UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física

PROJETO DE PESQUISA

Luz estruturada aplicada a espectroscopia óptica não linear e dispositivos fotônicos

COORDENADOR:

Albert Stevens Reyna Ocas

Fevereiro de 2022

Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA
Rua Cento e Sessenta e Três, 300 – Garapu
54518-430 Cabo de Santo Agostinho/PE
www.ppengfis.ufrpe.br

I- IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

1- Título	
Luz estruturada aplicada a espectroscopia óptica não linear e dispositivos fotônicos	
2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	02/2022
Término previsto (mês/ano):	02/2026
3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	Ciências exatas e da terra
Número do código:	1.00.00.00-3
Nome da sub-área :	Física
Número do código:	1.05.00.00-6
Nome da especialidade:	Física da Matéria Condensada
Número do código:	1.05.07.00-00
4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
☒	Materiais Nanoestruturados
☐	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
☐	Metrologia e Instrumentação
☒	Espectroscopia coerente e óptica não linear
☐	Controle e dinâmica não linear
5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Luz estruturada	• Fotônica
• Espectroscopia	• Materiais nanoestruturados
• Óptica não linear	

Cabo de Santo Agostinho, 2 de fevereiro de 2022

Coordenador: Albert Stevens Reyna Ocas
(SIAPE: 3066537])

6- Participantes docentes:

Nome:	Albert Stevens Reyna Ocas
CPF:	700.287.194-33
E-mail:	albert.reyna@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?: PQ-2
Função:	Coordenador ☒ Colaborador ☐

Nome:	Rafael Alves de Oliveira
CPF:	060.534.824-39
E-mail:	rafael@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Weliton Soares Martins
CPF:	055.580.144-66
E-mail:	weliton.martins@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

Nome:	Adriano da Silva Marques
CPF:	028.510.364-40
E-mail:	adriano.marques@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador ☒

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

O projeto visa a expansão e aprimoramento dos procedimentos de controle e manipulação de luz por luz por introduzir o conceito e propriedades dos sólitons ópticos multidimensionais, baseados em feixes de luz estruturada. A relevância da proposta encontra-se em explorar o fenômeno de autoconfinamento, presente na propagação de ondas solitónicas, com o intuito de fornecer uma total autonomia espaço-temporal ao feixe principal para propagar-se e interagir com outros pulsos de luz sem perder suas características iniciais; sendo uma condição ideal para aplicações em controle de luz por luz. Para isto, serão realizados estudos teórico, numéricos e experimentais sobre a formação, propagação e interação de sólitons escalares e vetoriais gerados a partir de lasers emitindo pulsos intensos de luz propagando-se em materiais altamente não lineares. Como prova de princípios, os novos procedimentos de controle de luz por luz usando sólitons baseados em luz estruturada serão utilizados para desenvolver chaves e moduladores ópticos ultrarrápidos de alta eficiência.

Como segundo problema, o projeto visa aplicar os procedimentos de controle de luz por luz para controlar as propriedades de fontes laser que não utilizam cavidades ópticas para capturar e amplificar a luz, conhecidos como lasers aleatórios (LAs). Para isto, pretende-se medir a influência da desordem em intensidade e fase de padrões de luz estruturada, tais como os padrões de *speckle*, ao longo da propagação em sistemas desordenados com ganho para a otimização de LAs, bem como expandir os fundamentos físicos para o estudo de localização de luz. O desenvolvimento da proposta traz consigo três aplicações científico-tecnológicas de grande importância, como são: a fabricação de LAs com melhor desempenho para sistemas de mapeamento de imagens com alta resolução, a obtenção de novas fontes de luz com coerência sintonizável, bem como a possibilidade de sintonizar as características da luz emitida pelos LAs de forma mais eficiente e com tempos de resposta ultrarrápidos.

2. Introdução

O controle e a manipulação seja da matéria e/ou da luz usando feixes ópticos vêm recebendo grande atenção nos últimos anos por abranger desde fundamentos básicos da Óptica Não Linear até aplicações inovadoras na Fotônica e Biofotônica. No primeiro caso, pesquisas na área de manipulação óptica da matéria têm resultado em grandes avanços científicos e tecnológicos tais como as pinças ópticas, armadilhas ópticas e levitação óptica, os quais permitem entender as propriedades microscópicas da matéria [1]. Entretanto, é no controle e manipulação de luz por luz que vários estudos estão sendo dedicados, por diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo, para aprimorar as metodologias de confinamento, guiamento e modulação induzida opticamente para desenvolvimento de dispositivos ópticos de alta velocidade e telecomunicações [2].

Atualmente, a metodologia utilizada para o desenvolvimento de dispositivos totalmente ópticos, baseados no controle e manipulação de luz por luz, consiste na interação de dois feixes ópticos

intensos propagando-se num material não linear [2]. Quanto mais intensa a não linearidade do meio e mais rápida sua resposta óptica, mais eficiente será o controle da interação de dois (ou mais) feixes de luz. Neste contexto, transistores e amplificadores totalmente ópticos têm sido desenvolvidos a partir de dispositivos de múltiplas portas que exploram a interação coerente de feixes em metamateriais plasmônicos que apresentam forte não linearidade [3]. Embora tais dispositivos ópticos tenham atingido tempos de resposta muito curtos, sendo usados para aumentar as velocidades de transferência e processamento de dados [4], a eficiência no controle de luz por luz por longas distâncias ainda é um grande desafio para a comunidade científica.

O presente projeto visa a expansão e aprimoramento dos procedimentos de controle e manipulação de luz por luz por introduzir o conceito e propriedades dos sólitons ópticos multidimensionais [5], baseados em feixes de luz estruturada. A relevância da proposta encontra-se em explorar o fenômeno de autoconfinamento, presente na geração e propagação de ondas solitónicas, com o intuito de fornecer uma total autonomia espaço-temporal ao feixe principal para propagar-se e interagir com outros pulsos de luz sem perder suas características iniciais [6]; sendo uma condição ideal para aplicações em controle de luz por luz. Para isto, serão realizados estudos teórico, numéricos e experimentais sobre a formação, propagação, controle e interação de sólitons escalares e vetoriais, em duas e três dimensões, gerados a partir de lasers emitindo pulsos intensos de luz, propagando-se em materiais fotônicos e/ou plasmônicos apresentando não linearidades de altas ordens. Como prova de princípios, os novos procedimentos de controle de luz por luz usando sólitons baseados em luz estruturada serão utilizados para desenvolver chaves e moduladores ópticos ultrarrápidos de alta eficiência.

Dentro do contexto apresentado acima, o grupo de pesquisa, liderado pelo coordenador do presente projeto, possui uma posição bastante favorável ao estudo e inovação de processos de controle e manipulação de luz por luz usando sólitons ópticos e luz estruturada. Em trabalhos prévios, nós reportamos, pela primeira vez na literatura científica, a formação e a propagação estável de sólitons fundamentais [7] e vorticais [[8],[9]], bem como *cluster* sólitons [10], em múltiplas dimensões, propagando-se em meios apresentando não linearidades de altas ordens. A estabilidade destes sólitons espaciais foi alcançada unicamente por um adequado controle da resposta não linear de materiais fotônicos, obtidos variando a concentração do material, o comprimento de onda do laser de excitação e a intensidade incidente [[11]-[13]]. Este procedimento de engenharia da resposta não linear, desenvolvida por nós, permite manipular eficientemente os parâmetros não lineares do material para encontrar as condições adequadas para diversas aplicações em dispositivos ópticos de alta velocidade [[14], [15]]. A partir dos experimentos anteriores, nós reportamos algumas propostas para aplicações em moduladores ópticos (*all-optical modulators*) [16] e guias de ondas induzidos por sólitons vorticais [9].

Por outro lado, na maioria de sistemas ópticos não lineares utilizados para desenvolver procedimentos de manipulação de luz por luz, a desordem apresenta-se com um fenômeno onipresente, embora sua contribuição nem sempre seja totalmente estudada. O comportamento imprevisível que a desordem causa em diversos sistemas ópticos tem sido considerado um fator limitante para o estudo dos fenômenos de interação luz-matéria, bem como limitando o

desempenho de dispositivos ópticos e fotônicos [17]. Em particular, o espalhamento de luz é um dos fenômenos mais típicos induzidos pela desordem intrínseca de sistemas fotônicos que interagem com campos eletromagnéticos. As vantagens (ou desvantagens) do fenômeno de espalhamento dependem do tipo de aplicação a ser explorada. Por exemplo, quando o espalhamento da luz é causado por imperfeições do sistema, sua contribuição é indesejada, tornando-se criticamente prejudicial para várias aplicações, como comunicação óptica e sistemas de imagem de alta resolução [18]. No entanto, compreender as propriedades físicas que podem ser controladas através do grau de desordem de um sistema permite que suas contribuições e fenômenos induzidos sejam desejados e necessários [[19],[20]].

Lasers aleatórios (LAs) são sistemas fotônicos que vêm usufruindo das vantagens dos fenômenos de desordem. Ao contrário dos lasers convencionais, os quais usam cavidades ópticas para capturar e amplificar a luz, os LAs foram concebidos para obter sua retroalimentação óptica a partir da luz espalhada por nano ou microestruturas desordenadas presentes dentro de um meio de ganho [21]. Desta forma, a distribuição espacial desordenada de partículas espalhadoras permite que os LAs emitam simultaneamente um grande número de modos ópticos com fases não correlacionadas, apresentando características únicas de uma fonte de luz, tais com: densidade espectral moderada, baixa coerência espacial e emissão angular ampla e complexa.

A influência da desordem nos sistemas fotônicos não é exclusiva do meio de espalhamento, mas também pode ter impacto na seleção adequada da luz de excitação. Os padrões de *speckle* são uma manifestação clara da desordem impressa na intensidade e fase dos campos ópticos, que têm apresentado contribuições importantes na interferência com luz espalhada, processamento óptico de imagens, deslocamentos e deformações de objetos difusos e tecidos biológicos [22]. Em relação aos LAs, propostas teóricas argumentam que sua emissão óptica pode ser fortemente influenciada pela introdução de aleatoriedade na luz que bombeia o meio laser. Por exemplo, o controle ativo da distribuição de intensidade espacial do feixe de excitação pode permitir a seleção de diferentes modos do LA, bem como atingir uma emissão altamente direcionada [23]. Embora existam alguns poucos estudos teóricos reportando o controle das características da luz de excitação para otimizar a performance de LAs, apenas recentemente nosso grupo de pesquisa tem demonstrado a importância de explorar a desordem da luz que excita os LAs para otimizar sua performance [[24],[25]]. Aumento em mais de 20 vezes a intensidade de emissão, acompanhado de uma redução no limiar de intensidade de excitação em 20 vezes, foi obtida usando luz estruturada, em comparação à excitação convencional, na excitação de LAs difusivos.

O presente projeto visa abordar como segundo problema de estudo a influência da desordem em intensidade e fase dos padrões de *speckle* ao longo da propagação em sistemas desordenados para a otimização de LAs, bem como expandir os fundamentos físicos para o estudo de localização de luz. O desenvolvimento da proposta traz consigo duas aplicações científico-tecnológicas de grande importância, como são: a fabricação de LAs com melhor desempenho para sistemas de mapeamento de imagens com alta resolução, bem como a obtenção de novas fontes de luz com coerência sintonizável. Além disso, com o intuito de conectar os dois problemas de estudo destacados neste projeto, pretende-se estudar também a influência da desordem impressa nos

padrões de *speckle* ao longo da propagação em meios altamente não lineares para aplicações em controle de luz por luz. Para isto, serão realizados estudos teóricos, numéricos e experimentais sobre a propagação de padrões de *speckle* em nanomateriais fotônicos e plasmônicos que apresentem alto grau de desordem, bem como não linearidades de altas ordens. Desde o ponto de vista de aplicações, o controle de luz por luz aplicado aos LAs permitirá sintonizar as características da luz emitida pelos sistemas desordenados que apresentam ganho de forma mais eficiente e com tempos de resposta ultrarrápidos.

3. Objetivos

Geral:

O objetivo geral do projeto consiste no uso de luz estruturada para o desenvolvimento de novos procedimentos de controle e manipulação de luz por luz baseados na interação de sólitons multidimensionais, suportados por materiais fotônicos altamente não lineares, com potencial de aplicação na fabricação de dispositivos ópticos ultrarrápidos, bem como na optimização da performance de lasers aleatórios.

Específicos:

- Estudo teórico-numérico da propagação de sólitons multidimensionais;
- Fabricação dos meios coloidais que apresentam não linearidades de altas ordens;
- Desenvolvimento de novos procedimentos de controle e manipulação de luz por luz usando luz estruturada;
- Estudo teórico-numérico da propagação de padrões de speckle em meios com alto grau de desordem;
- Fabricação dos meios coloidais que apresentam alto grau de espalhamento e desordem;
- Desenvolvimento de LAs mais eficientes e com controle óptico das suas propriedades de emissão.

4. Metodologia

Pretende-se neste projeto realizar estudos experimentais, análises teóricas e simulações numéricas baseadas na formação, propagação e interação de sólitons ópticos multidimensionais, gerados a partir de feixes de luz estruturada, para aplicações em controle e manipulação de luz por luz usados em óptica não linear e lasers aleatórios. Um breve detalhamento da metodologia do trabalho segue abaixo.

Estudo teórico e numérico da formação e propagação de sólitons multidimensionais em meios apresentando não linearidades de altas ordens

Desde que a proposta de implementação de novos procedimentos de controle de luz por luz é baseada na formação, propagação e interação de sólitons multidimensionais, a primeira etapa do projeto será destinada à identificação analítica das condições ópticas necessárias para explorar as regiões de estabilidade de sólitons vetoriais e vorticais, em 2D e 3D. Para isto, pretende-se desenvolver um modelo teórico que permita acoplar duas Equações de Schrödinger não linear (NLSEs) modificadas para incluir os parâmetros ópticos (susceptibilidades) não lineares de altas ordens, com o intuito de descrever a formação, propagação e interação de sólitons vetoriais em solventes com não linearidades do tipo saturada, bem como em coloides contendo nanopartículas plasmônicas com resposta não linear de terceira, quinta e sétima ordem. Esse estudo teórico terá como objetivo identificar e analisar, mediante o uso do método variacional [26], as condições necessárias para a estável propagação de sólitons vetoriais multidimensionais, baseados em diversos tipos de luz estruturada.

Em adição, simulações numéricas da propagação e interação de sólitons multidimensionais serão desenvolvidas para dar suporte aos resultados teóricos, além de validar o método de aproximação variacional e determinar a robustez da estabilidade dos sólitons frente a pequenas perturbações.

Observação experimental e análise da estável propagação e interação de sólitons multidimensionais em meios com não linearidades de altas ordens

Nesta etapa, pretende-se corroborar os resultados teóricos-numéricos da seção 0, realizando experimentos destinados à observação da formação, propagação de sólitons multidimensionais, baseados em feixes de luz estruturada, em meios apresentando não linearidades de terceira, quinta e sétima ordem. Desde que as variações no padrão da luz estruturada influenciam as condições necessárias para observar a estável propagação dos sólitons vetoriais, serão utilizados as não linearidades de altas ordens, assim como os métodos de engenharia da resposta não linear, desenvolvidos em nossos trabalhos anteriores [[11]-[13]], para manipular a resposta óptica do meio de propagação, de modo a controlar o comportamento dos campos correspondentes aos sólitons. Para isto, as análises teóricas e numéricas previstas na seção anterior serão de crucial importância para definir as regiões de estabilidade do sólitons vetoriais que poderiam ser experimentalmente exploradas.

Os experimentos serão desenvolvidos usando lasers pulsados de alta intensidade, adequados para revelar o comportamento não linear de altas ordens, necessários para suportar a estabilidade dos sólitons multidimensionais; bem como tempos de duração dos pulsos da ordem de picossegundos e fentossegundos, de forma a explorar novos efeitos ópticos com respostas ultrarrápidas, sendo atrativos para aplicações em dispositivos totalmente ópticos. Máscaras de fase

serão usadas para produzir feixes de luz estruturada, os quais apresentem um comportamento solitónico, permitindo analisar um amplo espectro de aplicações.

Estudo de novos procedimentos de controle de luz por luz

Desde o nascimento da Fotônica, optou-se pela ideia da construção de dispositivos completamente ópticos, os quais permitissem substituir os portadores de informação de elétrons por fótons, de modo a incrementar a velocidade de transferência e processamento de dados. Neste sentido, pretende-se explorar as propriedades de interação entre sólitons multidimensionais, com diferentes padrões de luz estruturada, como detalhado na seção 4.2, de forma a otimizar a eficiência de um dispositivo totalmente óptico. As características da luz estruturada permitirão acoplar propriedades de guiamento e confinamento de luz, por longas distâncias, com a capacidade de incrementar a taxa de transferência de dados em sistemas de comunicação fotônicos. Experimentos baseados no mecanismo de funcionamento de moduladores e chaves totalmente ópticas serão implementados para testar a eficiência e velocidade no controle de luz por luz.

Análise teórica e numérica da propagação de padrões de *speckle* em meios com alto grau de desordem e não linearidades de altas ordens

Nesta segunda etapa do projeto de pesquisa será realizada uma formulação matemática que descreva as mudanças no contraste, grau de coerência e correlação de segunda ordem dos padrões de *speckle* ao propagar-se em meios que apresentam alto grau de espalhamento e desordem. Para isto, será expandida a teoria de difusão da luz em meios espalhadores, desta vez considerando as mudanças no grau de aleatoriedade na intensidade e fase introduzidos pelos padrões de luz estruturada. Simulações numéricas baseadas nas matrizes de transmissão [27], usando o método *split-step* serão desenvolvidas para modelar a propagação dos padrões de *speckle*, bem como entrar as condições de maior eficiência para a excitação de LAs.

Em adição, as simulações também serão utilizadas para medir a influência da desordem impressa nos padrões de *speckle* ao longo da propagação em meios altamente não lineares. Portanto, a metodologia de matrizes de transmissão será empregada na solução da equação de Schrödinger não linear, considerando não linearidades de até sétima ordem.

Estudo experimental do uso de luz estruturada para a otimização e controle óptico das propriedades dos LAs

Como uma extensão de nossos estudos já publicados [[24],[25]], será montado um arranjo experimental para otimizar a performance e coerência de LA, no regime difusivo e de localização, porém considerando diversos padrões de luz estruturada, gerados a partir de um modulador espacial de luz (SLM, pela suas siglas em inglês). O uso do SLM permitirá manipular os padrões de luz estruturada de forma a encontrar as condições que permitam um maior acoplamento dos modos de excitação com as cavidades virtuais gerados pela desordem das partículas espalhadoras

que compõem o meio laser. Este trabalho será desenvolvido usando lasers no regime CW e pulsado (nanossegundos), com perfil de amplitude e fase modulados por um SLM.

Desde que nós temos demonstrado que não linearidades também influenciam o comportamento dos LAs, será utilizado a experiência adquirida na primeira parte do projeto para utilizar os procedimentos de controle de luz por luz em meios LAs que apresentem não linearidades de altas ordens. Experimentos com dois ou mais feixes de excitação, usando luz estruturada, serão implementados para controlar as propriedades dos LAs, tais como: densidade espectral, limiar de intensidade de excitação, coerência e principalmente direcionalidade; sendo a última uma propriedade amplamente desejada em LAs.

Descrição e métodos de caracterização dos materiais fotônicos não lineares

Materiais fotônicos não lineares são os elementos essenciais para aplicações no controle e manipulação de luz por luz, devido a sua alta sensibilidade frente aos campos ópticos. Neste projeto, pretende-se usar materiais fotônicos e plasmônicos que apresentem não linearidades de alta ordem, de forma a engrandecer os efeitos de interação entre os campos. Para isso, coloides contendo nanopartículas de prata e ouro, com diferentes tamanhos e morfologias, serão sintetizadas via procedimentos químicos, fotoquímicos e de foto-fragmentação laser, como reportado em nossos trabalhos anteriores [[15], [28]].

Os coloides metálicos serão escolhidos para realizar os estudos de interação e manipulação de luz por luz, devido a sua alta não linearidade de origem eletrônica, exibindo tempos de resposta ultrarrápidos. Nossos trabalhos prévios mostram que tais coloides apresentam não linearidades de terceira, quinta e sétima ordem, quando excitadas por intensidades pico de GW/cm^2, usando lasers pulsados com comprimento de onda de 532 nm e pulsos de 80 ps. Condições similares serão utilizados nos experimentos da presente proposta, com lasers em 532 nm e 80 ps, bem como 800 nm e 100 fs. Uma das características mais ressaltantes dos coloides metálicos, porém ainda pouco explorada, é a capacidade de poder gerenciar sua resposta não linear variando sua concentração, morfologia das nanopartículas e intensidade do feixe incidente. Este procedimento de engenharia da resposta não linear (*nonlinearity management*), desenvolvida por nosso grupo de pesquisa, permite incrementar, diminuir e inclusive cancelar os coeficientes não lineares de diferentes ordens [28]. Desta forma, coloides metálicos tornam-se excelentes materiais para engrandecer os efeitos de interação entre os campos dos sólitons e diminuir as perdas de intensidade, de forma a produzir um eficiente controle de luz por luz. Nanopartículas plasmônicas, como nanobastões de ouro e nanocascas de ouro com núcleos dielétricos também serão sintetizados para explorar a grande seção de choque de espalhamento, bem como sua alta não linearidade para os experimentos dedicados a LAs [29].

5. Resultados esperados

Com o desenvolvimento do presente projeto existem perspectivas da produção de resultados de grande relevância e impacto. Desde o ponto de vista do desenvolvimento científico, com as duas propostas abordadas no projeto pretende-se dar uma contribuição significativa no entendimento da evolução dos campos de feixes tipo sólitons, em múltiplas dimensões, assim como os comportamentos de coexistência e interação entre eles. A observação e análise desses efeitos são de interesse geral em várias áreas da Física, pois podem permitir a compreensão e interpretação de problemas universais como o colapso de campos, comportamento corpuscular das ondas de luz, geração e propagação de *shock waves* e *rogue waves*, entre outros. Além disso, o projeto pretende encontrar novas condições que permitam uma maior robustez na estável propagação de sólitons espaciais, pois até o presente, a instabilidade é um dos principais empecilhos para a aplicabilidade de ondas autoconfinadas em dispositivos totalmente ópticos. Quanto ao uso de luz estruturada no controle de luz por luz para aplicações em óptica não linear de altas ordens e em LAs, a proposta é completamente original, sendo os trabalhos desenvolvidos pelo nosso grupo de pesquisa pioneiros na área. Desta forma, o desenvolvimento do presente projeto visa dar continuidade aos estudos que permitirão desenvolver fontes de luz laser com maior intensidade de emissão, menor gasto de energia por diminuir o limiar de excitação, bem como controlar a coerência e direcionalidade da luz emitida pelos LAs mediante um sistema totalmente óptico e eficiente.

No âmbito das aplicações tecnológicas, a interação entre sólitons ópticos multidimensionais possuem grande potencial na construção e otimização de dispositivos ópticos de alta velocidade (como moduladores, chaves e transistores ópticos), criação de guias de ondas ópticas e aplicações com “luz líquida”, as quais possuem um amplo interesse a nível mundial principalmente na área de comunicações.

Finalmente no âmbito de inovação, LAs são amplamente utilizados em sistemas de imagens modernos com alta resolução e livre de ruído, porém LAs ainda sofrem pela falta de direcionalidade e baixa degenerescência de fótons. A metodologia, reportada pela primeira vez por nosso grupo de pesquisa, e prevista para ser implementada neste projeto visa conseguir otimizar ambas as propriedades a partir do controle de luz por luz. Portanto, os resultados da proposta possuem o potencial para fabricar fontes de luz com coerência controlada, alta degenerescência de fótons e direcionalidade para ser usados em sistemas de imagens com aplicações em biofotônica e medicina.

Espera-se, portanto, que por meio do presente projeto seja possível elucidar uma série de questões importantes que envolvem o controle e a manipulação de luz por luz introduzindo os conceitos de sólitons ópticos multidimensionais, luz estruturada, altas não linearidades e lasers aleatórios. Devido ao alto interesse nesta área de estudo, espera-se que todos os resultados possam ser publicados em revistas de alto impacto internacional (conceito A na avaliação da CAPES), como vêm sendo realizado até agora. A publicação dos resultados em congressos nacionais e internacionais também será uma consequência natural dos trabalhos.

Além disso, os conhecimentos e a experiência adquirida na realização deste projeto visam o desenvolvimento de uma nova linha de pesquisa no programa emergente de Pós-Graduação em

Engenharia Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco (programa iniciado em 2019), baseada na utilização da luz como ferramenta para desenvolver dispositivos ópticos de alta velocidade, novas fontes de luz, assim como desenvolver novas aplicações de amplo interesse, com impactos importantes em óptica, fotônica e telecomunicações.

6. Cronograma de atividades

Semestre / Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8
I	X	X						
II			X	X				
III				X	X			
IV						X	X	
V							X	
VI								X
VII	X	X						
VIII			X	X				
IX					X	X		
X						X	X	
XI								X

Atividade I	Desenvolvimento de um modelo teórico para analisar a formação e propagação de sólitons multidimensionais, com diferentes padrões de luz estruturada, baseado em sistemas acoplados de NLSEs considerando as susceptibilidades de altas ordens. Utilização do método de aproximação variacional em junção a critérios de estabilidade, como os desenvolvidos por Vakhitov-Kolokolov [26], para identificar as condições necessárias para a estável propagação dos sólitons multidimensionais, carregando diferentes cargas topológicas.
Atividade II	Desenvolvimento de simulações numéricas baseadas no *split-step compact finite-difference method* [7], os quais permitirão modelar a evolução espaço temporal dos sólitons escalares e vetoriais, considerando, além de propagações isoladas, os efeitos de acoplamento e interação entre dois ou mais sólitons.
Atividade III	Projeção e fabricação dos nanomateriais fotônicos que atuaram como meios ópticos apresentando não linearidades de altas ordens para o desenvolvimento das propostas deste projeto. Serão sintetizados coloides contendo nanopartículas de prata e ouro com morfologias do tipo esferas, nanobastões e nanocascas. Esta etapa também compreende a caracterização composicional, quantitativa, morfológica e óptica das amostras fabricadas.
Atividade IV	Esquematização e montagem dos sistemas experimentais para o estudo da formação, propagação, interação e controle dos sólitons escalares multidimensionais, com luz estruturada. A montagem dos arranjos

	experimentais envolvem desde a geração de padrões de luz estruturada usando o SLM, a óptica de propagação e caracterização dos sólitons, bem como implementação de sistemas de detecção digitais e automatizados para garantir a precisão de nossas medidas e melhorar a eficiência no tempo de aquisição dos resultados.
Atividade V	As montagens realizadas na etapa anterior serão utilizadas para estudar a propagação de sólitons vetoriais com luz estruturada, a partir de feixes Poincaré com topologias do tipo limão e estrela (e com diferente carga topológica), com a finalidade de caracterizar a evolução dos campos e identificar os regimes de estabilidade e instabilidade durante a propagação. Os resultados experimentais serão interpretados e corroborados com as análises teóricas e simulações numéricas das etapas anteriores.
Atividade VI	Medição da interação entre sólitons multidimensionais, e sua aplicabilidade para desenvolver procedimentos capazes de controlar e manipular luz por luz. Os mecanismos de funcionamento das chaves e moduladores totalmente ópticos serão testados nesta etapa.
Atividade VII	Desenvolvimento da formulação matemática baseada na teoria de propagação de padrões de *speckle* em meios que apresentam alto grau de espalhamento e não linearidades de altas ordens. Para o caso dos meios espalhadores, será estudada a distorção espacial dos padrões de luz estruturada a partir da teoria de difusão da luz em meios desordenados. Subsequentemente, uma proposta fenomenológica será desenvolvida para considerar a propagação de padrões de luz estruturada em meios não lineares, considerando a NLSE incluindo não linearidades de altas ordens
Atividade VIII	Os resultados teóricos obtidos na etapa anterior serão corroborados por simulações numéricas baseadas nas matrizes de transmissão acopladas ao *split-step compact finite-difference method*, para modelar a propagação dos padrões de *speckle*, em meios desordenados. A mesma metodologia será expandida para incluir a solução da NLSE, considerando não linearidades de altas ordens, a cada iteração da propagação numérica.
Atividade IX	Fabricação e caracterização composicional, quantitativa, morfológica e óptica dos nanomateriais com alto grau de espalhamento e não linearidades de altas ordens para ser usadas em LAs.
Atividade X	Serão montados os experimentos destinados a medir a influência dos padrões de luz estruturada na performance de LAs difusivos e coerentes. Consecutivamente, serão realizadas variações no contraste e autocorrelação de intensidade dos padrões de luz estruturada, usando um SLM, de forma a encontrar as condições que permitam um maior acoplamento dos modos de excitação com as cavidades virtuais gerados pela desordem das partículas espalhadoras que compõem o meio laser. A influência das características dos padrões de luz estruturada sobre as condições para atingir a localização de luz também será estudada
Atividade XI	A última etapa do projeto será dedicada a junção dos conhecimentos adquiridos nos dois problemas abordados na proposta. Montando experimentos com dois ou mais feixes de excitação, usando luz estruturada, para controlar as

	propriedades dos LAs, tais como: densidade espectral, limiar de intensidade de excitação, coerência e direcionalidade

7. Apoio financeiro e/ou institucional

Atualmente, o grupo de pesquisa, liderado pelo coordenador deste projeto, conta com o apoio financeiro do CNPq, através do Projeto Universal 2018 – CNPq, no valor de R$ 10.000,00; Auxílio a projetos de pesquisa para jovens pesquisadores – FACEPE, no valor de R$ 48.000,00; e a bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq – Nível 2. Também, os discentes de mestrado associados a este projeto contam com bolsas de estudo otourgados pela FACEPE. Em paralelo, o coordenador participa na posição de colaborador do projeto Manutenção, operação e complementação do Laboratório Multiusuário NANOFENTOLAB, do Edital 15/2019 da FACEPE, aprovado no valor total de R$ 325.000,00. No NANOFEMTOLAB-UFPE dispõe-se de lasers pulsados operando nos regimes de pico e fentossegundos, que serão utilizados para explorar as respostas não lineares ultrarrápidas, além de uma ampla infraestrutura com equipamentos para caracterização espectral e temporal de pulsos ópticos e eletrônica de detecção de sinais.

Planeja-se também a solicitação de novas propostas para financiamento da área de pesquisa, relacionadas ao tópico deste projeto, nos próximos editais da agência de fomento do estado de Pernambuco, FACEPE, e no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, através do edital universal em vigência.

8. Referências

[1] D. Gao, W. Ding, M. Nieto-Vesperinas, X. Ding, M. Rahman, T. Zhang, C. T. Lim and C.-W. Qiu, Light Sci. Appl. **6**, e17039 (2017).
[2] J. Zhang, K. F. MacDonald and N. I. Zheludev, Light Sci. Appl. **1**, e18 (2012).
[3] X. Fang, K. F. MacDonald and N. I. Zheludev, Light Sci. Appl. **4**, e292 (2015).
[4] Z. Chai, X. Hu, F. Wang, X. Niu, J. Xie and Q. Gong, Adv. Opt. Mat. **5**, 1600665 (2017).
[5] Z. Chen, M. Segev, and D. N. Christodoulides, Rep. Prog. Phys. 75, 086401 (2012).
[6] M. Alcon-Camas, A. E. El-Taher, H. Wang, P. Harper, V. Karalekas, J. A. Harrison, and J.-D. Ania-Castañón, Opt. Lett. **34**, 3104 (2009).
[7] A. S. Reyna, K. C. Jorge, and C. B. de Araújo, Phys. Rev. A **90**, 063835 (2014).
[8] A. S. Reyna, G. Boudebs, B. A. Malomed, and C. B. de Araújo, Phys. Rev. A **93**, 013840 (2016).
[9] A. S. Reyna and C. B. de Araújo, Opt. Lett. **41**, 191 (2016).
[10] A. S. Reyna, H. T. M. C. M. Baltar, E. Bergmann, A. M. Amaral, E. L. Falcão-Filho, P.-F. Brevet, B. A. Malomed, and C. B. de Araújo, Phys. Rev. A **102**, 033523 (2020).
[11] A. S. Reyna and C. B. de Araújo, Phys. Rev. A **89**, 063803 (2014).
[12] A. S. Reyna and C. B. de Araújo, Opt. Express **22**, 22456 (2014).
[13] A. S. Reyna and C. B. de Araújo, "High-Order nonlinearities of metal-dielectric nanocomposites," em Metal Nanostructures for Photonics, Elsevier, 2019.
[14] A. S. Reyna and C. B. de Araújo, Opt. Express **23**, 7659 (2015).

[15] A S. Reyna and C. B. de Araújo, Adv. Opt. Photon. 9, 720 (2017).
[16] A. S. Reyna and C. B. de Araújo, Phys. Rev. A **93**, 013843 (2016).
[17] S. Hughes, L. Ramunno, J. F. Young, and J. E. Sipe, Phys. Rev. Lett. **94**, 033903 (2005).
[18] A. T. Eggebrecht, S. L. Ferradal, A. Robichaux-Viehoever, M. S. Hassanpour, H. Dehghani, A. Z. Snyder, T. Hershey, and J. P. Culver, Nat. Photonics 8, 448 (2014).
[19] J. Bravo-Abad, Nat. Phys. 11, 213 (2015).
[20] M. Jang, Y. Horie, A. Shibukawa, J. Brake, Y. Liu, S. M. Kamali, A. Arbabi, H. Ruan, A. Faraon, and C. Yang, Nat. Photonics 12, 84 (2018).
[21] D. S. Wiersma, Nat. Phys. 4, 359 (2008).
[22] W. Heeman, W. Steenbergen, G. M. van Dam, and E. C. Boerma, J. Biomed. Opt. 24, 080901 (2019).
[23] T. Hisch, M. Liertzer, D. Pogany, F. Mintert, and S. Rotter, Phys. Rev. Lett. 111, 023902 (2013).
[24] N. T. C. Oliveira, A. M. Vieira, C. B. de Araújo, W. S. Martins, R. A. de Oliveira, and A. S. Reyna. Phys. Rev. Appl. **15**, 064062 (2021).
[25] A. M. Vieira, N. T. C. Oliveira, C. B. de Araújo, W. S. Martins, R. A. de Oliveira, and A. S. Reyna. J. Phys. Chem. C **125**, 5919 (2021).
[26] A. S. Reyna, B. A. Malomed, and C. B. de Araújo, Phys. Rev. A 92, 033810 (2015).
[27] K. D. Kim, H. Yu, K. Lee and Y. K. Park. Sci. Rep. **7**, 44435 (2017).
[28] N. T. C. Oliveira, A. S. Reyna, E. H. L. Falcão, and C. B. de Araújo. J. Phys. Chem. C 123, 12997 (2019).
[29] N. T. C. Oliveira, M. L. Silva-Neto, A. S. Reyna, and C. B. de Araújo. J. Phys. Chem. C 124, 10705 (2020).