

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CAMPUS DE NATAL**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**EFEITOS DA INTERAÇÃO DIPOLAR NAS FASES MAGNÉTICAS DE  
NANOELEMENTOS QUADRADOS**

**Daniel Sacramento Silva**

Natal – RN

2024

Daniel Sacramento Silva

**EFEITOS DA INTERAÇÃO DIPOLAR NAS FASES MAGNÉTICAS DE  
NANOELEMENTOS QUADRADOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade do  
Estado do Rio Grande do Norte (UERN) como requisito para a  
conclusão do Curso de Ciência e Tecnologia.**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Ana Lúcia Dantas**

Natal – RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do(a) autor(a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu(a) respectivo(a) autor(a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

**Catálogo da Publicação na Fonte.**  
**Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

S123e Sacramento Silva, Daniel  
EFEITOS DA INTERAÇÃO DIPOLAR NAS FASES  
MAGNÉTICAS DE NANOELEMENTOS QUADRADOS. /  
Daniel Sacramento Silva. - Natal-RN, 2024.  
52p.

Orientador(a): Profa. Dra. Aná Lúcia Dantas.  
Coorientador(a): Profa. M<sup>a</sup>. Thaisa Grasielly de Moraes  
Jales.

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia).  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Magnetismo. 2. Nanotecnologia. 3. Vórtices  
magnéticos. 4. Spin. 5. Interação dipolar. I. Dantas, Aná  
Lúcia. II. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.  
III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pela Diretoria de Informatização (DINF), sob orientação dos bibliotecários do SIB-UERN, para ser adaptado às necessidades da comunidade acadêmica UERN.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que me deu sabedoria e dedicação para a realização desse presente trabalho.

Agradeço a professora Ana Lúcia Dantas por acreditar no meu potencial a todo momento, me ajudando, dando suporte para que ele pudesse ser realizado e transmitindo seus conhecimentos sempre de maneira fácil e com paciência, para o meu entendimento. Serei eternamente grato a ela.

Agradeço a Thaisa Grasielly e Adlan da Silva que ficaram de dia, de noite e de madrugada me ajudando, me ensinando cada passo e me ajudando a aprender, sou muito grato a toda atenção que me deram.

Agradeço a minha namorada que esteve comigo desde sempre me dando apoio, transmitindo confiança e mesmo sem entender muito do assunto, fez de certa forma esse tcc comigo e me incentivou.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou, em especialmente a minha mãe que moveu inúmeras montanhas para que eu estudasse da melhor forma e os meus avós por serem sempre meus alicerces.

A Jordan Vinicius que me ajudou muito na elaboração do projeto e do tcc, sempre me passando confiança.

Ao Vladimir Mesquita que todo dia nos ajudava transmitindo seus conhecimentos, experiências e suas visões, sempre dando confiança.

Ao professor Dácio que esteve disponível sempre que pode, sempre nos mostrando detalhadamente como se faz um bom tcc e em horas extras várias vezes dava um jeito de nos ajudar para deixar o trabalho melhor com atenção e paciência. Agradeço bastante também aos demais professores que ajudam imensamente de várias formas e entendem os alunos, eles são cruciais para a minha formação desde o início.

E ao CNPQ pelo valor investido nesta pesquisa.

## RESUMO

O estudo de vórtices magnéticos em sistemas nanoestruturados levarão a descobertas de novos fenômenos e efeitos físicos que ainda não foram explorados. Por isso, esse trabalho se baseia na análise de estruturas ferromagnéticas com dimensões no tamanho de nanômetros, sendo essa análise totalmente teórica enfatizando os resultados da interação dipolar nas faces dos nanoelementos quadrados. Com essa análise, será possível a descrição das propriedades presentes nas células magnéticas sobre a nanoestruturação dos vórtices magnéticos, para compreender melhor essas propriedades, analisar os resultados realizados em células magnéticas e caracterizando os resultados da influência de diferentes parâmetros da teoria micromagnética nas características dos vórtices. Para essa pesquisa foi desenvolvido um algoritmo onde ocorreu o cálculo das energias presentes na teoria micromagnética, pois elas irão definir como esse sistema atua. Dessa forma, para implementar os cálculos, usa-se o conceito de célula de simulação, onde nelas serão avaliadas como propriedades geométricas e magnéticas, como o campo externo, infere em cada célula separadamente, campo externo esse que é utilizado para saturar a partícula e depois retirado gradativamente, deixando-a em estado de remanência, que é o nosso estado de interesse. O sistema para estudo consiste em nanoelementos de ferro e permalloy em sistemas isolados, que consiste na análise de um único nanoelemento e acoplados, com outro nanoelemento de mesmo tipo e dimensões, porém separados por um espaçador não ferromagnético com um tamanho fixo de 3nm, as dimensões de  $n_x$  e  $n_y$  serão iguais, variando de 30nm a 60nm e com sua altura “h” variando de 12nm a 30nm. Em base de tudo isso, os resultados avaliaram primeiramente a curva de magnetização em cada fase diferente encontrada que é presente nesse estudo, visando analisar como se apresenta a magnetização remanente do componente estudado, em cada dimensão. Após essa análise, foram apresentados no plano “xy” os resultados dos cálculos em forma do gráfico forma, após isso foi realizado um diagrama de fases para cada dimensão estudada, pontuando no diagrama como essas fases se diferenciam em variações de comprimento e altura. Mostrando como esses componentes podem alcançar o estado de mais baixa energia, respondendo a incógnita de se há possibilidade da manipulação dos vórtices magnéticos e elaborando perspectivas futuras para as pequenas lacunas ainda não respondida no estudo.

**Palavras-Chave:** Magnetismo. Nanotecnologia. Vórtices magnéticos. Spin. Interação dipolar.

## ABSTRACT

The study of magnetic vortices in nanostructured systems will lead to the discovery of new phenomena and physical effects that have not yet been explored. Therefore, this work is based on the analysis of ferromagnetic structures with dimensions on the nanometer scale, with this analysis being entirely theoretical, emphasizing the results of dipolar interaction on the faces of square nano-elements. With this analysis, it will be possible to describe the properties present in the magnetic cells on the nanostructuring of the vortices, to better understand these properties, analyze the results obtained in magnetic cells, and characterize the results of the influence of different parameters of micromagnetic theory on the characteristics of the vortices. For this research, an algorithm was developed where the calculation of the energies present in the micromagnetic theory occurred, as they will define how this system operates. In order to implement the calculations, the concept of a simulation cell is used, where geometric and magnetic properties will be evaluated, such as the external field, influencing each cell separately. This external field is used to saturate the particle and then gradually removed, leaving it in a remanent state, which is our state of interest. The system for study consists of isolated iron and permalloy nano-elements, which involves the analysis of a single nano-element and coupled with another nano-element of the same type and dimensions, but separated by a non-ferromagnetic spacer with a fixed size of 3nm, where the dimensions of  $n_x$  and  $n_y$  will be equal, varying from 30nm to 60nm and with its height "h" varying from 12nm to 30nm. Based on all of this, the results primarily evaluated the magnetization curve in each different phase found in this study, aiming to analyze how the remanent magnetization of the studied component is presented in each dimension. After this analysis, the results of the calculations were presented on the "xy" plane in the form of a graph, and then a phase diagram was constructed for each studied dimension, indicating on the diagram how these phases differ in length and height variations. Showing how these components can reach the state of lowest energy, answering the question of whether there is a possibility of manipulating magnetic vortices and developing future prospects for the small gaps still unanswered in the study.

**Keywords:** Magnetism. Nanotechnology. Magnetic vortices. Spin. Dipolar interaction.

## SUMÁRIO DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema da face de uma nanopartícula ferromagnética quadrada FM ( $n_x$ , $n_y$ , $h$ ), no plano $xy$ . As setas em preto representam os momentos magnéticos e a seta branca é apenas um guia visual. A fase magnética exibida é vórtice magnético.....	13
Figura 2. Ilustração de um nanoelemento e uma pequena parte dele, a célula de simulação.....	15
Figura 3. Ilustração de linhas de campo magnético.....	18
Figura 4. Ilustração de nanopartículas celulares.....	22
Figura 5. Orientação dos <i>spins</i> em materiais ferromagnéticos.....	24
Figura 6: Representação de domínios magnéticos em estados desmagnetizados e saturados.....	26
Figura 7: Ilustração do método autoconsistente.....	31
Figura 8: Vórtice magnético em uma nanoestrutura com dimensões de $n_x = n_y$ de 30nm com $h = 12$ nm.....	33
Figura 9: Diagrama de fases do ferro com nanoelementos isolados com o $n_x=n_y$ na faixa de 30nm a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm.....	35
Figura 10: Ilustração do resultado paralelo a Y no nanoelemento quadrado de Ferro (30 nm, 30 nm, 24 nm).....	36
Figura 11: Diagrama de fases do permalloy com nanoelementos isolados com o $n_x=n_y$ na faixa de 30 a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm.....	37
Figura 12: Gráfico permalloy tipo perpendicular com $N_x=n_y$ 33nm e $h=36$ nm.....	38
Figura 13: Curva de magnetização do Permalloy com $N_x=N_y=36$ nm e $h=12$ nm com resultados tipo C-plano.....	39
Figura 14: Gráfico permalloy tipo c- plano $N_x=n_y$ 36nm e $h=12$ nm.....	40
Figura 15: Curva de magnetização do Permalloy com $N_x=N_y=36$ nm e $h=15$ nm para um resultado de vórtice magnético.....	41
Figura 16: Gráfico permalloy tipo c- plano $N_x=n_y$ 36nm e $h=12$ nm.....	41
Figura 17: : Curva de magnetização do Permalloy com $N_x=N_y=36$ nm e $h=15$ nm para um resultado de vórtice magnético.....	42

Figura 18: Curva de magnetização do ferro com $N_x=N_y=30\text{nm}$ e $h=12\text{nm}$ para um resultado de vórtice magnético .....	43
Figura 19: Vórtice magnético no nanoelemento quadrado de Ferro (30 nm, 30 nm, 12 nm) .....	43
Figura 20: Diagrama de fases do permalloy a partir de nanoelementos acoplados com o $n_x=n_y$ na faixa de 30 a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm.....	44
Figura 21: Diagrama de fases do ferro a partir de nanoelementos acoplados com o $n_x=n_y$ na faixa de 30 a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm .....	45

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	13
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
3.1. Magnetismo e sua caracterização.....	17
3.2. Explorando os efeitos do campo magnético.....	18
3.2.1 Spins e seus movimentos subatômicos.....	19
3.3. Potencial da nanotecnologia e suas perspectivas.....	21
3.4. Nanopartículas ferromagnéticas e suas características (Fe e Py).....	22
3.4.1. Características do ferromagnetismo em nanopartículas ferromagnéticas.....	23
3.4.2. Nanopartícula de <i>Permalloy</i> , caracterização.....	24
3.5. Teoria micromagnética e suas contribuições para o mundo do eletromagnetismo.....	25
3.5.1. Interação de troca, energia de curta distância.....	26
3.5.2. Energia de anisotropia uniaxial.....	27
3.5.3. Energia Zeeman, campo externo.....	28
3.5.4. Interação dipolar, energia de longa distância.....	28
3.5.5. Densidade de energia magnética da célula de simulação.....	29
3.5.6 Cálculo do método autoconsistente.....	30
3.6. Curva de magnetização em vórtices magnéticos.....	31
3.7. Vórtices magnéticos em nanoestruturas magnéticas.....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	34
4.1 Nanoelementos ferromagnéticos isolados.....	35
4.2 Nanoelementos ferromagnéticos acoplados.....	38
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	47
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

O magnetismo é um fenômeno físico, presente em diversos momentos do cotidiano e fundamental para muitas tecnologias modernas. Originado das propriedades dos átomos e elétrons, o magnetismo surge quando partículas carregadas se movem. Esse movimento cria um campo magnético ao redor da partícula, que pode interagir com outros campos magnéticos e materiais magnéticos (Rodriguez, 1998).

O advento da nanotecnologia viabilizou o crescimento e caracterização de nanomateriais revolucionando a sociedade atual. Em materiais de dimensões nanométricas ( $10^{-9}$  nm), as superfícies e/ou as interfaces são partes relevantes do sistema. Como consequência, a nanotecnologia deu origem a uma gama de novas propriedades dos materiais. (Hupffer, 2019) Em magnetismo, não foi diferente.

O nanomagnetismo ampliou muito o leque de aplicações dos materiais magnéticos, dando origem a área de conhecimento hoje conhecida como spintrônica. Na spintrônica, além da carga, o spin do elétron tem papel fundamental. (Mills, 2006)

A Interação dipolar é um fenômeno que ocorre entre moléculas que possuem dipolos elétricos. Um dipolo elétrico é caracterizado pela presença de uma distribuição de carga desigual dentro da molécula, resultando em um polo positivo e um polo negativo. O dipolo magnético tem propriedades semelhantes a um dipolo elétrico, mas em vez de cargas elétricas, ele possui polos magnéticos. Um exemplo comum de dipolo magnético é um ímã permanente, onde a força magnética é gerada pela orientação dos spins dos elétrons nos átomos constituintes do material magnético. (Schmool, 2009)

Quando dois objetos magnéticos estão próximos o suficiente, as forças magnéticas entre eles se tornam significativas. Essas forças surgem da orientação dos momentos magnéticos elementares dentro dos materiais. Cada momento magnético, ou dipolo magnético, cria um campo magnético ao seu redor. (Schmool, 2009)

A partir disso, a indústria eletrônica aborda uma ampla atividade com o ramo da nanotecnologia, ao qual desempenha o papel fundamental na fabricação de dispositivos eletrônicos, tais como os transistores (Kanungo, 2022), chips de computador (Nair, 2002), telas com alta resolução (GRAMLING, 2017), e principalmente os discos rígidos (HD's) (Scheunert, 2016).

Os vórtices magnéticos são padrões de magnetização que se formam em materiais magnéticos quando expostos a um campo magnético externo ou devido a características

intrínsecas do material (Novak, 2018). Esses vórtices têm sido estudados intensamente devido às suas propriedades únicas e potencial aplicação em diversos campos, desde a armazenagem de dados até a eletrônica de spin.

Dessa forma, traremos como objeto desse estudo a caracterização dos efeitos de interação dipolar na formação de vórtices em nanoestruturas ferromagnéticas.

A lacuna de pesquisa parte da premissa que nesse sistema de face cúbica, foram apresentados resultados para os tipos isolados e acoplados, aonde foi perceptível como a interação dipolar atuou em ambos de forma distintas, porém quando foram colocados em outro nanoelemento em cima dos isolados, percebeu-se uma maior quantidade de resultados para o estado mais baixo de energia, o estado de vórtices magnéticos que procurávamos.

Um dos principais fatores que tem despertado o interesse da comunidade acadêmica e da indústria para o estudo de vórtices em nanoestruturas magnéticas é o seu potencial tecnológico, fazendo com que esse estudo seja crucial para a minha formação acadêmica e abrindo portas para possíveis estudos posteriormente.

O estudo dos vórtices magnéticos permite o desenvolvimento de novas tecnologias e dispositivos com aplicações práticas. Os vórtices têm sido explorados em áreas como armazenamento de dados de alta densidade, spintrônica, nanotecnologia e sensores magnéticos. Compreender e controlar os vórtices magnéticos é crucial para melhorar a eficiência e o desempenho dessas tecnologias. (Kiselev, 2003)

Nesse contexto, o estudo de vórtices magnéticos em sistemas nano estruturados também se justifica pela compreensão mais profunda da física fundamental na área de magnetismo. Além disso, a pesquisa em vórtices magnéticos pode levar a descobertas de novos fenômenos e efeitos físicos que ainda não foram explorados. (Thiaville, 2012)

A problemática relacionada aos vórtices magnéticos é relacionada a manipulação controlada dessas estruturas para objetos de armazenamento de dados. O desafio é o desenvolvimento de métodos eficientes para criar, controlar e ler vórtices magnéticos em escala nanométrica. Alguns pontos a considerar são: estabilidade, manipulação, interferência e interação, materiais e estruturas, leitura e escrita e resistência à temperatura.

A pergunta dessa pesquisa é: Como esse método de estudo atua para caracterizar o material e as estruturas do elemento para criar, controlar e ler vórtices magnéticos em escala nanométrica de maneira estável e confiável, a fim de viabilizar o uso de vórtices

magnéticos em dispositivos de armazenamento de dados de alta densidade e baixo consumo de energia?

A hipótese dessa pesquisa consiste na análise de cálculos numéricos, visando o estudo do ordenamento magnético em materiais ferromagnéticos, em remanência. A partir disso, obter configurações que facilitem a nucleação de vórtice.

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar as propriedades spínicas das células magnéticas sobre a nanoestruturação dos vórtices magnéticos.

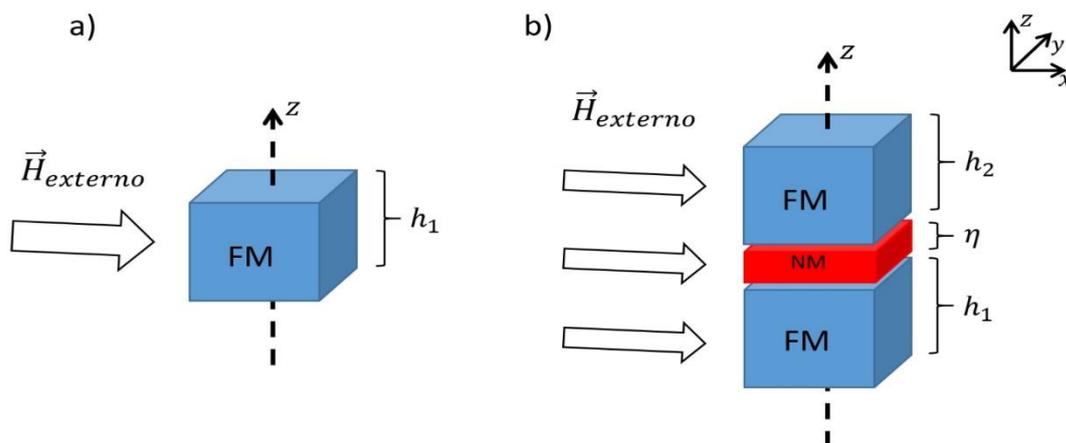
Os objetivos específicos desse estudo são compreender melhor as propriedades das células, explorando seu potencial para aplicações futuras. Analisar os resultados de simulações feitas por um software, sendo elas realizadas em células ferromagnéticas. Caracterizar os resultados da influência de diferentes parâmetros da teoria micromagnética nas características dos vórtices, de acordo com as frequências naturais de oscilação dos vórtices.

As palavras chaves para este trabalho são: Magnetismo. Nanotecnologia. Vórtices magnéticos. Spin. Interação dipolar.

## 2. METODOLOGIA

Nesse trabalho relatamos um estudo teórico, que foi realizado de forma quantitativa, sobre a nucleação de vórtices magnéticos em nanoelementos de face quadrada com arestas  $n_x = n_y$ , variando de 30 a 60 nm, e altura  $h$  de 12 a 30 nm. A análise foi feita em nanoestruturas de Ferro e Permalloy (80% níquel e 20% ferro), isoladas e acopladas magneticamente, como mostrado na figura 1.

**Figura 1: Imagem esquemática representando o sistema nanoestruturado. a) nanoelemento ferromagnético isolado de face quadrada e b) nanoelementos ferromagnéticos acoplados de face quadrada separados por um espaçador não magnético, via campo dipolar.**



Fonte: Elaborada pelo autor

Para identificar as fases magnéticas formadas no estado de remanência, adotamos o seguinte procedimento: Aplicamos um campo externo alto na direção do eixo  $x$ , saturando a nanopartícula. Então, diminuimos progressivamente o campo até  $H = 0$ , estabelecendo assim o estado de remanência.

A estrutura magnética foi descrita em termos de momentos magnéticos de células cúbicas com arestas de 3 nm, uma medida que é inferior ao comprimento de troca de ambos os materiais. O comprimento de troca ( $l_{exc}$ ), é definido pela equação 1.1:

$$l_{\text{exc}} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}} \quad (1.1)$$

Onde,  $A$  é a rigidez de troca,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $M_S$ , a magnetização de saturação do material.

A densidade de energia magnética dos nanoelementos em estudo é determinada por quatro componentes: energias de troca, de anisotropia, Zeeman e de interação dipolar. Portanto, a densidade de energia magnética total é dada pela expressão 2.0:

$$E = \frac{A}{d^2} \sum_{ij} (1 - \hat{m}_i \cdot \hat{m}_j) - K \sum_i (\hat{m}_{i,z})^2 - \vec{H} M_S \sum_i \hat{m}_i + \frac{M_S^2}{2} \sum_{i k} \left( \frac{\hat{m}_i \cdot \hat{m}_k}{n_{ik}^3} - \frac{3(\hat{m}_i \cdot \vec{n}_{ik})(\hat{m}_k \cdot \vec{n}_{ik})}{n_{ik}^5} \right) \quad (2.0)$$

Na equação acima,  $A$  é a rigidez de troca,  $d$  é o tamanho da célula,  $K$  é a constante de anisotropia e  $\hat{m}_i$  indica a direção do momento magnético da  $i$ -ésima célula,  $n$  é um vetor adimensional, que representa a distância entre as células de simulação em função das suas arestas. Para compreender o comportamento magnético, calculamos o campo efetivo exercido sobre cada célula individualmente, conforme expresso por:

$$\vec{H}_{\text{eff}}(i) = -\frac{1}{M_S} \vec{\nabla}_{\hat{m}} E \quad (3.0)$$

Aonde  $\vec{H}_{\text{eff}}(i)$  é o campo efetivo local sobre a  $i$ -ésima célula, que incorpora contribuições do campo de troca, de anisotropia, do externo e do campo dipolar. Com base na teoria de campo médio, assumimos que o vetor momento magnético de cada célula se alinha com a direção do seu campo efetivo local. Numericamente, isso significa que buscamos uma condição onde o torque seja aproximadamente zero, ou seja,  $\hat{m}_i \times \vec{H}_{\text{eff}}(i) \approx 0$

Portanto, a energia do sistema é conhecida, então para a utilização dos métodos computacionais foi usado como ferramenta de programação o *Origin Studio* 2012. Onde é feita a indução de parâmetros e a utilização do conceito retirado da teoria micromagnética, a célula de simulação, assim como demonstrado na figura 2. Porém, o

cálculo computacional utilizado para determinar a configuração magnética do sistema não é trivial, devido ao elevado número de átomos que irá compor a estrutura (Souza, 2020).

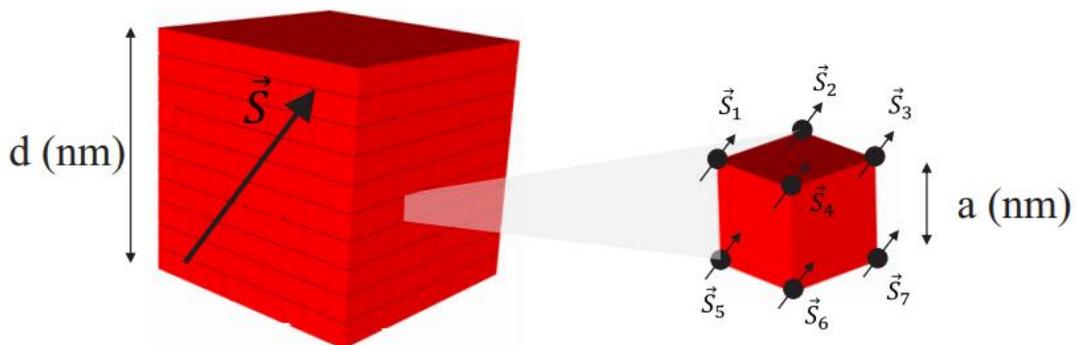
Como os materiais aqui estudados são têm a estrutura cristalina bcc (*body-centered cubic*), o número de átomos contidos em um nanoelemento é dada por:

$$N = 2 \left( \frac{d^3}{a_0} \right) \quad (4.0)$$

Nessa equação, por causa do material ser tipo bcc, o número de átomos é dado por  $N$  contidos no volume  $d^3$  onde  $a_0$  é o parâmetro de rede do material magnético, o número de células unitárias é representado pela fração e o termo 2 indica que cada célula unitária bcc apresenta dois átomos.

Se for considerado, por exemplo, um volume cúbico de ferro, com aresta  $d = 10\text{nm}$  e parâmetro de rede  $a_0$  do Fe é  $0,287\text{nm}$ , é obtido  $N \cong 84602$  átomos. Sendo assim, a fim de efetuar o cálculo computacional para determinar a configuração magnética de uma estrutura desse tipo, com dimensões de centenas de nanômetros, torna-se fundamental a utilização do conceito de célula de simulação, como ilustrado na figura 2.

**Figura 2: Ilustração de um nanoelemento e uma pequena parte dele, a célula de simulação.**



Fonte: Elaborada pelo autor

A célula de simulação é um conceito introduzido para facilitar o cálculo da configuração magnética de uma nanoestrutura, representando o conjunto de átomos presentes em seu volume que não apresentam variações consideráveis da magnetização.

Dessa forma, as interações no sistema não são calculadas entre os átomos, estruturas cristalinas, mas sim entre células. Essa célula de simulação será o sistema onde serão implementadas as energias da equação 2.0.

Para a visualização gráfica foi utilizado o software "OriginPro" versão 9.0 de 64 bits. A análise gráfica é constituída das curvas de magnetização e os mapas vetoriais que indicam a fase magnética do sistema para uma determinada intensidade de campo magnético externo.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

Nessa sessão será feito um refinamento relativo as partes teóricas utilizadas no presente trabalho, ao qual foram realizados por meio de livros, artigos científicos e simulações computacionais, além disso, o refinamento teórico envolve simulações computacionais.

#### **3.1 Magnetismo e sua caracterização**

O magnetismo é uma força fundamental da natureza que tem em larga escala interessado a curiosidade humana por séculos. Desde os antigos gregos até os cientistas modernos, o magnetismo tem sido objeto de estudo e aplicação em uma ampla gama de campos, desde a física fundamental até a tecnologia avançada.

Em sua essência, o magnetismo surge da interação entre partículas carregadas em movimento, como elétrons, que geram campos magnéticos ao seu redor. Esses campos magnéticos têm propriedades intrigantes que influenciam o comportamento de materiais e objetos ao seu redor (Schmool, 2009).

Um dos fenômenos mais conhecidos do magnetismo é a atração e repulsão entre ímãs. Ímãs possuem dois polos distintos, norte e sul, que interagem de acordo com a lei fundamental de atração e repulsão magnética. Essa interação é responsável por fenômenos tão comuns quanto a fixação de um ímã na geladeira até aplicações mais sofisticadas, como motores elétricos e geradores de energia. (Schmool, 2009).

Além da interação entre ímãs, os campos magnéticos também desempenham um papel crucial na estrutura e comportamento dos materiais. Materiais ferromagnéticos, como o ferro e o níquel, exibem propriedades magnéticas significativas devido à organização especial de seus elétrons. Quando expostos a um campo magnético externo, esses materiais podem se magnetizar, alinhando seus momentos magnéticos na direção do campo aplicado. (Leslie-pelecky, 1996)

Essa capacidade de magnetização é explorada em uma variedade de aplicações tecnológicas, desde a produção de dispositivos de armazenamento de dados, como discos rígidos e fitas magnéticas, até a fabricação de transformadores e dispositivos de comunicação sem fio. (Schmool, 2009).

Além disso, o magnetismo desempenha um papel fundamental na compreensão e exploração do cosmos. Campos magnéticos estelares influenciam a formação e evolução de galáxias, estrelas e planetas, e são essenciais para a pesquisa em astronomia e astrofísica. (Olavo, 2022)

O magnetismo em resumo é uma força poderosa e altamente presente que permeia o universo, desde os átomos até os confins do espaço. Seu estudo e aplicação continuam a moldar o mundo ao nosso redor e prometem facilitar novas fronteiras de conhecimento e inovações para o futuro.

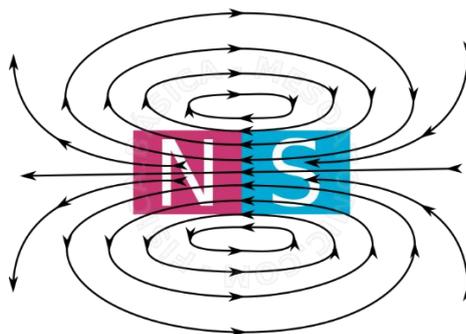
### 3.2 Explorando os Efeitos do Campo Magnético

O nosso redor é permeado por forças que moldam e influenciam tudo, desde as pequenas partículas subatômicas até suas ações no universo. Entre essas forças, uma das mais intrigantes é o campo magnético. (Ramos, 2017)

O campo magnético é um fenômeno de certa forma invisível, por seu delimitado tamanho e altamente presente, pois exerce um papel fundamental no universo e na forma como interagimos com ele. Essa força misteriosa, apesar de não ser facilmente percebida pelos sentidos humanos, desempenha um papel crucial em várias facetas da vida cotidiana. (Ludke, 2011)

Os campos magnéticos são gerados por cargas elétricas em movimento, sejam elas por elétrons orbitando em torno de um núcleo atômico ou por correntes elétricas fluindo em condutores. Quando uma corrente elétrica passa por um fio condutor, um campo magnético surge ao seu redor, demonstrando a relação íntima entre eletricidade e magnetismo. A figura três ilustra como atuam as linhas de campo magnético. (Medeiros, 2017)

**Figura 3: Ilustração de linhas de campo magnético**



Fonte: Mesoatomic

A interação entre ímãs é outro aspecto intrigante do campo magnético. Ímãs têm a capacidade de atrair materiais ferromagnéticos, como o ferro, devido à disposição especial de seus átomos e ao alinhamento de seus campos magnéticos. Esta capacidade de atrair e repelir é a base para inúmeras aplicações tecnológicas, atuando desde motores elétricos, ressonância magnética, geradores eólicos, até os dispositivos de armazenamento de dados em computadores. (Filho, 2007)

Além do seu impacto na tecnologia, destaca-se ainda o campo magnético terrestre desempenhando um papel crucial na proteção da vida no planeta Terra. A magnetosfera, a região em torno do planeta influenciada pelo campo magnético, atua como um escudo protetor, desviando partículas carregadas dos ventos solares que poderiam danificar a vida e as comunicações na Terra. (Echer, 2010)

No contexto cósmico, o campo magnético está presente em escalas enormes, desde as estrelas até as galáxias. As linhas de campo magnético desempenham um papel crucial na formação e evolução das estruturas cósmicas, influenciando o comportamento do plasma interestelar, a formação de estrelas e até mesmo a dinâmica das galáxias. (Echer, 2010)

O campo magnético é uma força que permeia o universo, influenciando desde os fenômenos microscópicos até os eventos cósmicos de larga escala. Sua compreensão e aplicação têm implicações profundas não apenas na ciência e na tecnologia, mas também na forma como percebemos e interagimos com alguns aspectos ao redor do mundo. (Echer, 2010)

### 3.2.1 Spins e seus movimentos subatômicos

Os *spins* são uma propriedade fundamental das partículas subatômicas quando nos aprofundamos no mundo quântico, descobrimos que as partículas elementares, como elétrons e prótons, não são simples "bolas" ou "esferas" com carga e massa, mas têm propriedades mais complexas, como o *spin*. (Belançon, 2018)

O termo "*spin*" não se refere a um movimento físico de rotação como o de uma bola girando sobre um eixo. O *spin* das partículas está associado a um tipo de momento angular intrínseco que está quantizado, o que significa que só pode ter valores específicos e discretos e padronizados. Enquanto o momento angular orbital de um objeto em rotação

pode assumir qualquer valor, o spin está limitado a valores discretos, como  $1/2$ ,  $1$ ,  $3/2$  e assim por diante, dependendo do tipo de partícula. (Sousa, 2022)

Isso pois existem partículas fermiônicas, que têm spin semi-inteiro, como  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$  e assim por diante. Essas partículas obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, o que significa que dois férmions idênticos não podem ocupar exatamente o mesmo estado quântico simultaneamente. Existem também as partículas de Bósons, que têm spin inteiro, como  $0$ ,  $1$ ,  $2$  e assim por diante. Os Bósons não têm restrições para ocupar os mesmos estados quânticos. O momento magnético está diretamente relacionado à orientação do spin da partícula, esses momentos podem se estabilizar ou ficar instáveis, mas dependem da sua relação ao campo magnético externo. (Belançon, 2018)

Quando uma partícula com spin é colocada em um campo magnético, ocorre o alinhamento ou desalinhamento do seu spin em relação a esse campo. Partículas com spin  $1/2$ , como elétrons, por exemplo, têm dois estados possíveis de spin quando colocados em um campo magnético: paralelo ou antiparalelo. Esses estados de spin podem ter diferentes energias associadas a eles. (Sousa, 2022)

No caso dos elétrons, por exemplo, o alinhamento paralelo ao campo magnético tem menor energia do que o antialinhamento. Isso resulta na divisão dos níveis de energia, chamada de divisão Zeeman, que é observável em espectros magnéticos. (Olavo, 2022)

Uma das peculiaridades do spin é sua relação com o campo magnético, pois partículas carregadas geram um campo magnético associado a esse spin. O spin tem um papel crucial na estrutura da matéria e nas interações fundamentais entre partículas. A sua compreensão é essencial para explicar a estabilidade dos átomos, a estrutura dos materiais e a diversidade de fenômenos observados na natureza. (Olavo, 2022)

Além disso, a interação do spin com um campo magnético pode resultar em precessão. A precessão do spin ocorre quando um sistema com momento magnético (como um elétron) é exposto a um campo magnético externo. O momento magnético tende a alinhar-se com o campo, resultando em um movimento de precessão em torno da direção do campo. Assim como a Terra atua em resposta à atração gravitacional do Sol, o spin de uma partícula pode atuar em torno do campo magnético aplicado. Esse fenômeno é fundamental na ressonância magnética nuclear por exemplo. (Olavo, 2022)

### 3.3 Potencial da nanotecnologia e suas perspectivas

A nanotecnologia representa um campo multidisciplinar que se concentra na manipulação e controle de materiais em escala nanométrica. Isso significa lidar com estruturas, dispositivos e sistemas em nível molecular e atômico, operando em uma faixa minúscula de dimensões, geralmente entre 1 a 100 nanômetros. Esta escala nanométrica permite explorar propriedades físicas, químicas e biológicas específicas, diferentes das observadas em escalas maiores. (Apolinário, 2020)

Na base da nanotecnologia está a habilidade de projetar, caracterizar e manipular materiais e estruturas no menor nível possível, onde as propriedades quânticas começam a se tornar dominantes. Esse domínio permite a criação de materiais com propriedades extraordinárias, como maior resistência, condutividade elétrica aprimorada, maior reatividade química, características essas que são desejáveis em diversas aplicações. (Ferreira, 2009)

A nanotecnologia é uma área interdisciplinar, visto que ela incorpora conceitos e técnicas de Física, Química, Biologia, Engenharia de Materiais e outras disciplinas científicas. Essa diversidade de conhecimentos é essencial para explorar e compreender os fenômenos que emergem nessa escala nanométrica.

As aplicações da nanotecnologia são vastas e abrangem uma ampla gama de setores. Na medicina, são desenvolvidos sistemas nanoestruturados para administração controlada de medicamentos, diagnósticos avançados e até mesmo terapias direcionadas ao nível molecular. Em eletrônicos, ela possibilita a fabricação de dispositivos cada vez menores e mais eficientes, como transistores e circuitos integrados. Na área de materiais, são criados revestimentos ultra resistentes, materiais mais leves e mais fortes, com aplicações na indústria aeroespacial, automotiva e construção civil. (Cancino, 2014)

O potencial da nanotecnologia é vasto, e seu desenvolvimento continua a avançar, oferecendo inúmeras possibilidades para aprimorar tecnologias existentes e criar soluções para desafios globais. (Souza, 2011)

Para exemplificação a figura 4 representa uma ilustração de uma nanopartícula celular interagindo com uma célula com um propósito de “cura”, porque como foi visto na recente pandemia, a comunidade científica uniu suas forças para criar dispositivos de detecção e proteção contra o vírus causador da COVID-19, precisando urgentemente

recorrer às ferramentas da nanomedicina. Algumas vacinas que foram desenvolvidas possuem nanoestruturas lipídicas que encapsulam um RNA mensageiro. (Bioequipomedico, 2022)

**Figura 4: Ilustração de nanopartículas celulares**



Fonte: bioequipomedico

### **3.4 Nanopartículas ferromagnéticas e suas características (Fe e Py)**

Nanopartículas magnéticas são estruturas minúsculas, muitas vezes na escala nanométrica, compostas por materiais magnéticos. Elas têm despertado interesse devido às suas propriedades únicas, resultantes de seu tamanho e da presença de propriedades magnéticas. (Souza, 2011)

A base dessas nanopartículas é frequentemente composta por materiais como óxidos de ferro, óxidos metálicos, ligas de metais ferrosos, dependendo das aplicações desejadas. Sua estrutura pode variar desde partículas individuais até estruturas mais complexas, como nanocompósitos ou nanotubos magnéticos. (Zhang, 2004)

A característica das nanopartículas magnéticas é a relação entre seu tamanho e as propriedades magnéticas, podendo ser diferentes das observadas em materiais em escala macroscópica. O "superparamagnetismo" é uma característica onde as nanopartículas não mantêm um magnetismo permanente, mas exibem comportamento magnético em resposta a um campo magnético externo, perdendo essa propriedade quando o campo é retirado. É importante ressaltar que as nanopartículas magnéticas ou ferromagnéticas nesse caso, podem ser manipuladas através de campos magnéticos externo sendo valiosas em diversas aplicações. (Sargentelli, 2010)

### 3.4.1 Características do ferromagnetismo em nanopartículas ferromagnéticas

As nanopartículas ferromagnéticas em sua essência, são estruturas extremamente pequenas, variando em tamanho de algumas dezenas a alguns poucos nanômetros, compostas por materiais ferromagnéticos. (Tessarolli, 2019)

O ferromagnetismo é uma propriedade física na qual certos materiais possuem domínios magnéticos alinhados espontaneamente, resultando em forte atração em nível microscópico. Quando esses materiais são reduzidos a uma escala nanométrica, surgem propriedades únicas e altamente influenciáveis pelo tamanho, forma e composição das nanopartículas. (Tessarolli, 2019)

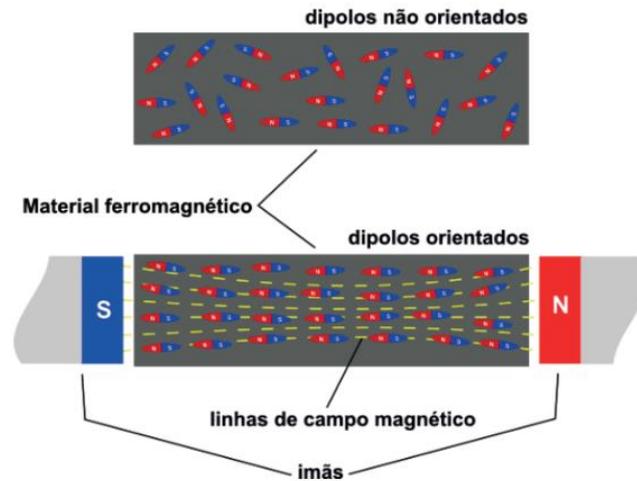
Uma das características mais marcantes das nanopartículas ferromagnéticas é sua resposta magnética diferenciada em comparação com os materiais em escala macroscópica. Isso se deve ao fenômeno conhecido como anisotropia de tamanho, no qual as propriedades magnéticas são sensíveis às dimensões nanométricas, podendo ser manipuladas para atender a propósitos específicos. (Zhang, 2004)

Essas nanopartículas têm sido alvo de intenso estudo e aplicação em diversos campos. Na medicina, por exemplo, têm sido utilizadas em terapias de hipertermia magnética para tratamento de câncer, onde as nanopartículas ferromagnéticas, quando expostas a campos magnéticos alternados, geram calor localizado para destruir células cancerosas de forma controlada e minimamente invasiva. (Roger et al, 1999; Vo-dinh, 2007; Thassu, 2007)

Em materiais ferromagnéticos, o acoplamento de interações faz com que os momentos magnéticos de spin resultantes de átomos adjacentes se alinhem uns com os outros, mesmo na ausência de um campo externo. (Caliister jr, 2016)

Na figura 5 temos uma representação esquemática de um material ferromagnético com os dipolos desorientados (ausência de campo externo) e depois alinhados com as linhas de campo de um campo magnético externo:

**Figura 5: Orientação dos *spins* em materiais ferromagnéticos**



Fonte: Promilitares

A capacidade de sintetizar e manipular nanopartículas ferromagnéticas com precisão tem sido objeto de pesquisa intensiva, visando explorar seu potencial em áreas como eletrônica, biomedicina, catálise. A compreensão e controle dessas propriedades magnéticas em escala nanométrica abrem um vasto campo de possibilidades para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e aplicadas em diversas esferas da ciência e da indústria. (Ferreira, 2007)

### 3.4.2 Nanopartícula de *Permalloy*, caracterização

As nanopartículas de *permalloy* são estruturas microscópicas com propriedades magnéticas notáveis, compostas principalmente por ferro (Fe) e níquel (Ni). Essas partículas são caracterizadas por seu tamanho extremamente reduzido, apresentando propriedades distintas em comparação com suas partes macroscópicas. (Ranstchler, 2007)

O *permalloy* é uma liga de ferro e níquel conhecida por suas excelentes propriedades magnéticas, como alta permeabilidade magnética e baixa coercividade. A combinação dessas características torna o *permalloy* ideal para aplicações em dispositivos magnéticos e eletrônicos, especialmente quando manipuladas em nanoescala. (Ranstchler, 2007)

A baixa coercitividade do *permalloy* e a resistência à mudança na direção da magnetização, tende a nos indicar que ele requer pouquíssima energia para reorientar seus

domínios magnéticos, auxiliando também o direcionamento mais facilitado dos *spins*. O *spin* é uma espécie de rotação intrínseca que essas partículas possuem, uma característica quântica que descreve o momento angular intrínseco da partícula. (Ranstchler, 2007)

A estrutura nanométrica das nanopartículas de *permalloy* proporciona uma área de superfície significativamente maior em comparação com formas maiores do material. Isso resulta em propriedades únicas, como maior sensibilidade magnética e resposta a campos magnéticos externos mais fracos. (Ranstchler, 2007)

As nanopartículas de *permalloy* encontram aplicação em diversas áreas, desde tecnologias de armazenamento de informação, como em sistemas de gravação magnética de alta densidade, devido à sua capacidade de interagir com campos magnéticos com alta eficiência em escalas diminutas. (Ranstchler, 2007)

Além disso, a manipulação e organização controlada dessas nanopartículas também permitem explorar fenômenos de superparamagnetismo e efeitos quânticos, abrindo caminho para avanços significativos em nanotecnologia e dispositivos magnéticos. (SARGENTELLI, 2010)

### **3.5 Teoria micromagnética e suas contribuições para o mundo do eletromagnetismo**

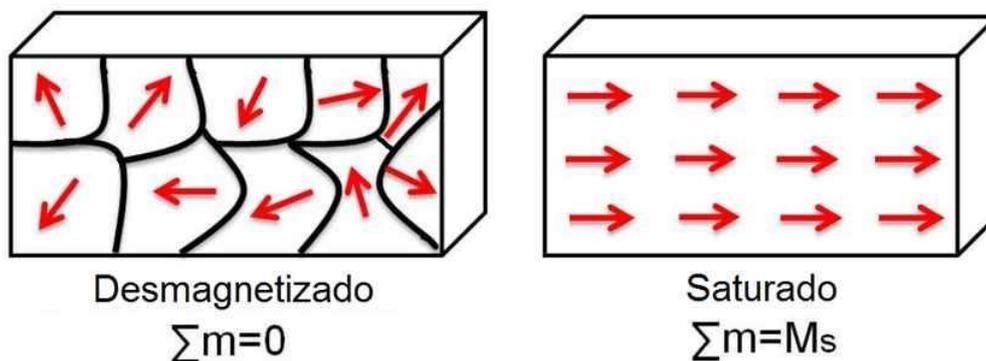
A teoria micromagnética é um campo dentro da física que se concentra no estudo do comportamento magnético dos materiais em uma escala menor, sendo essa escala na ordem de nanômetros ( $10^{-9}$  nm), onde essa relação diz que um fio de cabelo tem entre 80.000 a 100.000 nm de espessura (Garrett, 2016). considerando interações entre domínios magnéticos, dipolos e propriedades magnéticas locais. Essa teoria é fundamental para compreender como os materiais magnéticos se comportam e são aplicados em diversas áreas. (Martins, 2011)

Em nível microscópico, materiais magnéticos são compostos por pequenos dipolos magnéticos chamados de momentos magnéticos, que podem ser átomos individuais, grupos de átomos ou mesmo estruturas mais complexas. (Martins, 2011)

Essa teoria considera domínios magnéticos, regiões dentro do material onde os momentos magnéticos dos átomos estão alinhados numa mesma direção. Esses domínios podem mudar de tamanho e orientação devido a efeitos térmicos, campos magnéticos externos ou interações entre si. A interação entre esses momentos magnéticos resulta na

formação de domínios magnéticos, regiões em que os momentos magnéticos estão alinhados em uma direção preferencial. (Landgraf, 2011) Será ilustrado na figura 6 uma representação de domínios magnéticos no estado desmagnetizado e saturado.

**Figura 6: Representação de domínios magnéticos em estados desmagnetizados e saturados**



Fonte: Researchgate

Ao contrário da física macroscópica, que trata o material como um todo, a teoria micromagnética se concentra em entender como os momentos magnéticos dos átomos individuais interagem para produzir propriedades magnéticas observáveis. (Martins, 2011)

A teoria micromagnética é amplamente aplicada na indústria, particularmente na fabricação de dispositivos magnéticos, como discos rígidos, memórias magnéticas e componentes eletrônicos. Compreender como os domínios magnéticos se comportam em resposta a campos externos é essencial para otimizar o desempenho desses dispositivos e desenvolver novas tecnologias. (Martins, 2011; Landgraf, 2011)

### 3.5.1 Interação de troca, energia de curta distância

A interação de troca descreve a relação complexa e dinâmica entre os *spins* dos elétrons em um material magnético. Quando múltiplos elétrons interagem em um material, seus *spins* podem se alinhar ou se opor, influenciando fortemente as propriedades magnéticas desse material, a interação de troca surge da mecânica quântica

descrevendo como a energia de um sistema depende dos *spins* relativos dos elétrons. (Kramers, 1934)

Há dois tipos principais de interação de troca: a interação de troca ferromagnética e a antiferromagnética. Na interação ferromagnética, que será a aplicada nesse estudo, os *spins* dos elétrons tendem a se alinhar paralelamente, resultando em materiais com propriedades magnéticas fortes, como ímãs permanentes. (Kramers, 1934)

No contexto, existe a teoria dos primeiros vizinhos, onde mostra que essa energia é de curta distância. Essa teoria dos primeiros vizinhos foca nas interações de troca mais fortes que ocorrem entre os *spins* dos elétrons associados a esses átomos que são vizinhos. Em um arranjo cristalino, por exemplo, cada átomo está cercado por átomos vizinhos com os quais interage. Na teoria dos primeiros vizinhos, o foco está nas interações entre esses átomos vizinhos mais próximos, pois elas tendem a ser mais fortes e dominantes em comparação com as interações entre átomos mais distantes. (Kramers, 1934)

Dessa forma, consideramos a interação entre os momentos magnéticos dos átomos mais próximos em uma estrutura cristalina. Em materiais magnéticos, como os ferromagnéticos, os átomos exibem uma organização espacial regular, onde cada átomo interage principalmente com seus átomos vizinhos mais próximos. Esta interação entre primeiros vizinhos desempenha um papel crucial na determinação das propriedades magnéticas do material. (Kramers, 1934)

No magnetismo, o comportamento coletivo de um grande número de momentos magnéticos individuais, interagindo entre si e com seus primeiros vizinhos, leva a fenômenos macroscópicos como a magnetização, coercividade e a formação de domínios magnéticos. (Kramers, 1934)

### 3.5.2 Energia de anisotropia uniaxial

A energia de anisotropia uniaxial é um conceito que se refere à energia associada à preferência direcional de orientação dos momentos magnéticos em um material ao longo de um eixo específico, chamado de eixo de fácil magnetização. (Lopes, 2021)

Em sistemas magnéticos, a anisotropia desempenha um papel crucial, determinando como os momentos magnéticos se alinham em resposta a um campo magnético externo ou a mudanças nas condições ambientais. No caso da anisotropia uniaxial, há uma preferência de orientação dos momentos magnéticos ao longo de um único eixo. Isso

implica que o material possui uma direção preferencial na qual é mais fácil magnetizar ou alinhar seus momentos magnéticos. (Lopes, 2021)

A energia de anisotropia uniaxial surge devido a várias contribuições microscópicas no material. Em muitos casos, é resultado de efeitos cristalográficos, estrutura atômica ou padrões de *spin* que conferem uma direção preferencial aos momentos magnéticos. Essa preferência direcional pode ser atribuída a assimetrias na estrutura cristalina ou a interações específicas entre os átomos ou *spins* dentro do material. (Lopes, 2021)

A energia de anisotropia uniaxial influencia diretamente as propriedades magnéticas do material, como sua coercividade, a susceptibilidade magnética e a estabilidade dos domínios magnéticos, impactando, conseqüentemente, o desempenho de dispositivos magnéticos em diversas aplicações. (Lopes, 2021)

### 3.5.3 Energia Zeeman, campo externo

A energia Zeeman desempenha um papel crucial na compreensão do comportamento dos materiais em presença de campos magnéticos. A energia Zeeman refere-se à separação e ao desdobramento dos níveis de energia de um sistema quântico, como átomos ou partículas subatômicas, quando expostos a um campo magnético externo. (Aegerter, 1985)

Quando um material é colocado em um campo magnético, os *spins* dos elétrons e o momento magnético associado a eles interagem com esse campo. Essa interação leva à modificação dos níveis de energia do sistema. Segundo a teoria quântica, os elétrons em um átomo ocupam níveis de energia discretos, e quando submetidos a um campo magnético, esses níveis de energia são deslocados, resultando na divisão e no desdobramento desses estados quânticos. (Nascimento, 1990)

A energia Zeeman surge devido à influência do campo magnético nos momentos magnéticos intrínsecos das partículas carregadas, como elétrons, prótons ou nêutrons, presentes em átomos ou em outros sistemas físicos. Essa energia desempenha um papel crucial na compreensão da estrutura atômica e molecular, além de ser essencial para a exploração e desenvolvimento de tecnologias que dependem do magnetismo e da manipulação de materiais ferromagnéticos. (Nascimento, 1990)

### 3.5.4 Interação dipolar, energia de longa distância

A Energia de Interação Dipolar entre materiais magnéticos é fundamental no estudo do comportamento magnético dos materiais. Essa energia surge da interação entre os momentos magnéticos elementares, como os dipolos magnéticos, presentes nos átomos ou nas estruturas cristalinas dos materiais magnéticos. (Filho, 2016)

Para compreender essa forma de energia, é crucial entender que os materiais magnéticos são compostos por pequenos dipolos magnéticos que se comportam como pequenas agulhas magnéticas. Esses dipolos podem ser encontrados em substâncias como o ferro, o níquel, o cobalto e em ligas específicas. (Filho, 2016)

A interação dipolar ocorre devido à natureza magnética dos materiais, resultante da orientação dos momentos magnéticos dos átomos. Quando os dipolos magnéticos estão alinhados, ocorre uma diminuição na energia do sistema. Por outro lado, quando esses dipolos estão orientados de forma desordenada, a energia do sistema é maior. Essa energia é influenciada pelo arranjo espacial dos dipolos, pela presença de campos magnéticos externos e pela temperatura. (Filho, 2016)

Um aspecto importante a considerar é que a Energia de Interação Dipolar pode afetar significativamente as propriedades magnéticas dos materiais, tais como sua coercividade (a resistência à mudança na direção da magnetização), a sua suscetibilidade magnética e até mesmo o comportamento de materiais em situações de magnetização. (Filho, 2016)

### 3.5.5 Densidade de energia magnética da célula de simulação

A densidade de energia magnética é uma medida da energia contida em um campo magnético por unidade de volume. Ela descreve a quantidade de energia magnética armazenada em um determinado espaço. O conceito de densidade de energia magnética é essencial na descrição do comportamento dos materiais magnéticos, pois está intimamente ligado à forma como o campo magnético interage e se distribui dentro desses materiais. (DANTAS, 2020)

Sua equação é dada por:

$$E = \frac{A}{d^2} \sum_{ij} (1 - \hat{m}_i \cdot \hat{m}_j) - K \cdot \sum_i (\hat{m}_i^2)^2 - \vec{H} M_S \sum_i \hat{m}_i + \frac{M_S^2}{2} \sum_{ik} \left( \frac{\hat{m}_i \cdot \hat{m}_k}{n_{ik}^3} - \frac{3(\hat{m}_i \cdot \vec{n}_{ik})(\hat{m}_k \cdot \vec{n}_{ik})}{n_{ik}^5} \right) \quad (2.0)$$

Essa equação é determinada respectivamente por quatro componentes: Energia de troca, de anisotropia, energia Zeeman e energia de interação dipolar. Ela mostra que a densidade de energia magnética está diretamente relacionada à densidade do campo magnético. Quanto maior a intensidade do campo magnético, maior será a densidade de energia magnética na região em questão. (Dantas, 2020)

A densidade de energia magnética é uma medida crucial em diversas aplicações, desde o design de materiais para dispositivos magnéticos, como motores e geradores, até a compreensão de fenômenos magnéticos em sistemas microscópicos. (Dantas, 2020)

Além disso, a densidade de energia magnética está relacionada à energia total armazenada em um sistema magnético. Por exemplo, em um ímã permanente, a densidade de energia magnética é a energia potencial armazenada no campo magnético do ímã. Essa energia pode ser liberada ou alterada quando o ímã interage com outros materiais ou campos magnéticos externos. (Dantas, 2020)

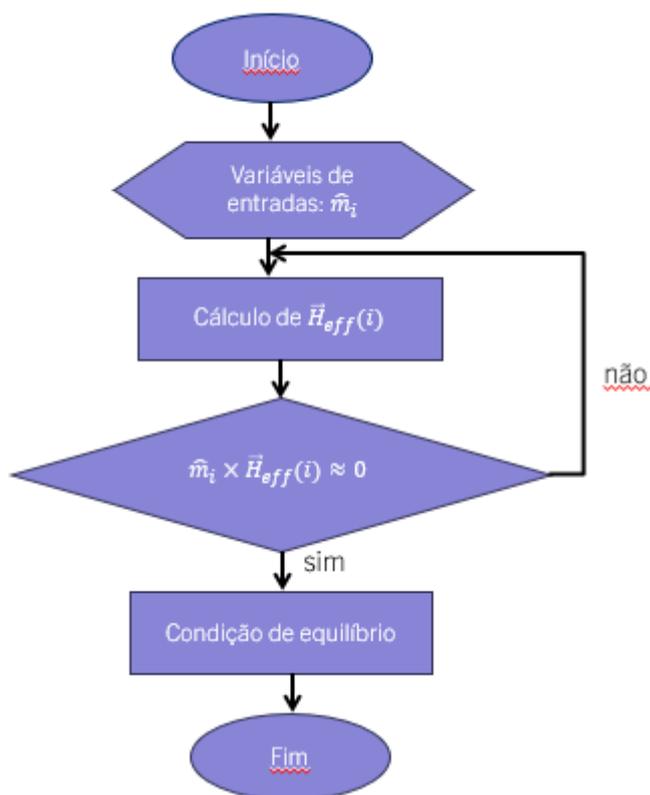
Compreender a densidade de energia magnética é fundamental para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias baseadas em magnetismo, influenciando desde a concepção de dispositivos até a exploração de novos materiais com propriedades magnéticas específicas.

### 3.5.6 Cálculo do método autoconsistente

O campo efetivo total apresentado na equação 3.0, ele se torna presente em todas as células de simulação. “Pretende-se desvendar a configuração de equilíbrio desta estrutura, que é atingida quando o momento magnético de cada célula alinha-se com o campo total.” (Souza, 2020, P.43)

O método autoconsistente é uma condição de equilíbrio, onde pós utilização das variáveis de entrada, se faz o cálculo do campo efetivo, exposto na equação 3.0. Onde posteriormente ocorre o produto vetorial do campo externo com o campo efetivo, trazendo assim uma condição de toque nulo. Caso essa condição não seja concretizada, o programa refaz esse cálculo até ela ser satisfeita. A exemplificação de como esse processo se baseia é exposta na figura 7.

**Figura 7: Ilustração do método autoconsistente**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.6 Curva de magnetização em materiais magnéticos

A curva de magnetização, também conhecida como curva de histerese magnética, é um gráfico que ilustra a relação entre a intensidade do campo magnético aplicado e a magnetização resultante de um material magnético. Essa curva é uma ferramenta importante para entender como um material responde a mudanças no campo magnético e fornece informações sobre suas propriedades magnéticas. (Hanbicki, 2011)

A curva de magnetização é frequentemente obtida experimentalmente por meio de um processo chamado de magnetometria. Durante o experimento, um campo magnético é aplicado ao material em incrementos, e a magnetização resultante é medida em cada ponto. A partir desses dados, a curva de magnetização é construída.

Conforme o campo magnético externo é aumentado, a magnetização do vórtice responde de maneira característica. A curva de magnetização pode mostrar as regiões de histerese, onde a magnetização do vórtice mantém valores específicos mesmo quando o campo magnético é reduzido após ter sido aumentado. (Hanbicki, 2011)

Essas propriedades da curva de histerese magnética são influenciadas pelas características intrínsecas do material, como a composição química, a estrutura cristalina e a presença de domínios magnéticos. A curva de histerese magnética também está relacionada aos vórtices magnéticos. Quando o campo magnético é variado em um ciclo de histerese, os vórtices magnéticos podem experimentar rearranjos e alterações em suas posições devido às mudanças na magnetização, a compreensão da curva de magnetização é importante para entender como os vórtices magnéticos se comportam em diferentes situações magnéticas. (Hrkac, 2015)

Essas curvas são importantes para compreender como os vórtices magnéticos podem ser manipulados e controlados para aplicações em dispositivos magnéticos, como memórias magnéticas, processamento de informações ou sensores. O estudo das curvas de magnetização em vórtices magnéticos contribui para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em materiais magnéticos com propriedades específicas e controláveis, a representação da curva de magnetização será representada na figura 13.

### **3.7 Vórtices magnéticos em nanoestruturas magnéticas**

Os vórtices magnéticos são padrões de orientação dos momentos magnéticos (*spins*) dos elétrons em materiais magnéticos. Eles ocorrem em sistemas magnéticos bidimensionais, como em planos finos, ou em estruturas com geometrias restritas, sendo cúbica no nosso caso. A formação dos vórtices magnéticos envolve uma competição entre as energias citadas e interações magnéticas. (Otani, 2013)

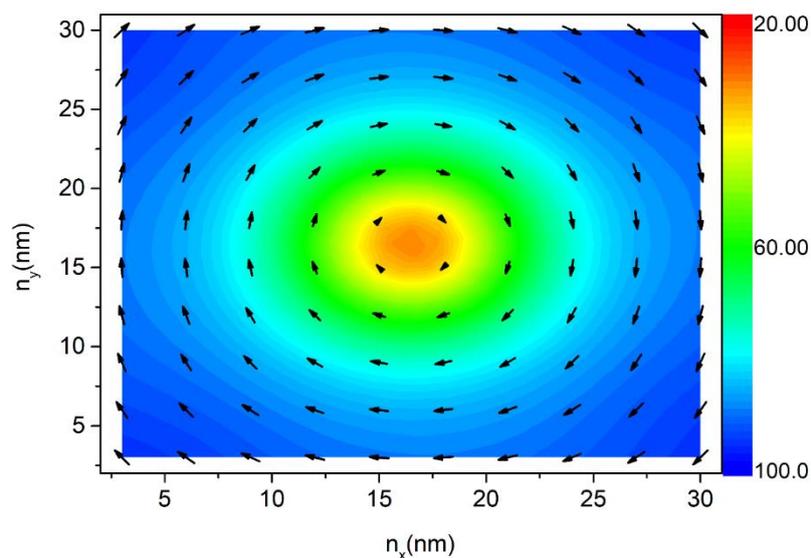
A formação dos vórtices magnéticos ocorre quando essas forças e interações entram em equilíbrio. Em um plano fino, por exemplo, a interação de troca quer alinhar os

momentos magnéticos paralelamente, mas a anisotropia magnética pode favorecer uma direção específica. (Hrkac, 2015).

Quando o plano é suficientemente fino, os gradientes de campo magnético e as interações dipolares podem começar a desempenhar um papel significativo, dependendo do material. (Dantas, 2020). Significa que ao assumir uma anisotropia de forma, à medida que você viaja pelo plano, a direção preferencial de magnetização pode começar a girar, criando uma estrutura em forma de redemoinho. Formando assim o vórtice magnético.

O núcleo do vórtice, no centro, pode ter uma direção de magnetização oposta às regiões circundantes. A orientação precisa do vórtice (sentido horário ou anti-horário) depende das propriedades do material e das condições específicas, é exposto na figura 8.

**Figura 8: Vórtice magnético em uma nanoestrutura com dimensões de  $n_x = n_y$  de 30nm com  $h = 12$ nm**



Fonte: Elaborada pelo autor

Em suma, é necessário enfatizar que os vórtices magnéticos são formados como resultado da competição entre as forças de interação de troca, anisotropia magnética, gradientes de campo magnético e interações dipolares, especialmente em sistemas de dimensões reduzidas. Essa competição leva a uma estrutura de spin que se assemelha a um redemoinho, com um núcleo especial no centro.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados foram obtidos a partir de estudos de forma computacional e teórica da nucleação do vórtice em nanoelementos ferromagnéticos com face quadrada com arestas  $n_x = n_y$ , variando de 30 a 60 nm, e altura  $h$  de 12 a 30 nm. A análise foi feita em nanoestruturas de Ferro e Permalloy (80% níquel e 20% ferro), isoladas e acopladas magneticamente.

Identificamos as fases magnéticas formadas no estado de remanência, utilizando o seguinte procedimento: Aplica-se um campo externo alto na direção do eixo  $x$ , saturando a nanopartícula com um campo externo elevado de 5.5 kOe. Posteriormente, diminuimos progressivamente o campo até  $h = 0.0$  kOe, estabelecendo assim o estado de remanência, onde ocorre a análise.

Relatamos a nucleação de vórtice, em um nanoelemento isolado, composto de Ferro ou permalloy, com arestas  $n_x = n_y$ , desde 30 até 60 nm, e altura  $h$  de 12nm até 30 nm. Como mostra a figura 1(a). Além disso, analisamos um par de nanoelementos ferromagnéticos quadrados coaxiais, acoplados magneticamente, com arestas  $n_x = n_y$ , desde 30nm até 60 nm, com altura de 12 até 30 nm, separados por uma camada não-magnética fixa de 3 nm. Como está representado na figura 1(b).

Estes resultados serão responsáveis por responder a problemática de se existe alguma possibilidade do controle e manipulação dessas estruturas em escalas nanométricas, podendo assim fornecer algumas formas de contribuições para a criação, controle e leitura dos vórtices, podendo assim trazer auxílio para os problemas de estabilidade, manipulação, materiais e estruturas com potencial magnético, leitura e escrita. Vale ressaltar que todos esses resultados foram realizados de forma computacional e são denotados como resultados teóricos.

Os resultados são feitos para analisar as propriedades spínicas das células magnéticas sobre a nanoestruturação dos vórtices magnéticos em diferentes configurações de dimensão e a partir dessa análise, compreender melhor as propriedades das células, explorando seu potencial para aplicações futuras.

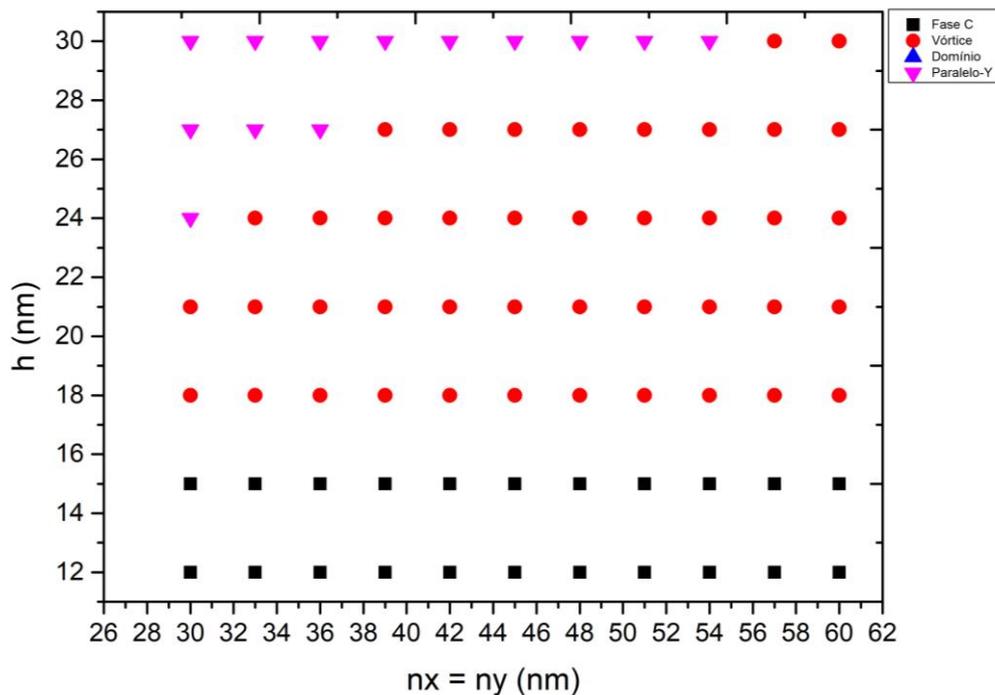
Além disso, a análise dos resultados são de simulações que foram feitas por um algoritmo, criado com auxílio de vários pesquisadores e instituições como a UERN em consonância com a UFRN, sendo essas simulações realizadas em células ferromagnéticas de ferro e de permalloy. Sendo dessa forma possível caracterização os resultados da

influência de diferentes parâmetros da teoria micromagnética nas características dos vórtices, de acordo com as suas frequências naturais de oscilação.

## 4.2 Nanoelementos isolados

Os nanoelementos apresentados de forma isolada aplicam o campo externo na direção de X, sendo analisados somente eles, sem qualquer interferência de outros componentes, os resultados são com dimensões de  $n_x$  e  $n_y$  variando de 30nm a 60nm com  $h$  variando de 12nm a 30nm. Os resultados serão apresentados no plano xy. Os resultados do ferro serão vistos no diagrama de fases da figura 9. As fases também serão avaliadas em estado de remanência.

**Figura 9: Diagrama de fases do ferro com nanoelementos isolados com o  $n_x=n_y$  na faixa de 30 a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm**



Fonte: Elaborada pelo autor

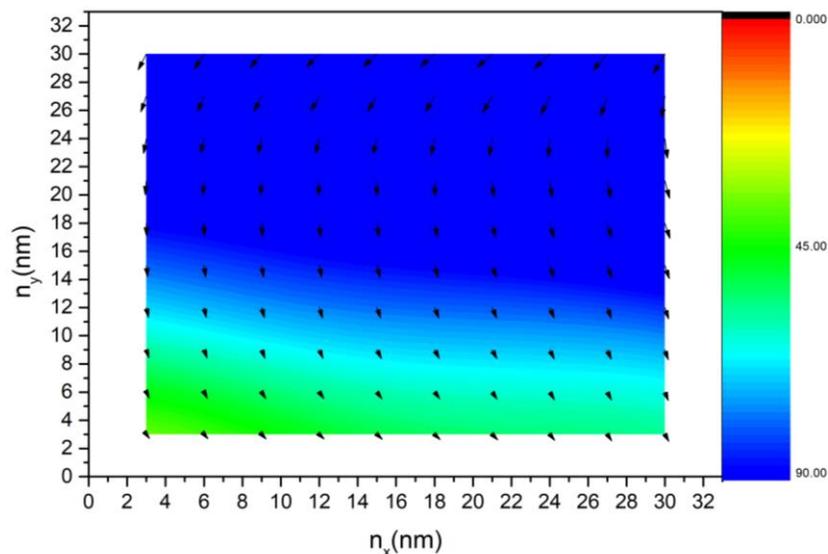
Os resultados de ferro no gráfico do nanoelemento isolado apresenta uma estrutura que é apresentada no gráfico sendo ela em fase C, com ela variando  $n_x$  e  $n_y= 30$ nm a

60nm, com  $h$  variando de 12nm a 15nm, nos mostrando que mesmo com a retirada de todo o campo aplicado externamente, essa dimensão continua magnetizada em estado remanente.

Os resultados variando de  $n_x = n_y$  com 30nm a 60nm com os estados de vórtice estando presentes de  $h=18$ nm até  $h=60$ nm, apresentam estados a magnetização predominante nessa etapa, com os spins variando sua angulação, podendo chegar até 73 graus.

Os demais resultados que estão presentes no topo do diagrama variando entre  $n_x = n_y$  com 30nm a 54nm estando presentes entre algumas partes das alturas de  $h = 24$ nm a 30nm e de  $h=15$ nm até 60nm obtiveram o resultado no gráfico de paralelo ao eixo Y. Como representado na figura 10.

**Figura 10: Ilustração do resultado paralelo a Y no nanoelemento quadrado de Ferro (30 nm, 30 nm, 24 nm).**



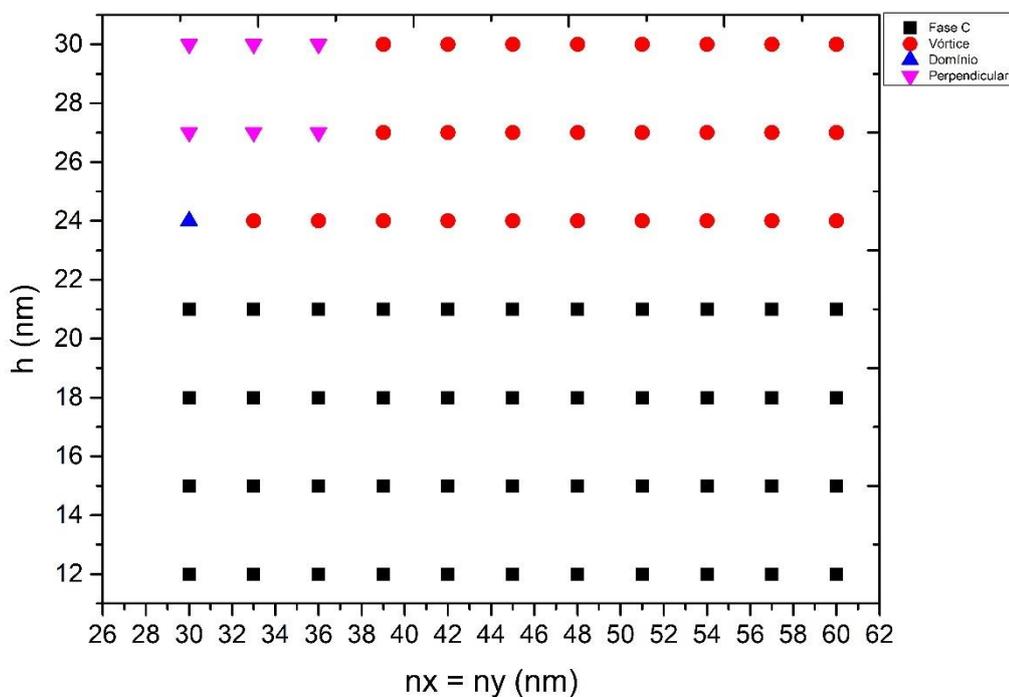
Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura 11 é apresentado o diagrama de fases do permalloy com os nanoelementos apresentados de forma isolada, indde também foi aplicado um campo externo de 5.5 kOe até  $h=0.0$  kOe na direção de X. Esses resultados são analisados em estado de remanência, sendo somente esses nanoelementos isolados, sem qualquer interferência de outros componentes. Os resultados são com dimensões de  $n_x$  e  $n_y$

variando de 30nm a 60nm com  $h$  variando de 12nm a 30nm. Os resultados serão apresentados no plano  $xy$ .

Os resultados de permalloy no gráfico do nanoelemento isolado apresenta uma estrutura que é apresentada no gráfico sendo ela em fase de domínio magnético uniforme, aonde todos os spins estão alinhados com o campo externo, essa fase aparece apenas uma vez quando  $n_x$  e  $n_y$  são iguais a 30nm e com  $h = 24$ nm, nos mostrando que mesmo com a retirada de todo o campo aplicado externamente, essa dimensão continua magnetizada em estado remanente.

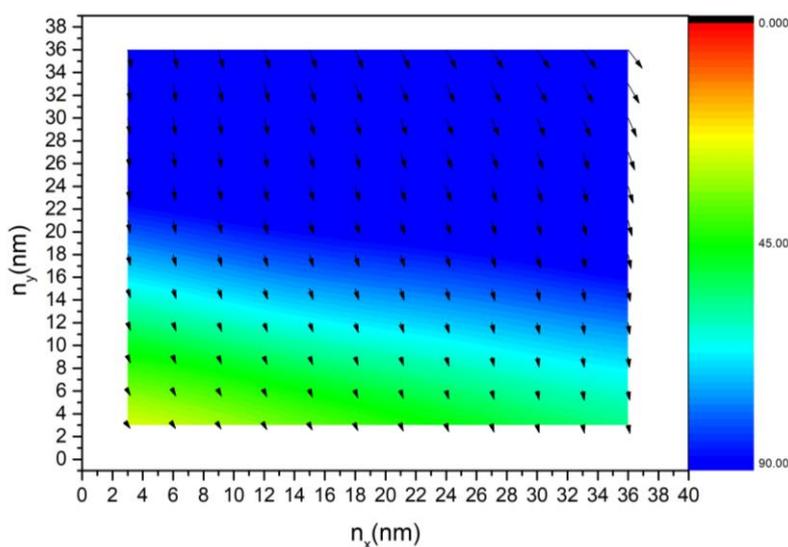
**Figura 11: Diagrama de fases do permalloy com nanoelementos isolados com o  $n_x=n_y$  na faixa de 30nm a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm**



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados variando de  $n_x = n_y$  com 30nm a 36nm de  $h=27$ nm até  $h=30$ nm, apresentamos estados a magnetização perpendicular nessa etapa, com os spins variando sua angulação, podendo chegar até 90 graus. A ilustração dessa fase está exemplificada na figura 12.

**Figura 12: Gráfico permalloy tipo perpendicular com  $N_x=n_y$  33nm e  $h=30$ nm**



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados com dimensões que estão presentes na parte inferior do diagrama variando entre  $n_x = n_y$  com 30nm a 60nm estando presentes entre algumas partes das alturas variando de  $h = 12$ nm a 30nm e sua altura variando de  $h=15$ nm até 60nm obtiveram o resultado no gráfico de Fase C.

Os resultados com dimensões que estão presentes na parte superior do diagrama variando entre  $n_x = n_y$  com 33nm a 39nm, com dois resultados em  $h=24$ nm e assim posteriormente preenchendo o diagrama estando presente nas variações  $n_x$  e  $n_y$  de 39nm a 60nm e sua altura variando de  $h=24$ nm até 30nm obtiveram o resultado no gráfico de vórtice magnético.

As investigações foram realizadas enquanto o campo magnético estava com  $H=0$ , no estado conhecido como remanência. Nossas pesquisas sugerem que é possível estabilizar um padrão de movimento circular de campo magnético, o vórtice magnético, tanto em pequenos elementos de ferro (Fe) quanto de permalloy (Py) com a sua forma quadrada.

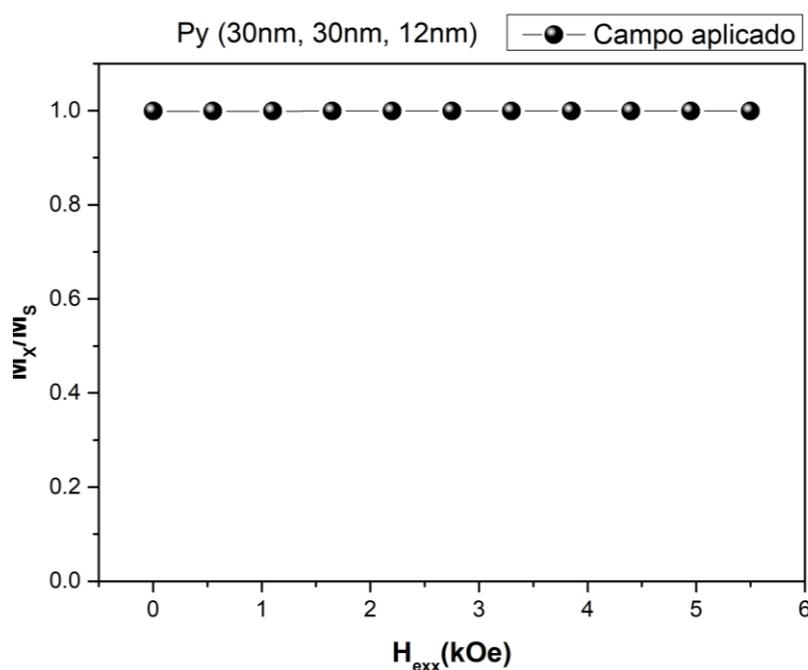
## 4.2 Nanoelementos ferromagneticos acoplados

Nossa pesquisa se concentra nos estados magnéticos de pares de nanoelementos ferromagnéticos quadrados, de Ferro ou Permalloy ( $Ni_{80}Fe_{20}$ ). Nesse modelo, utiliza-se nanoelementos separados por um espaçador não magnético. Esses nanoelementos

interagem através do acoplamento dipolar magnético. Aplicamos o campo magnético externo no eixo x, os nanoelementos terão uma determinada altura iguais para os dois ( $h_1$  e  $h_2$ ) e o espaçador não magnético( $\eta$ ) com altura fixa de 3nm. Tudo isso é evidenciado na figura 1.

Para esta análise, em primeiro lugar foi importante evidenciar o comportamento da curva de magnetização, para a os momentos de saturação e de remanência, onde demonstra a quantificação de magnetização restante ao final do processo dos cálculos de simulação. A figura 13 mostra o gráfico de curva de magnetização do permalloy.

**Figura 13: Curva de magnetização do Permalloy com  $N_x=N_y=30\text{nm}$  e  $h=12\text{nm}$  com resultados tipo uniforme**

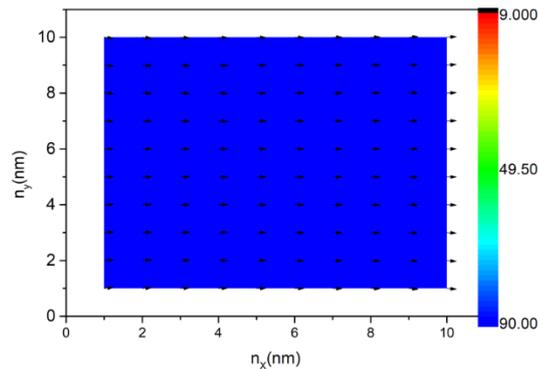


Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico da figura 14 exibe os resultados da curva de magnetização do permalloy em um sistema acoplado de uma nanopartícula com  $N_x=N_y=30\text{nm}$  com  $h=12$ , aonde ocorre a indução do campo externo elevado de 5.5 kOe, fazendo com que todos os momentos magnéticos fiquem alinhados na direção do campo aplicado, até sua retirada gradativa, para 0.0 kOe. O gráfico de curva nos permite visualizar que mesmo com o campo externo retirado, nanoestrutura continua magnetizada.

O painel exibido na Fig. 10 mostra o perfil de magnetização para o nanoelemento Py(30 nm, 30 nm, 12 nm) em remanência. Nesse caso, há regiões momento magnético uniforme, no sentido do campo aplicado. Os padrões de cores mostram o ângulo do momento magnético com o eixo z, no Py temos apenas a cor azul, indicando que os momentos magnéticos fazem um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$  com o eixo z

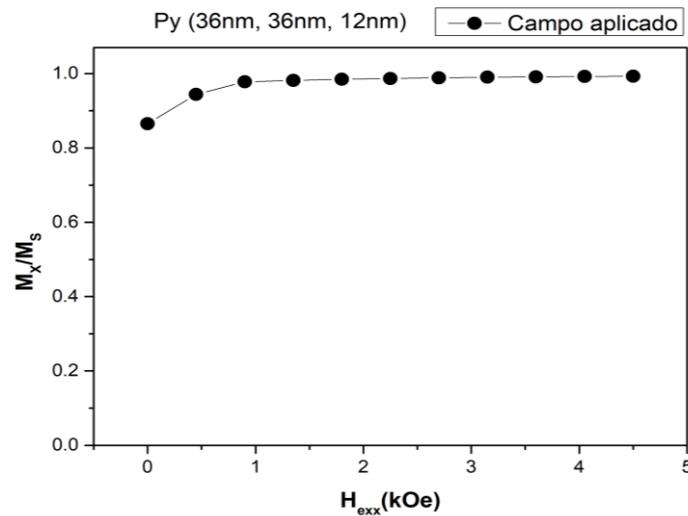
**Figura 14: Gráfico permalloy tipo uniforme  $N_x=N_y$  30nm e  $h=12$ nm**



Fonte: Elaboradas pelo autor

Já o gráfico da figura 15 demonstra os resultados da curva de magnetização do permalloy em um sistema acoplado de uma partícula com  $N_x=N_y=36$ nm com  $h=12$ , aonde ocorre a indução do campo externo elevado de 5.5 kOe, fazendo com que todos os momentos magnéticos se alinhem na direção do campo aplicado, até sua retirada gradativa até 0.0 kOe. O gráfico de curva nos permite visualizar que mesmo com o campo externo retirado, nanoestrutura continua magnetizada.

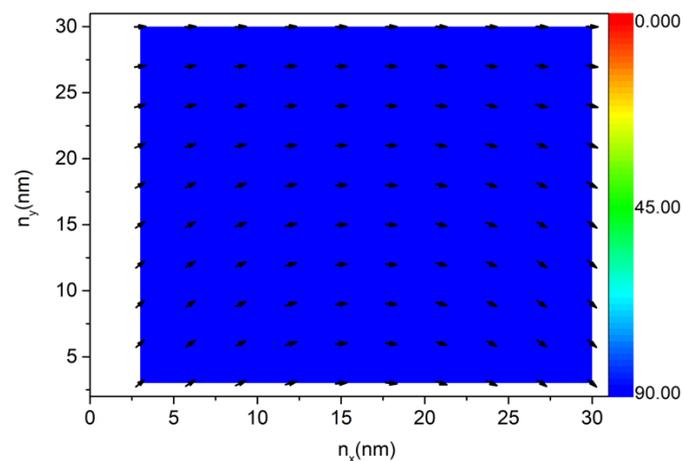
**Figura 15: Curva de magnetização do Permalloy com  $N_x=N_y=36\text{nm}$  e  $h=12\text{nm}$  com resultados tipo C-plano.**



Fonte: Elaboradas pelo autor

O gráfico da figura 16 demonstra os resultados da curva de magnetização do permalloy em uma partícula com  $N_x=N_y=36\text{nm}$  com  $h=12$ , após a análise da curva de magnetização. Nele fica evidente o resultado do estado da magnetização de saturação que ocorre no eixo X, mostrando que mesmo retirando totalmente o campo externo, o componente continua relativamente magnetizado. Esse tipo de resultado de curva de magnetização é recorrente de resultados como de magnetização uniforme e tipo C-Plano, demonstrado no plano xy.

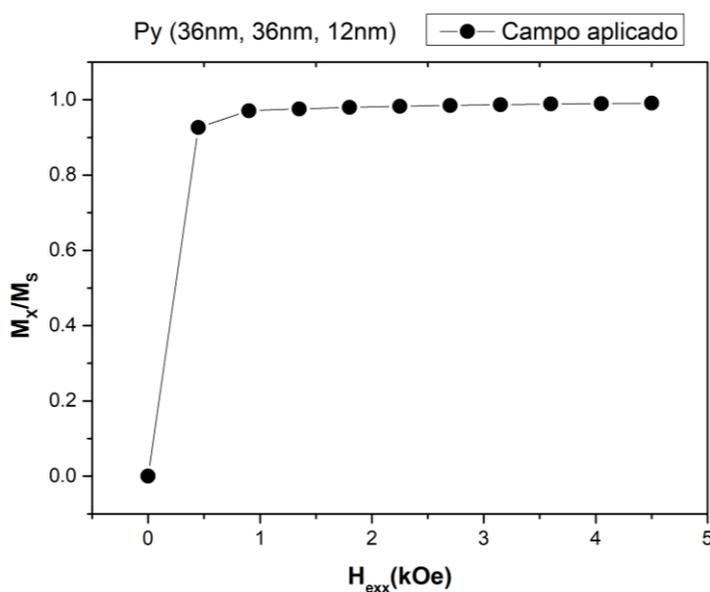
**Figura 16: Gráfico permalloy tipo c- plano  $N_x=n_y$  36nm e  $h=12\text{nm}$**



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 17 será apresentada a curva de magnetização do permalloy com dimensões de  $N_x=N_y=36\text{nm}$  com  $h=15$ . Nesse resultado, a magnetização remanente é menor do que foi averiguado no resultado das figuras 8 e 10, chegando a zero, porque ao reduzir o campo magnético externo de forma gradativa, nota-se uma diminuição na magnetização. Nesse caso, posteriormente foi possível notar que resultou na forma de um vórtice magnético, igual ao representado na figura 18.

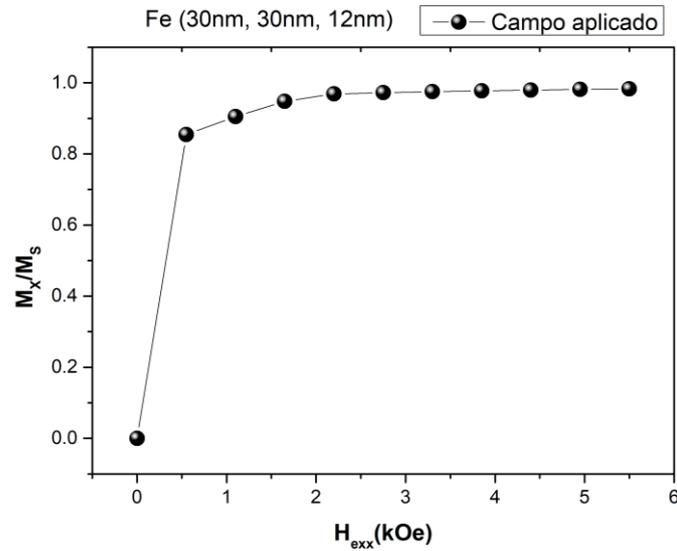
**Figura 17: Curva de magnetização do Permalloy com  $N_x=N_y=36\text{nm}$  e  $h=15\text{nm}$  para um resultado de vórtice magnético**



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados para as simulações magnéticas do componente de ferro deram um resultado mais padronizado, visto que o ferro contém propriedades que diferenciam suas características cristalinas, como anisotropia, que é baixa porém considerável em relação a do permalloy que é nula. A figura 18 exibe a curva de magnetização do ferro.

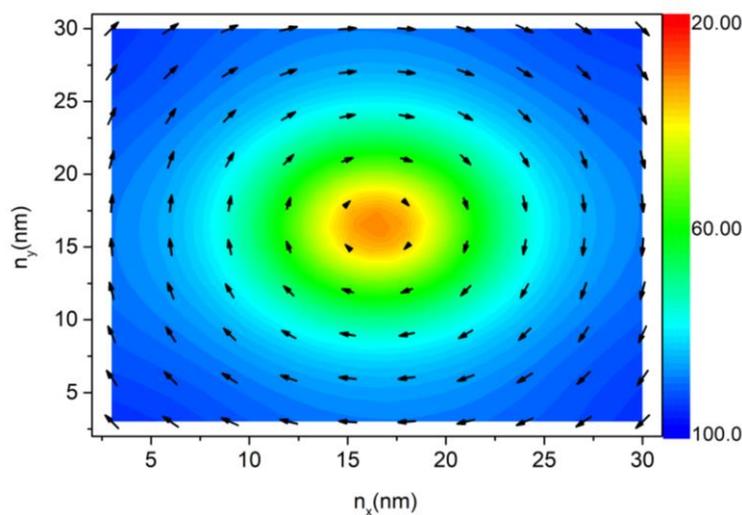
**Figura 18: Curva de magnetização do ferro com  $N_x=N_y=30\text{nm}$  e  $h=12\text{nm}$  para um resultado de vórtice magnético**



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a curva de magnetização do ferro foi utilizada uma nanopartícula com  $N_x=N_y=30\text{nm}$  com  $h=12$ , aonde ocorre a indução do campo externo de 5.5 kOe até sua retirada gradativa até 0.0 kOe. Essa curva foi feita e após análise o resultado foi de vórtice magnético. No estado de remanência, o vórtice é alcançado ao desligar completamente o campo externo, formando-o no centro do nanoelemento, que pode ser observado na figura 19. No gráfico, o padrão de cores ilustra os diferentes ângulos formados entre o momento magnético e o eixo z

**Figura 19: Vórtice magnético no nanoelemento quadrado de Ferro (30 nm, 30 nm, 12 nm).**

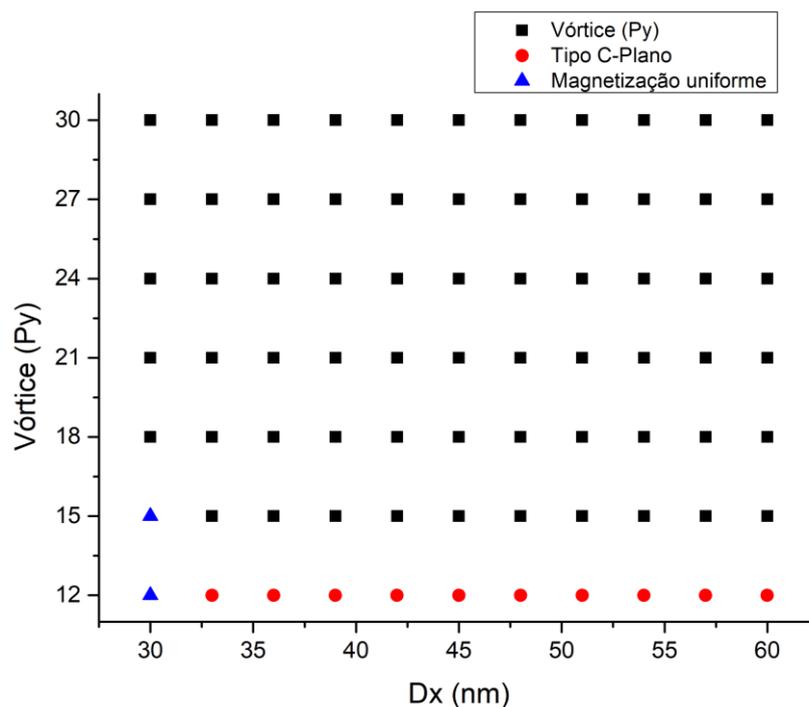


Fonte: Elaborado pelo autor

A barra de cores representa a variação dos ângulos entre o momento magnético e o eixo z. As setas pretas indicam as direções dos momentos magnéticos, e a seta cinza serve como um guia visual, indicando a quiralidade do vórtice.

Na Fig. 20, apresentamos os diagramas de fases magnéticas que se forma em nanoelementos quadrados de Py( $n_x, n_y, h$ ), onde  $n_x = n_y$  varia de 30 nm a 60 nm, enquanto a altura  $h$  varia de 12 nm a 30 nm. Nossos resultados mostram que nesses intervalos de dimensões as fases que se formam em remanência para o permalloy foram apresentados resultados de vórtice magnético em predominância, resultados de magnetização uniforme e resultados com estados de magnetização tipo C-Plano. Mostrando assim que nesse intervalo há um limite para haver a formação do vórtice.

**Figura 20: Diagrama de fases do permalloy a partir de nanoelementos acoplados com o  $n_x=n_y$  na faixa de 30 a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm**



Fonte: Elaborado pelo autor

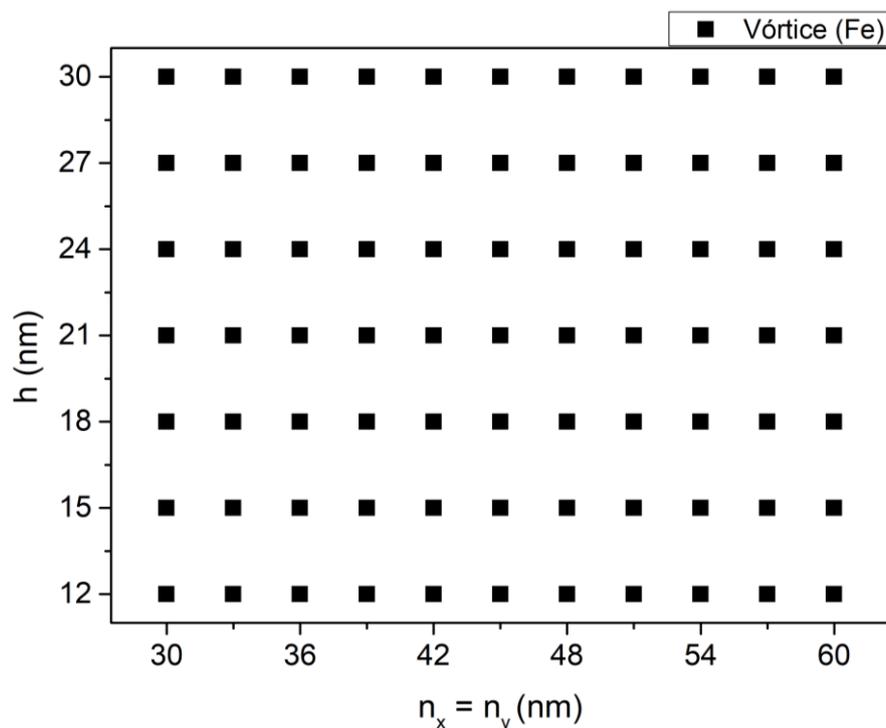
Os resultados do estudo do nanoelemento de permalloy, no gráfico do nanoelemento acoplado, apresentam uma estrutura que é representada no gráfico sendo ela totalmente uniforme ( $n_x$  e  $n_y = 30$  com  $h = 12$  e  $15$ ), nos mostrando que mesmo com a retirada de todo o campo aplicado externamente, essa dimensão continua magnetizada em estado remanente.

Os resultados variando de  $n_x = n_y$  com 36nm a 60nm com  $h=12$  apresentam estados de magnetização tipo C-Plano, com os spins variando sua angulação, indo de 87.48 graus até 97.52 graus.

Os demais resultados que variaram de  $n_x = n_y$  com 33nm a 60nm e sua altura variando de  $h=15$ nm até 60nm obtiveram o resultado do gráfico de vórtice magnético, momento esse que é considerado o estado de mais baixa energia, com suas forças entrando em equilíbrio e nos permitindo uma manipulação mais fácil do sistema mesmo com tamanho altamente reduzido. A angulação dos spins pode chegar a 75 graus

Na figura 21 será representado o gráfico da análise para o elemento ferromagnético de ferro com dimensões onde a aresta ( $n_x = n_y$  varia de 30 nm a 60 nm), enquanto a altura  $h$  varia de 12 nm a 30 nm.

**Figura 21: Diagrama de fases do ferro a partir de nanoelementos acoplados com o  $n_x=n_y$  na faixa de 30 a 60nm e altura ( $z = h$ ) variando entre 12nm a 30nm**



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados do estudo do elemento ferromagnético, no gráfico do nanoelemento acoplado, se dão em todas as dimensões analisadas, ter total predominância de vórtice

magnético, com a angulação dos spins podendo chegar a 70 graus. Esse resultado acontece, pois, neste intervalo, porque provavelmente a magnetização de saturação do Py é menos que a do Fe, enquanto para o ferro temos  $M_s = 1.7 \times 10^6$  e alta anisotropia, para o permalloy  $M_s$  equivale a  $0.8 \times 10^6$  e tem anisotropia desprezível (Souza, 2020).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse presente estudo foi baseado em uma pesquisa quantitativa teórica computacional, onde é feita em células de simulações de nanoelementos ferromagnéticos dos tipos de ferro e permalloy. Com eles tendo dimensões de  $n_x$  e  $n_y$  variando de 30nm a 60 nm e a altura  $h$  variando de 12nm a 30nm, fazendo o processo de saturação um campo externo de 5.5 kOe e retirando até o estado de remanência, de 0.0 kOe.

Como esse sistema atua, é dito pelo resultado da soma das energias que atuam nele, ou seja, as energias que estão presentes na teoria micromagnética (energia de interação de troca, energia de anisotropia uniaxial, energia Zeeman e energia de interação dipolar) explicadas e demonstradas no capítulo 3, seção 4. Esse resultado é a energia total do sistema ou no caso a densidade de energia magnética. Além desses cálculos, também é feito o cálculo do campo médio onde conseguimos saber o quanto que o campo externo interfere em cada célula de simulação.

Os resultados foram baseados em sistemas isolados, onde foi avaliado um sistema de um único nanoelemento que tem a dimensões citadas acima, assim como ilustrado na figura 1, letra a. É realizado o processo de saturação do sistema e depois retira-se gradativamente, até o estado de remanência, que é onde os resultados são visualizados. Também foi realizado em um sistema de nanoelementos acoplados, onde os resultados foram analisados em dois nanoelementos que tem dimensões iguais, porém entre esses nanoelementos existe um espaçador não ferromagnético, que nesse estudo teve um tamanho fixo de 3nm, assim como ilustrado na figura 1, letra b.

Todos os resultados são demonstrados representados graficamente no eixo  $xy$ , onde conseguimos acentuar que a hipótese foi confirmada, onde é feito com êxito a análise de cálculos numéricos, visando o estudo do ordenamento magnético em materiais ferromagnéticos, em remanência. Dessa forma, foi possível obter configurações que facilitam a nucleação de vórtice, isso devido ao conjunto de resultados obtidos, concretizando também o objetivo geral de analisar as fases das células magnéticas sobre a nanoestruturação dos vórtices magnéticos.

Os resultados do sistema demonstram que no formato isolado do nanoelemento de ferro, ele ganha algumas dimensões que no formato acoplado apresentam vórtices, visto que em todo o diagrama de fases do ferro acoplado, existe a presença de um vórtice magnético, porém no isolado o ferro perde a característica de vórtice em  $h$  variando de

12nm a 15nm e  $h$  variando de 27nm a 30nm no sistema isolado. Assim como apresentado no diagrama de fases da figura 9.

Já a liga metálica de permalloy tem seus resultados mais concisos, onde mesmo apresentando fases novas, ao qual mostram na curva de magnetização que mesmo com a retirada do campo externo, ele permanece magnetizado no estado de remanência. Eles mantêm a característica da presença de vórtices magnéticas em dimensões com alturas mais elevadas, começando a aparecer em  $h = 24\text{nm}$ . Assim como apresentado na figura 11.

Avaliando os intervalos dos resultados nos nanoelementos acoplados, percebe-se que o permalloy tem intervalos que não apresentam presença de vórtice. Nesses intervalos, isso ocorre provavelmente pois a magnetização de saturação do Py é menor que a do Fe, enquanto para o ferro temos magnetização de saturação equivalente a  $1.7 \times 10^6 \text{A/m}$  e alta anisotropia, para o permalloy a magnetização de saturação equivale a  $0.8 \times 10^6 \text{A/m}$  e tem anisotropia desprezível (Souza, 2020).

Nossos estudos indicam a possibilidade de estabilização de um vórtice magnético tanto em nanoelementos quadrados de Fe quanto de Py. Como próxima etapa, pretendemos incorporar a influência de uma corrente elétrica no sistema, fazendo uso da equação de Landau-Lifshitz.

As perspectivas para o futuro vêm de modificar ou analisar mais incisivamente o plano de diferentes nanoestruturas, pretende-se também variar o espaçamento para analisar as fases magnéticas de acordo com variações no tamanho do espaçador e averiguar como o acoplamento dipolar varia de acordo com a substância imposta no elemento, com a ajuda das equações de Landau-Lifshitz, verificar como esse sistema atua diante da indução da corrente elétrica.

A fragilidade desse trabalho se denota diante da falta da análise do sistema diante da indução da corrente elétrica, mostrando assim como tais resultados se adaptariam a um sistema teoricamente mais completo. Por esse motivo o trabalho aqui presente merece mais investigações futuramente.

Essas perspectivas futuras ajudam a entender a justificativa dessa pesquisa, pois após esse longo período de estudos, fica cada vez mais evidente o quanto que as pesquisa em vórtices magnéticos pode levar a descobertas de novos fenômenos e efeitos físicos que ainda não foram explorados, trazendo assim mais interesse em meus trabalhos especialmente nessa área, principalmente para realizar as pesquisas futuras aqui citadas.

## 6. REFERÊNCIAS

APOLINÁRIO, A. **ABRINDO A CAIXA DE PANDORA DOS NANOMEDICAMENTOS: HÁ REALMENTE MUITO MAIS ‘ESPAÇO LÁ EMBAIXO’**. Química Nova, 43(2), 212–225. 2020. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170481>

BELANÇON, M. **O ENSINO DO SPIN: UMA ABORDAGEM INTEGRADA A TECNOLOGIA E A SOCIEDADE**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 40(4), e5402. 2018. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0377>

BIOSMEQ, Nanomedicina. **BIOSEQUIPOMEDICO**, 2022. Disponível em: <https://www.biosmeq.com.mx/nanomedicina/>. Acesso em: 14 dez. 2023.

CANCINO, J. **NANOTECNOLOGIA EM MEDICINA: ASPECTOS FUNDAMENTAIS E PRINCIPAIS PREOCUPAÇÕES**. Química Nova, 37(3), 521–526. 05 Maio 2014. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140086>

DANTAS, Jadson. **TAILORING MAGNETIC VORTICES OF DIPOLAR COUPLED NANOELEMENTS**. Journal of Applied Physics, [S. l.], p. 1-16, 3 out.2020.

DIAS, P. **OS FUNDAMENTOS MECÂNICOS DO ELETROMAGNETISMO**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 36(3), 1–14. 18 Set. 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000300019>

DINIZ, A. **UMA ABORDAGEM PRÁTICA PARA O ENSINO DO ELETROMAGNETISMO USANDO UM MOTOR DE INDUÇÃO DE BAIXO CUSTO**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 41(1). 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0216>

ECHER, E. **MAGNETOSFERAS PLANETÁRIAS**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 32(2), 2301. 31 Jan. 2011. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172010000200001>

FILHO, S, M. **DEMONSTRAÇÃO DIDÁTICA DA INTERAÇÃO ENTRE CORRENTES ELÉTRICAS**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 29(4), 605–612. 18 Mar. 2008. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000400020>

FERREIRA, H. **NANOTECNOLOGIA: ASPECTOS GERAIS E POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM CATÁLISE**. Química Nova, 32(7), 1860–1870. 22 Out. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000700033>

GARRETT, Filipe. O que é nanômetro? Veja significado e qual a função nos processadores. **TechTudo**, 2016. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2016/10/o-que-sao-nanometros-e-por-que-eles-sao-tao-importantes-na-tecnologia.ghml>. Acesso em: 09 jan. 2024.

GRAMLING, Hannah M. **NANOTECHNOLOGY FOR CONSUMER ELECTRONICS**. Nanoelectronics: Materials, Devices, Applications, First Edition, [s. l.], 17 set. 2017. <https://doi.org/10.1002/9783527800728.ch22>

HOLL, Christian. **PROBING THE PINNING STRENGTH OF MAGNETIC VORTEX CORES WITH SUB-NANOMETER RESOLUTION**. Nature

HRKAC, Gino. **MAGNETIC VORTEX OSCILLATORS**. Journal of Physics, [s.l.], 6 out. 2015.

HUPFFER, H. M.; LAZZARETTI, L. L. **NANOTECNOLOGIA E SUA REGULAMENTAÇÃO NO BRASIL**. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 153–177, 2019. DOI: 10.25112/rgd.v16i3.1792. Disponível em: <https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/1792>. Acesso em: 2 mar. 2024.

JACKSON, Tenderwealth Clement. **NANOTECHNOLOGY IN DIAGNOSIS: AREVIEW**. Scientific ressearch publishing, [s. l.], 4 ago. 2017.

KANUNGO, Sayan. **2D MATERIALS-BASED NANOSCALE TUNNELING FIELD EFFECT TRANSISTORS: CURRENT DEVELOPMENTS AND FUTURE**

**PROSPECTS.** 2D materials and applications, [s. l.], 16 nov. 2022.  
<https://doi.org/10.1038/s41699-022-00352-2>

LESLIE-PELECKY, Diandra L.; RIEKE, Reuben D. Propriedades magnéticas de materiais nanoestruturados. **Química dos materiais**, v. 8, n. 8, pág. 1770-1783, 1996.

LÜDKE, E. (2011). **UMA ANÁLISE QUANTITATIVA DO CAMPO MAGNÉTICO DENTRO DE UM MEIO CONDUTOR.** Revista Brasileira De Ensino De Física, 33(1), 1503. 18 Abr. 2011. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100017>

D.L. Mills and J.A.C. Bland, **NANOMAGNETISM: ULTRATHIN FILMS, MULTILAYERS AND NANOSTRUCTURES**, Elsevier (2006).

MEDEIROS, M. (2017). **SOBRE A DINÂMICA DE PARTÍCULAS CARREGADAS EM CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO.** Revista Brasileira De Ensino De Física, 39(1). 2017. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0180>

RAMOS, I. **SOBRE A INDUÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO EM REFERENCIAIS INERCIAIS MEDIANTE TRANSFORMAÇÕES DE GALILEU E LORENTZ.** Revista Brasileira De Ensino De Física, 39(2). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0161>

RILEY II, Michael K. **RECENT ADVANCES IN NANOMATERIALS FOR GENE DELIVERY—A REVIEW.** Nanomaterials, [s. l.], 28 abr. 2017.

R. Nair, **EFEITO DO AUMENTO DA DENSIDADE DO CHIP NA EVOLUÇÃO DAS ARQUITETURAS DE COMPUTADOR**, no IBM Journal of Research and Development, vol. 46, nº. 2.3, pp. 223-234, março de 2002, doi: 10.1147/rd.462.0223.

SCHEUNERT, G. **A REVIEW OF HIGH MAGNETIC MOMENT THIN FILMS FOR MICROSCALE AND NANOTECHNOLOGY APPLICATIONS.** Applied physics reviews 3, 011301 (2016), [s. l.], 17 fev. 2016.

SARGENTELLI, V. **NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS: O COBALTO**. Eclética Química, 35(4), 153–163. 2010. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v35.4.2010.p153-163>

SCHMOOL, D.S., SCHMALZL, M. (2009). **MAGNETIC DIPOLAR INTERACTIONS IN NANOPARTICLE SYSTEMS: Theory, Simulations and Ferromagnetic Resonance**. In: Aktas, B., Mikailov, F. (eds) Advances in Nanoscale Magnetism. Springer Proceedings in Physics, vol 122. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69882-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69882-1_15)

SOUZA, Caio Guilherme Secco de. **NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS MULTIFUNCAIONAIS: SÍNTESE E PROPRIEDADES VISANDO APLICAÇÃO EM DIAGNÓSTICO E TERAPIA EM BIOMEDICINA**. 2011. Dissertação (Mestrado em Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi:10.11606/D.75.2011.tde-19052011-110028. Acesso em: 2023-12-15.

SOUSA, R, J. **UM ESTUDO DIDÁTICO DA DINÂMICA DE SPINS**. Revista Brasileira De Ensino De Física, 43, e20210099. 07 Jul. 2021. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0099>

TESSAROLLI, B. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE FE<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>**. Matéria (rio De Janeiro), 24(4), e12506. 25 Nov. 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0831>

RODRÍGUEZ, Gustavo Jesus Bracho. (Why do we study Magnetic Materials). **O PORQUE DE ESTUDARMOS OS MATERIAIS MAGNETICOS**, Revista Brasileira de Ensino de Física, ano 1998, v. 20, n. 4, p. 315-320, 12 dez. 1998.

ZHANG, S. **ROLES OF NONEQUILIBRIUM CONDUCTION ELECTRONS ON THE MAGNETIZATION DYNAMICS OF FERROMAGNETS**. Physical review letters, [s. l.], 17 set. 2004.