



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

JANSEN FELIX DOS ANJOS

**A LOCALIZAÇÃO DA LUZ: UM CAMINHO PARA O
DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS FOTÔNICOS AVANÇADOS**

ARARUNA, PB
2019

JANSEN FELIX DOS ANJOS

**A LOCALIZAÇÃO DA LUZ: UM CAMINHO PARA O
DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS FOTÔNICOS AVANÇADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física.

Orientador: Prof. Dr. Mário César Soares Xavier.

ARARUNA, PB
2019

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A583I Anjos, Jansen Felix dos.

A localização da luz: um caminho para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos avançados [manuscrito] / Jansen Felix dos Anjos. - 2019.

35 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2019.

"Orientação : Prof. Dr. Mário César Soares Xavier , Coordenação do Curso de Física - CCTS."

1. Nanopartículas de TiO₂. 2. Localização de Anderson. 3. Localização da luz. I. Título

21. ed. CDD 530.7

JANSEN FELIX DOS ANJOS

A LOCALIZAÇÃO DA LUZ: UM CAMINHO PARA O DESENVOLVIMENTO DE
DISPOSITIVOS FOTÔNICO AVANÇADOS

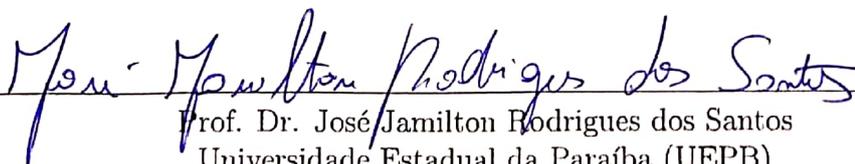
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação /Departamento do Curso de Graduação em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovada em: 06 de Dezembro de 2019.

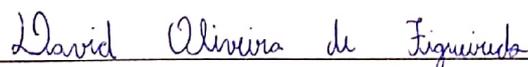
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário César Soares Xavier - Orientador
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. José Jamilton Rodrigues dos Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. David Oliveira de Figueiredo
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

À minha mãe Maria do socorro, pelo o exemplo de mulher, mãe e esposa que mostra ser. Ao meu pai Juscelino pela a força, carinho e investimento nos meus estudos. A minha esposa Alyne, por acredita em mim, pelo o incentivo, amor e carinho. E em especial a minha filha Maria Laura por ser a minha fonte de força. E a toda minha família, meus irmãos e sobrinhos.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

Charles Chaplin

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	PONTO QUÂNTICO	11
2.1	Classificação dos Pontos Quânticos	12
2.2	Pontos Quânticos binário	12
2.3	Propriedades óticas	14
3	LOCALIZAÇÃO DE ANDERSON	15
4	TEORIA DAS MATRIZES ALEATÓRIAS	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
5.1	Revestimento da Sílica	19
5.1.1	<i>Metodologia</i>	19
5.1.2	<i>Matérias utilizados</i>	20
5.1.3	<i>Limpezas dos materiais</i>	20
5.1.4	<i>Pesagem</i>	21
5.1.5	<i>Mistura</i>	22
5.1.6	<i>Secagem</i>	23
5.1.7	<i>Caracterização pelo grupo de pesquisa da UEPB</i>	24
5.2	Simulação Teórica	25
5.2.1	<i>Metodologia</i>	26
5.2.2	<i>Resultados</i>	26
6	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

A LOCALIZAÇÃO DA LUZ UM CAMINHO PARA O DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS FOTÔNICOS AVANÇADOS

Jansen Felix dos Anjos ¹

RESUMO

A observação direta da localização da luz tem comprovado ser muito difícil; vários trabalhos têm sido publicados, mas questionadas, primeiramente por oponentes e depois refutados por seus próprios autores. A absorção residual ou fenômenos não-lineares podem levar a uma diminuição do comprimento de coerência dos fótons, dificultando os efeitos de interferências as (localização), diante disto, neste trabalho é apresentado todo um processo da produção experimental da síntese das nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2) revestidas com uma camada de aproximadamente 40 nm de sílica pelo método Stöber, e uma simulação teórica, realizada através da teoria de matriz aleatória, onde concorda satisfatoriamente com os resultados experimentais Realizadas por Xavier e colaboradores, no trabalho “Localization of light: beginning of a new optics” (JIMENEZ *et al.*, 2018), mostrando em sua abordagem os fenômenos de transporte de luz em um meio óptico fortemente desordenado composto por nanopartículas de núcleo-casca ($TiO_2@Silica$) suspenso em solução de etanol, que mostram um transporte difusivo para uma localização regime de transição conforme a concentração de nanopartículas de $TiO_2@Silica$ é aumentada. Um fenômeno notável de reforço absorção, principalmente perto da borda de entrada, surge na transição de localização, da qual um aumento do índice de refração foi inferido (XAVIER, 2018). Um aumento da densidade de estados localizados e absorção perto da borda de entrada é relatado quando o ângulo de incidência é aumentado. A reflexão especular, medida para os fótons que entram na amostra, é consideravelmente inferior à efetiva reflexão interna sofrida pelos fótons coerentemente retro difundidos direção oposta, indicando uma propagação não recíproca da luz (quebra de paridade-simetria)(XAVIER, 2018).

Palavras chaves: nanopartículas de TiO_2 . localização de Anderson. localização da luz.

ABSTRACT

Direct observation of the location of light has proven to be very difficult; Several works have been published but questioned, first by opponents and later refuted by their own authors. Residual absorption or nonlinear phenomena can lead to a reduction in the coherence length of photons, making it difficult to interfere with (localization) effects. In this work, a whole process of experimental production of the synthesis of carbon dioxide nanoparticles is presented. *titanium*(TiO_2) coated with an approximately 40

¹Aluno de Graduação em Física pela Universidade Estadual da Paraíba – Campus VIII
E-mail: jansen.felix.edu@gmail.com

nm layer of silica by the Stöber method, and a theoretical simulation performed using the random matrix theory, where it satisfactorily agrees with the experimental results by Xavier et al. “Localization of light: beginning of a new optics” (JIMENEZ et al., 2018), showing in his approach the phenomena of light transport in a strongly disordered optical medium composed of shell-core nanoparticles (*TiO₂@Silica*) suspended in ethanol solution, which show a diffusive transport to a transition regime location as per *TiO₂@Silica* nanoparticle concentration is increased. A remarkable phenomenon of reinforcement absorption, especially near the inlet edge, arises in the localization transition, from which an increase in refractive index was inferred (XAVIER, 2018). An increase in localized state density and absorption near the inlet border is reported when the incidence angle is increased. Specular reflection, measured for the incoming photons, is considerably lower than the effective internal reflection suffered by coherently retro photons diffused in the opposite direction, indicating non-reciprocal light propagation (parity-symmetry break) (XAVIER, 2018).

Keywords: *TiO₂* nanoparticles. Anderson’s location. light’s location.

1 INTRODUÇÃO

A observação direta da localização da luz tem comprovado ser muito difícil; várias trabalhos têm sido publicadas, mas questionadas, primeiramente por oponentes e depois refutadas por seus próprios autores. A absorção residual ou fenômenos não-lineares podem levar a uma diminuição do comprimento de coerência dos fótons, dificultando os efeitos de interferências (localização)(JIMENEZ *et al.*, 2018). De acordo com o recente resultado teórico de Skipetrov e Sokolov (2014), o acoplamento de campo próximo pode dificultar a localização da luz. Além disso, em um trabalho subsequente, Escalante e Skipetrov mostraram que uma estrutura core-shell poderia ser uma estratégia promissora para alcançar a localização da luz em 3D. Recentemente, foi demonstrado um efeito de intensificação da absorção quando o sistema se aproxima da localização. Uma intensificação da localização e absorção perto da borda de entrada da amostra também foram observadas à medida que o ângulo de incidência é aumentado (JIMENEZ *et al.*, 2018).

Na área da Ciência em sistemas mesoscópicos O prefixo "meso", do grego, significa intermediário, indicando que a escala de comprimento de uma estrutura mesoscópica deve estar entre o macroscópico e o microscópico, um dos importantes estudos e observações é realizado com partículas nanométricas, ou seja, da ordem de $10^{-9}m$, são partículas minúsculas, mas de grande interesse e eficiência para o avanço tecnológico em sistema mesoscópicos. Estudos com nanopartículas vêm sendo desenvolvidas na área científica que, de modo geral, é observado um grande interesse em meios desordenados nestes últimos anos (DANTAS, 2018), desta forma, pesquisas são cada vez mais introduzidas nas áreas de laser aleatório (Random Laser) (LEONETTI; LOPEZ, 2011), (CAO *et al.*, 2000), em células fotovoltaicas (GENOVESE; LIGHTCAP; KAMAT, 2012), (KIM *et al.*, 2012), fotocatalisadores (AWAZU *et al.*, 2008), em cosméticos, pinturas (tintas), e entre outros meios de estudos desenvolvidos na área de dispositivos ópticos (TANABE *et al.*, 2005)(ABDERRAFI *et al.*, 2012).

A localização da luz de Anderson e os fenômenos associados a esta, é outro estudo que tem atraído a atenção dos pesquisadores nas últimas décadas. Vários experimentos pioneiros que estudaram a transmissão de ondas eletromagnéticas através de meios óticos fortemente desordenados reivindicaram a observação da localização da luz.

Diante disto, este trabalho será apresentado todo um processo da produção experimental da síntese das nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2) revestidas com uma camada de aproximadamente 40 nm de sílica pelo método stöber, e uma simulação teórica, realizada através da teoria das matrizes aleatórias, onde será comparado com os resultados experimentais Realizadas por Xavier e colaboradores, no trabalho "Localization

of light: beginning of a new optics”. (JIMENEZ *et al.*, 2018)

Com o método de Stöber (ABDERRAFI *et al.*, 2018), as nanopartículas de TiO_2 foram revestidas com sílica homogênea, a fim de eliminar os resíduos do produto químico síntese e, conseqüentemente, reduzir a absorção residual, os processos subsequentes de diálise e centrifugação realizado.

A estratégia core-shell TiO_2 @Sílica como um meio espalhador (em suspensão coloidal) é algo extremamente novo na literatura. A camada de sílica irá atuar como um estabilizador de densidade que, juntamente com as nanopartículas de TiO_2 ocorrerá um equilíbrio na densidade e com isso uma melhor estabilidade coloidal acontecerá, não causando assim, portanto, precipitações; outro fator bastante interessante é que no processo, uma barreira dielétrica é formada evitando a transferência de cargas elétricas da superfície das nanopartículas para o meio externo, conseqüentemente ocasionando a fotodegradação. (DANTAS, 2018)

O revestimento de sílica com espessuras ao redor ou acima de $40nm$ impede a junção “ótica” do TiO_2 superfícies de espalhamento (efeito “óptico” estérico) (XAVIER, 2018), diminuindo o acoplamento de campo próximo que poderia dificultar a localização (JIMENEZ *et al.*, 2018), nos chamado de propriedade de estabilidade coloidal óptica (JIMENEZ *et al.*, 2013).

2 PONTO QUÂNTICO

Com o desenvolvimento das técnicas da micronização de dispositivos, uma variedade de novos sistemas vem surgindo, cujas as dimensões estão por volta de milhares de nanômetros. Assim, sistemas quânticos que ao mesmo tempo pareciam meramente acadêmicos, como os problemas de tunelamento através de uma ou duas barreiras, hoje em dia são produzidos frequentemente nos laboratórios. Nessa linha de pensamento, uma definição quântica dos fenômenos físicos torna-se fundamental para envolver propriedades como o transporte elétrico (COHEN; DIU; LALOE, 1977).

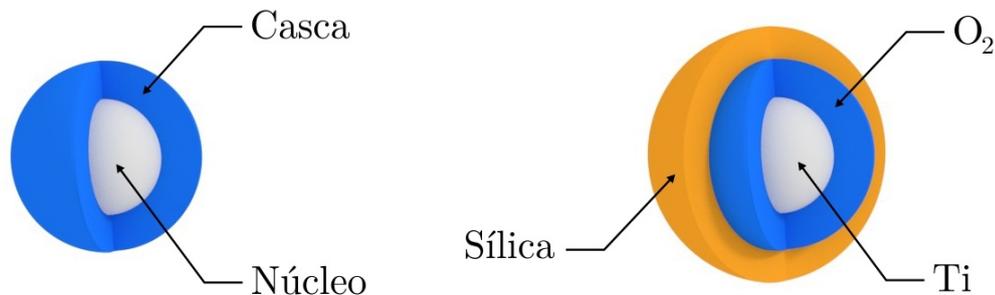
Em específico, um sistema nanoscópico que vem recebendo crescente atenção e constituído de reservatórios de elétrons (terminais) acoplados, via barreiras de tunelamento, a um sistema de dimensão zero (ponto quântico), isto é, que confina os elétrons nas três direções espaciais (KOUWENHOVEN; MARCUS, 1998). São formas distintas de se produzir um ponto quântico. Por exemplo, pelo meio de técnicas litográficas pode-se pôr eletrodos metálicos sobre uma superfície semicondutora sob a qual reside um gás de elétrons bidimensional. Ao se aplicar tensões negativas nesses contatos, o gás de elétrons se repele, deixando uma região vazia de transportadores que corresponde ao ponto quântico

(MEIRAV; KASTNER; WIND, 1990).

2.1 Classificação dos Pontos Quânticos

Os pontos quânticos, vem do inglês quantum dots (QDs), são partículas semicondutoras nanometricamente pequenas e fluorescentes, onde no caso binários (constituída por dois elementos químicos) formado por um núcleo (*core*) de um semicondutor com um nível gap de energia, recoberto por uma casca (*shell*) de outro semicondutor de outro nível gap de energia, como ilustra a figura 1 a, estrutura núcleo casca, para a nossa estrutura da nanopartícula de $TiO_2@Sílica$ é ilustrada a figura 1 b.

Figura 1: a) Estrutura núcleo casca, b) estrutura $TiO_2@Sílica$.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Os pontos quânticos podem ser classificados quanto ao número e à família química dos elementos presentes em sua composição: o que contém um único elemento, são tipicamente são feitos de um elemento isolante ou semicondutor, como carbono (quase sempre ligados a hidrogênio), silício, germânio e fósforo (ZHANG *et al.*, 2015). Os binários (contém dois elementos), podem ser classificados nos tipos II-VI, III-V e IV-VI, de acordo com a família química a qual competem seus elementos constituintes, o que utilizamos nesse trabalho é da família IV-VI, composto pelo Ti (titânio) família 4B e O (oxigênio) família 6A, apesar das nanopartículas de $TiO_2@Sílica$ possuírem 3 elementos, não se encaixa na composição ternária, pois a sílica e adicionada ao TiO_2 não faz parte da composição inicial da partícula a sílica irá atuar como um estabilizador de densidade, não participando do ponto quânticos. Pontos quânticos também podem apresentar composição quaternária (OLIVEIRA, 2010).

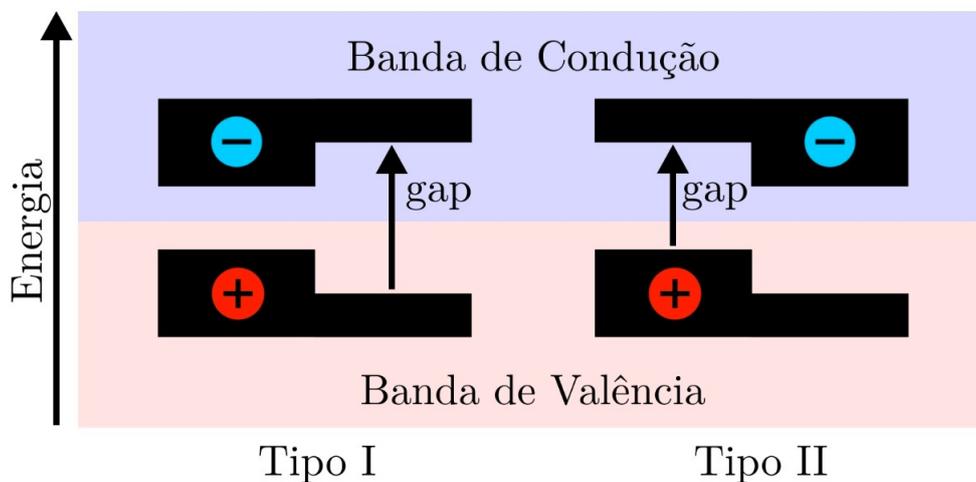
2.2 Ponto Quântico binário

Ressaltando a classificação binária, os semicondutores do tipo núcleo/casca que é

o tipo utilizado em nosso trabalho, tem um sistema que eleva o rendimento quântico de fotoluminescência, tem-se também um ganho de estabilidade dos nanocristais. Além disso, o núcleo e a casaca quando são escolhidos adequadamente permitem estender a emissão desses nanomateriais para uma ampla faixa de comprimentos de onda do espectro (HINES; GUYOT, 1996).

De acordo com o arranjo dos nanocristais e com a separação das bandas de energia, os sistemas núcleo-casca podem ser classificados em tipo I ou tipo II, conforme esquematizado na Figura 2. No primeiro caso, tem-se na casaca o semiconductor com maior band *gap*, no núcleo, o material com menor band *gap*. Como resultado, buracos e elétrons ficam fortemente confinados na região do núcleo, o que faz com que este tipo de material apresente rendimentos quânticos elevados, maior estabilidade e maior luminescência. Isso acontece pelo fato de o semiconductor da casaca separar fisicamente a superfície ativa do semiconductor do núcleo do meio reacional, o que provoca uma diminuição dos defeitos de superfície, que poderia comprometer a qualidade desses nanocristais.

Figura 2: Representação esquemática das diferenças de energia entre as bandas de valência e bandas de condução e da posição dos elétrons e buracos nas diferentes estruturas núcleo/casca do tipo I (a) e tipo II (b)



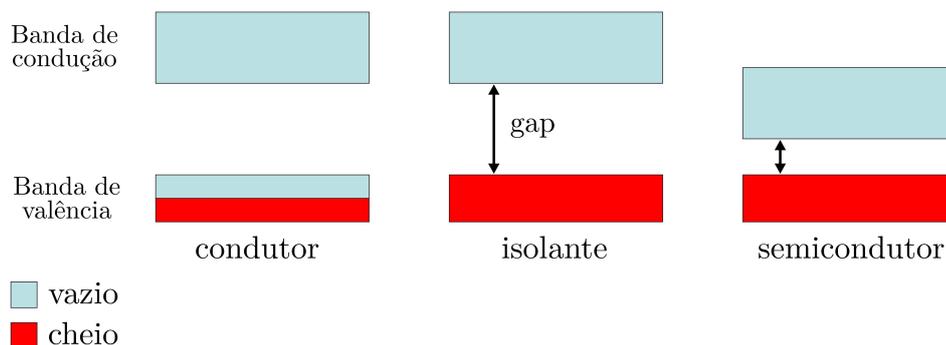
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Os sistemas núcleo-casca do tipo II são caracterizados por apresentarem uma separação espacial dos portadores de carga, uma vez que os elétrons ficam confinados na região da casaca, e os buracos, na região do núcleo, como ilustrado na Figura. O principal interesse por sistemas do tipo II é a possibilidade de se alterarem as propriedades ópticas desses materiais pela variação da espessura da casaca, o que ainda é pouco relatado para sistemas caroço-casca do tipo I (SMITH; MOHS; NIE, 2009).

2.3 Propriedades óticas

Nos semicondutores, a absorção de luz faz com que um elétron seja excitado da banda de valência para a banda de condução, deixando uma lacuna. O par elétron-lacuna é conhecido como éxciton. Quando este éxciton se recombina (o elétron retorna ao seu estado fundamental), a energia do éxciton pode ser emitida como um fóton. Este fenômeno é conhecido como fluorescência. Em um modelo simplificado, a energia do fóton emitido pode ser entendida como a diferença da energia entre o nível desocupado mais baixo da banda de condução e o nível ocupado mais alto da banda de valência como mostra a figura 3, as bandas de energia, os níveis ocupado são mostrados em vermelho e os níveis desocupados em azul. No material de um ponto quântico são usados dois semicondutores, observa-se que a absorção de energia é menor no semicondutor, do que no condutor e isolante, para que passe da banda de valência para a banda de condução, por essa razão são utilizados dois semicondutores na confecção dos pontos quânticos (ALEXANDRE; IVANO, 2017).

Figura 3: energia de *gap* para cada material.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

No ponto quântico (materiais semicondutores) a energia de confinamento para a passagem da banda de valência para a banda de condução está sujeita ao tamanho do ponto quântico, a absorção e a emissão de fluorescência podem ser modulados a partir do controle do tamanho do ponto quântico durante a síntese. Com o aumento no tamanho do ponto quântico, ocorre um desvio para o vermelho (menor energia) tanto na emissão, como na absorção de luz. Por outro lado, pontos quânticos menores absorvem e emitem luz de cor mais azul (alta energia), por esse motivo a utilização de pontos quânticos vem sendo muito utilizada, pois elas têm emissão de luz bastante específica para cada tamanho, com comprimento de onda bem definido (ALMEIDA, 2013).

3 LOCALIZAÇÃO DE ANDERSON

O estudo da condutância de elétrons pertence ao “coração” da física da matéria condensada. A condutividade eletrônica de Drude (1900) foi construída com base na ideia de que elétrons livres são espalhados por íons positivos numa rede em estrutura sólida cristalina (metal). O conceito nessa descrição era o caminho livre médio, que consistia no comprimento médio que um elétron viaja antes de colidir com um íon. De acordo com a teoria clássica, a condutividade eletrônica deve ser proporcionalmente ao caminho livre médio, que experimentalmente haviam sido estabelecido grades de metais ou seja em estrutura sólida bem estruturada (MODELO DE DRUDE, 2013).

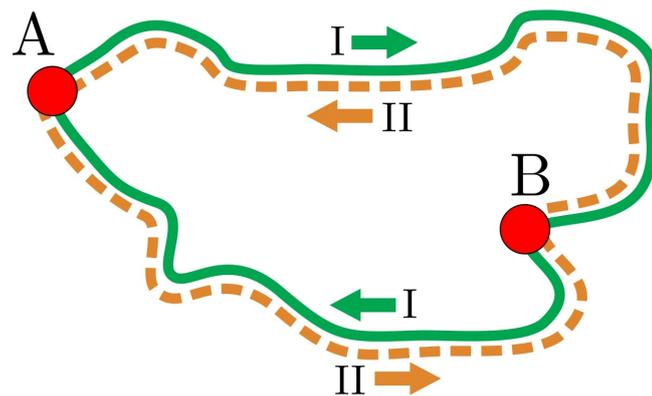
Os físicos tiveram que esperar pela descoberta de meios quânticos, técnicas para entender a condutância em estrutura sólida amorfo (composto por um arranjo de átomos ou íons de forma desordenada) e por que os elétrons aparentemente não se espalham do íons que ocupam sítios regulares de treliça: o caráter ondulatório do elétron faz com que o elétron se difracte de um cristal ideal. A resistência aparece apenas quando os elétrons se dispersam de imperfeições na estrutura cristalina (composto por um arranjo de átomos ou íons de forma periódica que segue uma ordenação). Com uma reformulação no meio quântico, o modelo Drude ainda pode ser usado, mas com uma nova imagem em que um elétron é visto como ziguezague entre as impurezas e não mais como linha reta, e quanto mais impurezas (imperfeições), menor o caminho livre médio e menor a condutividade (MODELO DO ELÉTRON LIVRE, 2017).

Qualquer aumento no grau de desordem da rede acarreta apenas uma diminuição no caminho livre médio e, portanto, uma menor condutividade, ou algo incomum pode acontecer ao longo desse caminho, Essa questão foi levantada há meio século por Philip Anderson, além de uma quantidade crítica de espalhamento nas impurezas, ele descobriu, o movimento difuso em zigue-zague do elétron onde seu movimento não é apenas reduzido, mas pode chegar a uma parada completa (ANDERSON, 1958), onde elétron fica preso e a condutividade desaparece.

Porém, se explicamos de um modo intuitivo, com a mecânica elementar das ondas, um elétron propagando-se em um meio desordenado do ponto A ao ponto B. É necessário somar todas as amplitudes de todos os caminhos possíveis e elevar ao quadrado, o resultado final dar um valor complexo para obter a total probabilidade de um elétron para chegar em B. Essa probabilidade consiste em uma soma dos termos ao quadrado - a contribuição clássica e incoerente - além de muitos termos de interferência entre produtos (ANDERSON, 1958). Ainda pode-se argumentar que em meios desordenados, nas fases da interferência os termos são tão aleatórios que sua amplitude desaparece no caminho médio. Essa suposição traz de volta à difusão modelo de condutância metálica.

Mas essa negligência de interferências nem sempre é justificada. Imagine uma onda que viaja do ponto A ao longo de um caminho para o ponto B e depois volta para A. Na figura 4, temos dois possíveis caminhos representados: um caminho escolhido aleatoriamente e o outro em sentido oposto. Os dois caminhos interferem construtivamente e deve ser tratado coerentemente – que é somado antes de ser elevado ao quadrado. A probabilidade de o elétron retornar a A é então duas vezes maior do que seria probabilidades adicionadas pela primeira quadratura e depois somando. O retroespalhamento aprimorada, conhecida como localização fraca, que reduz a condutância entre A e B, aumentando a probabilidade de o elétron retornar à sua partida ponto A (LAGENDIJK; TIGGELEN; WIERSMA, 2009). será possível eventualmente localizar o elétron em torno de A?

Figura 4: Influência da interferência dos efeitos de propagação de ondas em um meio desordenado. Se duas ondas seguem o mesmo caminho de A a B, um indo no sentido horário e no outro sentido anti-horário, eles interferem construtivamente ao retornar a A.



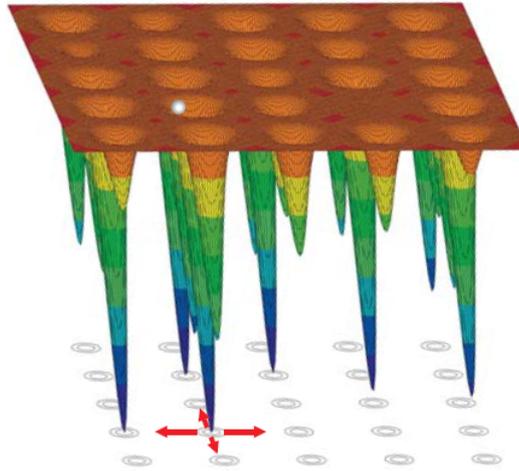
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

O conceito da localização do elétron poderia explicar a observação, mas romperia com a convencional imagem da difusão. Para explicar o efeito, Anderson usou um modelo de localização forte de um elétron em uma rede desordenada; em cada local da rede, um elétron sente um potencial aleatório, e permitido fazer um túnel entre os locais vizinhos mais próximos com uma taxa constante de barreira potencial.

Imagine um elétron(prata) pulando em uma rede bidimensional com energias potenciais em cada local, conforme a figura 5, a mecânica quântica permite que o elétron movesse de um local para outro através de grandes barreiras de energia, conforme ilustrado pelas setas vermelhas. A energia do elétron muda assim aleatoriamente, embora em cada local da rede a extensão espacial de sua função de onda (esboçado abaixo do potencial) é assumido constante, levando a uma taxa constante de tunelamento. Em um poços da mesma profundidade, o elétron seria completamente móvel para uma variedade de energias. Mas aqui, uma quantidade crítica de aleatoriedade nas profundezas do

poço localiza o elétron, embora em uma escala maior que a constante da rede. Para outra perspectiva do que ocorre como uma rede muda de perfeita para desordenada (LAGENDIJK; TIGGELEN; WIERSMA, 2009).

Figura 5: O modelo de Anderson.



Fonte: LAGENDIJK; TIGGELEN; WIERSMA (2009).

Elétrons são ondas, é claro. Mas ao invés de pensar elétrons de condução como ondas planas estendidas com curta vidas e pequenos caminhos livres médios, deve-se ver como ondas estacionárias confinadas no espaço e, portanto, tem vidas longas. Além disso, não apenas um ou dois elétrons estão localizados por um poço aleatório no estado da energia potencial; quase todos os elétrons de condução ficam localizados em conjunto (LAGENDIJK; TIGGELEN; WIERSMA, 2009).

O modelo de Anderson inaugurou uma nova visão mecânica quântica das transições metal-isolador. No início 1960 Nevill Mott introduziu a noção de uma vantagem de mobilidade que separa estados estendidos e localizados. Elétrons com grandes energias - e correspondentemente pequenos comprimentos de onda de Broglie comportar-se convencionalmente e apoiar um sistema eletrônico atual, argumentou Mott. Mas elétrons com energias próximas à borda da banda, com comprimentos de onda de Broglie correspondentemente grandes, seria localizado. A ideia de uma vantagem de mobilidade evoluiria para um dos conceitos mais estudados de Física de matéria condensada. Por seu trabalho em sistemas desordenados, Anderson, e seu orientador de tese, John van Vleck, e Mott, compartilhou o Prêmio Nobel de 1977 em Física (LAGENDIJK; TIGGELEN; WIERSMA, 2009).

4 TEORIA DAS MATRIZES ALEATÓRIAS

Com o descobrimento de uma relação entre as propriedades universais de grandes matrizes aleatórias e as flutuações da condutância em condutores desordenados trouxe consigo o desenvolvimento de uma teoria de matriz aleatória para tratar o transporte quântico (SPERLING *et al.*, 2016), (MIRLIN, 1997). Onde tem visto um novo surgimento da importância nas décadas passadas, tendo sido aplicada em vários fenômenos físicos (FUERTES, 2011), (RODRÍGUES *et al.*, 2005). Na física atômica, Wigner mostrou que as propriedades de um núcleo atômico dependem da amostra de maneira aparentemente aleatória. Apesar da aleatoriedade, Wigner percebeu que, em sistemas quânticos genéricos, as propriedades estatísticas como a média e a variância são universais, isto é, essas quantidades dependem de simetrias fundamentais. Por sua vez, Wigner inferiu que, apesar da aleatoriedade dos hamiltonianos H , estes obedecem a relações de simetria ligadas às simetrias de inversão temporal e rotação de spin. Os sistemas quânticos abertos podem ser descritivos por matrizes de dispersão S relacionadas ao hamiltoniano na região de dispersão através da fórmula Mahaux-Weidenmuller (XAVIER, 2018). Equação 1.

$$S = 2\pi W(E - H - i\pi W^\dagger W)^{-1} W^\dagger \quad (1)$$

A matriz S vincula os canais de entrada e saída, portanto tem uma dimensão igual ao número total de canais. A matriz H tem uma dimensão igual ao número de ressonâncias na região de dispersão. O número de ressonâncias está diretamente relacionado ao tamanho da região de espalhamento. A matriz W liga canais abertos às ressonâncias. Assim, a matriz W revela o acoplamento ou as taxas de tunelamento entre as duas regiões diferentes no espaço de coordenadas. Por sua vez, a matriz de dispersão pode ser escrita em termos de sub-blocos de transmissão t e reflexão r . Observe que, as três simetrias fundamentais, incorporadas no hamiltoniano, que identificam (i) sistemas com inversão temporal (conjunto ortogonal gaussiano), (ii) sistemas sem inversão temporal (conjunto unitário gaussiano) e (iii) sistemas sem rotação de spin (ensemble simplético gaussiano) também está diretamente identificada na matriz de dispersão (XAVIER, 2018). As propriedades de transporte podem ser obtidas através do bloco de transmissão t da matriz S , de modo que a condutância seja escrita como:

$$g = \text{tr}(tt^\dagger) \quad (2)$$

Desta forma, a condutância pertence a um dos três conjuntos de Wigner-Dyson. Nesta trabalho, usamos um conjunto com várias realizações do hamiltoniano H , mostrando que a simulação teórica concorda muito bem com os resultados experimentais do trabalho

de Xavier e colaboradores (XAVIER, 2018) , o que revela que os sistemas óticos desordenados também são universais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, mostraremos o procedimento da síntese nanopartículas e as simulações teórica.

5.1 Revestimento da Sílica

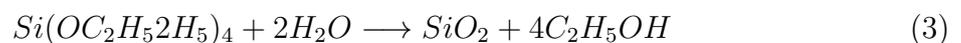
Em parceria com o laboratório de química analítica da UFPB coordenado pelo Prof. Dr. Mario César Ugulino de Araújo, realizamos o processo da produção da nanopartículas de $TiO_2@Sílica$.

5.1.1 Metodologia

O revestimento das nanopartículas com a camada de sílica foi feito através do método de Stöber (ABDERRAFI *et al*), usando o composto químico Tetra-ethyl-ortho-silicate (*TEOS*) $Si(OC_2H_5)_4$.

Como o *TEOS* é um líquido incolor que se degrada na água e que é usado principalmente como um agente de reticulação em polímeros de silicone, ele é considerado como o precursor do dióxido de silício, bastante utilizado nas indústrias de semicondutores, sendo usado também na produção de aerogel (TETRAETHYL ORTHOSILICATE, 2019).

O *TEOS* facilmente se converte em dióxido de silício após a reação com moléculas de água:



Esta é uma reação de hidrólise em que o produto secundário é o etanol. O processo acontece através de uma série de reações de condensação que convertem a molécula do *TEOS* num sólido semelhante a um mineral através da formação de ligações $Si-O-Si$ [2]. Como, na preparação das nanopartículas de $TiO_2@Sílica$ o solvente utilizado é o etanol, logo, após a reação do *TEOS* com as moléculas da pequena porção de água existente desse solvente que estão nas proximidades da superfície das nanopartículas, a reação final da hidrólise é justamente o solvente presente na solução, o próprio Etanol. Este processo é o fundamental no revestimento das nanopartículas (DANTAS, 2018).

5.1.2 *Materiais utilizado*

Para o revestimentos das nanopartículas de TiO_2 utilizamos os seguintes materiais:

- Etanol Espectroscópico (C_2H_5OH) – (líquido);
- Nanopartículas de TiO_2 (em pó);
- Hidróxido de Amônio – NH_4OH (líquido);
- Tetra-ethyl-ortho-silicate ($TEOS$) – precursor da Sílica;
- Água Destilada;
- Ultrassônico;
- Evaporador Rotativo e Destilador;
- Estufa;
- Balança de Precisão;
- Agitador Magnético;
- Utensílios de Laboratório.

5.1.3 *Limpeza dos materiais*

Inicialmente lavamos com sabão e água corrente os frasco para retiradas das impurezas mais grosseiras, logo após foram adicionada água destiladas, e deixado no ultrassom por cerca de 30 minutos como ilustra a figura 6, para fazer uma misturas homogêneas onde se tiver qualquer tipo de impureza grudada na parede do vidro irá solta, após os 30 minutos foi retirada a água e adicionada um pouco de etanol nos vidros e tirado logo em seguida e colocado os frascos para secar.

Figura 6: Vidraria no ultrassom para a limpeza de impurezas.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

5.1.4 *Pesagem*

Foi necessário de 10 gramas do *TEOS*, como a densidade do reagente é 0,9335 g/ml, foi necessário utilizar o cálculo de densidade.

$$d = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Portanto com a utilização da equação (04), a quantidade necessária para obter as 10 gramas de *TEOS* foi de 10,71 gramas do reagente, após a medição foi colocado para refrigerar por alguns minutos.

Com a pesagem do Hidróxido de Amônia (NH_4OH), foi feito o mesmo processo utilizando a equação (04), como o hidróxido de amônia tem a densidade de 0,89 g/ml, para obter 22 gramas do hidróxido da amônia pesamos 24,7 gramas de reagente.

O hidróxido de amônio é um composto altamente volátil, incolor, de cheiro amargo e fortemente penetrante, se decompõe a temperaturas a partir de $450^{\circ}C$ e liberam os gases hidrogênio e nitrogênio, tóxico, corrosivo, sensível ao calor e incompatível com vários tipos de substâncias como, por exemplo, ácidos, oxidantes fortes, peróxidos, acroleína, aldeído acético, hidrazina, ferrocianeto de potássio e grande parte dos metais. A vantagem de utilizarmos o hidróxido de amônio no experimento é devido a sua rápida reação com o meio. Essa substância é um produto da ionização da amônia e, por isso, existe somente em solução aquosa (base solúvel), como na reação 5 (RIBEIRO, 2019):



Podemos perceber que após a reação do hidróxido de amônio, uma certa quantidade de gás amônia (NH_3) é liberada juntamente com um porção de água. Essa porção de água irá se deslocar para as proximidades da superfície das nanopartículas devido ao potencial elétrico gerado por elas. Como visto anteriormente, essas moléculas de água irão reagir com o *TEOS* para formar a camada de sílica em torno das nanopartículas de TiO_2 .

5.1.5 *Mistura*

Para a mistura utilizamos um recipiente de 500 ml vedado após a colocação de 7,8 gramas de óxido de titânio TiO_2 (em pó) e 500 gramas de etanol, ficando mergulhado na água destilada no ultrassônico por vinte minutos, em seguida colocamos 10 alíquotas de $440\mu l$ do hidróxido da amônia (para ter um aumento do pH, onde haverá uma maior dispersão das nanopartículas na solução), com o auxílio de duas pipetas foram adicionados uma quantidade de 100 alíquotas de $440\mu l$ de amônia e 100 alíquotas de $220\mu l$ de *TEOS* no recipiente simultaneamente, adicionados todos os reagentes o recipiente permanece mergulhado na água destilada como mostra a figura 7, e com o intervalo de 1 hora havia o processo de agitar o recipiente, fazendo esse processo no mínimo 5 vezes (quanto maior o tempo no ultrassônico a uma maior dispersão na amostra, ou seja, com menos precipitação).

Figura 7: Erlenmeyer mergulhados no Ultrassônico.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Depois de terminado todo o procedimento citado acima, as nanopartículas de TiO_2 já estavam recobertas com a camada de sílica, pois, quando adicionamos o hidróxido de amônio junto do *TEOS* como no processo dito anteriormente, a reação aos arredores da superfície das nanopartículas ($410nm$ de diâmetro) acontecem quase que instantaneamente. Esse fenômeno ocorre devido às reações químicas envolvendo o *TEOS* e o hidróxido de amônio, e em conjunto com as propriedades elétricas e potenciais das nanopartículas.

5.1.6 *Secagem*

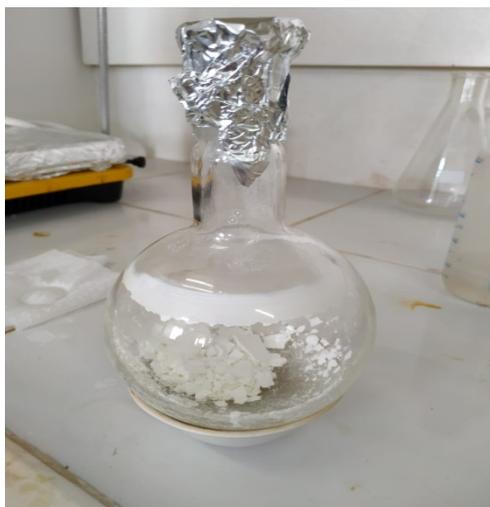
Depois de terminada a mistura apresentada acima, a amostra foi tirada do Ultrassônico e levada para um evaporador para ser destilada do Etanol, onde ligamos o evaporizador com temperatura de 60°C , 115 rpm e uma pressão suficiente para prender o frasco com a solução. Este processo foi utilizado para separar as nanopartículas o etanol e o gás amônia, conforme podemos observar na figura (8) o processo de rotaevaporação e na figura (9) o resultado final desta etapa, em que são liberados pelo o processo de rotaevaporação. Fizemos todo esse procedimento para obtermos somente as nanopartículas em pó.

Figura 8: Processo de rotaevaporação da amostra, obtendo somente as nanopartículas de TiO_2 .



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 9: Processo final da rotaevaporação da amostra.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Encerrado o procedimento anterior da rotaevaporação das amostras, logo em seguida colocamos todo o pó que obtivemos no final do processo em uma estufa (nanopartículas de TiO_2 já revestidas com uma camada de sílica). A temperatura de aquecimento foi de aproximadamente $100^\circ C$ num período de 24 horas, para eliminarmos toda a humidade que ainda existia entre as nanopartículas. Como mostra na figura (10) a nanopartícula em pó.

Figura 10: Nanopartículas de $TiO_2@Sílica$.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

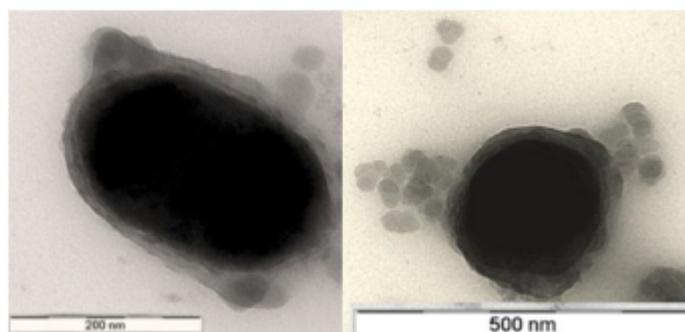
Obtivemos uma quantidade de 10 gramas de nanopartículas já prontas para as análises.

5.1.7 *Caracterização pelo grupo de pesquisa da UEPB*

As nanopartículas após estarem prontas foram caracterizadas em um trabalho posterior pelo grupo de pesquisa da UFPB, composta pelo Ernesto Villar e colaboradores. Essas nanopartículas posteriormente renderam um artigo publicado na revista Nanoscale

no ano de 2016, com o título “Anderson localization of light in a colloidal suspension ($TiO_2@S\acute{il}ica$)” (JIMENEZ *et al.*, 2016), em que se tratando de uma determinada concentração específica de nanoprticulas, efeitos de interferências eram observados, chegando a um regime de localização da luz num dada região no interior da amostra. Essas nanoprticulas foram examinadas por: Microscopia Eletrnica de Transmissão (TEM), por espectroscopia de perda de energia de elétrons (EELS), e também por energia dispersiva de fluorescência de raios-X (ED-XRF). A microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e a espectroscopia de perda de energia de elétrons (EELS) foram realizadas em um microscópio eletrônico de transmissão Carl Zeiss Libra de 120 kV. Para a caracterização de ED-XRF, 200 mg da amostra seca em p ($TiO_2@S\acute{il}ica$) foram prensados numa forma de comprimido com um diâmetro de 12 mm . A relação percentual de massa (Ti/Si) do p da amostra já estando seca (nanoprticulas de ($TiO_2@S\acute{il}ica$) e que foi determinada por ED-XRF, foi de Ti_{72}/Si_{28} , que representa uma espessura média da camada de sílica de aproximadamente $42nm$ (JIMENEZ *et al.*, 2016). A figura 11 apresenta as imagens feitas pela TEM:

Figura 11: Imagens da TEM demonstraram uma homogeneidade no revestimento da camada de sílica sobre as nanoprticulas de TiO_2 .



Fonte: JIMENEZ *et al* (2016).

Na realização da síntese, desenvolvida no Laboratório de Automação e Instrumentação em Química Analítica e Quimiometria – (LAQA) da Universidade Federal da Paraíba–UFPB, conseguiram um bom aproveitamento das amostras e um bom desempenho na aprendizagem de como realizar todo o procedimento experimental. As nanoprticulas de dióxido de titânio (TiO_2) tiveram um bom aspecto, por isso concluíram que a síntese foi um sucesso e que toda a sua superfície estava totalmente recoberta pela camada de Sílica. Desta forma, a reação química foi realizada quase que instantaneamente entre o hidróxido de amônio e o $TEOS$ aos arredores das nanoprticulas.

5.2 Simulaoes Teóricas

Nessa sessão apresentamos as simulaoes Teóricas usando Teoria de Matrizes Aleatórias que comprovaram os resultados experimentais obtidos no trabalho Anomalous

transport of light at the phase transition to localization: Strong dependence with incident angle de Xavier e colaboradores.

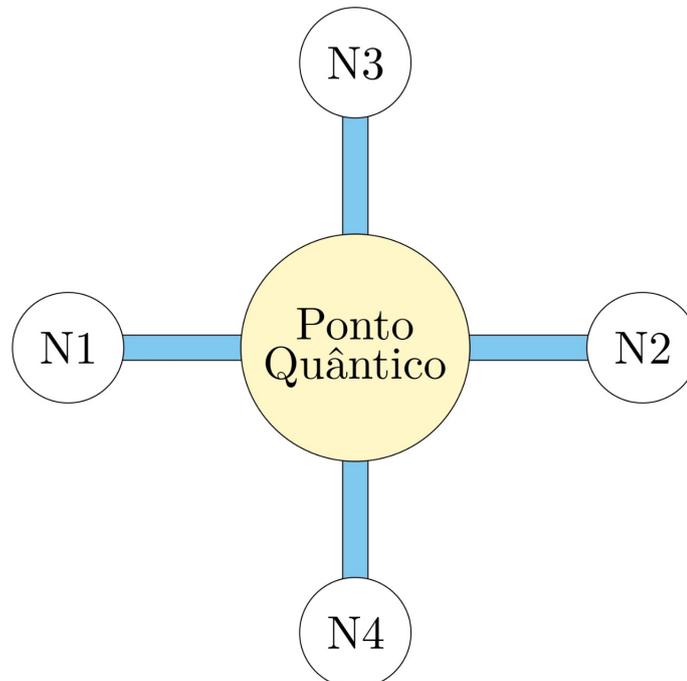
5.2.1 Metodologia

Realizamos uma simulação teórica com um ensemble de Hamiltonianos $N = 5.10^5$. Para simular as condições experimentais (laser He-Ne), consideramos uma única energia por terminal. A condutância g é calculada como uma função da reflexão interna efetiva sentida pelos fótons retroespalhados de forma coerente (terminal de retroespalhamento). Simulamos um ensemble ortogonal universal (com simetria de reversão temporal) e um ensemble unitário (sem simetria de reversão temporal). Sabe-se que, sistemas sem simetria de inversão temporal não conduzem à interferência quântica, de modo que a única contribuição significativa são os caminhos clássicos, também conhecidos como difusões.

5.2.2 Resultados

Consideramos a geometria chamada "ponto quântico" com três contatos pontuais que o conectam três reservatórios de fótons: primeiro (N_1), terminal de entrada; segundo (N_2), terminal de transmissão e terceiro (N_3), terminal de retroespalhamento, figura 12.

Figura 12: Esquema para simular o processo experimental.



Fonte:Elaborada pelo autor, 2019.

Para simular o tamanho da região de dispersão, usamos uma série de ressonâncias, que é proporcional a esse tamanho. Consideramos que a reflexão nos contatos do ponto

de entrada (IR_1) e transmissão (IR_2) são iguais zero ($IR_1 = IR_2 = 0$), isto é, não há reflexão apreciável na interface de entrada e saída. Supomos duas diferentes reflexões internas efetivas no terminal de retroespalhamento (N_3); uma reflexão interna efetiva para os fótons retroespalhados de forma coerente (fótons previamente localizados) no N_3 , IR_{3L} e outra reflexão interna para fótons retroespalhados incoerentemente (fótons não localizados) no N_4 , IR_{3D} . Para os fótons retroespalhados incoerentemente, a reflexão interna na interface amostra-sílica pode ser negligenciada ($IR_{3D} \approx 0$), devido ao baixo contraste entre os índices de refração (1.53 - 1.46). Para cada reflexão interna efetiva IR_{3L} (terminal de retroespalhamento), calculamos a condutância desde N_1 para N_2 como função do número de ressonâncias através da (equação 6). Para esse fim, tomamos em consideração a presença (ensemble ortogonal de Gauss (EOG)) ou ausência (ensemble gaussiano unitário (EGU)) de simetria de reversão temporal (SRT).

$$\langle g \rangle_{1-2}(IR_{3L}) = \langle g \rangle_{EOG}(IR_{3L}) - \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3L}) + \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3D} = 0) \quad (6)$$

Os termos $\langle g \rangle_{EOG}(IR_{3L})$, $\langle g \rangle_{EGU}(IR_{3L})$ e $\langle g \rangle_{EGU}(IR_{3D} = 0)$ representam a condutância desde N_1 para N_2 tendo em conta, a presença de SRT (IR_{3L}), ausência de SRT (IR_{3L}) e ausência de SRT com (IR_{3D}) = 0, respectivamente. O símbolo $\langle \cdot \rangle$ indica a média dos ensembles universais.

Para simular cada média de condutância específica ou seja de $\langle g \rangle_{EOG}$ e $\langle g \rangle_{EGU}$ foi utilizado um software computacional chamado MATLAB (software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico, onde integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos), dentro desse software foram criados os programas traco noovart e traco ohm, que obedece toda teoria da matrizes aleatória, para programas traco noovart e utilizado a simetria de inversão temporal o que nos dar o valor de $\langle g \rangle_{EOG}$, o traco ohm sem a ausência de simetria de inversão temporal o que nos dar o valor de $\langle g \rangle_{EGU}$.

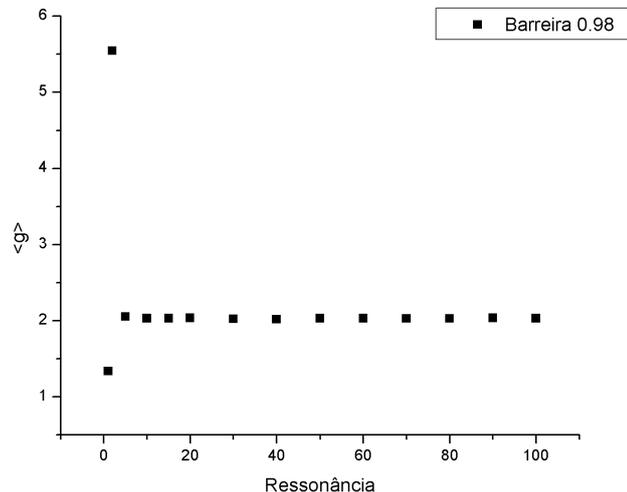
A primeira parte da equação (6) ($\langle g \rangle_{EOG}(IR_{3L}) - \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3L})$) representa o termo associado à interferência para uma reflexão interna efetiva IR_{3L} . Por isso, $\langle g \rangle_{1-2}(IR_{3L})$ é calculado pela adição do termo unitário $\langle g \rangle_{EGU}(IR_{3D} = 1)$, considerando uma reflexão interna efetiva em N_3 igual a zero, mais o termo interferência, calculado pela expressão $\langle g \rangle_{EOG}(IR_{3L}) - \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3L})$ considerando uma reflexão interna efetiva IR_{3L} . Em resumo, assumimos que os fótons retroespalhados coerentemente (anteriormente localizados) sentem uma reflexão interna efetiva igual a IR_{3L} , enquanto os fótons incoerentemente retrodispersos (não localizados) sentem uma reflexão interna efetiva $IR_{3D} = 0$.

Para os valores $\langle g \rangle_{EOG}$ e $\langle g \rangle_{EGU}$ foram feitas as simulações com 100 ressonâncias, mudando os valores N_3 , com as barreiras 0.98, 0.97, 0.95, 0.93, 0.91 e 0.85. Para calcular a condutância com presença de simetria de inversão temporal de N_1 para N_2 utilizando a equação (7), onde Γ é igual ao valor da barreira. $\langle g \rangle_{EOG}(\Gamma_R)$ é a média das 100 ressonâncias, que se mantem fixas para cada barreiras.

$$\langle g \rangle(\Gamma) = \frac{\langle g \rangle_{EOG}(\Gamma_R)}{\langle g \rangle_{EOG}(\Gamma) - \langle g \rangle_{EGU}(\Gamma) + \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3D} = 1)} \quad (7)$$

Com os valores das médias da condutância relativas foram plotados os gráficos das $\langle g \rangle$ em Função das Ressonâncias para todas as barreira, o gráfico abaixo demonstrado na figura (13) é da barreira 0.98.

Figura 13: $\langle g \rangle$ em Função da Ressonância para a barreira 0.98

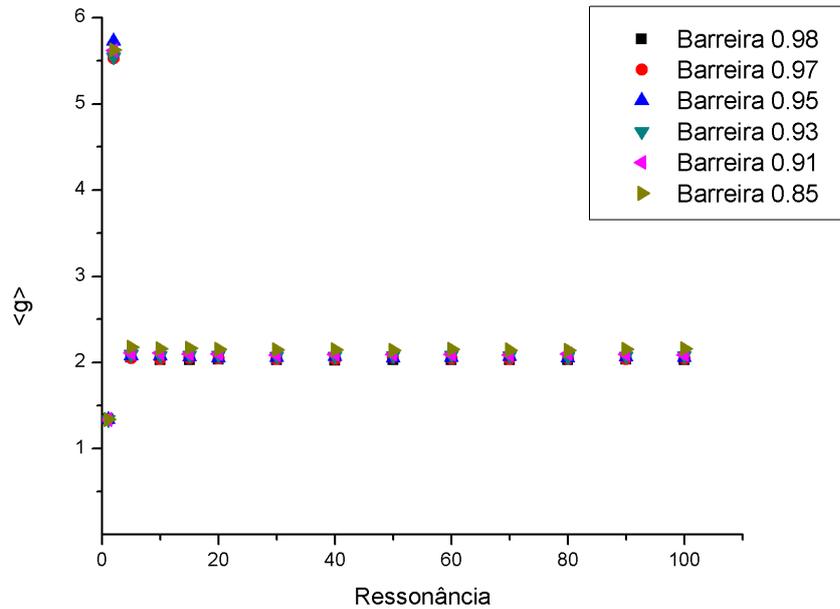


Fonte:Elaborada pelo autor, 2019.

Para as demais barreiras o gráfico obedece a mesma configuração, onde é perceptível que para as 5 primeiras ressonâncias a um aumento na condutância, podemos inferir que esse aumento é descrito através do transporte perto da superfície de entrada (regime ergódico), onde tem um maior aumento de aprisionamentos de fótons na borda de entrada.

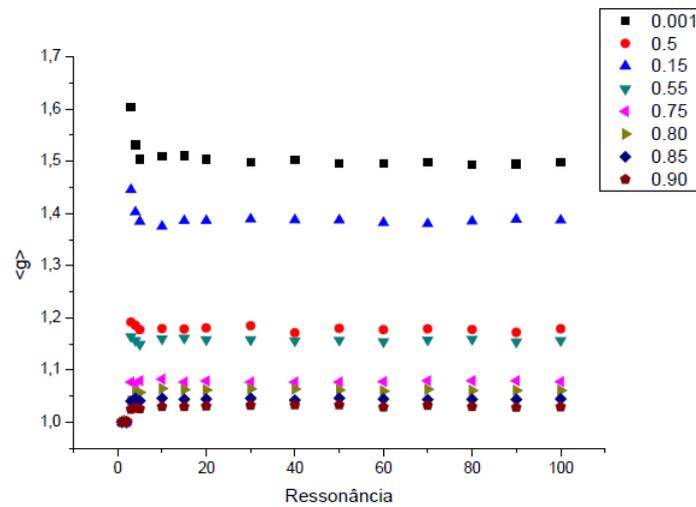
No gráfico da figura (14), está representado $\langle g \rangle$ de todas as barreiras em função da ressonância, que comparado com o gráfico da figura (15) do artigo "Localization of light: beginning of a new optics" (JIMENEZ *et al.*, 2018), mesmo o trabalhos de Xavier utiliza barreiras mais afastadas, comparando com o nosso trabalho exibi a mesma configuração, que para barreiras menores o valor de $\langle g \rangle$ é maior.

Figura 14: $\langle g \rangle$ de todas as barreiras em Função da Ressonância.



Fonte:Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 15: $\langle g \rangle$ de todas as barreiras em Função da Ressonância.



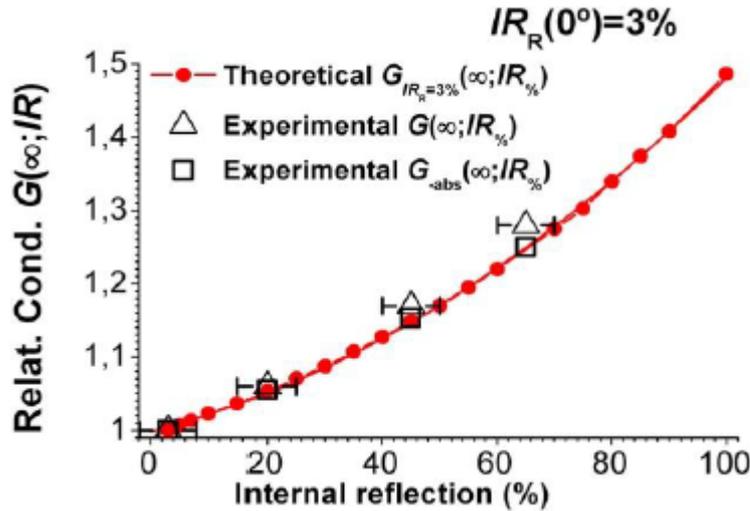
Fonte:JIMENEZ *et al* (2018)

Para calcular a condutância em incidência normal Xavier e colaboradores (XAVIER, 2018), considerou $IR_{3L} = 3\%$. Portanto, os valores assintóticos (para grande número de ressonâncias) de condutância relativa para cada reflexão interna efetiva $IR_{3L}(G_{IR_R}(\infty; IR_{3L}))$ podem ser calculados pela equação (8), considerando uma reflexão interna de referência (IR_R) na incidência normal de $IR_R = 3\%$.

$$G_{IR_R=3\%}(\infty; IR_{3L}) = \frac{\langle g \rangle_{EOG}(IR_R = 3\%) - \langle g \rangle_{EGU}(IR_R = 3\%) + \langle g \rangle_{EOG}(IR_{3D} = 0)}{\langle g \rangle_{EOG}(IR_{3L}) - \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3L}) + \langle g \rangle_{EGU}(IR_{3D} = 0)} \quad (8)$$

A notação $\langle g \rangle$ representa os valores assintóticos da condutância calculados para um grande número de ressonâncias. A figura 16, mostra $G_{IR_R=3\%}(\infty; IR_{3L})$ calculado por simulação teórica (pontos-vermelhos) e $G(\infty; \theta)$, (triângulos) e $G_{-abs}(\infty; \theta)$ (quadrados abertos), determinado experimentalmente, como função da reflexão interna efetiva IR_{3L} (terminal de retroespalhamento)(XAVIER, 2018). Como pode ser observado, os valores de $G(\infty; \theta)$ para os ângulos de 60° e 70° são levemente superiores aos valores $G_{IR_R=3\%}(\infty; IR_{3L})$ calculados pela simulação teórica. Este último pode ser porque a absorção aumenta sensivelmente para ângulos de incidência de 60° e 70° , o que provoca uma diminuição adicional da intensidade transmitida. No entanto, a simulação teórica concorda muito bem com os valores de $G_{-abs}(\infty; \theta)$ determinados também experimentalmente, mas sem o efeito de absorção, o que mostra a generalidade desta abordagem (teoria de matriz aleatória) para abordar fenômenos de transporte, indicando que não depende no tamanho da amostra ou grau de desordem. Além disso, podemos inferir que a dependência da condutância com o ângulo de incidência pode ser descrita completamente através do transporte perto da superfície de entrada (regime ergódico). O último pode ser interpretado de tal forma que a dependência do transporte de luz com o ângulo de incidência deve ser determinada por esses estados localizados superficiais (VILLAR *et al.*, 2018), que foi previamente deduzido das medidas experimentais. Devemos destacar que o número de canais ou terminais envolvidos no experimento de propagação ($3 \cdot 10^5$) é muito superior ao considerado na simulação teórica. Claramente, um aumento do número de terminais deve levar a interferências entre os terminais, o que afetaria o valor da condutância. No entanto, a condutância assintótica entre os terminais de entrada e transmissão deve ser dimensionada por um fator ligado ao número de terminais. Esse fator é cancelado matematicamente no cálculo da condutância relativa. Por isso, a condutância relativa deve ser indiferente ao número de terminais. A relação entre a condutância assintótica e o número de terminais ultrapassa o escopo do trabalho, que poderia ser um assunto para pesquisas futuras. Devemos esclarecer que o canal é uma notação comumente usada na ótica, que seria equivalente aos terminais (notação que usamos na simulação teórica).

Figura 16: Valores assintóticos teóricos e experimentais de condutância relativa: $G_{IR_R=3\%}(\infty; IR_{3L})$, calculado por simulação teórica (pontos vermelhos), $G(\infty; \theta)$, determinado pela relação $I(0^\circ)/I(\theta)$ (triângulos pretos) e $G_{-abs}(\infty; \theta)$ sem efeito de absorção, determinado pela expressão $(I_{cent}(0^\circ))/(I_{cent\theta}) \times (\omega_{eff}(0^\circ))/(\omega_{eff}(\theta))$ (quadrados pretos), em função da reflexão interna efetiva sentida pelos fótons retroespalhados coerentemente (reflexão interna de referência é $IR_R = 3\%$).



Fonte: XAVIER (2018)

6 CONCLUSÃO

A partir de todo o procedimento experimental da síntese das nanopartículas, que envolve tanto a área da química e física, podemos concluir que tivemos um maior conhecimento e desenvolvimento na prática da confecção dessas nanopartículas inovadoras, revestidas com uma camada de sílica de aproximadamente 40 nm de sílica.

Na simulação teórica, realizada através da teoria de matriz aleatória, concordaram satisfatoriamente com os resultados experimentais realizados pelo orientador Mário César Soares Xavier e colaboradores no trabalho “Localization of light: beginning of a new optics” (XAVIER, 2018), mostrando a esta abordagem para abordar os fenômenos de transporte, que estudos os transporte de luz em um meio óptico fortemente desordenado composto por nanopartículas de núcleo-casca ($TiO_2@Sílica$) suspenso em solução de etanol. Demonstram o cruzamento de um transporte difusivo para uma localização regime de transição conforme a concentração de nanopartículas de $TiO_2@Sílica$ é aumentada. Um fenômeno notável de reforço absorção, principalmente perto da borda de entrada, surge na transição de localização, da qual um aumento do índice de refração foi inferido. Um aumento da densidade de estados localizados e absorção perto da borda de entrada é relatado quando o ângulo de incidência é aumentado. A reflexão especular, medida para os fótons que entram na amostra, é consideravelmente inferior à efetiva reflexão interna sofrida pelos fótons coerentemente retro difundidos no exato oposto direção, indicando uma propagação não recíproca da luz (quebra de paridade-simetria).

Ultimamente, uma vasta seleção de artigos e trabalhos na área da Física dos lasers vem sendo desenvolvidos por pesquisadores das diversas localidades do planeta e publicados em revistas de renomes internacionais. Essas aplicações principalmente dos lasers aleatórios, tem contribuído satisfatoriamente no desenvolvimento e qualidade de muitos produtos das variadas áreas de produção, com uma maior durabilidade e alto desempenho. Com essa nova proposta do revestimento das nanopartículas espalhadoras, grandes vantagens e até mesmo produtos com uma melhor qualidade podem ser confeccionados e aplicados a determinados setores em que os lasers aleatórios estão inseridos.

REFERÊNCIA

ABDERRAFI, K. *et al.* “Production of Nanometer-Size GaAs Nanocrystals by Nanosecond Laser Ablation in Liquid,” *J. Nanosci. Nanotechnol.* 12(8), 6774–6778 (2012).

ALEXANDRE, L, B.; IVANO, G. R. Fotoeletrocatalise em semicondutores: dos princípios básicos até sua conformação à nanoescala. Departamento de Química Fundamental, Instituto de Química, Universidade de São Paulo. São Paulo , Brasil. Novembro de 2017.

ALMEIDA, D, B. Pontos quânticos coloidais de semicondutores: sínteses, caracterizações e aplicações. 2013. 268f, Tese de Doutorado – UNICAMP, Campina, 2013.

AWAZU, K. *et al.* *Am. Chem. Soc.*, 130, (2008) 1676–1680.

ANDERSON, P,W. *Phys. Rev.* 109, 1492 (1958).

CAO, H. *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 84, (2000) 5584–5587.

COHEN, C, T.; DIU, B.; LALOE, F. *Quantum Mechanics*, vol. 1, John Wiley e Sons. 1977.

DANTAS, A. R. S. Estudo sobre novo meio espalhador para laser aleatório. Dissertação (graduação em licenciatura em Física) – Departamento de Física, Universidade Estadual da Paraíba, Patos, 2018.

FUERTES, G. *et al.* "Photoswitchable bactericidal effects from novel silica-coated silver nanoparticles," *Prog. Biomed. Opt. Imaging - Proc. SPIE 8092*, R. Sroka and L. D. Lilge, Eds., 80921M (2011).

GENOVESE, M, P.; LIGHTCAP, I, V.; KAMAT, P, V.; "Sun-Believable Solar Paint. A Transformative One-Step Approach for Designing Nanocrystalline Solar Cells," *ACS Nano* 6(1), 865–872 (2012).

HINES, M, A.; GUYOT, S, P, J. *Phys. Chem.* 1996, 100, 468.

JIMENEZ,V,E., *et al.*, *Nanoscale*, 2016, 8, 10938.

JIMENEZ,V.E. *et al.* "Localization of light: beginning of a new optics," *Proc. SPIE 10549*, Complex Light and Optical Forces XII, 1054905 (22 February 2018); doi: 10.1117/12.2288993

JIMENEZ,V, E.; JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, P. C.; Sá, G. F.; "Novel core-shell (TiO₂@Silica) nanoparticles for scattering medium in a random laser: higher efficiency, lower laser threshold and lower photodegradation," *Nanoscale* 5(24), 12512 (2013).

KIM, J, B. *et al.* *Nature Photonics*, 6, (2012) 327–332.

KOUWENHOVEN, L.; MARCUS, C. *Phys. World*, 35, Junho de 1998.

LAGENDIJK, A.; TIGGELEN, B, V.; WIERSMA, D, S. Fifty years of Anderson localization. Feature article, agosto de 2009.

LEONETTI, M. C.;LOPEZ, C. *Nature Photonics*, 5, (2011) 615–617.

MEIRAV, U.; KASTNER, M. A.; WIND, S, J. A primeira realização experimental de um ponto quântico gerado eletrostaticamente (via eletrodos) sobre uma superfície de GaAs., *Phys. Rev. Lett.* 65, 771. 1990.

MIRLIN, A. D. "Spatial structure of anomalously localized states in disordered conductors," *J. Math. Phys.* 38(4), 1888–1917 (1997).

MODELO DE DRUDE. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2013. Disponível em: < https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Modelo_de_Drude&oldid=34678360 >. Acesso em: 23 de agosto de 2019.

MODELO DO ELÉTRON LIVRE. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2017. Disponível em: < https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Modelo_do_el%C3%A9tron_livre&oldid=49409886 >. Acesso em: 24 de agosto de 2019.

OLIVEIRA, S, F. *et al.* O estado da arte da síntese de semicondutores nanocristalinos coloidais. 2010. Química Nova. 33 (9): 1933–1939. 2010.

RIBEIRO, F. V. "Hidróxido de amônio". INFOESCOLA, [s.d]. Disponível em: <https://www.infoescola.com/amonio/>. acesso em: 23 de setembro 2019.

RODRÍGUEZ, E. *et al.* "1D photonic band gap PbTe doped silica quantum dot optical device," Glas. Technol. 46(2), 47–49(3) (2005).

SKIPETROV, S. E.; SOKOLOV, I. M. Absence of Anderson localization of light in a random ensemble of point scatterers. Phys. Rev. Lett. 2014, 112, 023905.

SMITH, A, M.; MOHS, A, M.,NIE, S. Nanotechnology 2009, 4, 56.

SOLJACIC,M.; JOANNOPOULOS, J, D. Nature Materials, 3, (2004) 211–219.

SPERLING, T. *et al.* "Can 3D light localization be reached in 'white paint'?", New J. Phys. 18(1), 13039 (2016).

TANABE, T, M.; NOTOMI, S.; MITSUGI, A.; SHINYA, E, K. Appl. Phys. Lett., 87, (2005) 151112.

TETRAETHYL ORTHOSILICATE. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2019. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Tetraethyl_orthosilicate acesso em: 23 de setembro 2019.

VILLAR, JIMENEZ, E. *et al.* "Anomalous transport of light at the phase transition to

localization: Strong dependence with incident angle” *Photonics Research* 6(10), 929-942 (2018).

XAVIER, M, C, S. Localização de Anderson da Luz: Forte Dependência com ângulo de Incidência. 2018. 113 f. Dissertação de Doutorado em Física, universidade federal da Paraíba, Departamento de física, João Pessoa – PB. 2018.

ZHANG, X. *et al* . *Angewandte Chemie International Edition* . 54 (12): 3653–3657. fevereiro de 2015.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a DEUS, pois ele é o responsável pela a minha fé, força e coragem, obrigado senhor por mais essa conquista.

Ao meu orientador Dr. Mário Cesar Soares Xavier, pela orientação, pela paciência e compreensão, muito obrigada por tudo!

A Universidade Estadual da Paraíba, Campus VIII, Departamento de Física pela oportunidade de realização do curso e pelo suporte.

Aos professores do curso de Física pelo conhecimento transmitido, que com certeza irei levar ao longo de toda a minha vida profissional.

Aos meus colegas de estudos: Maria Eduarda, Francielho Fernandes e Acson Clementino, pela as horas passada nos laboratórios e a preocupação para que esse trabalho acontecesse.

Ao técnico de laboratório Fagner Fernandes, pelo os auxílios no momento de escrever o meu trabalho.

E a todos que contribuíram diretamente e indiretamente para que esse trabalho acontecesse.