nd:YAG at its 50th anniversary: Still to learn. *Journal of Luminescence*, 169, 426–439. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.04.018>
- McLaren, K. (1985). Newton's indigo. *Color Research & Application*, 10(4), 225–229. <https://doi.org/10.1002/col.5080100411>
- Nandanwar, C. M., Kokode, N. S., Nande, A. V., Yerpude, A. N., Yadav, R. S., & Dhoble, S. J. (2025a). Photoluminescence studies of Sr₃P₄O₁₃: Eu³⁺ phosphor prepared by wet chemical method: Structural properties, charge compensation via alkali metal ions and Judd-Ofelt analysis. *Journal of Molecular Structure*, 1322, 140224. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140224>
- Nandanwar, C. M., Yerpude, A. N., Patwardhan, M. A., Kokode, N. S., & Kohale, R. L. (2025b). Investigations on photoluminescence properties, quantum and Judd-Ofelt analysis of novel NaSrY(BO₃)₂:Eu³⁺ phosphor for lighting applications. *Materials Research Bulletin*, 191, 113562. <https://doi.org/10.1016/J.MATERRESBULL.2025.113562>
- Nyalosaso, J., Potdevin, A., Réveret, F., Disseix, P., Mahiou, R., & Chadeyron, G. (2020). Enhancement of light extraction in Y₃Al₅O₁₂:Tb³⁺ thin films through nanopatterning. *Chemical Engineering Science*, 213, 115416. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115416>
- Orekhova, K., Tomala, R., & Zamoryanskaya, M. (2021a). The study of composition, structure and cathodoluminescent features of YAG:Eu³⁺ nanoceramics. Excitation capture efficiency of Eu³⁺ energy levels. *Journal of Alloys and Compounds*, 858(157731), 157731. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157731>
- Orekhova, K., Tomala, R., & Zamoryanskaya, M. (2021b). The study of composition, structure and cathodoluminescent features of YAG:Eu³⁺ nanoceramics. Excitation capture efficiency of Eu³⁺ energy levels. *Journal of Alloys and Compounds*, 858, 157731. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157731>
- Owoseni, T. A., Rincon Romero, A., Pala, Z., Venturi, F., Lester, E. H., Grant, D. M., & Hussain, T. (2021). YAG thermal barrier coatings deposited by suspension and solution precursor thermal spray. *Ceramics International*, 47(17), 23803–23813. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.087>
- Pereira, P. F. S., Nogueira, I. C., Longo, E., Nassar, E. J., Rosa, I. L. V., & Cavalcante, L. S. (2015). Rietveld refinement and optical properties of SrWO₄:Eu³⁺ powders prepared by the non-hydrolytic sol-gel method. *Journal of Rare Earths*, 33(2), 113–128. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60391-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60391-4)

- Rodríguez-Carvajal, J. (1993). Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, 192, 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-I](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-I)
- Santos, J. C. A., Silva, E. P., Sampaio, D. V., Alves, Y. G. S., Rezende, M. V. S., Kucera, C., Ballato, J., & Silva, R. S. (2019a). Structural, microstructural, and luminescent properties of laser-sintered Eu-doped YAG ceramics. *Optical Materials*, 89, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.01.038>
- Santos, J. C. A., Silva, E. P., Souza, N. R. S., Alves, Y. G. S., Sampaio, D. V., Kucera, C., Jacobsohn, L. G., Ballato, J., & Silva, R. S. (2018). Laser sintering and photoluminescence study of Tb doped yttrium aluminum garnet ceramics. *Ceramics International*, 45(3), 3797–3802. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.048>
- Santos, J. C. A., Silva, E. P., Souza, N. R. S., Alves, Y. G. S., Sampaio, D. V., Kucera, C., Jacobsohn, L. G., Ballato, J., & Silva, R. S. (2019b). Laser sintering and photoluminescence study of Tb-doped yttrium aluminum garnet ceramics. *Ceramics International*, 45(3), 3797–3802. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.048>
- SHANNON, R. D. (1976). Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides. *Acta Crystallographica*, A32, 751–767.
- Silva, A. J. S., Therézio, E. M., Craco, L., da S. Carvalho, I., Nascimento, P. A. M., Silveira, W. S., & Marcos, M. V. (2025). Tunable visible luminescence from Tb³⁺/Fe³⁺ co-doped LiAl₅O₈ under UV and X-ray excitation. *Journal of Luminescence*, 288, 121497. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2025.121497>
- Silveira, W. S. (2018). Efeito do co-dopante (Sr²⁺) e da glicose nas propriedades estruturais e ópticas do YAG dopado com íons terras raras (Eu³⁺, Ce³⁺ e Tb³⁺) [universidade Federal de Sergipe]. <https://doi.org/http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/8039>
- Silveira, W. S. (2022). Efeito dos íons codopantes (Tb³⁺, Ca²⁺) nas propriedades luminescentes do Y₃Al₅O₁₂:Eu³⁺ [UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE]. <https://doi.org/http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/23581>
- Silveira, W. S., & dos S. Rezende, M. V. (2021). Influence of Ca²⁺ co-doping on the luminescence properties of Eu doped Y₃Al₅O₁₂ phosphors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 154(March), 110041. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2021.110041>
- Silveira, W. S., Nascimento, P. A. M., Silva, A. J. S., & Rezende, M. V. do S. (2020). Luminescent properties and energy transfer mechanism from Tb³⁺ to Eu³⁺ doped in Y₃Al₅O₁₂ phosphors. *Journal of Alloys and Compounds*, 822, 153651. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153651>
- Silveira, W. S., Silva, A. J. S., Nascimento, P. A. M. do, Carvalho, I. da S., & Rezende, M. V. dos S. (2021). Improving the luminescence properties of YAG:Ce³⁺ phosphors by co-doping Sr²⁺ ions. *Optik*, 231(January), 166363. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166363>
- Silveira, W. S., Silva, A. J. S., Nascimento, P. A. M., & dos S. Rezende, M. V. (2019). Effect of strontium co-doping on luminescent properties of Eu-doped YAG phosphors. *Optik*, 185(February), 847–851. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.138>
- Simonov, M., Karpov, O. G., Shvirkst, Y. Y., & Gode, G. K. (1989). Localization of hydrogen atoms in crystal structure of Ba₁₀(OH)₄12·H₂O. *Kristallografiya*, 34 (5)(16), 1292–1294. <https://doi.org/10.1107/s2414314619007703>
- Song, Z., Liao, J., Ding, X., Liu, X., & Liu, Q. (2013). Synthesis of YAG phosphor particles with excellent morphology by solid state reaction. *Journal of Crystal Growth*, 365, 24–28. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.12.022>
- Terra, I. A. A., Borrero-González, L. J., Almeida, J. M. P., Hernandez, A. C., & Nunes, L. A. O. (2020). JUDD-OFELT ANALYSIS of Tb³⁺ and UPCONVERSION STUDY in Yb³⁺–Tb³⁺ CO-DOPED CALIBO GLASSES. *Quimica Nova*, 43(2), 188–193. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170465>
- Tucureanu, V., Matei, A., & Avram, A. M. (2015). Synthesis and characterization of YAG:Ce phosphors for white LEDs. *Opto-Electronics Review*, 23(4). <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0038>
- Upasani, M. (2017). Synthesis of Y₃Al₅O₁₂:Tb & Y₃Al₅O₁₂:Tb,Si phosphor by combustion synthesis: Comparative investigations on the structural and spectral properties. *Optical Materials*, 64, 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.11.039>
- Wang, S., Sun, Q., Devakumar, B., Liang, J., Sun, L., & Huang, X. (2019). Mn⁴⁺-activated Li₃Mg₂SbO₆ as an ultrabright fluoride-free red-emitting phosphor for warm white light-emitting diodes. *RSC Advances*, 9(6), 3429–3435. <https://doi.org/10.1039/C8RA10158B>
- Xue, X., Cheng, T., Suzuki, T., & Ohishi, Y. (2015). Upconversion emissions from high energy levels of Tb³⁺ under near-infrared laser excitation at 976 nm. *Optical Materials Express*, 5(12), 2768. <https://doi.org/10.1364/ome.5.002768>
- Yang, H., Lee, D. K., & Kim, Y. S. (2009). Spectral variations of nano-sized Y₃Al₅O₁₂:Ce phosphors via codoping/substitution and their white LED characteristics. *Materials Chemistry and Physics*, 114(2–3), 665–669. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.10.019>

Isenção de responsabilidade/Nota do editor: As declarações, opiniões e dados contidos em todas as publicações são exclusivamente de responsabilidade do(s) autor(es) e colaborador(es) individual(is) e não do Caderno de Física da UEFS e/ou do(s) editor(es). O Caderno de Física da UEFS e os editores isentam-se de responsabilidade por qualquer dano a pessoas ou propriedades resultante de quaisquer ideias, métodos, instruções ou produtos mencionados no conteúdo.