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

PROJETO DE PESQUISA

A spin fonônica em materiais piezo-ferromagnéticos

COORDENADOR:

José Holanda da Silva Júnior

maio 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	
A spin fonônica em materiais piezo-ferromagnéticos	
2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	05/2022
Término previsto (mês/ano):	05/2026
3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	Física
Número do código:	1.05.00.00-6
Nome da sub-área :	Física da Matéria Condensada
Número do código:	1.05.07.00-0
Nome da especialidade:	Materiais Magnéticos e Propriedades Magnéticas
Número do código:	1.05.07.13-2
4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
X	Materiais Nanoestruturados
X	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
X	Metrologia e Instrumentação
X	Espectroscopia coerente e óptica não linear
X	Controle e dinâmica não linear
5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Spin fonônica	• Piezoelétricos
• Fônons	• Ferromagnéticos
• Mágnons	

Cabo de Santo Agostinho,09 de maio de 2022

José Holanda da Silva Júnior

Coordenador:José Holanda da Silva Júnior

(SIAPE: *3213145*)

6- Participantes docentes:

Nome:	José Holanda da Silva Júnior
CPF:	019.016.453-04
E-mail:	joseholanda.homeoffice@gmail.com
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?:PQ-2
Função:	Coordenador☒ Colaborador☐

Nome:	Marcos Cesar Santos Oriá
CPF:	166.0590774-91
E-mail:	marcos.oria@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?:PQ-2
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

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 X

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 X

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

Spin (auto-rotação, ou seja, rotação do elétron em torno do seu eixo) é uma entidade quântica. As excitações coletivas de spins em materiais piezo-ferromagnéticos são quantizadas como mágnons, e as ondas elásticas que surgem de excitações na rede são quantizadas como fônons. Portanto, isso significa que os mágnons estão intimamente relacionados à propagação de informações coerentes. Por outro lado, os fônons em filmes de alta qualidade são freqüentemente empregados como uma nova forma de processamento de sinais porque também são excelentes mediadores de informações coerentes. A manipulação e controle de mágnons ou fônons por meio da interação magnetoelástica em materiais piezo-ferromagnéticos ajudará a explorar o campo da spin fonônica. O projeto visa desenvolver este novo campo e contribuir para a formação de novos pesquisadores de alto nível científico.

2. Introdução

A capacidade da matéria de gerar efeitos magnéticos macroscópicos é conhecida da humanidade há muitos anos. Porém, somente no final do século XIX, com o estudo de Pierre Curie, começaram a ser feitas investigações sistemáticas das propriedades das substâncias magnéticas. No início do século 20, compreendeu-se que materiais fortemente magnéticos, todos chamados de ferromagnetos, exibiam uma magnetização espontânea em temperaturas abaixo de um valor crítico, denominado temperatura de Curie. Percebeu-se que essa magnetização se devia a um forte acoplamento entre momentos magnéticos microscópicos, mas as origens dos momentos e sua interação eram desconhecidas. Com uma abordagem fenomenológica do campo molecular, Pierre Weiss propôs uma teoria que dava uma variação da magnetização espontânea com a temperatura em concordância satisfatória com as medidas existentes. A abordagem assume que cada momento magnético microscópico interage com um campo molecular efetivo criado pelos momentos vizinhos. Com essa suposição, pode-se obter uma estimativa de ordem de magnitude para um campo molecular efetivo a partir da temperatura de Curie medida. A energia térmica é comparável à energia de ordenação de cada momento nesta temperatura. Com o desenvolvimento da mecânica quântica no início do século 20 e a compreensão detalhada dos átomos, a origem do momento magnético microscópico foi explicada e um possível mecanismo para sua forte interação foi

desenvolvido por Heisenberg. Hoje, é bem conhecido que os momentos se originam de spins eletrônicos desemparelhados de íons com distribuições internas parcialmente preenchidas de alguns elementos da tabela periódica. Este é o caso de elementos do grupo de metais de transição 3d, como: Fe, Cr, Mn, Fe, Co e Ni, e elementos de terras raras, como: Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, etc. A forte interação entre momentos de átomos vizinhos tem sua origem na interação de troca entre os spins.

Tais interações entre spins foram fundamentais para Felix Bloch na década de 1930 definir o desvio coletivo dos spins, que ele chamou de onda de spin [1, 2]. No estudo de ondas de spin, as condições de contorno nas superfícies da amostra são de suma importância. Esta é uma abordagem válida para vetor de onda $k > 10^3$ cm^{-1}, porque esta faixa de vetores de onda corresponde a comprimentos de onda muito mais baixos do que as dimensões típicas de amostras usadas em experimentos do tipo. Neste caso, a variação da magnetização nas superfícies da amostra é tal que os campos de desmagnetização de superfície são desprezíveis. Para o modo de mágnon $k = 0$, a desmagnetização da superfície tem um efeito importante na freqüência da ressonância ferromagnética (FMR). Isso desperta interesse no efeito de campos dipolares de superfície na frequência de ondas de spin com comprimentos de onda comparáveis às dimensões da amostra, como filmes finos. O método padrão para estudar essas ondas é usar a equação para o potencial escalar magnético em um meio ferromagnético, inicialmente derivada por Larry Walker [3] para amostras esféricas. Outro trabalho importante é o de Damon-Eshbach [4], no qual fenômenos de ondas de spin foram estudados com filmes espessos, uma vez que naquela época não havia filmes finos ferromagnéticos de boa qualidade disponíveis.

No final do século 20, percebeu-se que o spin, com ou sem carga elétrica, pode ser usado para processar informações, principalmente informações digitais codificadas com bits binários 0 e 1. Tais desenvolvimentos foram alimentados pela investigação de como as correntes elétricas spin-polarizadas podem ser injetadas em multicamadas ferromagnéticas/não magnéticas que, na década de 1980, levaram à importante descoberta do fenômeno da magnetorresistência gigante (GMR) [5, 6]. Nesse momento surgiu uma nova área chamada spintrônica. A spintrônica ganhou ímpeto com a observação ou predição de novos fenômenos envolvendo a interação entre as correntes de spin e a dinâmica da magnetização acoplada ou não à dinâmica elástica, como o bombeamento de spin com ondas elásticas [7, 8], excitação de ondas de spin por ondas elásticas em interfaces magnéticas/não magnéticas [9-11], transporte mágnon-polaron não local em isolantes magnéticos [12, 13],

transporte de fônon controlado pela dinâmica da magnetização [14-17], observação direta do acoplamento mágnon-fônon em isolantes magnéticos por espalhamento inelástico de nêutrons [18], detecção do spin do fônon em experimentos de conversão mágnon-fônon [19], aprimoramento termoelástico do efeito Seebeck [20], e outros efeitos de fônons na spintrônica [21-23]. É importante destacar que tendo os fônons amortecimento menor que em mágnons, o uso de fônons aumenta as possibilidades de aplicações.

Fenômenos envolvendo mágnons e fônons estão no centro de um novo campo de pesquisa denominado de spin fonônica, que visa desenvolver novas perspectivas para as tecnologias de informação emergentes [19, 24, 25]. Os isolantes ferromagnéticos convencionais com grandes efeitos piezoelétricos podem tornar a excitação direta, a manipulação e a detecção de ondas elásticas coerentes um desafio. O bombeamento de fônons, ou seja, a excitação de ondas elásticas coerentes em isolantes ferromagnéticos de alta qualidade pela dinâmica de uma camada magnética via acoplamento magnetoelástico é de fundamental importância para os dispositivos spin fonônicos [19, 24-27]. Mágnons e fônons podem ser excitados de maneiras diferentes. Vários grupos relataram experiências em que as correntes de spin são usadas para excitar à dinâmica de magnetização coerente em nanoestruturas magnéticas, que dão origem as correntes de spin magnônicas [19, 24-31]. Esta é uma forma possível de manipular os fônons via acoplamento magnetoelástico.

Um dos efeitos fundamentais da corrente de spin é baseado no torque de spin representando o anti-amortecimento que é exercido na magnetização de uma camada ferromagnética [28-32], que pode permitir a observação de novos fenômenos. Por outro lado, as superposições de correntes de carga e spin, as chamadas correntes de spin-polarizadas, têm sido estudadas extensivamente em nanoestruturas metálicas; tais correntes polarizadas de spin podem ser produzidas passando uma corrente elétrica por um filtro de spin. Além disso, é bem conhecido que ao injetar adequadamente uma corrente elétrica em multicamadas magnéticas metálicas, o torque de spin representando o anti-amortecimento pode produzir precessão de magnetização frequentemente na faixa de microondas, abrindo a possibilidade de usar nanoosciladores fonônicos sintonizáveis [33-41]. Por outro lado, ondas elásticas coerentes têm sido estudadas por meio da propagação de ondas acústicas de superfície, mostrando que o bombeamento de fônons é de fundamental importância para o processamento de sinais para tecnologias de comunicação [26, 27, 42]. Muito recentemente, tem

sido relatada a observação do bombeamento de fônons por correntes de spin em filmes de YIG [43], em um processo que é o Onsager recíproco do bombeamento de spin por ondas elásticas, que foi experimentalmente observado em multicamadas metálicas [5-8]. Inúmeros procedimentos foram realizados para estudar os mágnons e os fônons individualmente ou acoplados. No entanto, foi nos trabalhos de José Holanda [43, 44] que essas entidades quânticas mostraram uma relação direta de conservação de energia e momento, o que permitiu detectar o spin do fônon [44]. Neste momento surge a spin fonônica, um novo campo de estudo iniciado puramente no Brasil. E este projeto busca o desenvolvimento deste campo de estudo.

3. Objetivos

Geral:

O campo da spin fonônica é extremamente novo. Uma contextualização ampla do que representa este novo campo e no que ele se baseia, além da importância geral deste projeto está descrito na introdução. Em poucas palavras, este projeto objetiva expandir este novo campo de estudo.

Específicos:

Será enfatizada a possibilidade de aplicação e geração de dispositivos spin fonônicos.

4. Metodologia

Todas as metodologias utilizadas neste projeto utilizarão os conhecimentos que o coordenador do projeto possui em instrumentação científica. Além disso, algumas técnicas tradicionais serão utilizadas para explorar os fenômenos, tais como: sputtering, métodos químicos, ressonância ferromagnética, ressonância ferromagnética acústica, efeito de Kerr magneto-óptico assistido por micro-ondas (MOKE), espalhamento de luz Brillouin (BLS), simulações numéricas.

5. Resultados esperados

A spin fonônica é baseada em processos físicos que tem conservação de energia e momento. Seus materiais de estudo estão relacionados aos materiais que possuem interações magnéticas, elásticas e magnetoelásticas. Os efeitos de spin e rede estão no cerne dos dispositivos spin fonônicos que

possuem como um dos objetivos, aprimorar as tecnologias da informação e comunicação. Desta forma, os efeitos envolvendo a spin fonônica em materiais piezo-ferromagnéticos podem aumentar as aplicações e tornar a computação quântica cada vez mais viável. Pode-se afirmar que este é o caminho para iniciar uma nova revolução tecnológica, assim como aconteceu com a descoberta da magnetorresistência gigante que permitiu um aumento significativo no armazenamento de dados nos discos rígidos dos computadores. Pela importância das pesquisas realizadas em física básica, os descobridores da magnetorresistência gigante ganharam o Prêmio Nobel de Física em 2007. Em resumo, espera-se que os resultados deste projeto permitam consolidar este novo campo de pesquisa.

6. Cronograma de atividades

Semestre / Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
II	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
III	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
V	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VI	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
VII	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Atividade I	Revisão bibliográfica, aulas, minicursos, palestras sobre técnicas e fenômenos
Atividade II	Produção de amostras, caracterização, montagem de estruturas experimentais, aprendizagem de técnicas de simulação
Atividade III	Montagem de técnicas experimentais
Atividade IV	Experimentos, modelagem teórica e simulações
Atividade V	Resultados
Atividade VI	Análises de resultados
Atividade VII	Escrita de relatórios, artigos, patentes, produção de dispositivos spin fonônicos

7. Apoio financeiro e/ou institucional

O financiamento deste projeto será através da bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq – PQ-2.

8. Referências

[1] F. Block, *Zur Theorie des Ferromagnetismus*, Z. Phys. **61**, 206 (1930).

[2] F. Block, *Zur Theorie des Austauschproblems und der Remanenzerscheinung der Ferromagnetika*, Z. Phys. **74**, 295 (1932).

[3] L. R. Walker, *Resonant modes of ferromagnetic spheroids*, J. Appl. Phys. **2**, 318 (1958).

[4] R. W. Damon and J. R. Eshbach, *Magnetostatic modes of a ferromagnet slab*, J. Phys. Chem. Solids **19**, 308 (1961).

[5] K. Uchida, H. Adachi, T. An, T. Ota, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Long-range spin Seebeck effect and acoustic spin pumping*, Nat. Mat. **10**, 737 (2011).

[6] M. Weiler, H. Huebl, F. S. Goerg, F. D. Czeschka, R. Gross, and S. T. B. Goennenwein, *Spin Pumping with Coherent Elastic Waves*, Phys. Rev. Lett. **108**, 176601 (2012).

[7] A. V. Azovtsev and N. A. Pertsev, *Magnetization dynamics and spin pumping induced by standing elastic waves*, Phys. Rev. B **94**, 184401 (2016).

[8] J. Puebla, M. Xu, B. Rana, K. Yamamoto, S. Maekawa, and Y. Otani, *Acoustic ferromagnetic resonance and spin pumping induced by surface acoustic waves*, J. Phys. D: Appl. Phys. **53**, 264002 (2020).

[9] A. Kamra, H. Keshtgar, P. Yan, and G. E. W. Bauer, *Coherent elastic excitation of spin waves*, Phys. Rev. B **91**, 104409 (2015).

[10] X. Li, D. Labanowski, S. Salahuddin, and C. S. Lynch, *Spin wave generation by surface acoustic waves*, J. Appl. Phys. **122**, 043904 (2017).

[11] T. Kikkawa, K. Shen, B. Flebus, R. A. Duine, K.-i. Uchida, Z. Qiu, G. E. W. Bauer, and E. Saitoh, *Magnon Polarons in the Spin Seebeck Effect*, Phys. Rev. Lett. **117**, 207203 (2016).

[12] B. Flebus, K. Shen, T. Kikkawa, K.-i.Uchida, Z. Qiu, E. Saitoh, R. A. Duine, and G. E. W.Bauer *Magnon-polaron transport in magnetic insulators*, Phys. Rev. B **95**, 144420 (2017).

[13] L. J. Cornelissen, K. Oyanagi, T. Kikkawa, Z. Qiu, T. Kuschel, G. E. W. Bauer, B. J. van Wees, and E. Saitoh, *Nonlocal magnon-polaron transport in yttrium iron garnet*, Phys. Rev. B **96**, 104441 (2017).

[14] S. Streib, H. Keshtgar, and G. E.W. Bauer, *Damping of Magnetization Dynamics by Phonon Pumping*, Phys. Rev. Lett. **121**, 027202 (2018).

[15] K. An, A. N. Litvinenko,R. Kohno, A. A. Fuad, V. V. Naletov, L. Vila,U. Ebels, G. de Loubens, H. Hurdequint, N. Beaulieu, J. Ben Youssef, N. Vukadinovic, G. E. W. Bauer, A. N.

Slavin, V. S. Tiberkevich, and O. Klein, *Coherent long-range transfer of angular momentum between magnon Kittel modes by phonons*, Phys. Rev. B **101**, 060407(R) (2020).

[16] A. Rückriegel and R. A. Duine, *Long-Range Phonon Spin Transport in Ferromagnet–Nonmagnetic InsulatorHeterostructures*, Phys. Rev. Lett. **124**, 117201 (2020).

[17] C. Zhao, Y. Li, Z. Zhang, M. Vogel, J. E. Pearson, J. Wang, W. Zhang, V. Novosad, Q. Liu, and A. Hoffmann, *Phonon Transport Controlled by Ferromagnetic Resonance*, Phys. Rev. Appl. **13**, 054032 (2020).

[18] H. Man, Z. Shi, G. Xu, Y. Xu, X. Chen, S. Sullivan, J. Zhou, K. Xia, J. Shi, and P. Dai, *Direct observation of magnon-phonon coupling in yttrium iron garnet*, Phys. Rev. B **96**, 100406(R) (2017).

[19] S. C.Guerreiro and S. M. Rezende, *Magnon-phonon interconversion in a dynamically reconfigurable magnetic material*, Phys. Rev. B **92**, 214437 (2015).

[20] L. Chotorlishvili, X.-G. Wang, Z. Toklikishvili, and J. Berakdar, *Thermoelastic enhancement of the magnonic spin Seebeck effect*, Phys. Rev. B **97**, 144409 (2018).

[21] N. Ogawa, W. Koshibae, A. J. Beekman, N. Nagaosa, M. Kubota, M. Kawasaki, and Y. Tokura, *Photodrive of magnetic bubbles via magnetoelastic waves*, PNAS **112**, 8977-8981 (2015).

[22] K. An, K. S. Olsson, A. Weathers, S. Sullivan, X. Chen, X. Li, L. G. Marshall, X. Ma, N. Klimovich, J. Zhou, L. Shi, and X. Li, *Magnons and Phonons Optically Driven out of Local Equilibrium in a Magnetic Insulator*, Phys. Rev. Lett. **117**, 107202 (2016).

[23] D. A. Bozhko, P. Clausen, G. A. Melkov, V. S.L'vov, A. Pomyalov, V. I. Vasyuchka, A. V. Chumak, B. Hillebrands, and A. A. Serga, *Bottleneck Accumulation of Hybrid Magnetoelastic Boson*, Phys. Rev. Lett. **118**, 237201 (2017).

[24] S. M. Rezende, D. S. Maior, O. Alves Santos, and J. Holanda, Theory for phonon pumping by magnonic spin currents, Phys. Rev. **B 103**, 144430 (2021).

[25] E. Schlömann and R. I. Joseph, *Generation of Spin Waves in Nonuniform Magnetic Fields. III. Magnetoelastic Interaction*, J. Appl. Phys. **35,** 2382 (1964).

[26] S. Streib, H. Keshtgar, and G. E. W. Bauer, *Damping of Magnetization Dynamics by Phonon Pumping*, Phys. Rev. Lett. 121, 027202 (2018).

[27] C. Berk, M. Jaris, W. Yang, S. Dhuey, S. Cabrini, and H. Schmidt, *Strongly coupled magnon–phonon dynamics in a single nanomagnet*, Nat. Commun. 10, 2652 (2019).

[28] J. C. Slonczewski, *Current-driven excitation of magnetic multilayers*, J. Mag. Mag. Mat. **159**, L1 (1996).

[29] L. Berger, *Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current*, Phys. Rev.

B **54**, 9353 (1996).

[30] J. C. Slonczewski, *Excitation of spin waves by an electric current*, J. Magn. Magn. Mater. **195**, L261 (1999).

[31] M. D. Stiles and A. Zangwill, *Anatomy of spin-transfer torque*, Phys. Rev. B **66**, 014407 (2002).

[32] M. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, and P. Wyder, *Excitation of a Magnetic Multilayer by an Electric Current*, Phys. Rev. Lett. **80,** 4281 (1998).

[33] W. H. Rippard, M. R. Pufall, and T. J. Silva, *Quantitative studies of spin-momentum-transfer-induced excitations in Co/Cu multilayer films using point-contact spectroscopy*, Appl. Phys. Lett. **82**, 1260 (2003).

[34] S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov, N. C. Emley,R. J. Schoelkopf, R. A. Buhrman, and D. C. Ralph, *Microwave oscillations of an anomagnet driven by a spin-polarized current*, Nature **425**, 380 (2003).

[35] W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek, and T. J. Silva, *Direct-Current Induced Dynamics in* $Co_{90}Fe_{10}/Ni_{80}Fe_{20}$ *Point Contacts*, Phys. Rev. Lett. **92**, 027201 (2004).

[36] S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov, N. C. Emley, M. Rinkoski, C. Perez, R. A. Buhrman, and D. C. Ralph, *Current-Induced Nanomagnet Dynamics for Magnetic Fields Perpendicularto the Sample Plane*, Phys. Rev. Lett. **93**, 036601 (2004).

[37] I. N.Krivorotov, N. C. Emley, J. C. Sankey, S. I. Kiselev,D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Time-domain measurements of nanomagnet dynamics driven by spin-transfer torques*, Science **307,** 228(2005).

[38] S. M. Rezende, F.M. de Aguiar, and A. Azevedo, *Spin Wave Theory for the Dynamics Induced by Direct Currents inMagnetic Multilayers*, Phys. Rev. Lett.**94**, 037202 (2005).

[39] S. E. Russek, S. Kaka, W. H. Rippard, M. R. Pufall, and T. J. Silva, *Finite-temperature modeling of nanoscale spin-transfer oscillators*, Phys. Rev. B**71**, 104425 (2005).

[40] S.M. Rezende, F.M. de Aguiar, and A. Azevedo, *Magnon excitation by spin-polarized direct currents in magnetic Nanostructures*, Phys. Rev. B **73**, 094402(2006).

[41] V. E. Demidov, S.Urazhdin, H.Ulrichs, V.Tiberkevich, A.Slavin,D.Baither, G. Schmitz, and S. O. Demokritov, *Magnetic nano-oscillator driven by purespin current*, Nat. Mater. **11**, 1028 (2012).

[42] Y. Kajiwara et. al., *Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator*, Nature **464**, 262 (2010).

[43] J. Holanda, D. S. Maior, O. Alves Santos, A. Azevedo, and S. M. Rezende, *Evidence of*

phonon pumping by magnonic spin currents, Appl. Phys. Lett. **118**, 022409 (2021).

[44] J. Holanda, D. S. Maior, A. Azevedo, and S. M. Rezende, *Detecting the phonon spin in magnon-phonon conversion experiments*, Nat. Phys. **14**, 500 (2018).