

## 1. Identificação da Proposta

**Título:** Melhoramento da eficiência do armazenamento e da leitura de informações em memórias atômicas.

**Instituição Executora do Projeto:** UACSA/UFRPE – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, PE.

**Orientador:** Prof. Rafael Alves de Oliveira (CPF: 060.534.824-39).

**Coorientador:** Prof. Weliton Soares Martins (CPF: 055.580.144-66).

## 2. Resumo da Proposta

A presente proposta visa realizar investigações experimentais, teóricas e simulações computacionais em problemas relacionados ao estudo da melhora nos processos de armazenamento e leitura de informações em memórias atômicas. A pesquisa a ser desenvolvida nesta proposta envolve a aplicação de novas técnicas com intuito de realizar a preparação do ensemble atômico, utilizado para armazenar a informação, e analisar o melhor processo de leitura de modo a garantir a maior eficiência na retirada da informação armazenada. Esse tema possui extremo interesse da engenharia devido à sua grande aplicabilidade tecnológica, como por exemplo, no desenvolvimento de novos tipos de memórias, novas possibilidades de implementação de algoritmos computacionais nesses tipos de memórias e aplicações tecnológicas associadas às comunicações óticas. Além disso, o tema é bastante atrativo às ciências da natureza por envolver conceitos fundamentais de Física associados às características intrínsecas da luz que propiciam o desenvolvimento da ciência básica através de um maior entendimento da interação radiação-matéria. Através deste projeto, vimos solicitar uma bolsa mestrado junto à FACEPE para auxiliar na consolidação das atividades de pesquisa no Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) sediado na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Campus das Engenharias (UACSA-UFRPE). Essa proposta tem como objetivo desenvolver um estudo experimental e teórico do armazenamento e leitura de informações em novos tipos de memórias atômicas e sua possível aplicação no desenvolvimento da computação quântica, na teoria da informação e nas comunicações ópticas em geral. Com isso, acreditamos que o projeto carrega um aspecto bastante inovador, pois o mesmo propicia a integração entre a pesquisa de conceitos básicos de óptica não-linear e da interação radiação-matéria e seus impactos em aplicações na engenharia. Neste sentido, a consolidação dessa linha de pesquisa no PPENGFIS terá um papel fundamental no desenvolvimento científico da região e na consolidação do ambiente de inovação no Estado de Pernambuco.

## 3. Introdução

O estudo de sistemas atômicos coerentemente preparados tem revelado diversos fenômenos interessantes. Um deles é o aprisionamento coerente de população [1] (**CPT**, *Coherent Population Trapping*) observado pela primeira vez por Alzetta et al [2]. Tal fenômeno deve-se ao bombeamento do sistema atômico num estado específico de superposição coerente dos níveis fundamentais do sistema, o qual não absorve radiação. Esse estado é denominado de "estado escuro". A partir de então, diversos estudos e observações relacionados ao CPT foram realizados [3-7]. Uma consequência direta desse efeito é o cancelamento da absorção de luz pelo ensemble atômico, mesmo que os campos envolvidos estejam ressonantes com o meio. Essa ressonância de transparência é denominada de transparência eletromagneticamente induzida [8] (**EIT**, *Electromagnetically Induced Transparency*), a qual foi observada primeiramente por Boller et al [9] em uma amostra de vapor de Estrôncio. Além dessa transparência poder ser explicada com base no fenômeno de CPT, outras interpretações foram dadas para esse efeito, como, por exemplo, devido a uma interferência quântica destrutiva entre os dois caminhos possíveis de absorção envolvendo estados vestidos do sistema átomo-campo [10]. Um resultado importante associado ao EIT é que, na mesma região espectral onde ocorre o cancelamento da absorção devido à interferência quântica destrutiva, podem ocorrer interferências construtivas. Essas interferências construtivas afetam as suscetibilidades não-lineares de ordens mais altas no campo elétrico, fazendo com que seu valor aumente algumas ordens de grandezas [11] e seja possível estudar ótica não-linear no regime de baixas intensidades [12]. O fenômeno de EIT também possibilitou reduzir drasticamente a velocidade de grupo da luz [13], efeito denominado de "luz lenta". Para obter esse efeito, utiliza-se o fato de que um meio na condição de EIT possui uma alta dispersão em frequência. Assim, como a velocidade de grupo de um pulso varia inversamente com essa dispersão, tal velocidade pode ser reduzida a algumas dezenas de *m/s* e até mesmo ser nula [13,14]. Além disso, Hau e colaboradores [15] mostraram que é possível utilizar a condição de EIT para armazenar coerentemente um pulso de luz em um meio atômico e depois recuperá-lo através

da aplicação de um feixe apropriado. Esse experimento mostrou a transferência das características do feixe de luz para as coerências atômicas e a recuperação posterior de toda a informação. Nesta mesma linha, Fleischhauer e Lukin [16] mostraram que pode existir uma excitação mista entre luz e matéria, denominada de "Dark State Polariton" (DSP), que se propaga sem se deformar no meio e contém toda informação dessa luz. Mais importante, as componentes dessa excitação mista podem ser manipuladas através de um pulso de "controle", de tal modo que ao se reduzir a intensidade desse pulso a zero, o DSP torna-se puramente atômico e, diz-se que a informação da luz incidentefica completamente armazenada no meio. Ao religar o pulso de "controle", pode-se então reobter o pulso luminoso e toda a sua informação é restaurada, inclusive sua forma temporal. No formalismo desenvolvido por Fleischhauer e Lukin foi afirmado que eram necessárias algumas condições para o armazenamento da informação da luz, entre elas o meio ser do tipo EIT.

A maioria dos fenômenos coerentes está associada com o aprisionamento coerente de população e o cancelamento da absorção da luz. Contudo, em certas condições, a interação coerente pode aumentar a absorção do meio na ressonância. Esse fenômeno, que pode ser considerado o oposto a EIT, é denominado Absorção Eletromagneticamente Induzida (**EIA**, *Electromagnetically Induced Absortion*). O EIA foi previsto e observado pela primeira vez por Lezama e colaboradores em 1998 [17]. O aumento de absorção do meio ocorre devido à transferência espontânea de coerência dos estados excitados para os estados fundamentais [18, 19]. Na EIA temos a possibilidade de medir velocidade de grupo negativa para pulsos de luz, ou seja, propagação de pulso "superluminal", como comentado em [20, 21]. Muito recentemente, foi mostrado que é possível observar o armazenamento de luz no meio atômico também no regime de EIA [22], mostrando que as condições impostas por Fleischhauer e Lukin poderiam ser desconsideradas de modo a ainda obter o armazenamento da informação da luz, como foi feito em EIT. Isto representa uma potencial aplicação desse tipo de fenômeno coerente no desenvolvimento de novos tipos de memórias atômicas.

Por outro lado, o desenvolvimento de memórias atômicas baseadas em um meio tipo EIA não foi muito explorado, bem como o estudo da eficiência desse novo protocolo ainda não foi feito. Desta forma, esse projeto propõe lançar luz sobre pontos que continuam em aberto, tais como, a análise da eficiência energética do processo de armazenamento na condição de EIA e a análise das melhores condições para realizar a leitura dessa informação armazenada. Além disso, tal técnica poderá auxiliar no desenvolvimento de novas estratégias para o desenvolvimento da computação quântica e da teoria da informação.

## 4. Objetivos

### 4.1 Geral

- Analisar e caracterizar a eficiência do armazenamento de informação em um meio do tipo EIA e a melhor condição de leitura dessa informação.

### 4.2 Específicos

- Obter o armazenamento de informação nas condições de EIA e EIT;
- Estudar a dependência da energia armazenada no meio tipo EIA com a potência dos feixes de escrita e leitura;
- Comparar os resultados obtidos com os já conhecidos para a informação armazenada em um meio do tipo EIT e determinar as condições em que cada tipo de memória é mais eficiente;
- Avaliar diferentes possibilidades de leitura da informação armazenada nas diferentes condições de armazenamento.

## 5. Metodologia

Para estudar os aspectos descritos na introdução e nos objetivos, iremos montar um aparato experimental composto por duas células contendo vapor de césio na qual iremos incidir dois feixes de luz proveniente de um laser de diodo. Para controlar a frequência de um dos feixes usaremos um modulador acusto-óptico o qual servirá também para modular a amplitude dele. Já para a medição e aquisição do sinal utilizaremos dois detectores de baixo ruído que foram construídos no laboratório de manipulação coerente de átomos e luz do IFUSP, os quais foram doados para realização destes experimentos, e um osciloscópio de velocidade 200 MHz que faz parte do patrimônio da UACSA-UFRPE. Todos esses dados serão armazenados e analisados em um microcomputador. Especificamente, iremos medir o sinal extraído do

meio após o processo de leitura da informação armazenada. De posse do pulso extraído do meio, seremos capazes de analisar a energia total extraída na condição de EIA em função da potência dos feixes de escrita e leitura da informação para caracterizar a eficiência do processo de armazenamento da informação. Após a análise da energia obtida, iremos caracterizar a energia extraída em função da frequência do feixe de leitura para levantar o espectro de leitura do sinal armazenado. É importante notar que com todos os resultados em mãos poderemos comparar os resultados obtidos na condição EIA com os já conhecidos resultados na condição de EIT e analisar em quais condições cada tipo de meio é mais eficiente para o armazenamento de informação. Em paralelo à realização do experimento nos dedicaremos a elaborar um modelo teórico que explique qualitativa e quantitativamente os resultados experimentais. A construção deste modelo será fundamental para nos guiar na melhor interpretação dos fenômenos físicos que regem a dinâmica deste sinal. Além disso, a elaboração de uma simulação numérica será de suma importância para auxiliar o modelo teórico e também para resolver exatamente algumas equações que não possuem soluções analíticas.

## **6. Aderência aos critérios de Priorização**

### **6.1. Reserva de bolsas para Cursos Novos.**

O programa de pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS), vinculado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA–UFRPE), está iniciando suas atividades em 2019.1. O PPENGFIS foi aprovado na 181ª reunião do CTC-CAPES em dezembro de 2018.

### **6.2. Apoio diferenciado à pós-graduação em Engenharias.**

O projeto está vinculado ao programa de pós-graduação em Engenharia Física, sediado na UACSA-UFRPE, pertencente à grande área de Materiais da CAPES.

### **6.3. Projeto em temas estratégicos para o desenvolvimento do estado - Arranjos Produtivos Locais (APLs) do estado: Porto Digital.**

Este projeto será desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Engenharia Física (PPENGFIS) da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA-UFRPE), Campus das Engenharias, que é situado na cidade do Cabo de Santo Agostinho-PE. O desenvolvimento deste projeto é fundamental para a consolidação das atividades de pesquisa na cidade do Cabo de Santo Agostinho implicando em um ambiente propício para o desenvolvimento tecnológico de Pernambuco e, em particular, para o desenvolvimento do Porto Digital do Estado. Desta forma, o desenvolvimento de novos tipos de memórias (tema deste projeto) é de inegável importância para este relevante setor tecnológico de Pernambuco, principalmente para o desenvolvimento de novas estratégias em Teoria da Informação e Comunicação (TIC), área de interesse central do Porto Digital. Além disso, compreendemos que o fato de estarmos contribuindo para uma formação sólida dos estudantes da área de tecnologia, implicará numa melhor estrutura do Estado acarretando numa maior possibilidade de atração grandes empreendimentos neste tema, onde o PPENGFIS atua. De fato, o maior gargalo enfrentado pelos Estados da federação para atrair os empreendimentos de grande porte é a falta de mão de obra especializada. Então, a nossa contribuição na formação de excelentes quadros nas áreas tecnológicas implicará também em um ganho social significativo pelos fatos já citados.

## **7. Resultados Esperados**

Conforme explicitado nos objetivos e na metodologia, a eficiência do armazenamento de informação em um meio tipo EIA ainda não foi completamente analisada. Desta forma, pretendemos obter resultados experimentais e teóricos que caracterizem a dependência da energia extraída de um sinal armazenado na condição de EIA em função das potências dos feixes de escrita e leitura da informação, do ângulo entre os eixos e em função dos diâmetros dos feixes; a dependência da energia armazenada na condição de EIA e fora dela, caracterizando os fatores responsáveis pela mudança da eficiência de um regime para o outro. Pretendemos compreender a técnica e identificar possíveis vantagens na aplicação do armazenamento de informação na condição de EIA e utilizar essas vantagens no desenvolvimento de novas estratégias para a construção de novas memórias atômicas. Por fim, pretendemos construir um modelo teórico e a simulação numérica para essas situações de modo a permitir uma melhor compreensão da técnica de armazenamento da luz e sua possível aplicação no desenvolvimento da computação quântica e na melhora dos novos tipos de forma de armazenamento de informações em meios atômicos.

## 8. Cronograma de Atividades

| Atividades                                                                                                                                       | 1º Semestre | 2º Semestre | 3º Semestre | 4º Semestre |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Revisão e atualização bibliográfica.                                                                                                             | X           | X           | X           | X           |
| Disciplinas.                                                                                                                                     | X           | X           |             |             |
| Elaboração do modelo teórico para análise da energia armazenada no meio tipo EIA.                                                                |             | X           | X           |             |
| Montagem do experimento para o estudo do armazenamento de informação na condição de EIA e realizar a comparação com o resultado obtido para EIT. |             | X           | X           |             |
| Análise dos resultados.                                                                                                                          |             |             | X           | X           |
| Elaboração de artigo.                                                                                                                            |             |             |             | X           |
| Elaboração de Relatório.                                                                                                                         | X           | X           | X           | X           |
| Defesa da Dissertação.                                                                                                                           |             |             |             | X           |

## 9. Referências Bibliográficas

- [1] E. Arimondo, Progress in Optics 35, 257 (1996).
- [2] G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, and G. Orriols, Nuovo Cimento B 36, 5 (1976).
- [3] R. M. Whitley and C. R. S. Jr., Phys. Rev. A 14, 1498 (1976).
- [4] S. Wang, D. G. Ducreay, R. Pina, M. Yan, and Y. Zhu, Phys. Rev. A 61, 033805 (2000).
- [5] V. Milner and Y. Prior, Phys. Rev. Lett. 80, 940 (1998).
- [6] J. Parker and C. R. Stroud, Phys. Rev. A 41, 1602 (1990).
- [7] F. T. Hioe and C. E. Carroll, Phys. Rev. A 37, 3000 (1988).
- [8] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J. P. Marangos, Rev. Mod. Phys. 77, 633 (2005).
- [9] K.-J. Boller, A. Imamoglu, and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. 66, 2593 (1991).
- [10] Y. Q. Li and M. Xiao, Opt. Lett. 51, 4959 (1995).
- [11] S. E. Harris, J. E. Field, and A. Imamoglu, Phys. Rev. Lett. 64, 1107 (1990).
- [12] S. E. Harris and L. V. Hau, Phys. Rev. Lett. 82, 4611 (1999).
- [13] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, Nature 397, 594 (1999).
- [14] O. Kocharovskaya, Y. Rostovtsev, and M. O. Scully, Phys. Rev. Lett. 86, 628 (2001).
- [15] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi, and L. V. Hau, Nature 409, 490 (2001).
- [16] M. Fleischhauer and M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. 84, 5094 (2000).
- [17] A.M.Akulshin, S.Barreiro, e A.Lezama. Phys. Rev.A, 57:2996, 1998.
- [18] A.V. Taichenachev, A.M.Tumaikin, e V.I.Yudin. Phys. Rev. A, 60:011802, 2000.
- [19] J.B. Kim, K. Kim, H.S. Moon, M.Kwon, e H.D.Park. J. Korean Phys. Society, 39:859, 2001.
- [20] A.M. Akulshin, S. Barreiro, e A. Lezama. Phys.Rev. Lett, 83:4277, 1999.
- [21] A.M. Akulshin, A. Cimmino, e G.I.Opat. Quantum Electron, 32:567, 2002.
- [22] A. Lezama, A.M. Akulshin, A.I. Sidorov, e P. Hannaford. arXiv:physics/0506199v1.