

O uso de materiais luminescentes em células solares

The use of luminescent materials in solar cells

DOI:10.34117/bjdv7n9-018

Recebimento dos originais: 07/08/2021

Aceitação para publicação: 01/09/2021

Felipe Rodrigues da Silva

Mestre em Ensino de Física; Engenharia Mecânica - IFCE
Secretaria de Educação do Estado do Ceará - SEDUC-CE
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Maracanaú,
IFCE
Av. Parque Central, 1315 - Distrito Industrial I, Maracanaú - CE, 61939-140
E-mail: feliperodrigues199@hotmail.com

João Paulo Bezerra de Souza

Graduando em Física, IFCE
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza,
IFCE
Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica, Fortaleza - CE, 60040-531
E-mail: jpfisica01@gmail.com

Samuel Bastos Balbino de Almeida

Graduando em Física, IFCE
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza,
IFCE.
Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica, Fortaleza - CE, 60040-531
E-mail: samuelbastos9@gmail.com

João Dionízio de Melo Neto

Doutorando em Engenharia e Ciências de Materiais, UFC.
Programa de Pós-Graduação Em Engenharia e Ciência de Materiais, PPGECM/UFC.
Universidade Federal do Ceará - UFC
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza,
IFCE
Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica, Fortaleza - CE, 60040-531
E-mail: joao.dionizio@ifce.edu.br

Mairton Cavalcante Romeu

Doutor em Engenharia de Teleinformática - UFC
Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais - LOCEM
Universidade Federal do Ceará - UFC
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Fortaleza
Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica, Fortaleza - CE, 60040-531
E-mail: mairtoncavalcante@ifce.edu.br

RESUMO

O presente artigo apresenta a utilização de materiais luminescentes promissores na aplicação em células fotovoltaicas, de modo a contribuir com o aumento da eficiência energética. Para isso, serão discutidos a geração de energia solar, os materiais cerâmicos dopados com íons terras raras (materiais luminescentes), a conversão espectral, bem como o processo de produção e obtenção desses compostos. Como metodologia, apresentaremos uma das formas de produção de materiais cerâmicos, e os principais métodos de caracterização desses materiais, tais como caracterização estrutural a Difração de Raio X (DRX), a análise morfológica com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a caracterização óptica. Os materiais cerâmicos podem ser produzidos pela síntese por reação em estado sólido. Inicia-se a produção com os critérios de proporções estequiométricas dos reagentes utilizados, seguido de processo de moagem de alta energia, para homogeneizar e reduzir o tamanho de grão, processo de calcinação na qual obtém-se a síntese da matriz cerâmica. Após a identificação da fase pelo DRX, realiza-se a dopagem com íons terras raras, e então o material produzido, apresentará propriedades *upconversion* ou *downconversion*. Assim, esses fenômenos conseguem aproveitar faixas do infravermelho e do ultravioleta que não seriam completamente absorvidas pela placa solar, ou seja, melhorando o rendimento das células solares. Esses materiais são considerados inovadores para captação de luz, pois melhoram o desempenho das células fotovoltaicas e aumentam a eficiência quântica através da capacidade de alguns íons absorverem energia em diferentes comprimentos de onda e convertê-los para a região do visível. Como consequência, a aplicação desses materiais dopados apresentam propriedades luminescentes (*upconversion* ou *downconversion*) que proporcionam na célula solar economia e alto desempenho através da conversão espectral.

Palavras-chave: Luminescência, Energia Solar, Dopagem, Terras Raras.

ABSTRACT

This paper presents the use of promising luminescent materials in the application in photovoltaic cells in order to contribute to the increase of energy efficiency. For this, the generation of solar energy, ceramic materials doped with rare earth ions (luminescent materials), spectral conversion, as well as the process of production and obtaining these compounds will be discussed. As methodology, we will present one of the ways of production of ceramic materials, and the main methods of characterization of these materials, such as structural characterization with X-Ray Diffraction (XRD), morphological analysis with Scanning Electron Microscopy (SEM) and optical characterization. Ceramic materials can be produced by solid state reaction synthesis. The production begins with the criteria of stoichiometric proportions of the reagents used, followed by a high energy milling process, to homogenize and reduce the grain size, a calcination process in which the synthesis of the ceramic matrix is obtained. After the phase identification by XRD, the doping with rare earth ions is performed, and then the material produced will present upconversion or downconversion properties. Thus, these phenomena are able to take advantage of infrared and ultraviolet bands that would not be completely absorbed by the solar plate, i.e., improving the performance of solar cells. These materials are considered innovative for light harvesting, as they improve the performance of photovoltaic cells and increase the quantum efficiency through the ability of some ions to absorb energy at different wavelengths and convert them to the visible region. As a consequence, the application of these doped materials exhibit luminescent properties (upconversion or downconversion) that provide in the solar cell economy and high performance through spectral conversion.

Keywords: Luminescence, Solar Energy, Doping, Rare Earths.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia vem fascinando a humanidade com suas inovações, crescendo de forma exponencial, principalmente a de desenvolvimento de métodos e práticas de otimização da captação de energia solar. O aperfeiçoamento e a pesquisa por novos materiais luminescentes são essenciais para o aprimoramento de sistemas de energia solar fotovoltaica. Os registros sobre sistemas fotovoltaicos remontam ao século XIX. Na ocasião, Alexandre Edmond Becquerel constatou que a luz solar, ao incidir em um material semiconductor, ocasiona uma diferença de potencial, sendo possível a conversão de energia solar em energia elétrica. Atualmente, usinas, empresas e residências fazem uso de sistemas fotovoltaicos para geração e consumo de energia.

A energia solar fotovoltaica é proveniente da radiação solar, em que as células fotovoltaicas convertem essa luz em energia elétrica. A reação da luz solar ocorre dentro da célula, devido a existência de um material semiconductor e da combinação de vários elementos sobrepostos (DOS SANTOS *et al.*, 2020). O princípio de funcionamento das células solares é basicamente a transformação de radiação solar em energia elétrica. Isso ocorre devido às propriedades eletrônicas da estrutura cristalina. As células fotovoltaicas mais utilizadas são as de silício, devido à facilidade de obtenção dessa matéria-prima. Contudo, há novas metodologias e técnicas que vêm se destacando, dentre elas têm as células solares, sensibilizadas por corante (DSSC, do inglês *Dye-Sensitized Solar Cells*); as células solares, sensibilizadas por pontos quânticos (QDSSC, do inglês *Quantum Dot-Sensitized Solar Cells*); e as células solares de perovskita (PSC, do inglês *Perovskite Solar Cells*) (RAPHAEL *et al.*, 2018). A aplicação de materiais luminescentes nesses sistemas, visam converter o espectro solar para as propriedades que o semiconductor absorva, assim esse processo de conversão dos fótons traz diversas vantagens (SHALAV *et al.*, 2007).

De acordo com De Mayrinck *et al.* (2020), materiais luminescentes dopados com íons RE³⁺ realizam upconversion, absorvendo fótons de baixa energia (próximos ao infravermelho) e convertendo em fótons de maior energia como o ultravioleta e o visível, sendo, então, de grande utilidade para células solares. Os autores relatam, ainda, que há fatores limitantes nos dispositivos solares tradicionais, como a perda de transparência e recombinação radiativa, que afetam a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Dessa forma, os sistemas de óxidos dopados com RE³⁺ são considerados inovadores para captação de

luz, pois melhoram o desempenho das células fotovoltaicas e aumentam a eficiência quântica através da capacidade de alguns íons absorverem energia em diferentes comprimentos de onda e convertê-los para a região do visível. Portanto, os fenômenos de upconversion ou downconversion são capazes de aumentar a potência elétrica de um dispositivo fotovoltaico.

Assim, nos tópicos a seguir, aborda-se a contextualização sobre a aplicação tecnológica dos materiais luminescentes, depois a capacidade energética solar no mundo, em seguida, os materiais luminescentes e os seus fenômenos da conversão espectral. Como metodologia, descreve-se, de modo geral, a rota de obtenção de um material cerâmico, dopado com terras raras para se alcançar um material luminescente e, por fim, as considerações finais.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

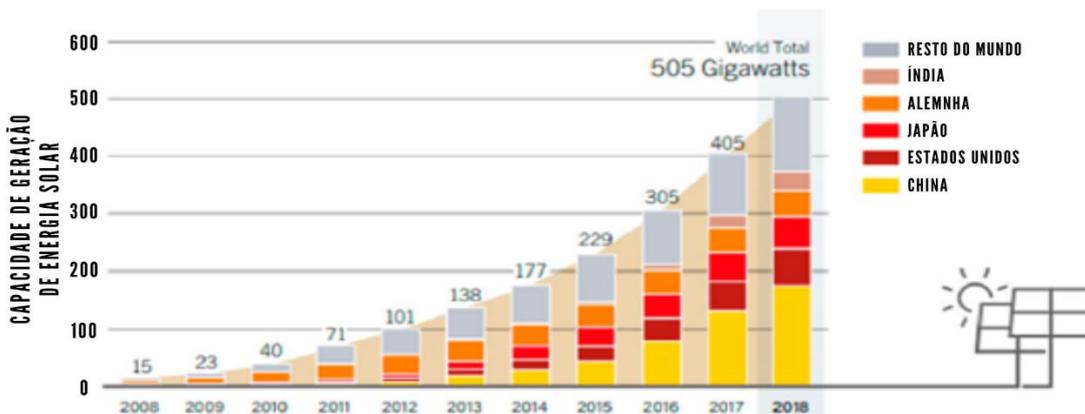
Os novos materiais luminescentes têm um grande espectro de aplicações, como por exemplo: imagem de exames para tratamentos de enfermidades, 3D-displays, iluminação de última geração, lasers de estado sólido, fotônicos, sensores de temperatura, biomarcadores fluorescentes, terapia fotodinâmica, ciência forense, imagem de ressonância magnética, estocagem de dados óticos, diodos emissores de luz (LEDs) e células solares. Logo, envolvendo uma enorme variedade de setores: saúde, telecomunicações, indústria aeroespacial, indústria eletrônica, automotiva, energética, meio-ambiente, etc. Confirmando a extrema relevância dos materiais luminescentes para o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia. Na aplicação de células solares, materiais luminescentes são capazes de aumentar a potência elétrica do dispositivo fotovoltaico convertendo os fótons do infravermelho para a região do visível, ou seja, favorecendo a absorção, consequentemente tornando-os materiais promissores para aplicações na produção de energia atrelados ao aumento da eficiência de sistemas fotovoltaicos (DE MAYRINCK, 2020). Portanto, a conversão espectral visa transformar a energia incidente para uma forma ascendente (aumentando a frequência) ou descendente (reduzindo a frequência) da luz solar, de modo a melhorar a captação, consequentemente o rendimento da célula solar. Materiais cerâmicos dopados com íons terras raras têm a possibilidade de realizar as diferentes formas de conversão espectral: o upconversion, na qual dois fótons de baixa energia (sub-bandgap) são combinados para dar um fóton de alta energia; downshifting, na qual um fóton de alta energia é transformado em um fóton

de baixa energia; e downconversion, no qual um fóton de alta energia é transformado em dois fótons de baixa energia.

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA

O potencial energético solar possui grandes e variadas intensidades, entretanto é muito pouco aproveitado. A energia solar que chega ao planeta Terra diariamente é o suficiente para atender toda a demanda energética do planeta por um bom período. Em números, a superfície do planeta Terra recebe, por ano, cerca de $3 \cdot 10^{24}$ Joules, isso equivale a $9,5 \cdot 10^4$ TW (Terawatts) de energia solar, o que ultrapassa o consumo de toda a população terrestre em mais de 10.000 vezes. Diversos países estão investindo em projetos e recursos para impulsionar a geração de energia solar em grande escala. Segundo Al-Shahri *et al.* (2020), trabalhos em otimização de sistemas fotovoltaicos estão em expansão, de forma que tiveram grande aumento na última década. Os autores ainda relatam que artigos científicos sobre técnicas de otimização fotovoltaicas estão em alta nos países desenvolvidos como os Estados Unidos da América (EUA) e em países europeus, assim como em países de economia emergentes como a China e a Índia. A Figura 1 demonstra o crescimento da energia solar fotovoltaica do relatório do mercado global de eletricidade.

Figura 1 – Capacidade de produção global de energia solar fotovoltaica.

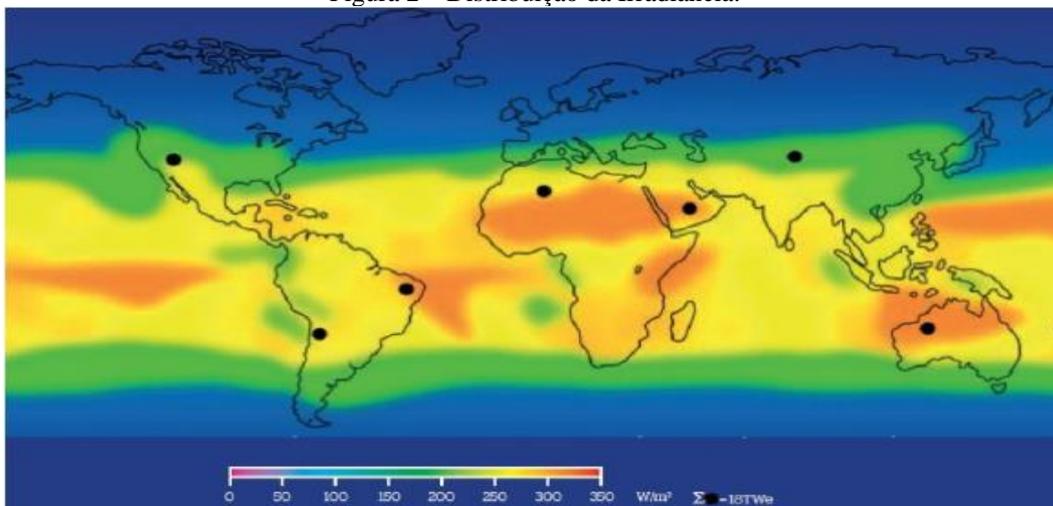


Fonte: (Global Status Report, 2019, apud AL-SHAHRI et al., 2020 – adaptação nossa)

Analisando os últimos dados, referentes ao ano de 2018, percebe-se que a China é o país que mais se destaca na capacidade de geração de energia solar. E, de acordo com os dados apresentados pela *Global Status Report* (2019) (ver Figura 1), a capacidade total de geração de energia em todo o mundo, ainda é bastante modesta, em torno de 500 Gigawatts de potência. É importante destacar que essa capacidade de geração de energia

solar está atrelada a diversos fatores, entre eles a localização geográfica do país. Sabe-se que quanto mais próximo da linha do Equador, maior a intensidade dos raios solares. Nesse sentido, Sousa (2019) destaca que a Alemanha é o país com a maior utilização de energia solar no mundo, a sua capacidade instalada é de 20GW (Gigawatts), representando 4% da produção de sua energia, mesmo sendo um país que tem baixo índice de radiação solar comparado com o Brasil. Em sua tese, o autor relata que a não uniformidade do fluxo de luz na superfície terrestre, faz com que haja regiões promissoras para instalações de plantas com painéis solares, demonstrado pelos pontos pretos no mapa da Figura 2.

Figura 2 – Distribuição da Irradiância.



Fonte: Souza, (2019).

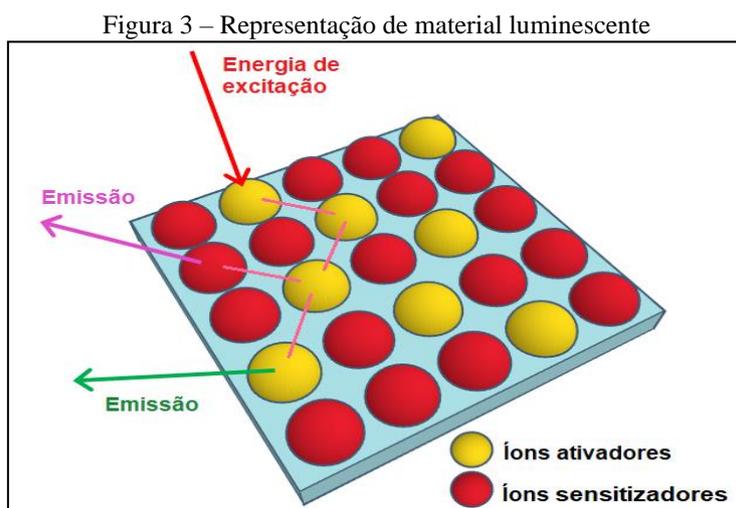
Com todo potencial tecnológico já desenvolvido no setor fotovoltaico, os módulos frequentemente encontrados no mercado possuem uma eficiência em torno de 15%, o que ainda torna difícil a utilização por pessoas físicas. Nessa perspectiva, diversos países lançaram políticas públicas para fomentar o uso da energia solar, porém, no Brasil, pouco se tem feito para promover a utilização, tanto no setor industrial quanto pela população (MACHADO; MIRANDO, 2015). Assim, é importante pesquisas de materiais que façam a união de baixo custo e maior eficiência para sistemas fotovoltaicos. No tópico seguinte serão explorados, de forma mais precisa, os materiais luminescentes que são promissores para atender esses requisitos de melhor economia e alto desempenho para células solares.

2.2 MATERIAIS LUMINESCENTES

Materiais que recebem energia e reemitem essa energia na forma de luz, são materiais considerados luminescentes. Essa reemissão da luz pelo material, pode ser chamado de fluorescência ou fosforescência, a distinção entre esses fenômenos acontece

pelo tempo de emissão (reemissão) da luz. Para a fluorescência, o fenômeno de emissão de luz ocorre para intervalos de tempo menor do que um segundo. No caso contrário, para intervalos de tempo maiores do que um segundo, tem-se uma situação de fosforescência (CALLISTER, 2010).

Geralmente, fenômenos ópticos dessa natureza não ocorrem regularmente em materiais puros, ou seja, a viabilidade da luminescência verifica-se pela presença de íons adicionados ao material (Figura 3). Conforme Richards (2006), materiais luminescentes dopados com terras raras são amplamente usados na indústria de iluminação, tal como na fabricação de tubos de raios catódicos e em tecnologias de painel de exibição de plasma. Terras raras estão na família de elementos luminescentes em uma ampla faixa, desde as proximidades do infravermelho, passando pelo visível, até o ultravioleta. Suas transições ópticas envolvem orbitais 4f, que são bem protegidos de seu ambiente local pelos orbitais 5s² e 5p⁶ externos completamente preenchidos.



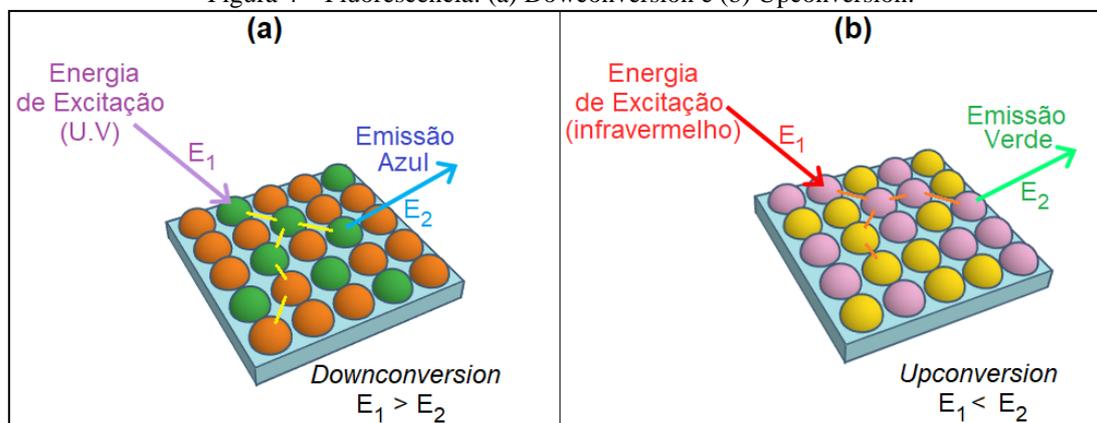
Fonte: o próprio autor (adaptado de RONDA, 2008).

No desenvolvimento de novos materiais, as pesquisas basicamente se empenham em associar a um material puro, isto é, um cristal inorgânico, à dopagem de íons, com a intenção de potencializar os fenômenos de luminescência do composto produzido. Nessa perspectiva, matrizes hospedeiras (sólidos inorgânicos) são dopadas com íons de maneira controlada. As impurezas adicionais são em concentrações baixas para evitar perda de eficiência, deste modo, a luminescência pode ocorrer pela matriz hospedeira ou pelas impurezas dopadas (RONDA, 2008), de maneira que se obtém a emissão desejada. O uso de íons terras raras em materiais puros são aplicações que oferecem a capacidade de

conversão de uma energia absorvida em outra como radiação infravermelha, ultravioleta ou do espectro visível, conforme seja a necessidade da conversão desejada.

Os íons ativadores e sensibilizadores do material produzido serão responsáveis pela emissão de energia deste material luminescente, sobre esses íons (ativadores e sensibilizadores) e as conversões de energia trataremos com mais detalhes na seção seguinte. Quando um material é exposto a uma radiação (visível ou não), esse emite energia com comprimento de onda diferente do que foi recebido. E elementos com essas características são denominados de fósforo (RONDA, 2008). O fenômeno de fluorescência é delimitado de duas formas, o downconversion ou upconversion (GAO et al., 2013; SONG et al., 2014). A diferenciação entre downconversion e upconversion se dará pela forma da reemissão de energia do material. Se a energia absorvida for maior que a energia reemitida pelo material, temos a ocorrência do downconversion. Do contrário, no momento em que a energia absorvida for menor do que a energia reemitida por este material define-se o upconversion. Na figura 4, demonstra-se uma simulação em que acontece o downconversion e o upconversion.

Figura 4 – Fluorescência: (a) Downconversion e (b) Upconversion.



Fonte: o próprio autor.

Na representação mostrada na figura 4.a, a matriz hospedeira recebe uma energia de excitação ultravioleta e emite radiação azul, ou melhor, a energia emitida foi menor que a absorvida pelo material ($E_1 > E_2$), ou seja, configura-se um processo de downconversion. A Figura 4.b mostra uma outra matriz que, ao ser excitada com radiação infravermelha, esta emite luz verde, deste modo, o material fluorescente recebeu energia de excitação menor do que a emissão ($E_1 < E_2$), nessas condições verifica-se o upconversion. Em especial, a Fluorescência upconversion é um processo óptico não linear com características de absorção de dois fótons ou mais, provenientes de uma fonte

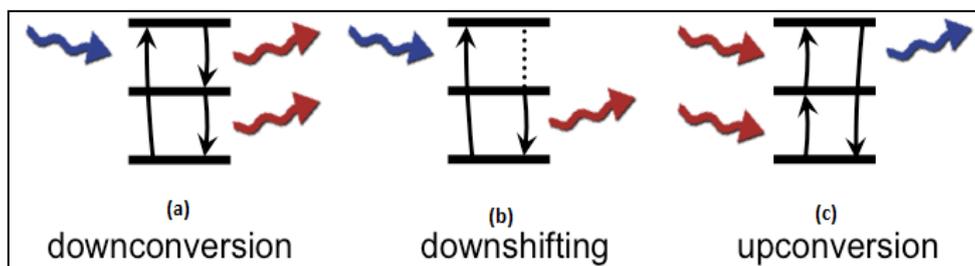
externa, em que o material luminescente, ao ser excitado, consegue passar os seus elétrons para um nível eletrônico mais energético. (HANNINEN; HÄRMÄ, 2011; RONDA, 2008). Por isso, materiais de fluorescência do tipo upconversion obtêm-se pela inserção de íons, tais como íons terras raras em sua estrutura cristalina (NASCIMENTO, 2019). Conseqüentemente, a técnica usual para modificar a propriedade de um determinado material conforme seu interesse é conhecido como dopagem (CALLISTER, 2016; SMART; MOORE, 2012).

Os íons terras raras fazem parte da família dos lantanídeos, mais especificamente 15 elementos que formam parte do período 6 da Tabela Periódica. Os dopantes constantemente empregados são os que possuem estado de oxidação 3+, assim como também, o 2+ e 4+. Nesta configuração, os orbitais 4f são incompletos, impedindo interações coulombianas dos elétrons pertencentes a este orbital, assim os íons terras raras apresentam bandas estreitas de emissão e absorção (SANTOS, 2013; SILVA, 2014). No processo upconversion, a rede cristalina dopada terá íons ativadores ou sensitizadores, nos quais o ativador é a excitação dos elétrons para níveis mais energéticos, sendo, então, responsável pela fluorescência. Os íons sensitizadores ao serem excitados pela fonte externa, transferem a energia para o ativador como fótons. Dependendo do composto produzido pelo processo de dopagem, os íons ativadores passam a ser sensitizadores (CARRILLO, 2016; KRISHNAN, 2015). Diante disso, de forma controlada, a modificação do cristal através da dopagem com íons terras raras, exibirá perfis de bandas de emissão bem definidas, conforme a fluorescência mais adequada à utilização da proposta desenvolvida.

2.3 A CONVERSÃO ESPECTRAL

A conversão espectral visa modificar o espectro solar incidente de forma que uma melhor correspondência seja obtida entre a eficiência de conversão e o comprimento de onda emitido pela célula solar. Sua vantagem é que pode ser aplicado a células solares existentes e que a otimização da célula solar e do conversor espectral pode ser feita separadamente. Diferentes tipos de conversão espectral (ver Figura 5) podem ser distinguidos: (a) downconversion ou corte quântico, no qual um fóton de alta energia é transformado em dois fótons de baixa energia; (b) Down-s ou Downshifting, na qual um fóton de alta energia é transformado em um fóton de baixa energia; e (c) upconversion, na qual dois fótons de baixa energia são combinados para dar um fóton de alta energia (VAN SARK et al., 2013).

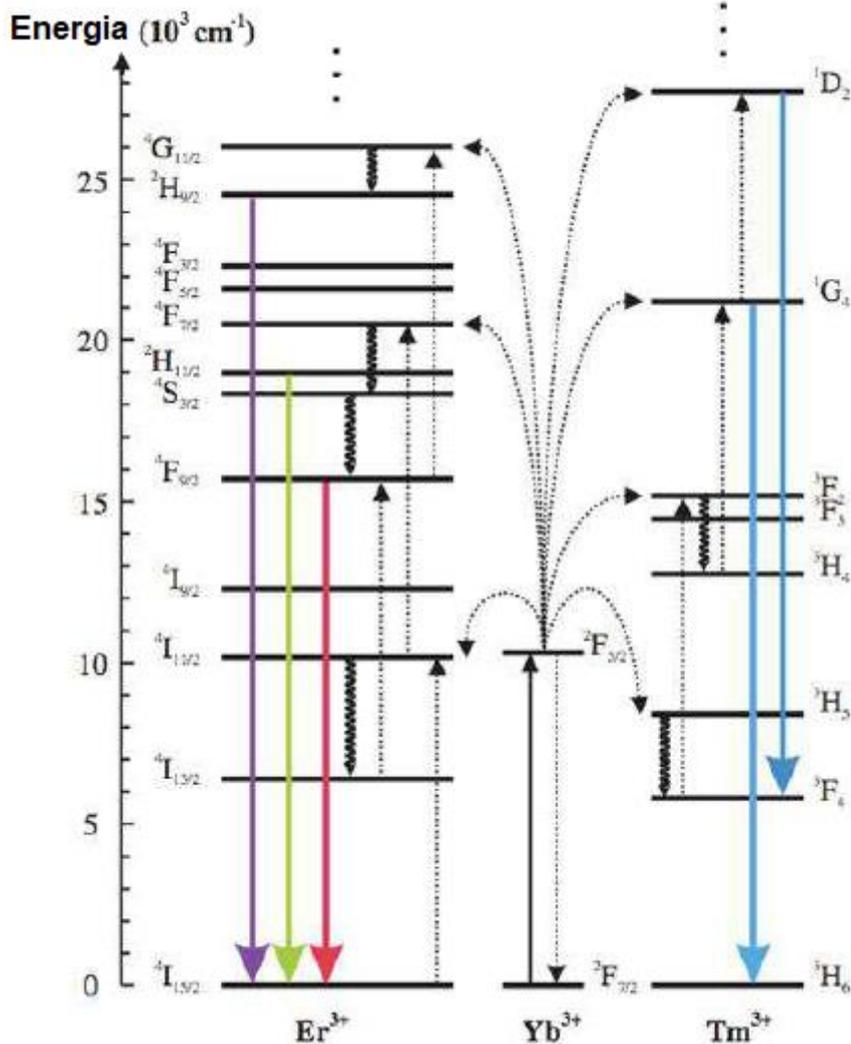
Figura 5 – Diagramas de energia.



Fonte: Van Sark et al. (2012).

De acordo com Huang et al. (2013), para aumentar a eficiência das células solares esses três processos de luminescência, upconversion, downconversion e o down-shifting são, atualmente, explorados para o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos eficientes. Entretanto, os íons lantanídeos trivalentes são os principais candidatos para obter uma conversão espectral eficiente devido à sua rica estrutura de nível de energia (conhecida como diagrama de Dieke) que permite o gerenciamento fácil de fótons. Os conversores ascendentes (upconversion), geralmente, combinam um íon ativo, cujo esquema de nível de energia é empregado para absorção, e um material hospedeiro, no qual o íon ativo está embutido. A conversão ascendente mais eficiente foi relatada para os pares de íons lantanídeos (Yb, Er) e (Yb, Tm); os esquemas de conversão ascendente correspondentes são mostrados na Figura 6.

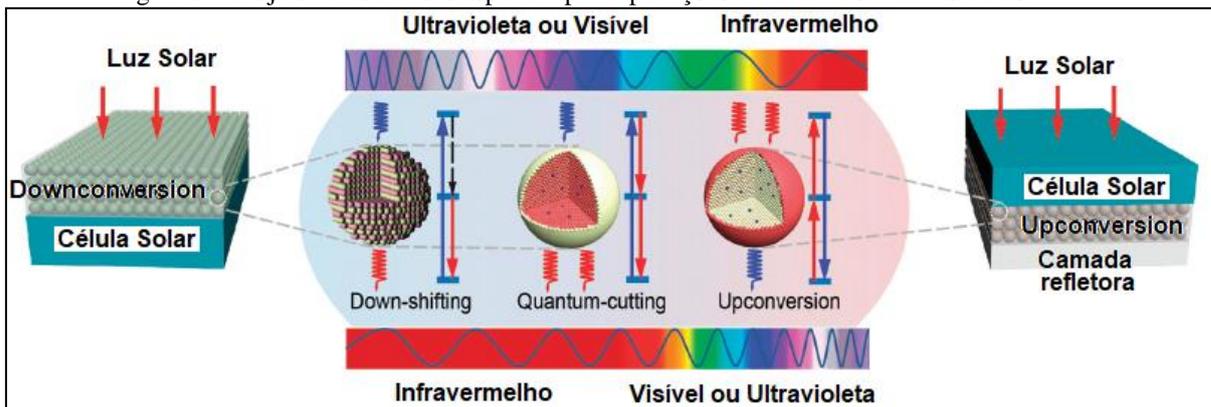
Figura 6 – Demonstração do upconversion para pares de íons Er^{3+} , Yb^{3+} e Tm^{3+} .



Fonte: (VAN SARK et al., 2012).

A conversão descendente (*downconversion*) foi teoricamente sugerida, pela primeira vez, por Dexter, na década de 1950, e mostrada experimentalmente 20 anos depois usando o íon lantanídeo praseodímio Pr^{3+} em um hospedeiro YF_3 de fluoreto de ítrio (VAN SARK *et al.*, 2012). A termalização de portadores de carga, gerada pela absorção de fótons de alta energia, é um dos principais mecanismos de perda pelo qual a energia coletada é subutilizada em uma célula solar convencional (RICHARDS, 2006). A conversão ascendente da luz sub-bandgap (*upconversion*) é explorada para reduzir as perdas de energia por não absorção. O sistema de célula solar bifacial de junção única tem uma camada de conversão ascendente posicionada na parte traseira do painel solar (Figura 7). O conversor ascendente transforma dois (ou mais) fótons sub-bandgap transmitidos em um fóton, que é subsequentemente absorvido pela célula solar para gerar pares elétrons.

Figura 7 – Projeto de conversão espectral para aplicações de materiais luminescentes.



Fonte: o próprio autor, adaptado de Huang et al. (2013).

Um dos maiores desafios no projeto de dispositivos de células solares é como minimizar as perdas de energia devido à incompatibilidade espectral entre a célula solar e o espectro solar incidente. Para fazer pleno uso do espectro solar, abordagens inovadoras por meio do uso de materiais luminescentes de *upconversion*, corte quântico e *down-shifting*, embora ainda estejam em seu estágio inicial, têm se mostrado promissores para o desenvolvimento desses materiais como conversores espectrais para efetivamente reduzir as perdas de incompatibilidade espectral e, como consequência, aumentar a eficiência das células solares (HUANG *et al.*, 2013). Portanto, é importante que os novos materiais, além de reduzirem o custo de produção, tenham uma melhoria em sua atuação, ou tenha, no mínimo, uma redução em seu custo de produção, mesmo que mantenha a qualidade de operação que tinha anteriormente. Assim, deve-se tentar produzir materiais que possam ampliar captação, obtendo um campo de maior e com melhor absorção da célula solar. Na próxima seção, será descrito, de modo geral, a construção de um material que possa ser utilizado para aplicações em células solares.

3 METODOLOGIA

Como metodologia, descreve-se a obtenção de um material cerâmico que tenha como aplicação as células solares, ou seja, material que apresente propriedades luminescentes. E nos subtópicos serão abordadas as formas de caracterização desse material. A técnica de confecção, aqui sugerida, é a do processo reacional no estado sólido.

3.1 PRODUÇÃO DO MATERIAL

No primeiro passo, realiza-se cálculo estequiométrico dos reagentes a serem utilizados. Esses reagentes são pesados, em quantidades estequiométricas (Passo 1, da

Figura 8), em seguida colocados em um recipiente específico para que se realize a moagem desse material. Trata-se de uma moagem de alta energia e, geralmente, utiliza-se em laboratório um moinho do tipo planetário. Dentro desse recipiente, além dos reagentes, tem-se esferas, como as de óxido de zircônio (ZrO_2), que servem para auxiliar na moagem desses reagentes. A intenção do processo de moagem é reduzir o tamanho dos grãos e homogeneizar os reagentes selecionados, para que ocorra a interface entre as fases reagentes (Passo 2, da Figura 8). Para conseguir a fase cristalina, a moagem pode durar várias horas. Após a moagem, realiza-se a calcinação, a temperatura e tempo previstos na literatura, em forno resistivo (Passo 3, Figura 8). Durante essa etapa, ocorre a reação entre os óxidos reagentes para formar a fase cerâmica.

Figura 8 – Etapas da produção da matriz cerâmica.



Fonte: o próprio autor.

Assim, obtém-se a matriz hospedeira. Para alcançar as propriedades luminescentes, upconversion ou downconversion, a matriz cerâmica deve ser dopada com os íons terras raras. Para isso, realiza-se o método de reação do estado sólido, a fim de sintetizar os compostos dopados a partir de quantidades estequiométricas dos óxidos trabalhados. Durante esses procedimentos, utiliza-se processos de caracterização do material, que serão detalhados nas próximas seções.

3.2 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Para a caracterização dos materiais, usa-se técnicas microscópicas e espectroscópicas, nas quais se pode certificar os resultados realizados no laboratório durante a construção do material. Várias características estruturais são coletadas durante essas análises, o que valida em caso de relevância inovadora do produto obtido. A seguir, mostra-se os principais procedimentos a serem realizados.

3.3 DIFRAÇÃO DE RAIO X

Para as medidas de difração de raios-X, emprega-se um difratômetro. Após a obtenção das medidas de raios-X, utiliza-se o banco de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) para obtenção das microfichas, que foram utilizadas de forma comparativa para identificar as fases presentes nas amostras sintetizadas. E, através de um software para o refinamento de Rietveld com o intuito de confirmar a obtenção da fase desejada, determinar os parâmetros de rede, verificar a formação de fases secundárias e observar possíveis alterações na rede cristalina.

3.4 ANÁLISE MORFOLÓGICA – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para conseguir informações dos arranjos cristalinos de suas estruturas, o estudo morfológico superficial dos materiais é feito pela análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) na matriz e nos sistemas dopados propostos para a luminescência.

3.5 CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA

Essa caracterização é para observar a absorção ou reflexão dos fótons incidentes. No caso, verificar a relação da estrutura de banda do material. Nesse contexto, podemos exemplificar as medidas de fluorescência.

3.5.1 Medidas de fluorescência

Nesse caso, geralmente as amostras são excitadas na região próxima ao infravermelho e estudar a fluorescência na região pretendida. Basicamente, um laser é operado em um determinado comprimento de onda, e usa-se amostras do material em discos para a medição. Esse sinal, por exemplo, é coletado por um espectrofotômetro e analisados por um software apropriado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Como foi apresentado, a capacidade energética proveniente do Sol é vasta, e o seu uso está em plena expansão. E ainda conforme o exposto nesse artigo, a aplicação de materiais com propriedades luminescentes em células solares, tendem a beneficiar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. É um campo que está em crescente desenvolvimento das pesquisas acadêmicas. Dessa forma, esses materiais são considerados inovadores para captação de luz, convertendo para as faixas que mais energéticas que interessam as células solares. Desse modo, melhoram o desempenho das

células fotovoltaicas e aumentam a eficiência quântica através da capacidade de alguns íons absorverem essa energia do Sol que vem em diferentes comprimentos de onda e são convertidos pelo material luminescente projetado. Portanto, os materiais dopados com terras raras, apresentam propriedades luminescentes (*upconversion* ou *downconversion*) que proporcionam na célula solar economia e alto desempenho através da conversão espectral. Por isso, a criação desses compostos estão sendo promissores em células solares.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Ceará, ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, também à CAPES pela concessão de bolsas.

REFERÊNCIAS

AL-SHAHRI, Omar A. *et al.* Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, p. 125465, 2020.

CALLISTER Jr., William D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Editora LTC Rios de Janeiro 2016.

CARRILLO, A. Herrera. **Propriedades espectroscópicas e estruturais de vidros de óxido de metais pesados dopados com íons Sm³⁺ e Pr³⁺ efeito de altas pressões e da incorporação de nanopartículas de ouro**. [S.N.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

DE MAYRINCK, Caroline *et al.* Downconversion and upconversion observed from Er³⁺/Yb³⁺/Eu³⁺ tri-doped-Y₂O₃ for application in energy conversion. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 816, p. 152591, 2020.

DOS SANTOS, Rodrigo Basilio; MARTINS, Victor Rezende; DE SOUSA BORGES, Rodolfo Rodrigues. Sistema de energia solar a partir de células fotovoltaicas: Estacionamento solar do Centro Universitário Unievangélica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 20097-20106, 2020.

GAO, D. *et al.* Yb³⁺/Er³⁺ codoped β -NaYF₄ microrods: Synthesis and tuning of multicolor upconversion. **Journal of Alloys and Compounds**, [s.l.], v. 554, p. 395–399, 2013.

HÄNNINEN, Pekka; HÄRMÄ, Harri (Ed.). Lanthanide luminescence: photophysical, analytical and biological aspects. **Springer Science & Business Media**, 2011.

HUANG, Xiaoyong *et al.* Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. **Chemical Society Reviews**, v. 42, n. 1, p. 173-201, 2013.

KRISHNAN, R. Synthesis and Luminescence Properties of Rare-Earth Doped Molybdate Micro/Nanostructures for Display Applications. [S.N.] B.S.Abdur Rahman University, 2015.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

Nascimento, João Paulo Costa do. **Análise das características elétricas e fluorescentes da matriz cerâmica ortoniobato de lantânio (LaNbO₄) co-dopada com íons terras raras praseodímio e itérbio**. 2019. 108. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

RAPHAEL, Ellen *et al.* Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova**, v. 41, n. 1, p. 61-74, 2018.

RICHARDS, Bryce S. **Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Down-conversion**. Solar energy materials and solar cells, v. 90, n. 9, p. 1189-1207, 2006.

RONDA, Cornelis R. **Luminescence from theory to applications**. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2008.

SANTOS, A. C. DE MELLO. **Mecanismo de emissão luminescente nos cintiladores de BaY2F8 dopado com terras raras**. [S.N.] Universidade Federal de Sergipe, 2013.

SHALAV, A.; RICHARDS, B. S.; GREEN, M. A. **Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Up-conversion**. Solar energy materials and solar cells, v. 91, n. 9, p. 829-842, 2007.

SILVA, Queli Priscilla Souza. **Influência da temperatura nas propriedades luminescentes de pós de SrF₂ dopados com Er³⁺ preparados via síntese por combustão**. [S.N.] Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2014.

SMART, L. E.; MOORE, E. A. **Solid State Chemistry: An Introduction**. 4. ed. [S.L.] CRC Press, 2012.

SONG, S. A. *et al.* Upconversion in Nd-Tm-Yb triply doped oxyfluoride glass-ceramics containing CaF₂ nanocrystals. **Journal of Luminescence**, [s.l], v. 152, p. 75–78, 2014.

SOUZA, A. P. S. **Produção e caracterização de células solares fotossensibilizadas por corante baseadas em filmes finos de titanatos e óxidos metálicos nanoestruturados**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Centro do Ciências, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 122. 2019.

VAN SARK, WGJHM; MEIJERINK, A.; SCHROPP, R. E. I. **Solar spectrum conversion for photovoltaics using nanoparticles**. Third generation photovoltaics, p. 1-28, 2012.