

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCALA DE CIÊNCIAS EXATAS E DA COMPUTAÇÃO
GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA



NANOMEDICINA:
A INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE A FÍSICA E A SAÚDE.

SAMUEL DE MELO CASTRO

GOIÂNIA
2020

SAMUEL DE MELO CASTRO

NANOMEDICINA:
A INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE A FÍSICA E A SAÚDE.

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Ciências Exatas e da Computação, da
Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de
Licenciado pleno em Física.*

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Cardoso da
Silva

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Costa da Silva.

GOIÂNIA

2020

SAMUEL DE MELO CASTRO

**NANOMEDICINA:
A INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE A FÍSICA E A SAÚDE.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso julgado adequado para obtenção do título de Licenciatura em Física, e aprovado em sua forma final pela Escola de Ciência Exatas e da Computação, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, em ____/____/____.

Prof. Ma. Ludmilla Reis Pinheiro dos Santos.
Coordenador(a) de Trabalho de Conclusão de
Curso.

Banca examinadora:

Orientador(a): Dr. André Luiz Cardoso da Silva.

Prof. Dr. Anderson Costa da Silva.

Prof. Dr. Cloves Gonçalves Rodrigues.

GOIÂNIA
2020

DEDICATÓRIA

Dedico a minha esposa, meus pais, minha irmã, meu
cunhado e minha sobrinha que está a caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa por ter tido paciência e por me apoiar de todas as formas possíveis durante o desenvolvimento desse trabalho. Agradeço a minha família por flexibilizar minha presença em nossa empresa, para que assim pudesse me dedicar a graduação. E a todos os professores da PUC/Goiás, especialmente aos professores Dr. Francisco Aparecido P. Osório, Dra. Sandra Regina Longhin e Me. Edson Vaz de Andrade, por contribuírem significativamente ao meu aprendizado.

Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. André Luiz Cardoso da Silva, por ter me orientado durante o meu Trabalho de Final de Curso (TCC) e ao Coordenador do curso Dr. Anderson Silva pela inspiração desse trabalho, pela organização do curso de Física e pelo tempo que disponibilizou para discutirmos juntos o assunto dessa obra.

“A natureza é um enorme jogo de xadrez disputado por deuses, e que temos o privilégio de observar. As regras do jogo são o que chamamos de física fundamental, e compreender essas regras é a nossa meta”.

Richard Philips Feynman (1918-1988)

RESUMO

Este trabalho contém aspectos dos fundamentos do eletromagnetismo, com objetivo de enaltecer a interdisciplinaridade entre as tecnologias físicas e a área da saúde. Com os avanços da teoria eletromagnética, as interações da matéria com o campo magnético foram sistematizadas de forma a proporcionar inúmeros benefícios em diferentes áreas tecnológicas. A escala nanométrica é aqui estudada de forma a mostrar suas aplicações nanotecnológicas. Em sequência, é exposto as características da área nanotecnológica que interage com questões medicinais, ou seja, as aplicações da nanomedicina. Fenômenos como o diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo e superparamagnetismo são expostos com ênfase nas propriedades magnéticas que possibilitam o tratamento e diagnóstico de doenças. Assim, faz-se proveito o estudo das diferentes nanopartículas e diferentes tratamentos que estão sendo estudados nos grandes centros de pesquisa.

Para finalizar, a magnetohipertermia é resumidamente explorada, como fenômeno físico, levando em conta o tratamento simbiótico a doenças oncológicas, como, por exemplo, a quimioterapia e radioterapia.

Palavras chave: Magnetismo, Nanotecnologia, Nanomedicina, Regimes Magnéticos.

ABSTRACT

This work contains aspects of the fundamentals of electromagnetism, in order to strengthen the interdisciplinarity between physical technologies and the health area. With the advances in electromagnetic theory, the interactions of matter with the magnetic field have been systematized in order to provide numerous benefits in different technological areas. The nanometric scale is studied here in order to show its nanotechnological applications. In sequence, the characteristics of the nanotechnological area that interacts with medicinal issues are exposed, that is, the applications of nanomedicine. Phenomena such as diamagnetism, paramagnetism, ferromagnetism and superparamagnetism are exposed with an emphasis on the magnetic properties that enable the treatment and diagnosis of diseases. Thus, the study of different nanoparticles and different treatments that are being studied in large research centers is advantageous.

Finally, magnetohyperthermia is briefly explored as a physical phenomenon, taking into account the symbiotic treatment of oncological diseases, such as chemotherapy and radiotherapy.

Keywords: Magnetism, Nanotechnology, Nanomedicine, Magnetic Regimes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2. O MAGNETISMO E A MATÉRIA.....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Um pouco de História do Magnetismo	5
2.3 Fundamentos do eletromagnetismo.....	13
2.4 Modelo Magnético da Matéria.....	18
2.5 Teoria Microscópica do Magnetismo	28
2.6 Regime Superparamagnético	32
3. NANOTECNOLOGIA	36
3.1 Introdução: Um Pouco de História	36
3.2 Algumas Aplicações da Nanotecnologia	38
3.2.1 Nanoeletrônica	39
3.2.2 Nanopartículas e fluidos magnéticos.....	39
3.2.3 Nanossensores.....	42
3.2.4 Nanocompostos poliméricos.....	42
3.3 Aplicações da nanotecnologia no agronegócio.....	43
4. NANOMEDICIA E SUAS APLICAÇÕES	44
4.1 Nanomedicina: escala e funcionalidades.	44
4.2 Dispositivos nanoestruturados no tratamento e diagnósticos de doenças..	46
4.2.1 Nanopartículas de Carbono.....	47
4.2.2 Nanopartículas Metálicas	47
4.2.3 Nanopartículas Magnéticas	48
4.2.4 Pontos Quântico	49
4.3 Nanotoxicidade	49
4.4 A física da nanomedicina: Magnetohipertermia	50
CONCLUSÕES FINAIS.....	55
REFERÊNCIAS:	Erro! Indicador não definido.
APÊNDICE A - Termo de Autorização de Publicação de Produção Acadêmica.....	67

1 INTRODUÇÃO

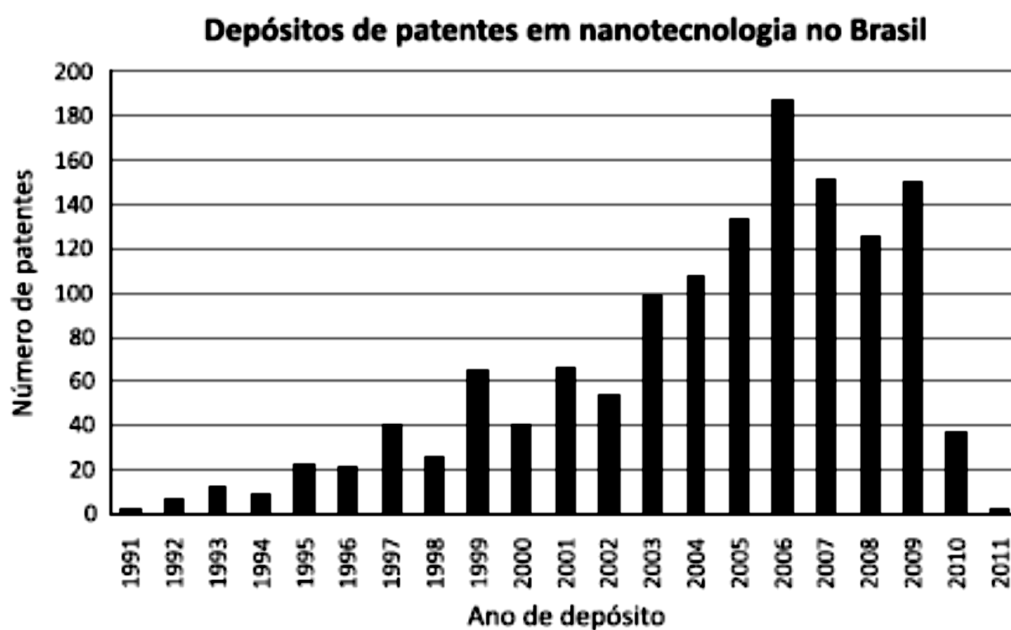
O que é Nanotecnologia? Essa palavra foi sugerida por Richard P. Feynmann para denominar a ciência em nano escala, ou mais precisamente, o termo nanotecnologia, surgiu apenas em 1974, quando o pesquisador da Universidade de Tóquio, Norio Taniguchi, fez a distinção entre engenharia em escala micrométrica no início da década de 1970, que estava dando seus primeiros passos em larga escala, e o novo campo da engenharia, em escala submicrométrica, que estava começando a surgir. O prefixo “nano” é derivado da palavra grega “nanos” que significa “anão”. Na concepção moderna desta palavra, “nano” é um termo técnico usado em qualquer unidade de medida, significando um bilionésimo de um metro ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$) ou aproximadamente a distância ocupada por cerca de 5 a 10 átomos, empilhados de maneira a formar uma linha. A palavra tecnologia tem um significado comum, também derivado do grego “téchné” (arte, ofício ou prática) e “logos” (conhecimento, estudo, ciência) que pode ser geralmente descrita como do método científico com objetivos práticos e comerciais (DURAN et al, 2012).

Neste contexto, a ciência nanotecnologia significa, de maneira muito geral, a habilidade de manipular átomos na escala compreendida entre 0,1nm e 100nm, para criar estruturas maiores fundamentalmente com nova organização estrutural e, normalmente, para fins de desenvolvimento de materiais e sistemas cujas estruturas e componentes exibem propriedades e fenômenos físicos, químicos e/ou biológicos significativamente novos e modificados devido à sua escala nanométrica. O objetivo é explorar estas propriedades por meio do controle de estruturas e dispositivos em nível atômico, molecular e supramolecular e aprender a fabricar e usar esses dispositivos de maneira eficiente. Manter a estabilidade de interfaces e a integração dessas nanoestruturas em escala micrométrica e macroscópica é a chave para o progresso da nanotecnologia. Avanços significativos em nanotecnologia não foram notados até o início da década de 1980, devido à ausência de novos instrumentos que permitissem a nanomanipulação, por exemplo, os microscópicos de varredura por sonda (SPM), de varredura por tunelamento (STM), de campo próximo (NFM) e de força atômica (AFM). Esses instrumentos vêm promovendo os “olhos” e os “dedos” necessários para medir e manipular materiais em escala nanométrica.

Atualmente, nanotecnologia tem atraído o interesse de inúmeros grupos de pesquisa em todo mundo, devido ao seu enorme potencial de aplicação nos mais

variados setores industriais, pela sua multidisciplinaridade, e ao impacto que seus resultados podem dar ao desenvolvimento tecnológico e econômico. Neste contexto, existe uma infinidade de áreas onde a nanotecnologia pode oferecer uma contribuição significativa, algumas das quais, inclusive, já possuem produtos sendo comercializados. No Brasil, estudos relacionados à nanotecnologia vêm sendo incentivados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), desde 2001, quando foram criadas 4 redes de pesquisa em Nanociência e Nanotecnologia, nas seguintes áreas: Materiais nanoestruturados, Interfaces e Nanotecnologia molecular, Nanobiotecnologia e Nanodispositivos semicondutores. Segundo o relatório “Nanotecnologia: Investimentos, Resultados e Demandas”, divulgado em 2006 pelo MCT, esta iniciativa permitiu que entre 2002 e 2005 houvesse o envolvimento de 77 instituições de ensino e pesquisa, 13 empresas, além de 300 pesquisadores que publicaram mais de 1000 artigos científicos e depositaram mais de 90 patentes (SANT’ANNA et al., 2013). País, as quais, por sua vez, têm expandido suas fronteiras para se integrar no estabelecimento de parcerias com institutos e grupos de excelência em nanotecnologia nos Estados Unidos, na Europa, China, América Latina e no Japão.

Figura 1.1 - Patenteamento em Nanotecnologia no Brasil entre 1991 e 2011



Fonte: SANT’ANNA, L. da Silva, ALENCAR, M. S. de Menezes, FERREIRA, A. Pacheco., Patenteamento em Nanotecnologia no Brasil: Desenvolvimento, Potencialidades e Reflexões para o Meio Ambiente e a Saúde Humana. Química Nova, Vol.36, No. 2, Págs. 348-353 (2013).

As oportunidades da nanotecnologia são imensas, os desafios estão na capacidade do País reconhecer o potencial desta nova tecnologia e conseguir rapidamente priorizar investimentos significativos nesta área, integrando esforços para as mais variadas empresas e instituições de pesquisa. O desenvolvimento de novos materiais com propriedades específicas e controláveis no nível molecular é objeto de estudo de muitos pesquisadores. Tais materiais podem ser usados na construção de sistemas minimizadores, nanorobôs e nanoreatores, mas a nanociência engloba também estudos de interações moleculares que acabam servindo para qualquer ramo tecnológico. Nanociência e nanotecnologia são multidisciplinares, uma vez que a produção de novos materiais com propriedades especiais requer trabalho de químicos, físicos, engenheiros, biólogos e cientistas de materiais. Esta multidisciplinaridade da nanociência permite estudo sobre nanoestruturas orgânicas, filmes nanoestruturados, nanopartículas magnéticas e fluidos magnéticos, nanossensores e nanobiossensores, polímeros biodegradáveis, nanopartículas poliméricas para administração de fármacos, estudos lipossomas, aplicações biomédicas de nanopartículas, dispositivos nanoestruturados no tratamento de câncer e aplicações em agronegócios. Neste TCC, escolhemos a abordagem da nanotecnologia na medicina.

No capítulo 2, falaremos um pouco sobre a história do magnetismo. Além disso, discutiremos um pouco sobre as diferentes teorias microscópicas do magnetismo e suas aplicações atuais. No capítulo 3, apresentamos um pouco sobre a nanotecnologia como uma ciência multidisciplinar e o avanço das pesquisas no Brasil segundo dados do CNPq.

No Capítulo 4, falaremos sobre a nanomedicina, uma junção da medicina e da nanotecnologia para curar, diagnosticar ou prevenir doenças. A nanomedicina é um dos ramos mais promissores da medicina contemporânea, retendo boa parte dos esforços científicos na busca de novos tratamentos para doenças como o câncer e a AIDS, entretanto a nanomedicina ainda depende de muitos avanços científicos e tecnológicos, já que a tecnologia necessária para a aplicação da nanomedicina ainda é muito nova no contexto científico. As possibilidades de aplicação da nanotecnologia na medicina são imensas. Segundo estimativas de 2006, já estavam sendo desenvolvidas pelo menos 130 drogas que utilizam a nanotecnologia no mundo com aplicações farmacêuticas. No Capítulo 5, faremos as conclusões finais.

CAPÍTULO 2

2. O MAGNETISMO E A MATÉRIA

2.1 Introdução

Os fenômenos magnéticos são largamente utilizados no desenvolvimento de novas tecnologias, desde sistemas de geração e distribuição de energia (hidrelétricas, entre outros), a sistemas de conversão eletromecânica (eletrodomésticos, automóveis), eletrônicos e de telecomunicações, transdutores, sensoramento, prospecção geológica, informática, automação industrial até a medicina e a engenharia biomédica. Isto só foi possível com o entendimento dos fenômenos magnéticos, e com a descoberta de novos materiais magnéticos. Fenômenos estes que são rigorosamente descritos pela mecânica quântica e a mecânica estatística numa abordagem microscópica, mas que podem ser compreendidos em uma primeira análise utilizando-se uma abordagem macroscópica, possibilitando assim a aplicação de conceitos de física clássica. O magnetismo não recebe a ênfase necessária no ensino médio, está muito presente em nossa vida. Pois desde o ímã que colocamos na porta da geladeira até a memória (HD – hard disk) do computador, utilizam fenômenos magnéticos.

Figura 2.1 – Um HD (HD – hard disk) aberto. As informações digitais centram-se magneticamente gravadas na mídia circular, que gira em alta velocidade. O movimento da cabeça de leitura sobre a mídia é obtido mediante força magnéticas que agem em bobinas imersas entre dois ímãs, na parte anterior esquerda do disco (parte metálica com cobertura preta).

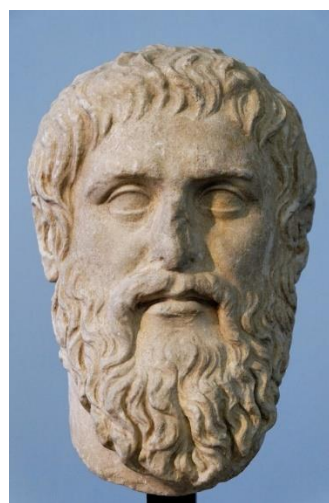
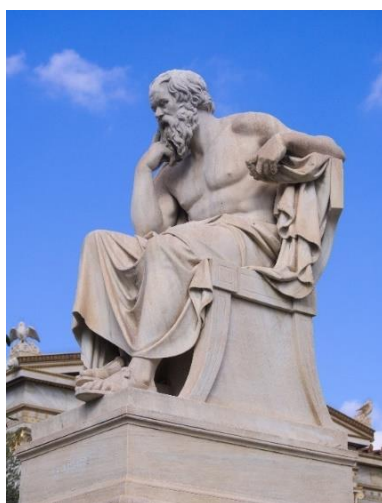


2.2 Um pouco de História do Magnetismo

Nesta seção, analisaremos a evolução dos conceitos referentes às propriedades magnéticas dos materiais, sem, contudo, levarmos em consideração o desenvolvimento dos fenômenos elétricos. Nossa análise vai desde os gregos até estudos atuais. A origem do termo “magnetismo”, segundo alguns historiadores, derivou do nome de um pastor de ovelhas, o grego Magnes. Este surpreso com a atração entre a ponta de ferro de seu cajado e os pregos de sua sandália por certas pedras que encontrava ao longo de onde ele pastoreava (provavelmente, se localizava na Tessália, uma província grega que passou a ser chamada por razões óbvias, de Magnésia). Essas pedras, pela mesma razão, passaram a ser conhecidas como *magnetita* ou *ímã natural*.

A propriedade de a magnetita atrair pedaços de ferro foi mencionada por vários filósofos gregos, tais como, Tales de Mileto (624-546), Anaxagoras de Clazomenas (c.500-c.428), Sócrates de Atenas (c.470-399), Platão de Atenas (c.427-c.347) e Lucrécio. Alguns desses acreditavam que a magnetita possuía uma alma, graças ao seu "aspecto quase mágico e vivo de seu comportamento". Diógenes de Apolônia (f.c. século V a.C.) também defendida essa tese animista. Ele afirmava que "a secura existente na magnetita se saciava na humidade existente no ferro".

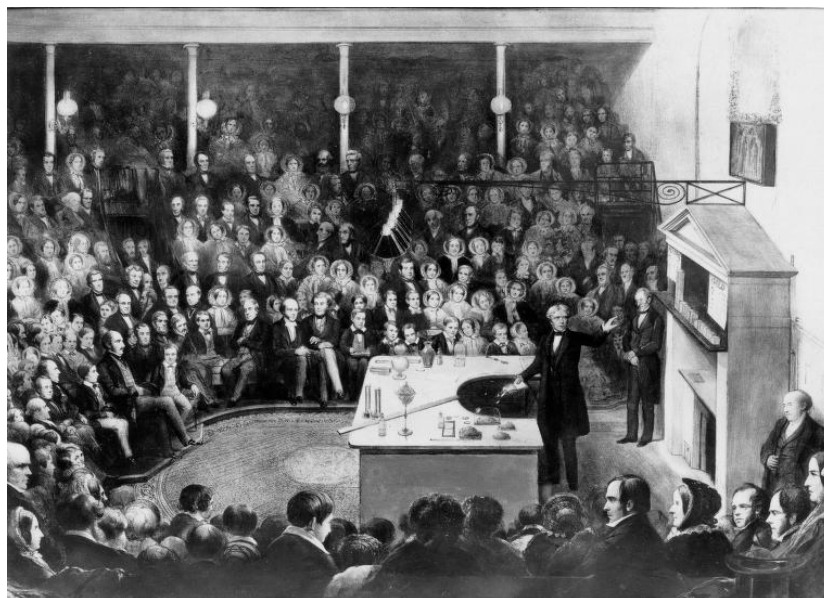
Figura 2.2 – (a) Estátua de Sócrates na Academia de Atenas. (b) Cópia em mármore do busto de Platão feito por Silanião, a.c. 370.



O francês Petrus Peregrinus de Maricourt (c.1240 -) é apontado como o primeiro a estudar as propriedades dos ímãs naturais. Em 1269, Petrus publicou uma série de suas observações em uma obra intitulada de *De Magnete*. As observações presentes na obra são sobre orientações de pequenos pedaços retangulares de ferro aproximados de pequenas amostras esféricas de magnetita, chamadas por ele de terrellas (pequenas terras), e sobre o fato do surgimento de novos polos após seccionar uma agulha magnética ao meio, além das interações entre polos.

O profundo conhecimento que Petrus Peregrinus possuía sobre o instrumento magnético chamado de bússola, possibilitou, a partir de 1302, o uso generalizado desse valioso instrumento na navegação. Isso só foi possível quando o navegador italiano Flávio Gioja (f.c. século XIV. A.D.) passou a utilizá-la, sistematicamente, em suas viagens. Cristovão Colombo (1451-1506), em 1492, também utilizou da potencialidade desse instrumento magnético ao atravessar o Oceano Atlântico. O que proporcionou o aparecimento da bússola no Novo Mundo.

Figura 2.3 – Michael Faraday professor Fulleriano de Química na Real instituição da Grã-Bretanha, 1833, aos 41 anos. Ocupando esse cargo pelo resto de sua vida.



Em meados do ano de 1600, o magnetismo foi objeto de estudo do médico inglês William Gilbert (1644-1603). Gilbert, utilizando do método experimental, tomou as rédeas do estudo do magnetismo ao investigar as forças entre ímãs. Ele observou três propriedades muito importantes. São essas: em um ímã uniforme, a força magnética era proporcional à sua massa, fazendo, desse modo e, presumivelmente,

pela primeira vez, a distinção entre peso e massa; tanto um ímã quanto um corpo eletrizado emitiam uma substância etérea e imaterial, chamada de *effluvium* magnético e elétrico. Assim, Gilbert, aproximou-se da ideia de campos magnéticos e elétricos; por fim, Gilbert observou que os ímãs perdiam suas propriedades quando aquecido até o vermelho rubro, readquirindo-as quando se esfriava.

A ideia de que a magnetita possuía uma alma foi descartada pelo filósofo e matemático francês René Descartes (1596-1650) em seu livro chamado *Principia Philosophiae* (Princípios Filosóficos), de 1644. Nesse livro, Descartes explicou os fenômenos magnéticos por intermédio de sua teoria dos vórtices. Defensor da ideia que a realidade do mundo material dependia de dois atributos; a extensão e o movimento, Descartes considerou a hipótese de que os fenômenos magnéticos eram devido a pequenas partículas fibradas e fluidas que circulavam pela Terra em delgados dutos, entrando através dos poros em um dos polos da Terra e saindo pelo outro. Para ele, existia dois tipos de partículas que viajavam pela extensão terrestre, sendo que uma delas penetrava a Terra no polo norte e a outra, pelo polo sul. Caso tais partículas encontrassem durante sua trajetória alguma substância magnética dotada de dutos, elas prefeririam passar por ela e ali permaneciam, entrando e saindo, formando assim, os vórtices.

Alguns anos depois, mais precisamente em 1751, o estadista e cientista norte-americano Benjamin Franklin (1700-1790) observou que agulhas de ferro poderiam ser imantadas ou desmantadas por uma descarga elétrica produzida por uma garrafa de Leiden. Esse fenômeno mostrava uma relação clara entre eletricidade e magnetismo. Porém, somente no século XIX, a relação entre a eletricidade e o magnetismo foi estudada com mais detalhes pelo físico dinamarquês Hans Christiann Oersted (1777-1851) (veremos mais adiante).

Os vórtices de Descartes começaram a ser definitivamente desconstruídos na segunda metade do século XVIII pelo físico russo Franz Maria Ulrich Theodor Hoch Aepinus (1724-1802) em seu *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetism* (Uma Tentativa Teórica da Eletricidade e do Magnetismo), livro publicado em 1759, considerado como sendo o primeiro trabalho a usar matemática para explicar a eletricidade e o magnetismo. Com efeito utilizando a Teoria de um fluido-elétrico (desenvolvida por Franklin, entre 1747 e 1748, para estudar os fenômenos elétricos), Aepinus propôs que os "polos" de um ímã se deviam à falta ou excesso de um fluido

magnético, cujas partículas repeliam uma a outra, assim como atraíam partículas de ferro e aço. Além disso, o magnetismo permanente do ímã era devido ao emaranhamento desse fluido nos poros desse mesmo ímã.

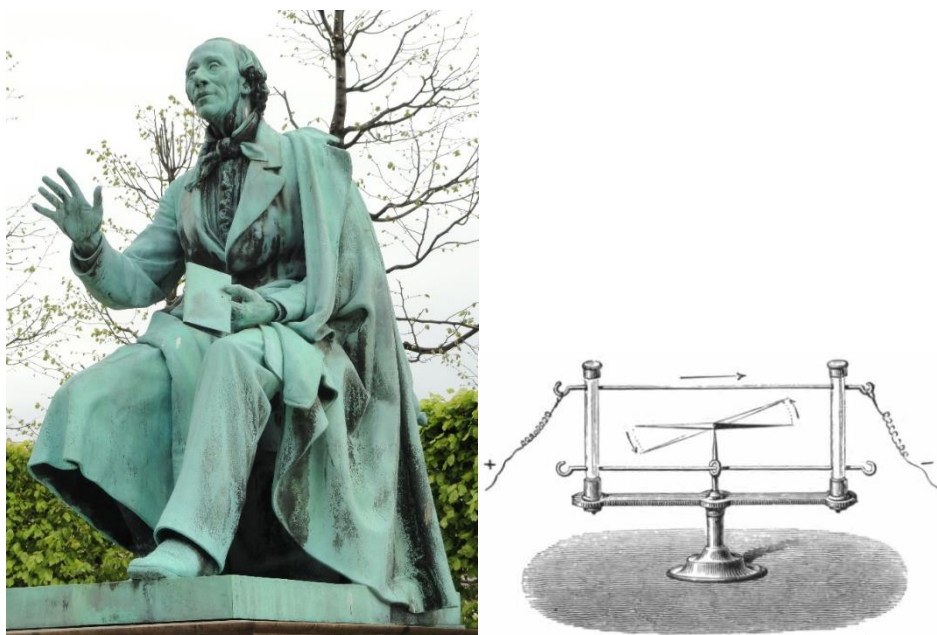
Por outro lado, um modelo de dois fluidos magnéticos (o boreal e o austral), diferentes dos fluidos que trataremos em capítulos posteriores, foi postulado pelos físicos Antoon Brugmans (1732-1789) o Johann Carl Wilcke (1732-1796). Assim, tais fluidos, eram supostos possuírem propriedades de atração e repulsão mútuas similares aquelas possuídas pelos dois fluidos elétricos.

Com o uso de argumentos mecânicos, em 1777, o físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806), explicou o magnetismo com uma nova investida contra a teoria dos "vórtices magnéticos" descartianos. Posteriormente, em 1785, Coulomb também confirmou a hipótese de que as partículas de fluidos magnéticos se atraem ou se repelem com uma força que é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre elas. Além disso, esse cientista francês confirmou a ideia de que os polos magnéticos de um ímã não podem ser isolados, isto é, não existem cargas magnéticas isoladas (relaciona-se com a observação de Petrus Peregrinus, feita em 1269, conforme vimos acima.). Ao realizar algumas experiências, Coulomb supôs que os fluidos magnéticos são permanentemente presos no interior das moléculas dos corpos magnéticos, e que são incapazes de passar de uma molécula para sua vizinha. Assim, a magnetização consisti simplesmente na separação de dois fluidos para as extremidades opostas de cada molécula. Portanto, através dessa hipótese, Coulomb explicou a impossibilidade de separar polos magnéticos de um ímã.

Seguindo o raciocínio cronológico que estamos desenvolvendo, a conexão entre a eletricidade e o magnetismo continuou a ser objeto de pesquisa por parte dos cientistas durante o século XIX. Em 1805, o físico francês Jean-Nicolas- Pierre Hachette (1769-1834) e o químico, também francês, Charles Bernard Desormes (1777-1862), tentaram verificar se uma pilha voltaica, isolada e suspensa livremente, seria orientada pelo magnetismo terrestre. Entretanto seus estudos não tiveram êxito. Dois anos depois (em 1807), também sem êxito, Oersted tentou realizar experiências onde procurava descobrir as relações entre a eletricidade e o magnetismo. Somente no inverno de 1819-1820, durante um curso ministrado na Universidade de Copenhague, sobre Eletricidade, Galvanismo e Magnetismo, Oersted fez a descoberta da ação magnética gerada por uma corrente elétrica.

Ao término de uma aula noturna, do curso citado anteriormente, Oersted teve a ideia de colocar o fio condutor paralelamente a direção da agulha, o que era contrário a seus procedimentos de costume. Em suas primeiras experiências, sempre o fio condutor do circuito galvânico utilizado em angulo reto sobre uma agulha magnética. No entanto, mesmo com a nova direção do fio condutor, Oersted não registrou nenhum movimento perceptível da agulha. Porém, observou uma razoável deflexão dessa agulha, e assim, a sonhada relação entre o magnetismo e a corrente elétrica estava, portanto, descoberta.

Figura 2.4 – (a) Monumento feito para Hans Christain Oersted em Copenhague. (b) A bússola em um fio percorrido por uma corrente.



Após a descoberta de Oersted, grande da comunidade científica despertou interesse pelo experimento dito anteriormente. Isso devido a existência de uma nova força que tal procedimento incrementava a natureza. Tal força, a “força” eletromagnética, atuava diferentemente, isto é, perpendicular à reta que unia o condutor ao pólo magnético. Alguns exemplos dessa curiosidade científica são: o físico suíço Marc-Auguste Pictet (1752-1825), que em Genebra, traduziu e divulgou o trabalho de Oersted: na mesma ocasião em que o físico francês Dominique-François Jean Arago (1786-1853) (estando naquela cidade) tomou conhecimento do mesmo e presenciou, com outros físicos, a repetição das experiências de Oersted realizada pelo também físico suíço Auguste de la Rive (1801-1873), com o auxílio de Pictet. Já na

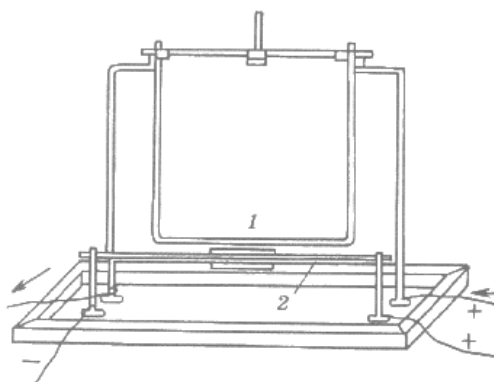
França, Arago realizou novas experiências nas quais constatou mais uma série de magnetizações através de correntes elétricas. Em setembro de 1820, o físico francês André-Marie Ampère (1775-1836) apresentou à Academia de Ciências de seu país o resultado de suas experiências sobre o efeito magnético da corrente elétrica.

Mesmo com os satisfatórios resultados das experiências de Ampère e Arago, a primeira análise matemática mais precisa sobre o campo magnético criado por uma corrente elétrica, foi feita pelos físicos franceses Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841). Em outubro de 1820, eles apresentaram à Academia de Ciências de Paris o resultado, que demonstrava a lei que permite calcular a ação do campo magnético criado por uma corrente elétrica, baseados em suas experiências. Segundo essa lei, “a ação experimentada por um polo magnético, quando colocado a uma certa distância de um fio no qual circula uma corrente voltaica, pode ser expressa da seguinte maneira: - Desenhe a partir do pólo uma perpendicular ao fio; a força sobre o pólo é perpendicular a esta linha e ao fio, e sua intensidade é proporcional ao inverso da distância.” (BASSALO, pág. 79). Na linguagem atual, essa força elementar (ou o campo magnético $\vec{H}$) é calculada pela expressão:

$$d\vec{F} = (Ci/r^3).d\vec{s} \times \vec{r}$$

(onde C depende do sistema de unidades escolhido), sendo r a distância do elemento $d\vec{s}$ ao ponto onde é calculada a força.

Figura 2.5 – (a) André-Marie Ampère (1775-1836). (b) Um dos experimentos de sobre força magnética realização realizados por ele na tentativa de estudar a lei de Biot-Savart.



Os resultados dos experimentos de Oersted, Arago, Ampère e Biot-Savart, vistos acima, apesar de revolucionários, apresentaram um resultado intrigante, o de que o campo magnético criado por uma corrente elétrica é circular. Por essa razão, houve um certo ceticismo na comunidade científica sobre essa teoria, havendo, portanto, alguns cientistas tentando outras explicações, como por exemplo, o químico sueco Jons Jakob Berzelius (1779-1848) e o químico inglês Humphry Davy (1778-1820). O que desenvolvendo assim, o modelo de Davy-Berzelius.

O físico britânico Michael Faraday (1791-1867), em seu celebre livro “Experimental Researches in Electricity” (Pesquisas Experimentais em Eletricidade, demonstrou que o modelo de Davy-Berzelius não era correto. Desse modo, Faraday passou a defender a hipótese oerstediana do campo magnético circular produzido por uma corrente elétrica e, como defesa dessa hipótese, apresentava o resultado de suas próprias experiências, dentre as quais destacava aquela em que um ímã exibia rotação em torno de um fio condutor. Apesar de não possuir quase nenhum conhecimento matemático, Faraday usou sua grande intuição para explicar os fenômenos eletromagnéticos que observará ao longo dos 23 anos de escrita dessa obra. Faraday discorreu sobre diversas aplicações dos efeitos elétricos e magnéticos, entretanto podemos dizer que a ideia que mais chama atenção em seu trabalho são as linhas de campos de forças.

Encantado com a obra de Faraday, no dia 6 de agosto de 1845, o físico inglês William Thomson (1824-1907) (mais tarde Lord Kelvin) escreveu uma longa carta a Faraday na qual descrevia seu tratamento matemático das linhas de força faradayananas. No final da carta, Thomson escreve uma série de sugestões sobre experiências que deveriam ser realizadas com o propósito de testar a teoria de Faraday. Numa dessas sugestões, Thomson indica a possibilidade de Faraday testar a ação do magnetismo sobre a luz plano polarizada. Faraday já havia tentado de outras formas, estudar a sugestão de Thomson nos anos de 1820 e de 1830, porém, sem sucesso. Entretanto, no dia 13 de setembro de 1846, seus esforços foram finalmente recompensados. Posicionando um vidro romboide de alto índice de refração entre os polos de um forte eletroímã, constatou que o vidro procurava se orientar perpendicularmente ao campo magnético. Fazendo passar por esse mesmo vidro um raio de luz plano-polarizada, paralelamente às linhas de força do campo

magnético, descobriu que o plano de polarização da luz era rodado e que o ângulo de rotação era diretamente proporcional à intensidade do campo (efeito Faraday).

O fato de que o campo magnético atuava na luz, através do vidro, sugeriu a Faraday que o campo magnético não poderia estar apenas confinado no Ferro, Níquel e Cobalto, como já era conhecido, e sim, em toda a matéria. Após desenvolver outras experiências, a fim de confirmar essa ideia, verificou que nem todos os corpos reagem da mesma maneira na presença de um campo magnético. Alguns deles, como por exemplo, o Ferro, conduzem bem o campo magnético, fazendo convergir as linhas de força desse campo através de si próprio (paramagnéticas). Por outro lado, outros corpos são pobres condutores de campo magnético, divergindo suas linhas de força através de si mesmos (diamagnéticos).

Após a descoberta dessas propriedades magnéticas da matéria os cientistas ficaram incentivados a formularem modelos para explicá-las. Assim, os partidários da teoria dos fluidos magnéticos, a utilizavam para explicar o paramagnetismo como sendo devido à atração entre esses fluidos. No entanto, no caso do diamagnetismo em que há repulsão, aqueles partidários acreditavam que as substâncias que exibiam essa propriedade, tinham a capacidade de reverter a "polaridade" daqueles fluidos. Entretanto, Faraday era bastante cético com relação a essa teoria dos fluidos. Para ele, as propriedades magnéticas dos corpos eram devidas as linhas de força.

Contudo, explicação das propriedades magnéticas apresentadas por ele era insatisfatória, uma vez que não era provida de nenhum mecanismo para explicar o fenómeno magnético. No entanto, a teoria apresentava um aspecto muito interessante, pois, atribuía ao campo magnético as ações magnéticas deste e não ao sistema que provoca o magnetismo (magneto).

A formulação matemática das ideias de Faraday foi feita pelo físico e matemático britânico James Clerk Maxwell (1831 – 1879). Apaixonado pelos trabalhos de Faraday, Maxwell conseguiu dar um tratamento matemático bastante rigoroso as linhas de força faradayanas. O resultado dos estudos de Maxwell foi por ele apresentado à Sociedade Filosófica de Cambridge, nos anos de 1855-1856, com o título: On Faraday's Line of Force (Sobre as Linhas de Força de Faraday). Esse trabalho é dividido em duas partes. Na primeira delas, Maxwell estudou a analogia entre as linhas de força e as linhas de fluxo em um fluido incompressível, fazendo uma extensão do trabalho de Thomson sobre esse assunto e na segunda parte, estudou o

eletromagnetismo propriamente dito, desenvolvendo a partir daí as suas quatro equações bastante conhecidos.

Posteriormente, Maxwell, em 1861-1862, analisou a existência de tensões e vibrações associadas as linhas de força de Faraday, relativas ao campo magnético. Ao estudar as leis da Dinâmica dessas tensões e vibrações, concluiu que a luz é uma onda eletromagnética.

Após a classificação apenas pictórica (pois não se faria acompanhar de nenhum mecanismo para explicar o fenômeno) das substâncias em dia e paramagnéticas de Faraday, o físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), em 1847, tentou explicá-las de forma mais formalizada, usando as correntes amperianas. Assim, para explicar o diamagnetismo postulou a existência de circuitos moleculares amperianos nos quais a resistência ôhmica é nula, de modo que um campo magnético externo causa correntes induzidas nesses circuitos. No entanto, embora o fluxo magnético através dos circuitos moleculares permaneça nulo, as correntes induzidas, cujas direções são dadas pela lei de Lenz, explicam o diamagnetismo.

Entretanto havia algumas dificuldades nessa explicação, uma vez que, segundo a mesma, todos os corpos seriam então diamagnéticos. Para escapar a essa conclusão, Weber admitiu que no ferro e nas outras substâncias magnéticas existiam correntes moleculares permanentes cujos planos eram orientados pelo campo magnetizante externo. Tais correntes assim orientadas, tinham sentido contrário as correntes induzidas pelo fenômeno do diamagnetismo, o que causa o efeito resultante ser paramagnético. Portanto, para Weber, as substâncias paramagnéticas seriam aquelas para as quais o paramagnetismo seria forte o bastante para mascarar o diamagnetismo.

A partir desse ponto da história do magnetismo, vários cientistas vieram para tentar entender os materiais diamagnéticos e paramagnéticos, fazendo com que, posteriormente, ainda surja mais classificações como o ferromagnetismo.

Vejamos a continuação histórica do magnetismo junto aos próximos capítulos.

2.3 Fundamentos do eletromagnetismo

Os campos magnéticos são gerados através do movimento de partículas eletricamente carregadas ou por ímãs permanentes. Adiante, será estabelecido algumas propriedades que caracterizam as grandezas que envolvem os campos

magnéticos gerados através das cargas em movimento. Posteriormente (no capítulo 2.4), trataremos as propriedades das grandezas que envolvem o campo magnético gerado pelos ímãs citados anteriormente.

Dado duas cargas q e q_1 localizadas em r , com uma das cargas na origem e em movimento uniforme com velocidades $\vec{v}$ e $\vec{v}_1$, respectivamente, além da força elétrica entre as cargas, terá uma força magnética adicional F_m representada pela equação 2.1.

$$\vec{F}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q q_1}{r^2} \cdot \vec{v} \times \left(\vec{v}_1 \times \frac{\vec{r}}{r} \right) \quad Eq. (2.1)$$

Por conveniência¹, podemos fatorar a carga teste q e sua velocidade v , tendo por consequência:

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad Eq. (2.2)$$

onde $\vec{B}$ é a indução magnética e pode ser expressa da seguinte forma:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1}{r^2} \vec{v}_1 \times \frac{\vec{r}}{r}. \quad Eq. (2.3)$$

Deve-se adicionar algum processo de limitação na definição de $\vec{B}$ para assegurar que a carga teste não afeta as fontes de $\vec{B}$. A unidade da indução magnética, no sistema MKS², é o newton-segundo por coulomb-metro, denominada de tesla (T).

Caso esteja presente o campo magnético e o campo elétrico ($\vec{E}$), em determinada situação, a força total sobre as cargas em movimento será $\vec{F}_e + \vec{F}_m$,

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}),$$

¹ Na eletrostática já é de costume fatorar a carga na relação de força elétrica, estabelecida pela Lei de Coulomb, para assegurar que a carga teste não afeta as fontes da indução magnética $\vec{B}$.

² Sistema MKS de unidades é um sistema de unidades de medidas físicas, ou sistema dimensional.

Eq. (2.3)

conhecida como *força de Lorentz*.

A direção da força magnética é dada pelo produto vetorial presente na Eq. (2.3). Em resumo, podemos assegurar que “A força $\vec{F}_B$ que age sobre uma partícula carregada que se move com velocidade $\vec{v}$ na presença de um campo magnético $\vec{B}$ é sempre perpendicular a $\vec{v}$ e $\vec{B}$.” (HALLIDAY et al, 2016, pág. 199).

Considerando um elemento $d\vec{l}$, que se encontra no sentido da corrente I de um condutor qualquer e paralelo a velocidade $\vec{v}$ dos portadores de carga dentro do condutor, podemos, a partir da força de Lorentz, determinarmos a força que atua sobre esse elemento. Se houver N portadores de carga por unidade de volume, entendemos que a força que atua sobre o elemento $d\vec{l}$ é

$$d\vec{F} = NA |d\vec{l}| q\vec{v} \times \vec{B},$$

Eq. (2.4)

onde A é a área da secção reta do condutor e q é a carga determinada por cada portador de carga.

Como $\vec{v}$ e $d\vec{l}$ são paralelos é conveniente escrevermos a Eq. (2.4) da seguinte maneira

$$d\vec{F} = Nq |\vec{v}| A d\vec{l} \times \vec{B}.$$

Eq. (2.4)

A conveniência se encontra no fato de que $Nq |\vec{v}| A$ é justamente a corrente para uma só espécie de portador. Portanto podemos reescrever a Eq. (2.4) da seguinte maneira

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}.$$

Eq. (2.5)

Outra grandeza interessante é o torque sobre um circuito completo. Como torque é o momento de uma força, o torque infinitesimal $d\vec{\tau}$ é dado por

$$d\vec{\tau} = \vec{r} \times d\vec{F} = I \vec{r} \times (d\vec{l} \times \vec{B}).$$

Eq. (2.6)

Portanto o torque sobre um circuito completo sobre a curva C é

$$\tau = I \oint_C \vec{r} \times (d\vec{l} \times \vec{B}).$$

Eq. (2.7)

Caso $\vec{B}$ seja uniforme, podemos realizar algumas expansões, obtendo por resultado

$$\tau = I \vec{A} \times \vec{B} , \quad \text{Eq. (2.8)}$$

onde $\vec{A}$ é o vetor cujas componentes são as áreas compreendidas pelas projeções da curva C sobre os planos xy , yz e zx . O produto escalar $I\vec{A}$ é frequente na teoria magnética e é chamado de **momento magnético** do circuito (m).

$$\vec{m} = I\vec{A} . \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Com intuito de determinar o campo magnético produzido por um número mais amplo e/ou uma distribuição espacial diferente de elementos que conduzem cargas, a Lei de Biot e Savart e a Lei de Ampère surgem no eletromagnetismo através de experimentações. Hoje, com a linguagem matemática moderna, podem ser escritas da seguinte maneira,

$$\vec{B}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint_1 \frac{d\vec{l}_1 \times (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} , \quad \text{(Lei de Biot e Savart) Eq. (2.10)}$$

$$\nabla \times \vec{B}(\vec{r}_2) = \mu_0 \cdot \vec{J}(\vec{r}_2) , \quad \text{(Lei de Ampère /diferencial) Eq. (2.11)}$$

$$\oint \vec{B}(\vec{r}_2) \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{J}(\vec{r}_2) \cdot \vec{n} da . \quad \text{(Lei de Ampère /Integral) Eq. (2.11)}$$

Por não ter relações diretas com o objetivo desse trabalho, não iremos aprofundar nas aplicações dessas duas importantes leis do eletromagnetismo, porém a visualização de suas equações, nos confirma a relação dos campos magnéticos gerados por elementos de carga em movimento e nos norteará na descrição de grandezas magnéticas que se relacionam diretamente com tais leis.

Com o intuito de simplificação, baseada no argumento que o divergente da indução magnética se anula e que o divergente de qualquer rotacional é igual a zero, supõe que a indução magnética pode ser expressa por

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} ,$$

Eq. (2.12)

sendo $\vec{A}$ chamado de potencial vetorial magnético e subordinando-o à Lei de Ampère (Eq. (2.11)), obtemos

$$\nabla \times \vec{B} = \nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu_0 \vec{J}.$$

Usando a identidade

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \nabla \cdot \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$$

e, como $\nabla \cdot \vec{A} = 0$, obtemos

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J}.$$

Eq. (2.13)

Integrando cada componente retangular da Eq. (2.13) e usando a solução da equação de Poisson, obtemos

$$\vec{A}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int \frac{\vec{J}(\vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} dv_1.$$

Eq. (2.14)

Para calcularmos o campo magnético devido a um círculo pequeno, a grandes distâncias, partiremos da Eq. (2.14) e faremos a seguinte substituição

$$\vec{J} dv \rightarrow I \cdot d\vec{l},$$

obtendo

$$\vec{A}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \oint \frac{d\vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}.$$

Eq. (2.15)

Após uma sequência de expansões e simplificações

$$\vec{A}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left[\frac{I}{2} \oint \vec{r}_1 \times d\vec{r}_1 \right] \times \frac{\vec{r}_2}{r_2^3}.$$

Eq. (2.16)

Segundo REITZ, et al, (1991, pág. 166), através de simetrias claras na integração de $\vec{r} \times d\vec{l}$,

$$\vec{m} = \frac{I}{2} \oint \vec{r} \times d\vec{l}.$$

Equação 8.22 do livro

Portanto, podemos escrever a Eq. (2.16) em termos de $\vec{m}$:

$$\vec{A}(\vec{r}_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{m} \times \vec{r}_2}{r_2^3}.$$

Eq. (2.17)

Como $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ (Eq. (2.12)), podemos definir facilmente a indução magnética através da informação do momento magnético, que é geralmente denominado de *momento de dipolo magnético*. Essa facilitação será utilizada em algumas propriedades que iremos analisar no capítulo 2.3.

Em regiões onde a densidade de corrente $\vec{j}$ seja zero, o rotacional da indução magnética é nulo, assim, podemos escrever a indução, nesses pontos, em termos do gradiente de um potencial escalar:

$$\vec{B} = -\mu_0 \cdot \nabla \cdot \varphi^* .$$

Eq. (2.18)

Contudo, o divergente de $\vec{B}$ é igual a zero, o que significa que

$$\nabla \cdot \vec{B} = -\mu_0 \cdot \nabla^2 \cdot \varphi^* = 0 ,$$

Eq. (2.19)

sendo φ^* chamado de potencial escalar magnético (REITZ, et al, 1991, pág. 178). O principal uso do potencial escalar magnético é para o tratamento de materiais magnéticos, portanto, assim como o potencial vetorial magnético, usaremos o potencial escalar no desenvolver do capítulo 2.4.

Outra forma de gerar campos magnéticos é através dos materiais que chamamos anteriormente de ímãs permanentes. Esses materiais possuem uma magnetização (nesse momento, podemos entender por magnetização como sendo uma informação do campo magnético gerado por materiais) resultante devido ao somatório dos momentos magnéticos intrínsecos, que ocasiona em um campo magnético duradouro. Iremos comentar mais sobre esses tipos de materiais e seus momentos internos, adiante.

2.4 Modelo Magnético da Matéria

Vimos anteriormente que campos magnéticos gerados por cargas em movimento podem ser calculados em pontos distantes, próximos ou presentes na superfície da curva que descreve o circuito elétrico. Para calcularmos agora o campo magnético no interior da matéria, preenchemos a região que circunda o circuito com um meio material.

Sabemos que a matéria é constituída por átomos e esses, por sua vez, são constituídos por elétrons em movimento. Assim, em cada átomo da matéria há um circuito denominado de **corrente atômica**. Tais correntes, são correntes circulatórias puras, isso por serem formadas através do movimento dos elétrons entorno do núcleo atômico. Portanto, as correntes atômicas, visto de um ponto estratégico³, não deslocam cargas como em uma corrente convencional, mas geram campos magnéticos.

A ideia de que a matéria possui diferentes interações magnéticas de acordo com alguns parâmetros, veio quando Faraday, após seu extenso trabalho a procura de entender o campo magnético em regiões externas à matéria e próximas do condutor, recebeu uma longa carta de William Thomson que indicava o teste dos efeitos magnéticos sobre a luz plano-polarizada. Faraday já havia testado algo parecido, mas sem sucesso.

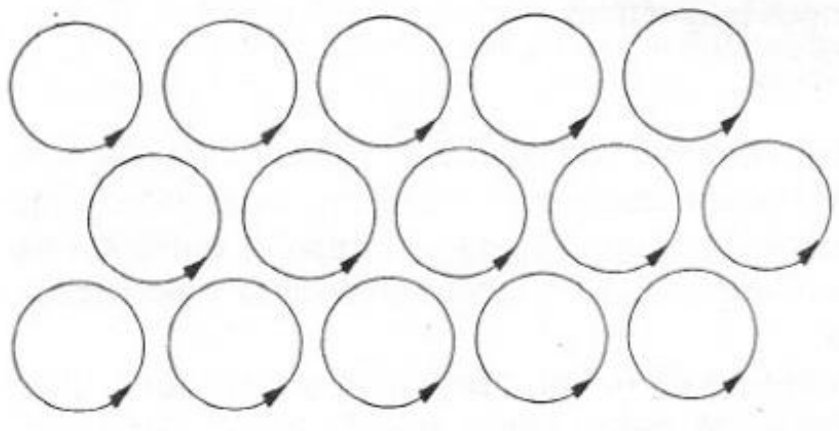
Em 1845, finalmente funcionou o experimento de Faraday. No experimento, pôde observar o desvio de uma luz polarizada que passava em um vidro com alto índice de refração e localizado entre os polos de um forte eletroímã. Assim, concluiu que o campo magnético não interagia somente com o ferro, níquel e cobalto, mas interagia com toda a matéria, porem de diferentes formas.

A partir desse ponto da história do magnetismo, a matéria podia ser classificada de acordo com sua capacidade de convergir ou divergir o campo magnético que flui pelos materiais. As classificações dos materiais foram aprimorando com o tempo. Três classificações importantes que, logo mais, analisaremos, são: o diamagnetismo, o paramagnetismo e o ferromagnetismo.

Agora, vejamos as correntes atômicas através da figura 3. Cada corrente atômica corresponde a um pequeno circuito fechado de dimensões atômicas descrito como um dipolo magnético.

³ Deve-se tratar tais pontos no limite em que há o tratamento da estruturação de moléculas por suas menores partes, os átomos, pois se considerarmos escalas menores, como o interior do átomo, teremos um deslocamento significativo dos elétrons, o que é tratado no estudo da mecânica quântica.

Figura 2.6 – Esquema simplificado de material magnético formado por correntes atômicas em círculos fechados que circulam no mesmo sentido.



Fonte: REITZ, et al, FUNDAMENTOS DA TEORIA ELETROMAGNÉTICA, (1991, pág186).

De acordo com a Eq.(2.17), podemos escrever o potencial vetorial magnético e, por consequência, o campo de indução magnética, em termos do momento de dipolo magnético devido a um só átomo. Pensando em uma quantidade macroscópica, é definida uma grandeza física chamada de **magnetização** ($\vec{M}$). Tal grandeza, pode ser equacionada somando, vetorialmente, cada momento de dipolo $\vec{m}$ presentes em um pequeno elemento de volume Δv e, então, dividindo o resultado por Δv . Sendo assim

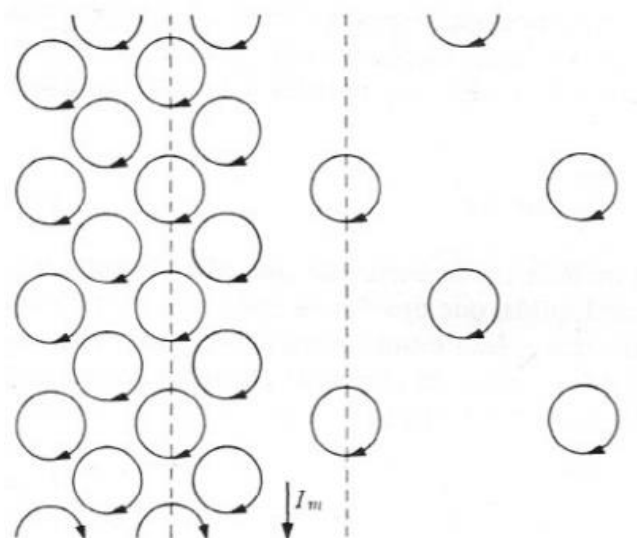
$$\vec{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_i (\vec{m}_i).$$

Eq . 2.20

Portanto, magnetização mede “o número de circuitos de corrente atômica por unidade de volume multiplicado pelo momento magnético efetivo ou médio de cada circuito.”, resumidamente, ela nos proporciona “[...] uma descrição macroscópica das correntes atômicas no interior da matéria.” (REITZ, et al, 1991, pág. 186).

Partindo dessa visão macroscópica, as derivadas da magnetização podem expressar todos os efeitos magnéticos devido a presença da matéria, ou seja, tais derivadas descrevem todos os efeitos da interação de campos magnéticos que fluem em regiões onde há um meio material. Uma dessas derivadas descreve uma grandeza chamada de densidade de corrente de magnetização, $\vec{J}_M = \nabla \times \vec{M}$. Tal grandeza é visualmente mais fácil, se olharmos para a Figura 4.

Figura 2.7 - Exemplo de mudança abrupta na magnetização.



Fonte: REITZ, et al, FUNDAMENTOS DA TEORIA ELETROMAGNÉTICA, (1991, pág186).

Observe que a magnetização no interior da matéria, exemplificada na figura 2.7, é uniforme. Se houver uma mudança abrupta na magnetização desse material, teremos um número maior de cargas se deslocando para baixo do que para cima. Esse efeito é o que provoca as *correntes de magnetização*. Essa corrente, mesmo que não transporte cargas, proporciona um movimento efetivo de cargas para baixo. Observe entre as linhas tracejada da figura 4.

O grande objeto de estudo, é a indução magnética, portanto, para uma distribuição magnetizada da matéria, a indução pode ser expressa através da soma do gradiente de um campo escalar e de um termo proporcional à magnetização total. Visivelmente, faz sentido pensarmos que essa contribuição proporcional à magnetização, é somada graças a presença da matéria e, por fim , podemos equacionar⁴ a indução magnética nessas regiões de matéria como sendo

$$\vec{B}(\vec{r}) = -\mu_0 \cdot \nabla \varphi^* + \mu_0 \cdot \vec{M}(\vec{r}) .$$

Eq. (2.21)

Antes de seguirmos no desenvolvimento sequencial, iremos desenvolver conceitos correlacionando com a historiografia de cada assunto almejado, e, posteriormente, continuaremos a descrever as relações da indução magnética, voltadas para a parte microscópica da matéria, diante das ferramentas matemáticas

⁴ O desenvolvimento matemático detalhado para a obtenção da equação 2.21 está no cap. 9.2 do livro; Os Fundamentos do Eletromagnetismo, escrito por Reitz, Milford e Christy (1991).

atuais. É provável, que os textos se misturem usando de artifício didático, o que permite que os parágrafos seguintes intercalem entre a história magnética e o magnetismo de um ponto de vista moderno.

A ideia das correntes de magnetização surgiu com os esforços do físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891). Weber estudou as publicações de Faraday sobre a classificação dos materiais e postulou, assim, a existência de circuitos moleculares amperianos (Circuitos de correntes magnéticas). Para Weber, além de refutar a ideia de que o magnetismo era formado por fluidos, chamados de fluidos magnéticos, a presença de correntes atômicas no interior da matéria explica mais facilmente o porquê da *“magnetização induzida não aumentava em proporção ao aumento do campo, mas tende para um valor de saturação”* (BASSALO, 1994, pág. 82). Com tais efeitos, Weber também descreveu que a força magnética externa orienta o momento magnético produzido pelas correntes atômicas no interior da matéria, na mesma direção do próprio campo. Assim, após orientar todos as componentes, ocorria a saturação.

Apesar de parecer solucionado, o tratamento postulado de Weber possuía uma dificuldade. Pensando que os momentos magnéticos internos podiam se mover livremente, sem encontrar resistência, qualquer campo magnético externo poderia levar a matéria a saturação, o que já se era sabido ser impossível (Os efeitos dos materiais Diamagnéticos já eram estudados, sabendo-se que quando imersos em regiões de campos magnéticos externos tendiam a se alinhar em sentido contrário as linhas de força, ocasionando em uma “inércia magnética”⁵). Como alternativa de contorno ao problema, Weber propôs que o movimento de cada circuito molecular sofria a resistência de um torque, provocado pela interação entre os outros momentos magnéticos de regiões vizinhas.

O físico escocês James Alfred Ewing (1855 – 1935), estudou o movimento realizado pelas correntes atômicas tratando do efeito termoelétrico e o de tensão do material. Ewing descobriu que há um atraso em relação a essas duas propriedades e então passou a estudar correntes passageiras (transientes) em um fio magnetizado torcido. Descobrimo o mesmo “atraso”, introduziu nos estudos da magnetização o termo histerese (significa em grego: estar em atraso).

⁵ O termo “inércia magnética” é aqui utilizado para representar a anulação resultante das interações entre a indução magnética externa e a magnetização do material. Tal fenômeno é mais detalhado na página 23.

Posteriormente, as diferenças entre o diamagnetismo e o paramagnetismo descritas por Weber foram confirmadas pelo físico francês Pierre Curie (1859 – 1906, PNF, 1903). Curie observou que a *susceptibilidade magnética* χ é inversamente proporcional a temperatura absoluta T , para materiais paramagnéticos, enquanto para materiais diamagnéticos é independente dessa mesma temperatura. Essa relação ficou conhecida como *Lei de Curie*. Curie, estudando amostras de materiais ferrimagnéticos (após um certo tempo de estudos, os cientistas começaram a chamar os materiais paramagnéticos que tinham uma magnetização muito alta de materiais ferrimagnéticos) em função da temperatura, observou que em uma temperatura específica (a *Temperatura de Curie*), em que acima dessa os materiais ferrimagnéticos se comportam como paramagnéticos.

Vejamos agora algumas das propriedades citadas anteriormente sobre a visão matemática moderna.

Em processos matemáticos avançados, determina-se o campo de indução magnética ao equacionar as relações do potencial escalar magnético e a magnetização. Por fim, teremos uma relação mais completa da indução que relaciona as correntes amperianas, o potencial escalar magnético, a densidade de polo magnético (ρ_M) e a densidade superficial da intensidade do polo magnético (σ_M) como variáveis do potencial escalar e a distância da fonte do campo até o ponto calculado. Resumidamente, a indução magnética pode ser equacionada da seguinte forma:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv' - \mu_0 \nabla \varphi^*(\vec{r}) + \mu_0 \cdot \vec{M}(\vec{r}) ,$$

Eq. (2.22)

onde

$$\varphi^*(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\rho_M dv'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{\sigma_M da'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} .$$

Eq. (2.23)

Como $\vec{M}(x'; y'; z')$ depende de $\vec{B}((x'; y'; z'))$ e para resolver a Eq. (2.22), nos melhores casos da função $\vec{M}(\vec{B})$, apareceria uma integral, é introduzido um vetor magnético auxiliar $\vec{H}$, definido por

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} .$$

Eq. (2.24)

O campo $\vec{H}$ é muito utilizado na teoria magnética, especialmente em problemas que envolvam ímãs permanentes.

Para resolver problemas de cunho magnético, é essencial que se saiba alguma relação entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$ ou, de forma equivalente, uma relação entre a magnetização $\vec{M}$ e um dos vetores do campo magnético. Tais relações, são características da natureza do material magnético e são usualmente obtidas por meio da experimentação.

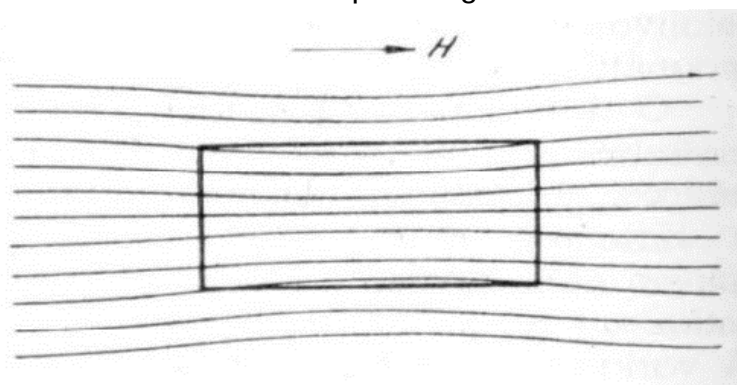
Há uma extensa classe de materiais em que existe uma relação aproximadamente linear entre $\vec{M}$ e $\vec{H}$. Se o material for isotrópico, o que significa dizer que o material possui as mesmas propriedades físicas em todas as direções, e linear,

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

Eq. (2.25)

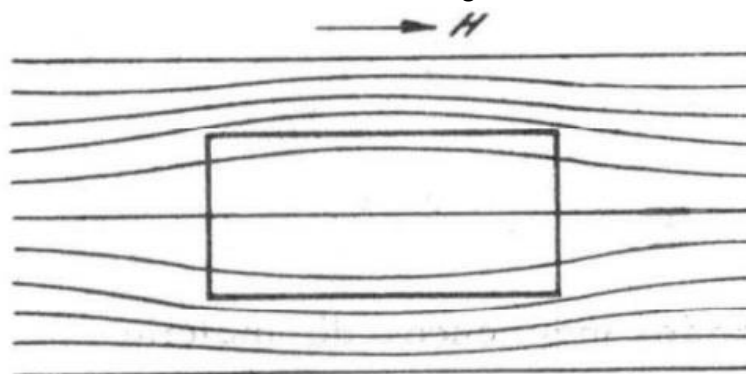
onde a quantidade escalar adimensional χ_m é denominada de *susceptibilidade magnética*. Se $\chi_m > 0$, ou seja, positivo, o material se classifica como *paramagnético* e assim, por consequência, a presença do material reforçará a indução magnética (Veja a Figura 5). Agora, se $\chi_m < 0$, ou seja, negativo, o material se classifica como *diamagnético* e a indução magnética se enfraquece pela presença do material (Veja a Figura 2.9). A convergência do campo da Figura 2.8 se deve a interação do campo com o material que, por ser paramagnético, contribui para o fortalecimento desse campo e explica o motivo da constante χ_m ser chamada de susceptibilidade. Já a divergência da Figura 6 se deve a interação do campo com o material que, por ser diamagnético, contribui para o enfraquecimento do campo, já que as linhas de campo terão o trabalho de se “desviarem” do material.

Figura 2.8 – Distribuição das linhas de força na transição do ar, ou do vácuo, para um material paramagnético.



Fonte: CHIAVERINI, Vicente. Aços Carbono e Aços ligas. Cap.: Materiais magnéticos. **Geologia e Metalúrgica**. São Paulo, p. 172-196. 1955.

Figura 2.9 - Distribuição das linhas de força na transição do ar, ou do vácuo, para um material diamagnético.



Fonte: CHIAVERINI, Vicente. Aços Carbono e Aços ligas. Cap.: Materiais magnéticos. **Geologia e Metalúrgica**. São Paulo, p. 172-196. 1955.

Embora χ_m seja uma função da temperatura, como determina a Lei de Curie, e muitas vezes a variação de temperatura é proporcionalmente grande, a susceptibilidade para materiais paramagnéticos e diamagnéticos é bastante pequena; isto é $\chi_m \ll 1$ (para materiais diamagnéticos e paramagnéticos).

Outras duas propriedades são de grande importância, assim como a susceptibilidade, para o tratamento de materiais magnéticos, essas são; a permeabilidade μ e a permeabilidade relativa K_m . A permeabilidade μ é obtida a partir da comparação entre as equações Eq. (2.24) e Eq. (2.25), considerando que a relação linear entre $\vec{M}$ e $\vec{B}$ implica também em uma relação linear entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$, de tal modo que

$$\vec{B} = \mu \vec{H} ,$$

Eq. (2.26)

e assim

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) .$$

Eq. (2.27)

A permeabilidade relativa é algumas vezes listada em tabela ao invés de χ_m , ela é adimensional e pode ser expressa por:

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m .$$

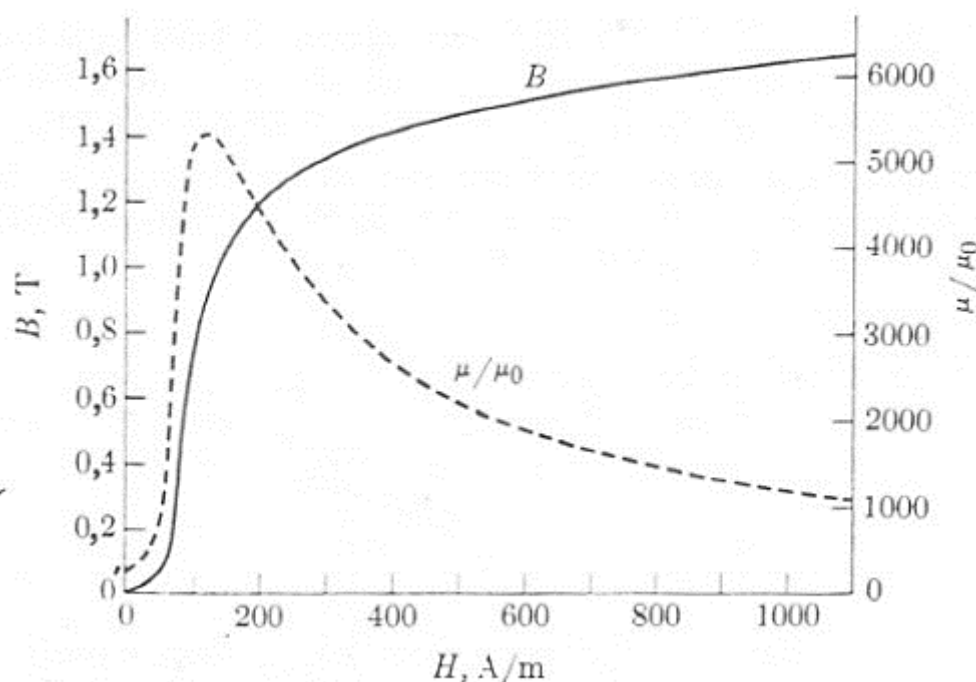
Eq. (2.28)

Os materiais ferromagnéticos não são lineares (e, em grande parte, são anisotrópicos), o que impede o uso das equações 2.25 e 2.26 com permeabilidade μ e susceptibilidade χ_m constantes. Esse empecilho nos faz procurar outros meios para

analisar a relação entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$, tais como, diagramas. Considerando uma amostra de um material ferromagnético com magnetização inicial nula, se aumentarmos gradativamente a intensidade magnética, a relação $\vec{B}$ e $\vec{H}$ descreverá uma curva chamada de *curva de magnetização do material*. Podemos ver um exemplo desse tipo de curva através da Figura 2.10.

Ao analisar a curva da Figura 2.10, pode-se obter diversos valores para a permeabilidade μ . O valor máximo de μ está localizada no “joelho” da curva. Pode-se entender como joelho, a região em que a curva ameniza sua taxa de inclinação em relação as taxas iniciais. Essa suavidade pode ser entendida pela manipulação da equação 2.24, sendo $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$. Após certo tempo de indução magnética, a magnetização do material chega a um valor máximo, o que faz com que a curva de magnetização continue a aumentar para um $\vec{H}$ muito grande, somente por razão do termo $\mu_0\vec{H}$. Tal ponto de máxima magnetização é denominado de *magnetização de saturação do material*.

Figura 2.10 – Curva de magnetização e permeabilidade relativa do ferro comercial (recozido).

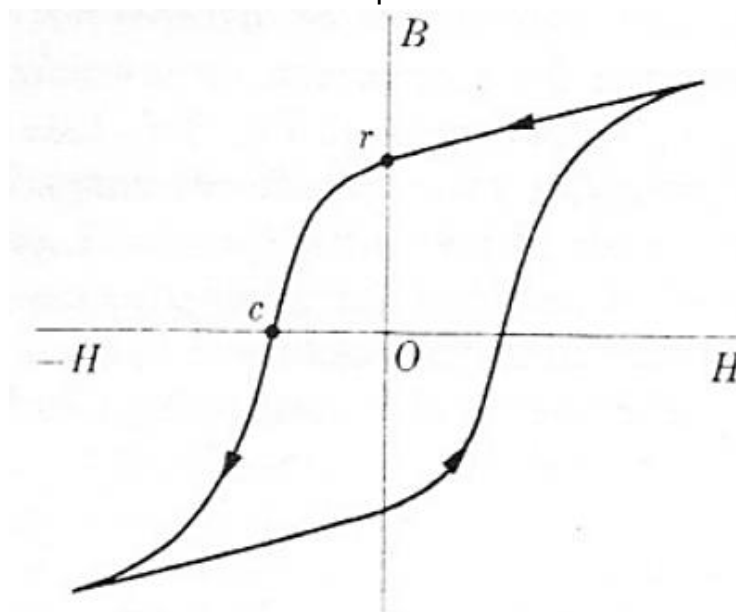


Fonte: REITZ, et al, FUNDAMENTOS DA TEORIA ELETROMAGNÉTICA, (1991, pág197).

Os materiais ferromagnéticos são de alto interesse graças a seus efeitos de intensificar a indução magnética, quando dispostos como meio material, e graças a

sua capacidade de ter uma magnetização permanente. Considerando uma amostra magnetizada da mesma forma que a dita anteriormente, com intensidade magnética inicialmente nula; se a intensidade magnética $\vec{H}$ for diminuída, a relação entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$ não retornará pela curva da Figura 2.10, mas em vez disso, se deslocará até certo ponto r , presente na Figura 2.11 (a seguir), onde $\vec{H}$ será nulo. Após isso, a magnetização, uma vez estabelecida, não desaparecerá no ponto r (remoção de $\vec{H}$); “ [...] na realidade, ela tomará uma intensidade magnética invertida para reduzir a magnetização a zero” (REITZ et al, 1991). Após reduzir a magnetização ao ponto mínimo, se o campo magnético externo $\vec{H}$ for novamente acrescido gradativamente, a curva não voltará pelo mesmo caminho da desmagnetização feita anteriormente (pelo próprio material), mas ela, entretanto, fará um traçado inferior, como, por exemplo, o traço descrito da curva inferior na Figura 2.11. Esse fenômeno é chamado de histerese.

Figura 2.11 – Curva de histerese típica de um material ferromagnético.



Fonte: REITZ, et al, FUNDAMENTOS DA TEORIA ELETROMAGNÉTICA, (1991, pág197).

O atraso estudado por Ewing é então descrito, dessa forma, pelo gráfico da Figura 8 chamado de *curva de histerese do material*. Outras nomenclaturas usualmente ditas são: para o valor de $\vec{B}$ no ponto r , é conhecido como valor de remanência ou retentividade; e o módulo de $\vec{H}$ no ponto c é denominado de *força coercitiva* ou *coercividade*.

2.5 Teoria Microscópica do Magnetismo

A teoria microscópica do magnetismo foi sendo desenvolvida, à medida que o elétron foi sendo, cada vez mais, comprovado como parte da matéria. A primeira aplicação de um modelo veio no ano de 1905, com o físico francês Paul Langevin (1872-1946). Langevin determinou que os átomos possuíam um momento magnético intrínseco e permanente $\vec{\mu}$, distribuídos no espaço de acordo com a distribuição de Boltzmann⁶. Posteriormente, Langevin demonstrou que a magnetização de um material é dada pela seguinte expressão:

$$\vec{M} = N \cdot \vec{\mu} \cdot L(x),$$

Eq. 2.29

onde

$$x = \frac{\vec{\mu} \cdot \vec{H}}{k_B \cdot T},$$

sendo N o *número de Avogadro*, $\vec{H}$ o campo magnético externo, k_B a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta e $L(x) \equiv \coth(x) - 1/x$, conhecida como Função de Langevin.

Para campos magnéticos fracos ou temperaturas muito altas (dia e paramagnetismo), $x \ll 1$, portanto $L(x) \cong x/3$ e a magnetização terá o seguinte valor:

$$\vec{M} = \frac{N \cdot \mu^2 \vec{H}}{3k_B T},$$

Eq. 2.30

De modo que a susceptibilidade magnética fica sendo inversamente proporcional a temperatura, assim como se espera, graças a Lei de Curie.

Vejamos agora, as características microscópicas, comparadas as macroscópicas, dos três tipos de materiais: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Os materiais diamagnéticos, quando submetidos a um campo magnético externo $\vec{H}$, se alinham com sentido contrário ao campo externo, de forma que seu momento dipolar magnético se cancela (HALLIDAY et al, 2016, pág. 351). Para

⁶ Essa distribuição foi proposta pelo físico austríaco Ludwig Edward Boltzmann (1844 - 1906), em 1868, ao generalizar a forma das distribuições das velocidades das moléculas constituintes de um gás.

explicar essa propriedade, Langevin considerou a *frequência de Larmor*⁷ dos elétrons entorno do campo magnético externo. Sua finalidade era encontrar o acréscimo ao momento magnético de uma molécula provocado por um elétron circulante na mesma. De acordo com BASSALO (1993, pág. 84),

“Mais uma vez, esse resultado obtido por Langevin concordava com a observação experimental de que a susceptibilidade magnética não dependia da temperatura, desde que o tamanho das órbitas eletrônicas não mudasse significativamente.”.

Em resumo, Langevin obteve por resultado: em materiais diamagnéticos, após serem submetidos por um campo magnético externo, as correntes eletrônicas (corrente provocada pelo movimento orbital dos elétrons no interior do átomo) de cada átomo se modificam de tal maneira que tendem a cancelar/enfraquecer o efeito do campo externo.

O movimento orbital de cada elétron entorno do núcleo atômico pode ser descrito em termos de um momento magnético. O paramagnetismo resulta da tendência dos seus momentos moleculares se alinharem com o campo externo. Tal momento, é resultado da soma vetorial dos momentos orbitais e de spin provenientes dos diversos elétrons da molécula. Entretanto, o alinhamento tendencioso possui algumas complicações. Uma dessas é provocada pela energia térmica no interior da molécula, que interage com a energia magnética fazendo com que, após todo o processo de agitação e colisões termodinâmica⁸, as direções dos momentos magnéticos fiquem aleatórias. O tratamento matemático para a magnetização dos materiais paramagnéticos é o mesmo descrito pela equação 2.30 e, vale acrescentar que a susceptibilidade magnética tende a valores positivos de modo $\chi_m > 0$, enquanto os materiais diamagnéticos tendem a um valor negativo, $\chi_m < 0$.

A outra classe de materiais, já citada anteriormente, são os materiais ferromagnéticos. Em comparação com a distribuição dos momentos moleculares paramagnéticos, os materiais ferromagnéticos estão quase alinhados, mesmo se o campo externo $\vec{H}$ for nulo. Esse alinhamento se deve a um campo molecular $\vec{H}_m$

⁷ $(e/2m_e) \cdot B_m$, sendo B_m o módulo do campo magnético microscópico para um só átomo.

⁸ O termo “colisões termodinâmicas”, foi aqui usado, em menção a teoria cinética dos gases, que tem por objeto de estudo os processos térmicos de uma substância em razão da dinâmica dos seus constituintes/átomos.

produzido, nessas condições ($\vec{H} = 0$), por termos da magnetização. O campo molecular $\vec{H}_m$, para a mesma condição, é equacionado da seguinte maneira:

$$\vec{H}_m = \gamma \vec{M},$$

Eq. 2.31

sendo $\gamma = \frac{1}{3}$; o que mostra a relação com a magnetização.

Os estudos das relações do ferromagnetismo foram explicadas pelo físico francês Pierre Ernst Weiss (1865-1940), no ano de 1907. Weiss, com base nos estudos de Langevin, considerou que *uma “substância ferromagnética era constituída de pequenos dipolos magnéticos, submetidos a um intenso campo magnético interno - o campo molecular $\vec{H}_m = q \vec{M}$ ”* (BASSALO, 1993, pág. 84). O argumento da função de Langevin se torna, portanto:

$$x = \mu \cdot \frac{(\vec{H} + q \cdot \vec{M})}{k_B T}$$

Eq. 2.32

e a susceptibilidade:

$$\chi = \frac{N \cdot \mu^2}{[3k_B \cdot (T - T_c)]}$$

Eq. 2.33

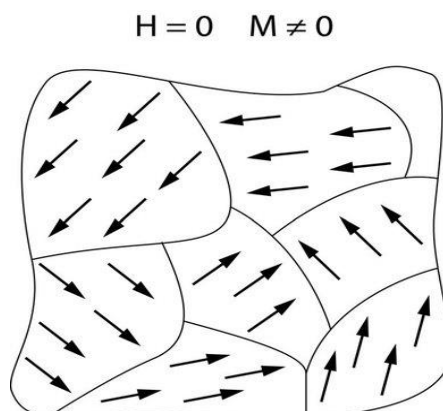
onde,

$$T_c = \frac{N q \mu^2}{3k_B}.$$

Weiss obteve um sucesso grande na sua formulação, pois ela se encaixava perfeitamente nos limites paramagnéticos-ferromagnéticos estabelecidos pelo *Lei de Curie*.

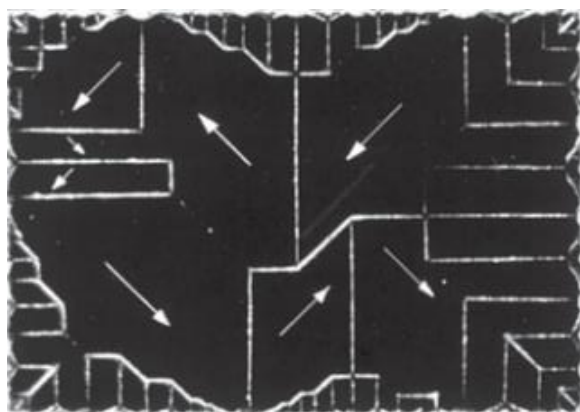
Com análises experimentais, Weiss, ainda nesse trabalho, deduziu que em uma substância ferromagnética há regiões maiores que átomos e moléculas, em que todos os átomos ali presentes estão alinhados pela magnetização interna, na mesma direção. Essas regiões são chamadas de *domínios magnéticos*. Esses domínios podem se orientar de forma aleatória, enquanto o material não está sobre um campo magnético externo $\vec{H}$ ou quando ainda não atingiu a saturação, de forma que apresentam um aspecto desmagnetizado (veja a Figura 2.12 e Figura 2.13).

Figura 2.12 – Domínios magnéticos de uma amostra ferromagnética.



Fonte: ASHIMA, Arora. Optical and electric field control of magnetism. Tese de Doutorado. Repositório Institucional da Universidade de Potsdam. Alemanha, 2018.

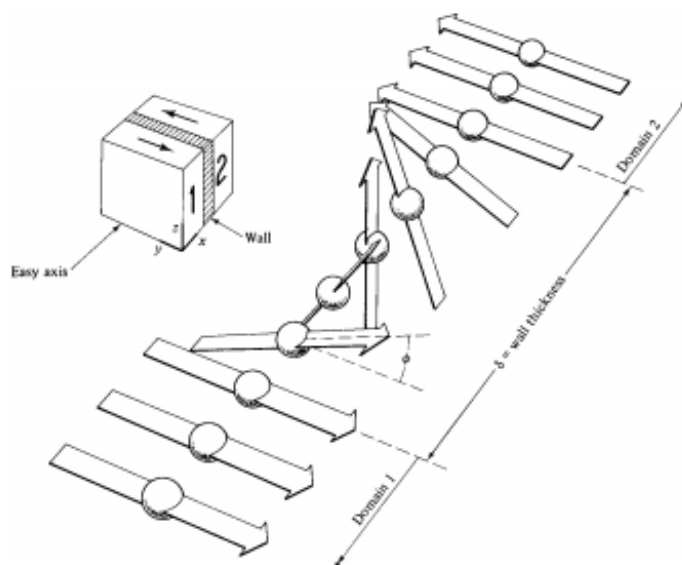
Figura 2.13 – Micrografia da distribuição de domínios magnéticos em um monocristal de níquel; as linhas brancas mostram as paredes dos domínios.



Fonte: HALLIDAY, David et al. Fundamentos de física: Eletromagnetismo; tradução: DE BIASI, Ronaldo Sérgio. 10. ed. v.3, 2016, pág. 751.

As paredes dos domínios, ou seja, as regiões de fronteira entre os domínios, são chamadas de *paredes de Bloch* ou *paredes de Néel*. Nessas regiões os momentos magnéticos periféricos ao domínio (momentos magnéticos próximos as paredes) vão mudando sua orientação gradualmente como, por exemplo, na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Esquema representativo das paredes de Néel ou paredes de Bloch com inversão de 180° da orientação de momentos de spin entre os domínios vizinhos.



Fonte: JÚNIOR, Ailton Antônio de Sousa. Avaliação dos efeitos das Hipertermias Magnética e Fototérmica na Síntese de Heteroestruturas à base de Nanopartículas de MnFe_2O_4 e Au. Tese de Mestrado, UFG, 2015.

Levando em consideração a quantidade de domínios presente no material, os domínios se classificam de duas formas; monodomínios e multidomínios magnéticos. Os materiais que apresentam mais de um domínio magnético, são chamados de multidomínios. Quando se reduz as dimensões de um material multidomínio, até um determinado ponto crítico, eles passam a apresentar apenas um “grande” domínio. Assim, esse tipo de material, é representado por um *monodomínio magnético*. Em tal ponto crítico, esses materiais apresentam comportamentos que os nomeiam em *superparamagnéticos*. Discutiremos tais comportamentos no capítulo seguinte.

2.6 Regime Superparamagnético

Para melhor entendermos o regime superparamagnético é necessário antes, ampliarmos os estudos sobre os domínios magnéticos e o fenômeno físico chamado de anisotropia magnética.

Uma quebra de simetria (singularidade) translacional, ou seja, uma alteração gradativa na direção dos momentos magnéticos internos, ocasiona na formação das paredes de domínios. Um dos motivos da assimetria que forma as paredes é de origem geométrica ou dimensional (como vimos no Capítulo 1), entretanto, de acordo

com FRANCISQUINI et al (2016, pág. 276), “*A singularidade mais importante em um material FM é o aparecimento de paredes de domínio custando energia para sua formação.*” (FM – ferromagnético).

Os domínios magnéticos que custam energia para sua formação são definidos por meio do balanço energético entre a energia de desmagnetização e a energia de formação de domínios. Assim, os *materiais macroscópicos*, tendem a se quebrar em vários domínios como tentativa de minimizar a energia total do sistema, ou seja, para não gastar muita energia no processo de desmagnetização, há formação de domínios. Já *estruturas reduzidas, amostras nanoscópicas*, não são favoráveis do ponto de vista energético e tendem a formar monodomínios. Essa tendência dos materiais de tamanho reduzido, se deve a dependência do tamanho dos domínios em relação à quantidade de paredes em todo o material. Em 1949, Louis Néel, propôs que amostras de materiais ferromagnéticas reduzidas possuem um diâmetro crítico d_c em que o material muda de um comportamento ferromagnético para um comportamento similar ao de materiais paramagnéticos, com diferenças na intensidade do campo. Esse novo comportamento ficou conhecido como *superparamagnético*.

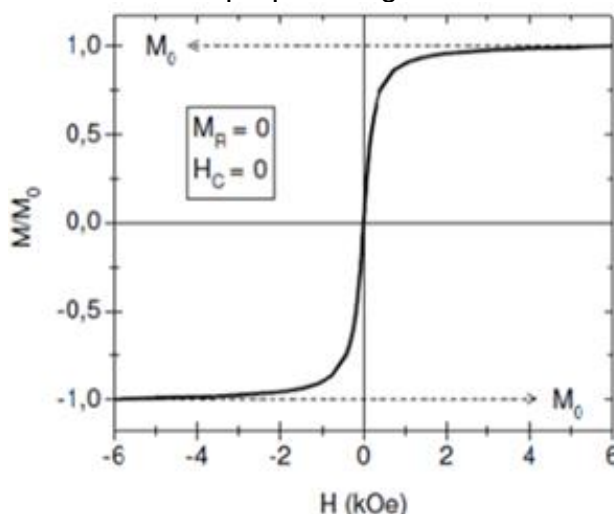
Flutuações térmicas podem interferir nas energias do sistema de certa forma que ao rotacionar os momentos magnéticos de uma direção tendenciosa à outra, a desmagnetização se torna mais lucrativa do que a formação de domínios. A dita desmagnetização depende diretamente do fenômeno físico, ao qual todas as partículas reduzidas estão subordinadas, chamado de anisotropia. Segundo DE SOUSA JÚNIOR (2015, pág. 16), “*Fala-se em anisotropia magnética quando a magnetização espontânea do material tende a se alinhar ao longo de uma direção preferencial, mais favorável de um ponto de vista energético, denominada eixo fácil de magnetização.*”.

A anisotropia, como podemos ver, é uma grandeza que varia com a temperatura. Além disso, ela possui várias origens, tais como: a estrutura cristalina do material (anisotropia magnetocristalina); o formato da amostra (anisotropia de forma); tensões mecânicas externas aplicadas à amostra (anisotropia induzida ou magnetoelástica). (DE SOUSA JÚNIOR, 2015, pág. 15). De acordo com esse fenômeno podemos classificar os materiais em duros e macios, o que liga a relação de uma alta ou baixa coercividade.

Um modelo para tratamento da magnetização a partir dos conceitos ditos anteriormente é chamado de modelo de Stoner-Wohlfarth. Através desse modelo podemos entender cada efeito da magnetização, dos domínios e regiões periféricas a esses, nos materiais macroscópicos e reduzidos, com simples extrapolações das equações nele presentes. Como não é o foco desse trabalho, iremos direto ao ponto, do qual podemos entender o que é comportamento superparamagnético e suas implicações na curva de magnetização.

Uma partícula está no regime superparamagnético, segundo DA SILVA (2015, pág. 31), “Quando o tempo de mudança de orientação é menor que o tempo necessário para medir essa orientação [...]”. Nesse regime o material não apresenta magnetização remanente e nem coercividade. Portanto, a curva das medidas de magnetização $\vec{M}$ em função do campo magnético externo $\vec{H}$ é representada pela Figura 2.15:

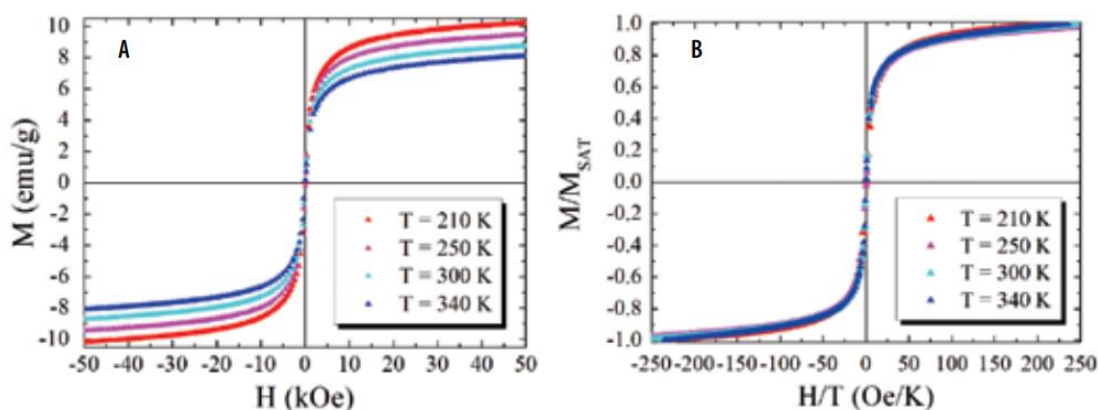
Figura 2.15 - Curva de magnetização para uma partícula em regime superparamagnético.



Fonte: DE SOUSA JÚNIOR, Ailton Antônio. Avaliação dos efeitos das Hipertermias Magnética e Fototérmica na Síntese de Heteroestruturas à base de Nanopartículas de MnFe₂O₄ e Au - Tese de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Goiás, 2015

Em processos mais avançados para a averiguação de amostras de materiais superparamagnéticos em laboratório, deve-se medir a magnetização em função do campo magnético em várias temperaturas para observar o comportamento de M/M_{SAT} versus H/T . Se todas as curvas colapsarem em uma mesma curva que segue o modelo da curva da função de Langevin, o sistema de materiais em análise está no estado superparamagnético (Veja Figura 2.16).

Figura 2.16 - (A) Medidas de magnetização em função do campo magnético em várias temperaturas acima de T_B . (B) Colapso das curvas normalizadas, M/M_{SAT} vs. H/T , em uma única curva universal indicando um comportamento superparamagnético.



Fonte: FRANCISQUINI et al. Química Supramolecular E Nanotecnologia; Cáp.14: Nanopartículas Magnéticas e suas Aplicações. EDITORA ATHENEU, 2014.

Para comparação, o valor teórico da magnetização de tais materiais é determinado pela seguinte equação:

$$\vec{M}(\vec{H}/T) = \vec{M}_{SAT} \cdot L \left(\frac{\vec{\mu} \cdot \vec{H}}{K_B \cdot T} \right), \quad Eq. (3.1)$$

sendo M_{SAT} a magnetização de saturação, μ o momento magnético por partícula e L é a função de Langevin dada por $L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x}$.

CÁPITULO 3

3. NANOTECNOLOGIA

3.1 Introdução: Um Pouco de História

Desde muito tempo, a ciência se preocupa com a constituição da matéria. Demócrito, em 400 a.C., iniciou o que hoje chamamos de teoria atomística, teoria essa cujo alvo de estudo, o átomo, se enquadra nas dimensões nanométricas. Cientistas como Ernest Rutherford, Niels Bohr, James Clerk Maxwell, contribuíram significativamente para estudos dos materiais, considerando a teoria atomística. Os fundamentos deixados por estes, fizeram com que recentemente a nanotecnologia fosse desenvolvida de forma a inovar técnicas e procedimentos utilizados nas diversas áreas do conhecimento.

Outras pessoas também manipulavam a matéria em escala nanométrica sem saber seus incríveis efeitos. Segundo SIMÕES E TAKEDA (2015, pág. 6), *“Um exemplo são os vidraceiros medievais que, com misturas de nanopartículas de ouro de diversos tamanhos, produziam tintas de cores diferentes para a fabricação de vitrais.”* Um dos primeiros nomes a mencionar os efeitos da nanotecnologia, mesmo sem nomeá-la, foi Richard Feynman. Feynman enquanto professor do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), ministrou uma série de palestras cujo principal objetivo era manter o interesse dos calouros e secundaristas que chegavam ao curso de física. Nessas palestras havia *“uma porção de coisas sobre o quão interessante e excitante é a física, a teoria da relatividade, a mecânica quântica, entre tantas outras ideias modernas.”* (FEYNMAN, 1963). Em uma de suas ilustres palestras, segundo SIMÕES E TAKEDA (2015, pág. 9), intitulada de *“There’s plenty of room at the bottom: an invitation to enter a new field of physics”*, ou seja, *“Há muito espaço no fundo: um convite para entrar em um novo campo da física”*, Feynman desbravou interessantes analogias com intuito de carregar a mensagem sobre a possibilidade de manipulação direta de átomos individuais, como uma forma poderosa que carregaria um número muito grande de informações em um espaço muito pequeno.

Uma dessas analogias que marcam a palestra foi a afirmação de que *“toda a área da cabeça de um alfinete (1/16 de polegada), se ampliada em 25.000 vezes, teria proporcionalmente uma área capaz de abrigar todas as páginas da Enciclopédia Britânica.”* (SIMÕES e TAKEDA, 2015). Mesmo com a grande repercussão das

analogias de Feynman, o termo nanotecnologia só foi criado de vez, em 1974, por Norio Taniguchi da Universidade de Tóquio, quando o usou para descrever a habilidade de se criar materiais em escala nanométrica.

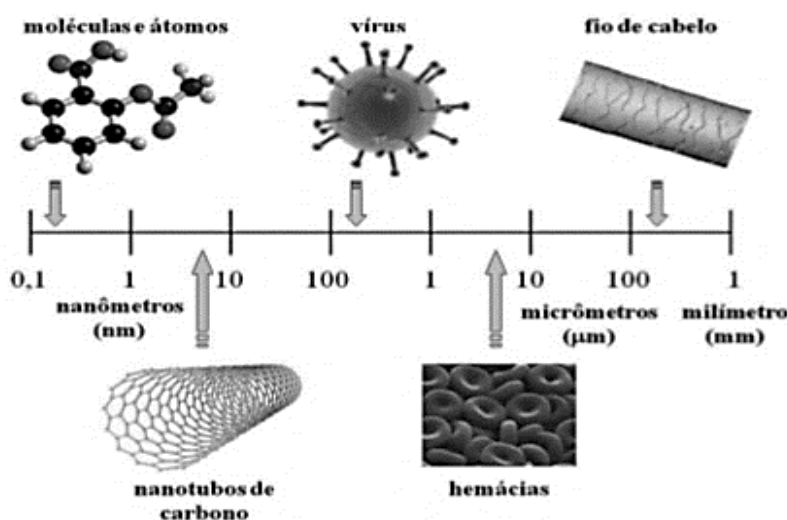
Figura 3.1 - Richard Feynman



Fonte: Site Nobel Prize

Uma comparação que facilita a visualização da escala nanométrica é muito bem representada pela Figura 3.2. Percebe-se pela imagem que a escala nano representa dimensões menores que a espessura de um fio de cabelo, hemácias e vírus.

Figura 3.2 - Escala comparativa de tamanhos de milímetros a nanômetros.



Fonte: Nanoestruturas, volume 1, Cap. 1, pág. 4.

Como forma de organizar e definir as novas descobertas na nanotecnologia, a Iniciativa Nacional De Nanotecnologia nos Estados Unidos (NNI – The National Nanotechnology Initiative) considera nanotecnologia apenas estruturas na escala de 1 a 100 nanômetros (nm). Para estruturas menores que 1 nm, há o *tratamento de átomos, uma vez que esses são pequenas partes das moléculas. O átomo de hidrogênio, por exemplo, possui diâmetro de aproximadamente um quarto de nanômetro ($d = 0,25 \text{ nm}$)*. No limite superior, 100 nm, há estruturas maiores que variam desde microtecnologia até escalas maiores. Portanto, o limite da NNI descreve a nanotecnologia como a engenharia de sistemas em escala molecular. (SIMÕES e TAKEDA, 2015)

No Brasil, o Ministério Da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC (2019, pág. 20) afirma que *“o crescimento do mercado de base nanotecnológica, nos últimos anos, tem sido expressivo com um movimento estimado de US\$ 1 trilhão em 2015, e com estimativas, para 2020, de US\$ 3 trilhões, sendo previsto um ciclo longo e duradouro [...]”*. Além disso, o MCTIC (2019, pág. 39) assume, como desafio, o papel de promover a divulgação das vantagens e benefícios que a nanotecnologia traz a sociedade, disponibilizando recursos e apoio às pesquisas voltadas a esse tema nas universidades.

3.2 Algumas Aplicações da Nanotecnologia

A tecnologia da escala nano não só está presente na construção de materiais com pequenas dimensões, mas também conta com diversas aplicações. Para DE MELO e PIMENTA (2004, pág. 10), *“[...] a grande motivação para o desenvolvimento de objetos e dispositivos nanométricos reside no fato de que novas e incomuns propriedades físicas e químicas [...] são observadas nessa nova escala.”*

A evidente manifestação dos efeitos quânticos e de superfície, podem ser apontados como principais características dos materiais nanométricos. Os efeitos de superfície são provocados devido ao elevado número de átomos presentes na superfície do material nanoscópico, comparados com o mesmo material em escalas macroscópicas. Já os efeitos quânticos influenciam em propriedades de cor e condutibilidade elétrica, por exemplo.

Além da produção de novos dispositivos eletrônicos mais compactos, os efeitos quânticos e superficiais explorados em materiais nanométricos são energeticamente

mais econômicos, visto que, segundo DE MELO e PIMENTA (2004, pág.10) “[...] *uma redução na escala física levará também a uma economia de energia, já que a potência desperdiçada por um dispositivo é proporcional a seu tamanho.*”.

Vejamos agora algumas áreas de aplicações e dispositivos da nanotecnologia:

3.2.1 Nanoeletrônica

Uma das aplicações nanotecnológicas que mais têm sido utilizada ao longo dos anos, é na área da eletrônica. Com a necessidade de armazenar mais informações e com a cobiçada capacidade de desenvolver inúmeras tarefas ao mesmo tempo, a nanoeletrônica vêm aprimorando a indústria de dispositivos eletrônicos. Segundo SIMÕES e TAKEDA (2015, pág. 15), a nanoeletrônica tem sido “[...] *usada para construir memória de computador utilizando moléculas individuais ou nanotubos [...]*”. Esses nanotubos são comumente construídos a partir de carbono, sendo então, nomeados de nanotubos de carbono.

A grande vantagem do uso desses pequenos materiais no ramo da eletrônica vêm permitindo, segundo SIMÕES e TAKEDA (2015, pág. 15), o armazenamento de bits de informações e o desenvolvimento de interruptores moleculares, transistores, monitores de tela plana, circuitos integrados, portas lógicas de acesso rápido, lasers nanoscópicos, e nanotubos como eletrodos em células a combustível.

Tais propriedades de materiais como os nanotubos, são benéficos devido a sua abundância e fácil manipulação estrutural em laboratório, o que faz, com que os dispositivos eletrônicos fiquem cada vez mais econômicos e mais eficientes. As propriedades físicas aproveitadas nesses tipos de materiais são, geralmente, vinculadas a propriedade de condutibilidade, dando ênfase a característica de semicondutibilidade, e a propriedades magnéticas, como, por exemplo, a memória magnética que materiais ferromagnéticos possuem.

3.2.2 Nanopartículas e fluidos magnéticos

As nanopartículas magnéticas são óxidos de ferros de pequenas dimensões que, diluídos em formas de coloides, são utilizados com ênfase nas terapias medicinais. Uma das dispersões coloidais usadas nesses tipos de terapias são os fluidos magnéticos, também chamados de ferrofluidos. Esses, segundo DA SILVA

(2015, pág.7), apresentam uma fase dispersa composta por nanopartículas ferro ou ferrimagnéticas (Fe_3O_4 , MnFe_2O_4 e outros) e uma fase contínua composta por um solvente líquido polar ou apolar.

Dispersões coloidais são misturas heterogêneas, assim, os fluidos magnéticos são misturas que se constituem de fases. Geralmente há duas fases: uma fase contínua, representada por um solvente fluido, e uma fase dispersa, representada por nanopartículas magnéticas, *aproximadamente esféricas* e constituídas, geralmente, de monodomínios magnéticos (DA SILVA, 2015, pág. 7).

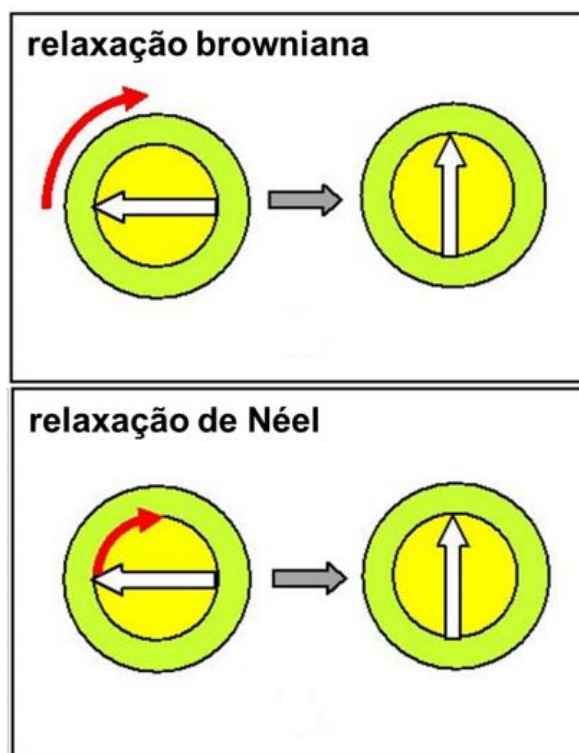
Uma propriedade importante nos fluidos magnéticos é a sua estabilidade, ou seja, na preparação de fluidos, deve-se considerar fatores que podem contribuir para instabilidade do fluido. Podemos dividir tais fatores em intrínsecos e extrínsecos. Os fatores extrínsecos podem ser: o campo gravitacional, atrações e repulsões elétricas e temperatura. Os fatores intrínsecos podem ser mecanismos como, por exemplo, as interações via potencial de *van der Waals*, dipolar magnética e dupla camada elétrica entre partículas.

Como já demonstrado, a dependência do parâmetro temperatura influencia nas divisões/formações de domínios e, por consequência, na magnetização da amostra, assim a temperatura se torna um parâmetro relevante para a análise da estabilidade. Já o parâmetro que se relaciona ao campo gravitacional tem por motivos a sedimentação (precipitação), que ocorre, caso as nanopartículas tenham uma massa elevada. As interações atrativas e repulsivas devem ser balanceadas de tal forma, que evite a formação de aglomerados, que por sua vez, também contribuem para não estabilidade do fluido. As interações a níveis moleculares se fazem das propriedades intrínsecas dos fluidos. Por não ser indispensável ao objetivo desse trabalho, não aprofundaremos mais nessas propriedades, entretanto, podem ser facilmente encontradas nos trabalhos das referências.

As nanopartículas magnéticas, quando se encontram dispersas em um fluido magnético, possuem movimentos livres que são associadas a um comportamento chamado de rotação mecânica. As rotações mecânicas são, segundo PARISE (2014, pág. 17), “*o que conduz a um segundo mecanismo de rotação do momento magnético: a rotação browniana.*”. Assim, quando o campo magnético externo é nulo ($\vec{H} = 0$), os momentos magnéticos associados a cada monodomínio, giram livremente, seja pelo

mecanismo de Néel ou de rotação browniana, fazendo com que a magnetização total seja nula (Veja a Figura 3.3).

Figura 3.3 – Modelos de relaxação do momento magnético em um FM: na relaxação browniana a NPM gira em conjunto com o momento magnético do monodomínio. Na relaxação de Néel, o momento magnético gira dentro da estrutura do monodomínio.



Fonte: PARISE, Marcelo de Souza. ELABORAÇÃO DE FLUIDOS MAGNÉTICOS À BASE DE GLICONANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS DE $Mn_1-xCo_xFe_2O_4$ FUNCIONALIZADAS COM ÁCIDOS CARBOXÍLICOS POLIHIDROXILADOS, VISANDO APLICAÇÕES EM NANOBIOTECNOLOGIA. Tese de Mestrado apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília. 2014, Brasília.

Quando o fluido magnético está sujeito a um campo magnético externo, as nanopartículas magnéticas em regime diluído possuem uma distribuição de orientação dos momentos magnéticos resultado das interações de energia magnética das partículas e da sua agitação térmica. As orientações podem se alinhar com a direção do campo externo de forma a produzir uma magnetização com potencialidade de chegar a um valor saturado, ou seja, os momentos magnéticos das nanopartículas magnéticas dispersas em fluidos podem alcançar um valor de saturação em presença do campo magnético externo. O valor da magnetização de saturação para um fluido magnético é

$$M_s = m_s \cdot \phi ,$$

Eq. (3.2)

onde, m_s é a magnetização de saturação da partícula magnética e ϕ corresponde a fração volumétrica de materiais magnéticos dispersos no fluido.

3.2.3 Nanossensores

Um nanossensor é qualquer material utilizado para transmitir informações químicas, físicas ou biológicas sobre nanomateriais e moléculas a partir de eventos de reconhecimento. Para ser considerado nano, uma ou mais de suas propriedades espaciais deve estar entre 10 a 100 nanômetros. Os nanossensores se classificam de acordo com quatro critérios principais: (1) tipo de interação que se estabelece entre o elemento sensor e o analito; (2) método utilizado para detectar tal interação; (3) natureza do elemento de reconhecimento (biológico, inorgânico) e; (4) sistema de transdução (BUENO et al, 2015, pág. 148). Tais critérios se diferenciam, portanto, pelos diferentes alvos de detecção.

Esses dispositivos são aplicados em diversas áreas como, por exemplo, no diagnóstico médico (marcadores de doenças, anticorpos, DNA, hormônios e antibióticos; no monitoramento de gases em geral; no monitoramento ambiental (poluentes atmosféricos); no agronegócio (pesticidas, feromônios, íons de metais pesados); no controle de qualidade de alimentos (detecção de micro-organismos, qualidade de água, maturação de frutas); na segurança (drogas e explosivos) e etc. (BUENO et al, 2015, pág. 149)

3.2.4 Nanocompostos poliméricos

Nanocompostos poliméricos são materiais cuja parte predominante é feita de algum polímero e sua fase dispersa inorgânica possui pelo menos uma de suas dimensões em escala nanométrica. Assim como todos os estudos sobre os compostos da nanoescala, os nanocompostos poliméricos têm por finalidade propor uma mudança de propriedades ao se unir. Uma das vantagens de tais novas propriedades é a maior rigidez/dureza que os nanocompostos podem apresentar em relação a polímeros comuns. Os materiais mais utilizados na fabricação desses compostos

nanométricos são “os silicatos lamelares, nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono, sílica, carbonato de cálcio, óxido de zinco etc.”. (PASSADOR, et al, 2015)

3.3 Aplicações da nanotecnologia no agronegócio

O agronegócio, por ser grande parte da economia brasileira, exige inovações tecnológicas dia após dia. Segundo MATTOSO (2015, pág. 41, apud, ALVES, 2001, BANCO DO BRASIL, 2004), “é essencial o investimento contínuo em novas tecnologias, para o País poder continuar crescendo e abrir novos mercados nesse setor tão dinâmico da economia.”. Assim a nanotecnologia vem sendo utilizada em processos agrários com finalidades de trazer uma significativa melhora no desempenho, na eficiência e na economia de insumos (fertilizantes, pesticidas etc.). Algumas ações da agroindústria que utilizam a nanotecnologia, com tais finalidades, são: a entrega controlada de fertilizantes e pesticidas, o uso de fármacos que contêm carreadores nanoestruturados no ramo veterinário, o desenvolvimento de insumos com maior eficiência (visando um desenvolvimento agrário mais ecológico), o desenvolvimento de membranas de separação e/ou barreira para vários processos agroindustriais, embalagens ativas e inteligentes para alimentos e bebidas e a purificação de água. (MATTOSO, 2015, pág. 41)

Além dessas aplicações, outras três áreas interligadas, onde a nanotecnologia pode, também, revolucionar o agronegócio, segundo MATTOSO (2015, pág. 43), são a rastreabilidade e certificação de produtos agropecuários para a segurança alimentar, através do desenvolvimento de nanossistemas inteligentes de monitoramento; a tomada de decisão; e os nanobiosensores e nanodispositivos eletrônicos. Assim, a nanotecnologia, já vem sendo aplicada em diversos processos do agronegócio e ainda dispõe de possíveis equipamentos nanotecnológicos em fase de desenvolvimento.

CAPÍTULO 4

4. NANOMEDICINA E SUAS APLICAÇÕES

4.1 Nanomedicina: escala e funcionalidades.

No ramo médico, a escala nano é utilizada através das propriedades específicas de materiais nanoestruturados como tecnologia em diagnóstico e tratamentos de doenças. A oncologia, por exemplo, é a área médica que utiliza sistemas, compostos por diferentes carreadores⁹, que se dedicam à entrega controlada de medicamentos, imageamento, terapia fotodinâmica, terapia fototérmica (CANCINO, et al, 2015), entre outros.

A entrega controlada de medicamentos, uma das primeiras áreas a se desenvolver na nanomedicina, surge com a utilização das propriedades físico-químicas de nanomateriais para guiar fármacos até pontos específicos do organismo. As vantagens do uso desse método de tratamento podem ser bem representadas em dois seguimentos: a biocompatibilidade desses compostos e o seu tamanho reduzido. Além da entrega temporalizada, ou seja, compostos que liberam substâncias em determinado momento de sua interação com o organismo, os desafios dessa linha de pesquisa são a produção de nanomateriais teranósticos. Esses tipos de nanomateriais comutam entre si a capacidade de tratamento e diagnóstico (CANCINO et al, 2015).

O encapsulamento de compostos é uma das soluções propostas para garantir a boa funcionalidade da entrega controlada. Com a mesma preocupação, alguns anticorpos, proteínas e outros compostos, como, transferases, lectinas ou avidinas, são adicionados aos nanomateriais trazendo singularidades a esses. Tais singularidades têm intuito de familiarizar os nanocompostos dos carreadores com os macrófagos¹⁰, permitindo assim maior tempo de permanência no organismo em relação a fármacos convencionais (COSTA e SILVA, 2017).

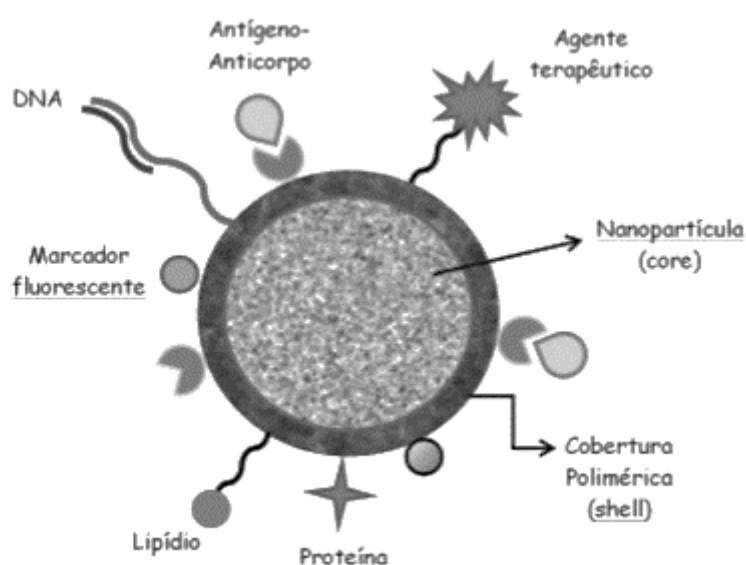
Além do tamanho, outra propriedade das nanopartículas que influencia na sua boa funcionalidade é a geometria. Segundo COSTA e SILVA (2017, pág. 3), “*Estudos*

⁹ Carreadores nanoestruturados são fluidos que carregam nanoestruturas difusas em si como forma de dispersão coloidal.

¹⁰ Macrófagos é o plural de macrófago. Macrófago: Histologia. Diz-se de, ou glóbulo branco que destrói elementos de grande porte (células estranhas, glóbulos vermelhos enfraquecidos). <https://www.dicio.com.br/macrofagos/>

recentes também revelam que o acúmulo de partículas discoidais em tumores de mama é cinco vezes maior que partículas esféricas apesar de terem diâmetros similares.”. A área da nanotecnologia que inova e comanda a produção dessas nanopartículas, com as devidas correlações específicas aplicadas a cada caso, é a nanofarmacologia. A toxicidade das nanopartículas é reduzida, dia após dia, devido a dedicação e comprometimento de pesquisadores do ramo das nanoestruturas.

Figura 4.1 - Nanopartícula com vários ligantes que permitem uma multifuncionalidade em plataforma única.



Fonte: **GRANDES ÁREAS DA NANOCIÊNCIA**. Cap. 3. Nanomedicina. Pág.97.

O imageamento, no contexto médico, consiste na obtenção de imagens internas do organismo através de diferentes técnicas. Uma dessas é a ressonância magnética nuclear. Essa técnica, segundo DIEGUEZ, Celia M. Tokarski et al (2018, pág. e1310-2) “[...] é utilizada [...] na área médica, sem a necessidade de submeter o paciente a qualquer tipo de radiação ionizante.”. No contexto de nanopartículas, a obtenção de imagens, como as de processos inflamatórios de arteriosclerose múltipla e artrite reumatoide em macrófagos (CANCINO et al, 2015), são desenvolvidas através de técnicas que utilizam estratégias nanotecnológicas denominadas de marcadores. Esses, por sua vez, inseridos na engenharia dos carreadores, utilizam do artifício da bioluminescência como forma de identificar diferentes estágios e tipos de câncer (COSTA e SILVA, 2017).

Com intensão de desenvolver uma forma menos agressiva de tratamento a doenças como o câncer, a Terapia Fotodinâmica (PDT, do inglês Photodynamic Therapy) se tornou uma excelente alternativa. Métodos como cirurgia, radioterapia e quimioterapia, comumente aplicados em tratamento a neoplasias, causam ao paciente uma série de desconfortos, como, a desfiguração (cirurgia), queda de cabelo, alterações gastrintestinais (náuseas, vômitos e diarreia), cansaço exagerado (quimioterapia e radioterapia), etc. (RIBEIRO, 2005) O método da terapia fotodinâmica é de certa forma inovador pela suavidade dos efeitos do tratamento no paciente.

De acordo com RIBEIRO et al (2005, pág. 2) *“A PDT é um novo e promissor tratamento clínico que emprega a combinação de luz, oxigênio e um composto fotossensibilizador (FTS) [...]”*. Em síntese é injetado um composto FTS que interage com a luz direcionada pontualmente na região da neoplasia causando a morte celular. Essa interação ocorre de duas maneiras. Elas se diferenciam na formação do tipo de oxigênio gerado e no tipo de interação do composto com a luz direcionada (transferência de elétrons gerando superóxido ou transferência de energias gerando oxigênio singlete (RIBEIRO, 2015)).

A terapia fototérmica (PTT), segundo COSTA e SILVA (2017, pág.6), *“se baseia em processos físicos de aquecimento, sendo uma fototerapia alternativa que permanece efetiva em condições de hipóxia¹¹, tornando esta alternativa vantajosa no tratamento de tumores avasculares.”*. Nesse tipo de terapia ocorre a exposição de áreas específicas a campos magnéticos alternados, que por sua vez, provoca através de fenômenos físicos específicos o aquecimento da região a uma temperatura entre 43°C e 46°C. O grande desafio desse tipo de tratamento consiste em como evitar um possível dano, graças ao processo de aquecimento, em células vizinhas saudáveis. Segundo BAKUZIS et al (2013, pág.1), *“Como plataforma para aplicações em biologia e medicina, o aquecimento de nanopartículas magnéticas (independentemente do mecanismo) oferece o potencial de atividade terapêutica não invasiva e altamente seletiva.”*

4.2 Dispositivos nanoestruturados no tratamento e diagnósticos de doenças

¹¹ Hipóxia significa baixo teor (concentração) de oxigênio.

Alguns dos materiais nanoestruturados mais utilizados no desenvolvimento de terapias medicinais, de acordo com BRANQUINHO (2014, pág. 1), são: nanotubos de carbono, lipossomos, magnetolipossomos, nanocápsulas, nanoesferas, dendrímeros, fulerenos e nanopartículas. As divisões das nanoestruturas podem ser relacionadas a partir de sua capacidade de diagnóstico e/ou tratamento em nanopartículas de carbono, nanopartículas metálicas, nanopartículas magnéticas, pontos quânticos, entre outros.

Vejamos as principais características das divisões citadas anteriormente.

4.2.1 Nanopartículas de Carbono

As Nanopartículas de Carbono, como o próprio nome sugere, são partículas da escala nanométrica constituídas de carbonos. Esse tipo de material, segundo CANCINO, et al (2014, pág. 522), *“possuem propriedades mecânicas, eletrônicas, óticas e químicas únicas e têm se mostrado interessantes para muitas aplicações.”*. As áreas que se beneficiam com essas “novas” propriedades são os biossensores, engenharia de tecidos, drug-delivery, imageamento molecular, entre outros.

Dois dos tipos de compostos que mais se destacam nessa classe, são os nanotubos de carbono e os grafenos. Os nanotubos de carbono tem sido usados na fabricação de biossensores utilizados na detecção de biomoléculas, medicamentos carreadores de fármacos e, por consequência da utilidade anterior, tem sido empregado com sucesso no tratamento de câncer. Por sua vez, o grafeno também tem demonstrado ser útil na área médica. O óxido de grafeno reduzido, por exemplo, tem se mostrado um excelente agente fototérmico, permitindo a eliminação eficiente de tumores em experimentos *in vivo*¹². Além de também poder ser conjugado com componentes de imageamento e terapêuticos, formando materiais teranósticos. (CANCINO, et al, 2014, pág. 522)

4.2.2 Nanopartículas Metálicas

As nanopartículas metálicas possuem propriedades óticas, eletrônicas e catalíticas diferenciadas. Algumas dessas diferentes propriedades se deve a uma

¹² O termo *“in vivo”* é utilizado para representar experimentos feitos dentro ou no tecido vivo de um organismo.

oscilação conhecida como ressonância plasmônica de superfície (SPR, do inglês Surface Plasmon Resonant). Tal oscilação ressonante é coerente com os elétrons livres na superfície destas nanoestruturas e de sua interação com o campo eletromagnético em frequências específicas. (CANCINO, et al, 2014, pág. 522)

Um dos nanomateriais metálicos mais amplamente estudados, no contexto da nanomedicina, são as nanopartículas de ouro com diâmetro entre 4 e 50 nm. Isso devido à elevada estabilidade e eficiente absorção da luz a base de ouro. Estas nanopartículas têm sido amplamente exploradas em biossensores, diagnóstico de doenças e veículo para entrega de moléculas dentro das células. (CANCINO, et al, 2014, pág. 522)

Um dos procedimentos medicinais que se beneficiam das propriedades nanopartículas de ouro é a fototermia. O aquecimento gerado pela absorção da luz incidente é extremamente proveitoso graças as características metálicas das nanopartículas de ouro. Além disso, a fácil manipulação química da estrutura desses materiais proporciona uma vantagem sobre as faixas de frequência de absorção, podendo assim, selecionar a localização de aquecimento.

4.2.3 Nanopartículas Magnéticas

Como vimos no capítulo 3.2.3, as nanopartículas magnéticas são óxidos de ferros de pequenas dimensões bastante utilizados, em forma diluída, em tratamentos medicinais. Um dos processos que se beneficiam das propriedades desse tipo de dispersão para fins terapêuticos é a hipertermia magnética. Esse processo utiliza de interações entre campos magnéticos externos, propriedades magnéticas das nanopartículas e mecanismos de geração de calor para induzir a morte celular de células neoplásicas. Posteriormente trataremos mais a fundo as propriedades desse processo.

Outras propriedades desses nanocompostos estão ligados também a agentes de contrastes utilizados em ressonância magnéticas. Alguns medicamentos, segundo DA SILVA (2015, pág. 1), já foram aprovados há algum tempo para uso clínico, como por exemplo, o Doxil - lipossomo contendo doxorubicina - aprovado pelo FDA (Food and Drug Administration - USA) em 1995.

4.2.4 Pontos Quântico

Os pequenos semicondutores que utilizam de suas propriedades ópticas como vantagens em sistemas de entrega controlada e imageamento são chamados de pontos quânticos. Também chamados de *quantum dots* (Qdots), os pontos quânticos são semicondutores luminescentes. Sua vantagem está no fácil controle da luz emitida, entretanto, a desvantagem é que, sem recobrimento, essas partículas podem ser tóxicas, *“uma vez que liberam substâncias químicas tóxicas como o cádmio e selênio, além da geração de espécies de oxigênio reativas em excesso.”* (CANCINO, et al, 2014, pág. 523).

Um exemplo da vantagem óptica dos pontos quânticos é o conhecimento sobre as cores da luminescência emitida por eles. A cor da luminescência emitida dos pontos quânticos depende em geral do tamanho de suas partículas. Quanto menor o ponto quântico, mais sua emissão de fluorescência tende ao azul, verde ou amarelo, enquanto os pontos quânticos com maior tamanho emitem no laranja, vermelho ou cinza. (CAMARGO, 2015,pág. 115)

4.3 Nanotoxicidade

Um dos pontos que mais preocupa os cientistas é o potencial efeito das partículas nanométricas sobre exposição prolongada. A pouca informação desses efeitos faz com que a nanomedicina passe por vários processos burocráticos, porém necessários. De acordo com CANCINO et al (2015, pág. 523), *“uma das principais preocupações diz respeito a como as nanopartículas conseguem penetrar em membranas celulares mais facilmente, quando comparado a diversas outras moléculas ou fármacos.”* Essa capacidade de fácil penetração é preocupante devido a possíveis acúmulos indesejados em partes do organismo. As dúvidas em relação a essa propriedade são se essas características se tornam vantajosas ou prejudiciais a curto, médio e longo prazo.

Alguns métodos analíticos e biológicos estão sendo adotados para estudar a toxicidade entre os nanomateriais e sistemas biológicos. Segundo CANCINO et al (2014, pág. 523), dentre os processos mais utilizados para tal estudo, estão a citometria de fluxo, proliferação celular, fragmentação do DNA, ciclo celular, histologia, biodisponibilidade e biodispersão. Os tipos de análises mais utilizadas são os ensaios

*in vitro*¹³ e *in vivo*, entretanto as informações obtidas por esses processos ainda são pouco precisas. Para contornar esse problema, têm crescido o uso de simulações computacionais ou instrumentações no nível atômico e/ ou molecular.

Algumas desvantagens toxicológicas já foram observadas em diferentes classes de nanoestruturas. Um exemplo, é a injeção intravenosa de nanopartículas de ouro revestidas com polietilenoglicol, com tamanho médio de 13 nm, onde em algumas pesquisas de ensaios *in vivo*, houve uma inflamação aguda e apoptose do fígado, além do grande acúmulo no mesmo órgão e no baço. O que garante a necessidade de investimento em pesquisas, para que assim, possamos contornar os malefícios e usufruir das vantagens medicinais desses materiais.

Com intuito de padronizar os cuidados a serem tomados nas experimentações sobre a nanotoxicidade, a organização internacional de padronizações, ISO (do inglês International Organization for Standardization) criou algumas certificações e guias como ISO/TS 12901:2012 para o gerenciamento de riscos aplicados ao desenvolvimento de nanomateriais; ISO/TR 11360:2010 onde se encontra metodologias de classificação e categorização de nanomateriais, ISO/ TS 16195:2013, a mais atual, que orienta para o desenvolvimento de ensaios de materiais em forma de pó seco que consistem de nano-objetos. (CANCINO et al, 2014, pág. 524)

4.4 A física da nanomedicina: Magnetohipertermia

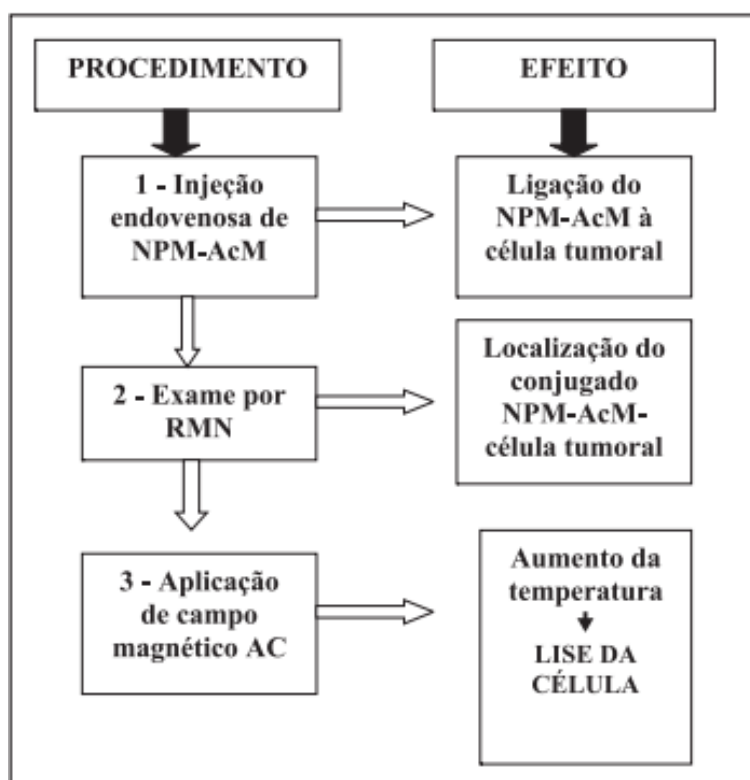
A física se mistura em tratamentos da medicina não só pela engenharia dos nanomateriais utilizados. Um dos processos que vai além da produção desses materiais é o método da hipertermia magnética. Esse processo ocorre quando há transferência energética entre a oscilação de um campo magnético externo $\vec{H}$ e fármacos direcionados por processos de entrega pontual de medicamento em tumores. A eficiência desse procedimento está ligada às interações entre o momento magnético das nanopartículas presentes de forma a aquecer localmente os tecidos penetrados. A grande preocupação em tal procedimento é garantir que apenas as células tumorais sejam levadas a apoptose.

¹³ O termo "*in vitro*" é utilizado para representar experimentos biológicos feitos fora dos sistemas vivos.

Um dos processos de terapia térmica que segundo BRANQUINHO (2014, pág.6) surgiu para garantir a eficiência do aquecimento localizado, ou seja, garantir que o aquecimento gerado pela hipertermia cause danos somente no tumor, é a magnetohipertermia. A magnetohipertermia já vem sendo usada como tratamento para variados tipos de cânceres, “[...] sobretudo para melhorar a eficácia dos fármacos antineoplásicos, sem aumentar o seu potencial citotóxico, sendo também favorável a aumentar a resposta clínica na radioterapia, imunoterapias e terapia gênica.” (MORAIS et al, 2004).

O procedimento da magnetohipertermia é muito bem representado pela Figura 4.2. Vejamos:

Figura 4.2 - Esquema da magnetohipertermia mostrando a sequência de procedimentos e suas consequências. No procedimento 2, uso de nanopartículas magnéticas para diagnóstico. No procedimento 3, uso de nanopartículas magnéticas para terapia. NPM-AcM, conjugado nanopartícula magnética-anticorpo monoclonal; RMN, ressonância magnética nuclear; AC, campo magnético de frequência alternada.



Fonte: MORAIS, Zulmira Guerreira Marques Lacava e DE MORAIS, Paulo César. Aplicações biomédicas de nanopartículas magnéticas. 2004. Parcerias estratégicas. n. 18.

No primeiro procedimento, acontece a injeção do fármaco que contém as nanopartículas magnéticas (NPM) biocompatíveis, associadas a anticorpos monoclonais (AcM) específicos para proteínas da membrana de células tumorais. A injeção de tais medicamentos pode ocorrer de duas formas; diretamente sobre o tumor ou injetado na corrente sanguínea e guiados por propriedades magnéticas até células com afinidade química entre a cobertura das nanopartículas.

O segundo procedimento da Figura 4.2, consiste na localização das nanopartículas e, por consequência, das células tumorais. Esse procedimento “potencializa o contraste de imagens de ressonância magnética, possibilitando que metástases sejam localizadas de forma mais eficiente e precoce” (MORAIS et al, 2004, pág. 76).

Para o processo de aquecimento das nanopartículas presentes nos fármacos direcionados às células tumorais, procedimento 3 da Figura 4.2, deve-se utilizar partículas que respondem fortemente à campos magnéticos externos. As mais comuns nanopartículas utilizadas para cumprir com tal exigência, são os magnetolipossomos e fluidos magnéticos (apresentando recobrimentos diversos) (MORAIS et al, 2014, pág. 77). A escolha das nanopartículas é desse modo selecionada, devido aos parâmetros do mecanismo de geração de calor, em especial, a capacidade de realizar trabalho.

Por sua vez, o aquecimento gerado, se deve pela dissipação da energia adquirida pelo trabalho. Trabalho esse, realizado nas rotações dos momentos magnéticos internos às partículas, devido à oscilação do campo magnético externo. Vejamos esse processo relacionando com sua devida contextualização física:

Considerando uma variação harmônica do campo magnético externo $\vec{H}$ no tempo, em um período T e partículas grandes o suficientes para aplicarmos as leis da termodinâmica, o sistema de aquecimento obedece a primeira lei da termodinâmica, de modo que a variação da energia interna seja nula ($dU = 0$);

$$dU = dQ - dW ,$$

Eq. (4.1)

portanto

$$dQ = dW .$$

Eq. (4.2)

Se integrarmos a Eq. (4.2) em um ciclo obtemos:

$$\oint_{Ciclo} dQ = \oint_{Ciclo} dW .$$

Eq. (4.3)

Podemos obter o trabalho realizado sobre um material magnético quando colocado em presença de um campo eletromagnético oscilando no tempo através do teorema de Poynting. Assim, o calor dissipado pelo material magnético (com condutibilidade sigma) é dado por

$$\oint_{Ciclo} dQ = \int_V \left(\int_{t_0}^t \vec{E} \cdot \vec{J} dt - \oint_{Ciclo} \vec{P} \cdot d\vec{E} - \oint_{Ciclo} \mu_0 \vec{M} \cdot d\vec{H} \right) dV ,$$

Eq. (4.3)

onde a primeira integral representa a dissipação por correntes parasitas, que surgem por corrente elétrica induzida pelo campo elétrico, e a segunda, a perda dielétrica que ocorre devido a polarização do meio sob ação de campo elétrico. A terceira integral representa a área sobre a curva de histerese, uma curva de $M \times H$, o que representa a dissipação de calor por histerese. (DA SILVA, 2015, pág. 46)

Por questões de má condutibilidade das nanopartículas magnéticas, podemos ignorar as perdas por correntes parasitas e dielétricas. Assim, a perda que prevalece se deve a histerese, ou seja, a perda representada pela terceira integral da Eq. (4.3). Então, considerando que a magnetização $\vec{M}$ da partícula seja uniforme em todo o volume e que $\vec{H}$ e V variem independentemente, podemos calcular as integrais independentemente uma das outras (DA SILVA, 2015, pág. 46):

$$\begin{aligned} \oint_{Ciclo} dQ &= \int_V dV \cdot - \oint_{Ciclo} \mu_0 \vec{M} \cdot d\vec{H} \\ - \oint_{Ciclo} dQ &= V_p \cdot \oint_{Ciclo} \mu_0 \vec{M} \cdot d\vec{H} \\ \therefore -\frac{1}{V_p} \oint_{Ciclo} dQ &= \oint_{Ciclo} \mu_0 \vec{M} \cdot d\vec{H} . \end{aligned}$$

Eq. (4.4)

Por fim, a integral que está ao lado direito da igualdade (Eq. (4.4)) representa a “energia dissipada em forma de calor por unidade de volume quando o material está sob ação de um campo magnético harmônico no tempo.” (DA SILVA, 2015, pág. 47).

Sabendo disso, para o desenvolvimento de estudos físicos na área da nanomedicina, alguns desafios enfrentados são: a procura de materiais com maior eficiência em dissipar calor, tendo em vista a curva de magnetização $M \times H$ desses, as técnicas de obtenção/estudo de tais curvas, a eficiência magnetotérmica das nanopartículas carreadoras, a engenharia das nanopartículas utilizadas, maquinários de geração de campos harmônicos, entre outras. Assim, a física tem se misturado com a área médica com finalidade tecnológica e compromisso com a vida, tendo em vista, que futuros avanços possam proporcionar a população um benefício de tratamento e diagnóstico de uma das doenças que mais a assombra.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de curso, exploramos uma breve noção histórica e conceitual sobre o desenvolvimento da nanotecnologia, nanomedicina e do magnetismo. Para isso, relacionamos e discutimos os marcos científicos de maior destaque, de modo que, pudéssemos obter um breve conhecimento sobre os avanços de densas áreas do meio científico. Inicialmente, trabalhamos a cronologia do magnetismo de modo que expuséssemos as principais relações e conceitos básicos, utilizados na interdisciplinaridade dos próximos capítulos.

Posteriormente, iniciamos o estudo da nanotecnologia destacando a figura carismática e característica dessa área, o físico Richard Feynman. Além do desenvolvimento histórico, abordamos boas perspectivas e analogias para que pudéssemos melhor entender a escala dessa nova tecnologia. Também foi relacionado dados sobre a formalização burocrática de organizações que surgiram com fins de direcionar o desenvolvimento dessa promissora área. E, por fim, desenvolvemos uma análise sobre diversas áreas que já utilizam as intrigantes e cobiçadas propriedades dos materiais nanotecnológicos.

Já na parte da nanomedicina, a preocupação inicial foi voltada para os destaques de diferentes áreas que a utilizam de modo a inovar procedimentos clínicos. O encapsulamento de nanopartículas surge com destaque em meio a entrega controlada de medicamento e, ganha aqui, essa ênfase, por proporcionar um benefício sobre o qual a comunidade científica possui atualmente como desafio, o controle toxicológico das partículas metálicas ao interagir com o organismo. Mais adiante, os procedimentos de imageamento, terapia fotodinâmica e fototérmica, são brevemente e satisfatoriamente, discutidos e analisados.

Por sua vez, não poderíamos de deixar de comentar os benefícios e propriedades dos diferentes dispositivos nanoestruturados: as nanopartículas magnéticas e os fluidos magnéticos, as nanopartículas metálicas, as nanopartículas de carbono e os pontos quânticos. Logo após, destacamos as preocupações e intervenções que as organizações governamentais de controle nanotecnológico têm

tido com a nanotoxicidade, tanto para fase de pesquisa, quanto para a fabricação e distribuição dos fármacos nanotecnológicos.

Por fim, a interdisciplinaridade entre a física e a área médica, não ficou apenas na engenharia de materiais. A magnetohipertermia surge como exemplo onde as grandezas magnéticas podem contribuir socialmente para necessidades como a saúde. Ressaltando seus processos, pudemos observar um possível procedimento para a indução da morte celular neoplásica, discutindo sobre propriedades físicas como o calor e trabalho. E chegamos à conclusão que para que tratamentos como esse estejam ativos e contribuindo para o bem estar da sociedade é importante que cada dia mais, haja pesquisas e engajamento científico sobre tal assunto.

REFERÊNCIAS

- [1] ARORA, Ashima. **Optical and electric field control of magnetism**. 2018. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Universität Potsdam, Potsdam, Alemanha, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330210801_Optical_and_electric_field_control_of_magnetism. Acesso em: 05 nov. 2020.
- [2] BAKUZIS, Andris F., Branquinho, L., Carrião A., et al. **Efeito de interações dipolares magnéticas na eficiência do aquecimento de nanopartículas: implicações para a hipertermia do câncer**. *Sci Rep.* **3**, 2887 (2013). <https://doi.org/10.1038/srep02887>
- [3] BRANCO, Rogério Mendes. **Nanopartículas magnéticas obtidas por coprecipitação homogênea sonoquimicamente assistida**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alenas, MG, Poços de Caldas, 2013 . Disponível em: <https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/590>. Acesso em: 13/09/2020.
- [4] BRANQUINHO, L. C. **Efeito da interação dipolar magnética na eficiência de aquecimento de nanopartículas: Implicações para magnetohipertermia**. 2014. 155 f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014. <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/7239> - Acesso dia 15 de abril de 2020.
- [5] BASSALO, José Maria Filardo. **A Crônica da Física do Estado Sólido: IV. magnetismo**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Belém, v. 16, p. 76-97, 01 abr. 1994.
- [6] CHIAVERINI, Vicente. Aços Carbono e Aços ligas. Cap.: Materiais magnéticos. **Geologia e Metalúrgica**. São Paulo, p. 172-196. 1955. Disponível: sites.poli.usp.br/geologiaemetalurgia/Revistas/Edi%C3%A7%C3%A3o%2011/completo11.pdf. Acesso: 26/09/2020.
- [7] CAMARGO, Renata Pires et al. Nanomedicina. In: RÓZ, Alessandra Luzia da et al (org.). **GRANDES ÁREAS DA NANOCIÊNCIA**. Volume 2. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. Cap. 4. Nanoneurobiofísica. P.111-144.
- [8] CANCINO, Juliana et al. Nanomedicina. In: RÓZ, Alessandra Luzia da et al (org.). **GRANDES ÁREAS DA NANOCIÊNCIA**. Volume 2. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. Cap. 3. Nanomedicina. p. 84-109.
- [9] CANCINO, Juliana; MARANGONI, Valéria S.; ZUCOLOTTTO, Valtencir. **Nanotecnologia em medicina: aspectos fundamentais e principais**

preocupações. Quím. Nova, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 521-526, junho de 2014. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010040422014000300022&lng=en&nrm=iso. acesso em 21 de maio de 2020. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140086>.

[10] COSTA, Alessandro Mariano, SILVA, Viviane Viana. **Estratégias nanotecnológicas para diagnóstico e tratamento do câncer**. Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA, Três Lagoas, v, 5, n.2. agosto/dezembro. 2017. ISSN: 2447-8822 . Publicado: 2017-09-03

[11] DA SILVA, Anderson Costa. **Avaliação Experimental e Teórica da Hipertermia Magnética de Magnetolipossomos para Tratamento Oncológico** – Tese de doutorado apresentada a Universidade Federal de Goiás, 2015.

[12] DE MELO, Celso P., PIMENTA, Marcos, **Nanociências e nanotecnologia. (CGEE), C. de G. e E.E.** (2004). Parcerias estratégicas. n. 18. http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/786/719 . Acesso dia 13 de maio de 2020.

[13] DE SOUSA JÚNIOR, Ailton Antônio. **Avaliação dos efeitos das Hipertermias Magnética e Fototérmica na Síntese de Heteroestruturas à base de Nanopartículas de MnFe₂O₄ e Au** - Tese de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Goiás, 2015

[14] DIEGUEZ, Celia M. Tokarski et al . **Os fundamentos quânticos da Ressonância Magnética Nuclear. Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo , v. 40, n. 1, e1310, 2018 . Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000100410&lng=pt&nrm=iso. acessos em 24 maio 2020. Epub 14-Ago-2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0093>.

[15] DURAN, Nelson. CAPPERELLI MATTOSO, L. Henrique. MORAIS, P. Cesar. **Nanotecnologia**. Editora Artliber LTDA, São Paulo, 2012

[16] FEYNMAN, Richard P., LEIGHTON, Robert B., SANDS, Matthew. **Lições de física de Feynman: edição definitiva**. Tradução Élcio Abdalla, Cecília Bertoni Martha Hadler Chirenti, Mario Cesar Baldiotti.– Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Bookman, 2008. Editado também como livro impresso em 2008. ISBN 978-85-7780-322-4 (v. 2).

[17] Foundation, E.E.S. Nanomedicine, An ESF–European Medical Research Councils (EMRC) forward look report. France: ESF, 2004

- [18] FRANCISQUINI, Elton; SCHOENMAKER, Jeroen; SOUZA, José Antonio. **Nanopartículas Magnéticas e suas Aplicações**. In: ALVES, Wendel Andrade. **Química Supramolecular e Nanotecnologia**. Brasil: Atheneu, 2014. Cap. 14. p. 269-289.
- [19] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física: Eletromagnetismo; tradução: DE BIASI, Ronaldo Sérgio. 10. ed. v.3 Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2016;
- [20] MACHADO, Kleber Daum. **Teoria do Eletromagnetismo**: volume 1. Ponta Grossa: Editora Uepg, 2000.
- [21] ISOLA, Vinicius. **A História do Eletromagnetismo**. 2003. Disponível em: https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/992558ViniciusIsola-RMartins_F809_RF09_0.pdf. Acesso em: 12 set. 2020.
- [22] LEITE, Rodolpho Carvalho. **“Coercividade e anisotropia magnética Magneto-ópticas em coloides magnéticos”**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/9404>. Acesso: 25/05/2020.
- [23] MATTOSO, L., MEDEIROS, E., MARTIN NETO, L.. A revolução nanotecnológica e o potencial para o agronegócio. **Revista de Política Agrícola**, Local de publicação (editar no plugin de tradução o arquivo da citação ABNT), 14, Jun. de 2015. Disponível em: <<https://seer>.
- [24] MORAIS, Zulmira Guerreira Marques Lacava e DE MORAIS, Paulo César. **Aplicações biomédicas de nanopartículas magnéticas. (CGEE), C. de G. e E.E.** (2004). Parcerias estratégicas. n. 18. http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/786/719 . Acesso dia 13 de maio de 2020.
- [25] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). Secretaria de Empreendedorismo e Inovação. **Plano de ação de ciência, tecnologia e inovação para tecnologias con - vergentes e habilitadoras: nanotecnologia** / organizador, Leandro Antunes Berti et al. 2019. 4 v. (v. 1 ; 56 p.) : il.
- [26] OLIVEIRA, Rafael Menezes de. **Ferrofluidos em células de Hele-Shaw de espaçamento variável: o papel do campo magnético e dos estresses viscosos**. 2007. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6547>. Acesso: 26/05/2020

[27] PARISE, Marcelo de Souza. **Elaboração de fluidos magnéticos à base de gliconanopartículas magnéticas de $Mn_{1-x}Co_xFe_2O_4$ funcionalizadas com ácidos carboxílicos polohidroxilados, visando aplicações em nanobiotecnologia**. 2014. ix, 78 f., il. Dissertação (Mestrado em Nanociências e Nanobiotecnologia)—Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: repositorio.unb.br/handle/10482/17958. Acesso em: 20, ago. de 2020.

[28] PASSADOR, Fabio Roberto, RUVOLO FILHO, Adhemar Collà, PESSAN, Luiz Antonio. NANOCOMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA E ARGILA LAMELAR. **Nanoestruturas**: coleção nanociência e nanotecnologia: princípios e aplicações. In: RÓZ, Alessandra Luzia da et al (org.). Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. Cap. 1. p.224 -249.

[29] PERECIN, Caio José. **Nanopartículas superparamagnéticas encapsuladas com polímeros para tratamento de câncer por hipertermia**. 2016. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) – Bioengenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível: 10.11606/D.82.2016.tde-22062016-103823. Acesso: 22/08/2020.

[30] SANT'ANNA, L. da Silva, ALENCAR, M. S. de Menezes, FERREIRA, A. Pacheco., **Patenteamento em Nanotecnologia no Brasil: Desenvolvimento, Potencialidades e Reflexões para o Meio Ambiente e a Saúde Humana**. Química Nova, Vol.36, No. 2, Págs. 348-353 (2013).

[31] RIBEIRO, Joselito Nardy et al. **Terapia Fotodinâmica: uma luz na luta contra o câncer**. *Physicae*, [S.l.], p. 5-14, jan. 2005. ISSN 22363521. Disponível em: <<https://physicae.ifi.unicamp.br/index.php/physicae/article/view/physicae.5.2>>. Acesso em: 24 may 2020. doi: <https://doi.org/10.5196/physicae.5.2>.

[32] SIMÕES, Fabio Ruiz, TAKEDA, Humberto Hissashi. CONCEITOS E PRINCÍPIOS BÁSICOS. In: RÓZ, Alessandra Luzia da et al (org.). **Nanoestruturas**: coleção nanociência e nanotecnologia: princípios e aplicações. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. Cap. 1. p. 3-40.

[33] SOUSA JÚNIOR, Ailton Antônio de. **Avaliação dos efeitos das Hipertermias Magnética e Fototérmica na Síntese de Heteroestruturas à base de Nanopartículas de $MnFe_2O_4$ e Au**. 2015. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/6892>. Acesso em: 25 maio 2020.

[34] REITZ, John R.; MILFORD, Frederick J.; CHRISTY, Robert W.. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1991.

[35] RIBEIRO, Giuliano Augustus Pavan. As Propriedades Magnéticas da Matéria: um primeiro contato. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Carlos, v. 22, p. 299-305, 03 set. 2000. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_299.pdf. Acesso em: 05 out. 2020.

[36] VALENTIM, Victor Valim. **Um estudo descritivo do efeito superparamagnético em nanopartículas**. 2014. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Departamento de Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014. Disponível em: http://www.fisica.ufes.br/sites/fisica.ufes.br/files/016_Victor_Valim_Valentim.pdf. Acesso em: 07 out. 2020.

[37] VERDE, Ediron Lima. **HIPERTERMIA MAGNÉTICA EM NANOPARTÍCULAS: DA INSTRUMENTAÇÃO BIOMÉDICA IN VITRO AO ESTUDO DAS PROPRIEDADES MAGNETO-TÉRMICAS DE DIFERENTES FERRITAS**. 2012. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/7/o/2012_Tese_Ediron_Lima_Verde.pdf. Acesso em: 24 maio 2020.

APÊNDICE A - TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE PUBLICAÇÃO DE PRODUÇÃO ACADÊMICA

O estudante SAMUEL DE MELO CASTRO do curso de Licenciatura Plena em Física, matrícula 20171001800058, telefone: (64) 92959500, e-mail samelocstro@hotmail.com , na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado NANOMEDICINA: A INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE A FÍSICA E A SAÚDE, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto (PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 15 de dezembro de 2020.

Assinatura do autor:



Nome completo do autor: SAMUEL DE MELO CASTRO

Assinatura do professor-orientador:



Nome completo do professor-orientador: Dr. ANDRÉ LUIZ CARDOSO DA SILVA