

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO  
FENÔMENO MAGNETOHIDRODINÂMICO**

**Fabio Norikazu Kashiwagi**

**Itajubá, Setembro de 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Fabio Norikazu Kashiwagi**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO  
FENÔMENO MAGNETOHIDRODINÂMICO**

Tese submetida ao Programa da Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos  
para obtenção do título de **Doutor em Ciências  
em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração:** Geração de Energia

**Orientador:** Prof. Dr. Estácio Tavares  
Wanderley Neto

**Co-orientador:** Prof. Dr. Álvaro Antonio  
Alencar de Queiroz

**Itajubá, Setembro de 2021**

# DEDICATÓRIA

À minha querida esposa Rosa e aos meus filhos  
Gustavo e Sara.

# AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Estácio Tavares pela confiança depositada em mim para ser o orientador, pela segurança e suporte em momentos nevrálgicos surgidos no decorrer do projeto, pelo incentivo a buscar o conhecimento em áreas nunca exploradas pelo meu restrito saber e pela amizade que resultou nesta longa jornada de trabalho.

Ao professor Dr. Álvaro Queiroz, um homem forjado pela vida, um mestre de poucas palavras, mas de uma capacidade extraordinária em fazer pesquisa e buscar a inovação, que quando precisa expressar algo de importante sobre o trabalho o faz com coerência, precisão e determinação sempre na busca de solução aos problemas que vão surgindo no decorrer deste trabalho e dos frutíferos conselhos sobre experiência profissional e pessoal.

À professora Dra. Maria Elena pelo auxílio em manusear os equipamentos do laboratório e montar rotinas dos experimentos e pela amizade.

Ao professor Credson Sales pelas trocas de experiências sobre normas técnicas do setor elétrico e de assuntos diversos da vida nas horas da refeição.

Aos meus pais, irmãos e familiares que sempre me incentivaram e apoiaram as minhas decisões, torcendo pelo meu sucesso.

Aos amigos dos programas de Graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica, Engenharia de Materiais e Engenharia de Produção que contribuíram direta e indiretamente, mesmo sem perceber.

Em especial, aos amigos Erik Bonaldi, Joana Teodoro e Levy Ely pelo inestimável e incalculável apoio na minha longa estada na cidade de Itajubá-MG, a cidade fácil de ser amada.

Aos amigos, colaboradores e professores do Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez (LAT-EFEI) pela amizade, suporte e troca de experiências.

Ao professor Dr. Gilberto Francisco Martha Souza (POLI-USP), atualmente vice-presidente do Conselho de Pesquisa da USP, por ceder o laboratório de confiabilidade e o acervo técnico para pesquisa e pela amizade.

À CAPES, à UNIFEI e ao FGTS pelo custeio financeiro, pela infraestrutura tecnológica adequada para fortalecer a pesquisa brasileira por meio do programa "Demanda Social" e pelos recursos poupados para este fim, que viabilizaram a realização deste trabalho.

A Deus que sempre ilumina o meu caminho no momento certo.

# EPÍGRAFE

"O estado de pensamento que permite que o homem faça um trabalho desse tipo é semelhante à adoração religiosa ou de um amante, o esforço diário não vem da intenção deliberada, mas, direto do coração".

Albert Einstein.

## RESUMO

Os avanços tecnológicos têm permitido e facilitado a miniaturização da forma e tamanho dos componentes eletrônicos para funcionar na escala entre microwatts e miliwatts. De um lado, a tendência de criação de sistemas eletrônicos complexos e de alto grau de processamento, tais como dispositivos autônomos, aparelhos médicos e redes de sensores sem fio operados a baterias, necessitando de baixa potência para funcionamento na faixa de 50  $\mu$ W a 100 mW surge como ações de redução de consumo de energia. Por outro lado, a Associação Brasileira da Indústria da Elétrica e Eletrônica (ABINEE) estima-se que a venda de pilhas e baterias para uso doméstico situa em torno de 1,2 bilhão de unidades por ano e o descarte de milhões de unidades destas, na maior parte irregular, devido ao término de vida útil ou perda de carga após inúmeras recargas. A possibilidade de utilização de fontes autônomas de energia como vibrações, movimento de fluidos, radiofrequência, acústica, luz, calor entre outros em conjunto com baterias ou mesmo substituindo-as vai auxiliar no funcionamento quase ininterrupto de dispositivos eletrônicos para operações críticas e prolongar a sua autonomia. No campo da nanotecnologia, novas oportunidades para fornecer energia a dispositivos de tecnologia assistiva e de acessibilidade estão surgindo a cada momento. O presente trabalho tem como objetivo construir um dispositivo microgerador funcionando a partir do movimento de fluidos magnéticos a base de uma mistura de dendrímeros de poliglicerol (PGLyD) com nanopartículas de óxido de ferro superparamagnéticos (SPIONs) sob um campo magnético, gerando correntes elétricas da ordem de microAmpere. Os resultados experimentais do protótipo mostraram-se promissores e satisfatórios.

Palavras-chave: fontes autônomas, dispositivo microgerador, geração de energia elétrica, fluidos magnéticos

## **ABSTRACT**

Technology advances have allowed and made easier the miniaturization of the shape and size of electronic components to operate low power ranges. On the one hand, the trend of creating complex electronic systems with a high degree of processing, such as autonomous devices, medical apparatus and wireless sensor networks supplied by batteries, requiring low power to operate in the range from dozens of microwatt to hundreds of milliwatts appears as actions to reduce energy consumption. On the other hand, the Brazilian Electrical and Electronics Industry Association (ABINEE) estimates that the sale of batteries for residential use is around 1.2 billion units per year and the disposal of millions of these, mostly irregular, due to end of life or loss of charge after several recharges. In nanotechnology scale, new opportunities of power supply have launched for assistive technology and accessibility devices. The present work aims to build a microgenerator device working from the kinetic magnetic fluids energy based on a mixture of polyglycerol dendrimers (PGLyD) with superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) under an applied magnetic field, generating electric current of the order of microAmpère. The experimental results of the prototype proved to be promising and satisfactory.

**Keywords:** autonomous device, microgenerator device, electrical energy source, magnetic fluids.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1: Idade e capacidade de geração elétrica por tipos de combustível.....   | 24 |
| Figura 2.2: Geração de energia por tipo de combustível.....  | 24 |
| Figura 2.3: Histórico da tarifa média cobrada para os consumidores. ....   | 26 |
| Figura 2.4: Ilustração dos experimentos de Faraday. ....   | 30 |
| Figura 2.5: Corte de um gerador síncrono de uma usina hidrelétrica.....  | 31 |
| Figura 2.6: (a) distribuição espacial da indução magnética; (b) onda elétrica do gerador. ....   | 31 |
| Figura 2.7: Esquema ilustrativo de polos salientes. ....   | 33 |
| Figura 2.8: Esquema ilustrativo de polos lisos. ....   | 33 |
| Figura 2.9: Curva de conjugado em relação ao escorregamento de uma máquina de indução, mostrando as regiões de frenagem e de funcionamento como motor e gerador..... | 34 |
| Figura 2.10: Ilustrativo de uma turbina a gás de ciclo combinado.....  | 35 |
| Figura 2.11: Ilustração do fenômeno de fissão nuclear. ....  | 36 |
| Figura 2.12: Esquema básico de um reator por fissão nuclear. ....  | 37 |
| Figura 2.13: Ilustração do princípio da fusão nuclear. ....  | 38 |
| Figura 2.14: Esquema didático para um reator de fusão nuclear.....   | 39 |
| Figura 2.15: Componentes de um gerador eólico.....   | 40 |
| Figura 2.16: Ilustração sobre incidência solar em diferentes áreas. ....   | 42 |
| Figura 2.17: Composição do módulo fotovoltaico. ....   | 42 |
| Figura 2.18: Ilustração sobre o funcionamento de uma célula de combustível.....  | 43 |
| Figura 2.19: Princípio básico do gerador MHD. ....   | 45 |
| Figura 2.20: Esquema de funcionamento do micro gerador por MHD de um calçado. ....   | 46 |
| Figura 2.21: Vista em corte do dispositivo móvel sobre uma unidade de carregamento por indução magnética. ....   | 47 |
| Figura 3.1: Ilustração em escalas do sistema coloidal e interfaces. ....   | 50 |
| Figura 3.2: Ilustração do efeito Tyndall para diferenciação de colóides.....   | 51 |
| Figura 3.3: Esquema de um movimento Browniano. ....  | 52 |
| Figura 3.4: Ilustração de materiais magnéticos a base de óxido de ferro.....   | 52 |
| Figura 3.5: Esquema de partícula constituinte de ferrofluido. ....   | 53 |
| Figura 3.6: Ilustrativo de ferrofluido típico submetido a um campo magnético variável. ....  | 54 |
| Figura 3.7: Métodos de síntese de SPIONs (a) Químicos, (b) Físicos, (c) Biológicos. ....   | 55 |
| Figura 3.8: Viscosidade dinâmica por temperatura em fluidos. ....  | 58 |
| Figura 3.9: Reação de diferentes microestruturas à aplicação de uma tensão.....  | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.10: Força de cisalhamento aplicada sobre um fluido. ....  | 60 |
| Figura 3.11: Classificação dos fluidos. ....   | 61 |
| Figura 3.12: Fluidos não Newtonianos independentes do tempo. ....  | 62 |
| Figura 3.13: Fluido não Newtoniano dependentes do tempo. ....  | 64 |
| Figura 3.14: Ilustrativo de escoamento de um fluido. ....  | 66 |
| Figura 3.15: (a) Ilustração comparativa entre nanopartículas magnéticas e outros materiais (a) e (b) comportamento das nanopartículas na ausência e presença do campo magnético H. ....  | 69 |
| Figura 3.16: Fluido magnético circulando internamente no toróide. ....   | 70 |
| Figura 3.17: Ilustração da anatomia de: (a) “dendri” galho de árvore, (b) dendrímero representado por linha sólida e as regiões chaves do dendrímero representados por linhas pontilhadas coloridas. ....  | 71 |
| Figura 3.18: Ilustração típica de um dendrímero poliglicerol. ....   | 72 |
| Figura 4.1: Ilustração da interação das técnicas experimentais para a prototipagem. ....   | 74 |
| Figura 4.2: Esquema de reação de síntese para substância inorgânica. ....  | 74 |
| Figura 4.3: Ilustração da estrutura e fórmula do carbonato de glicerol. ....   | 75 |
| Figura 4.4: Ilustração da medição eletroquímica. ....  | 76 |
| Figura 5.1: Esquema ilustrativo do Design Thinking. ....   | 79 |
| Figura 5.2: Representação de cálculo do volume do toróide. ....  | 81 |
| Figura 6.1: Ilustração da preparação potenciostática do fluido magnético dentro do PGLYD-SPIONs, (a) PGLYD absorve íons $Fe^{2+}$ e $Fe^{3+}$ , (c) nas suas cavidades ocorrem as interações eletrostáticas entre íons metálicos e grupos funcionais do dendrímero e (d) formação da magnetita através da redução eletroquímica, (b) Mapa eletrostático do grupo funcional do PGLYD indicado em vermelho para carga (-) e em azul para carga (+). .... | 85 |
| Figura 6.2: Ilustração do mapa de potencial eletrostático PGLYD-SPIONs. ....   | 87 |
| Figura 6.3: Perfil de corrente ao longo do tempo para síntese potenciostática da amostra do PGLYD-SPION. ....  | 87 |
| Figura 6.4: Voltamograma cíclicos obtidos na síntese aplicando faixa de potencial de -0,2 V a 1,2V vs. (Ag/AgCl) para eletrólito de $Fe^{3+}$ (a) e poliglicerol incrustado com nanopartículas de $Fe^{3+}$ (b) . Com velocidade de varredura igual a $50 \text{ mV.s}^{-1}$ a temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . ....   | 88 |
| Figura 6.5: Curva padrão de referência JCPDS 00-003-0863 do SPIONs $Fe_3O_4$ puro. ....  | 89 |
| Figura 6.6: Comparativo de picos de Braggs por Difratrômetro de raio X da marca Rigaku com fonte de radiação $CuK\alpha$ na faixa de $2\theta$ variando de $10^{\circ}$ a $50^{\circ}$ com incremento de $0,05^{\circ}$ destacando os picos de difração para: (a) Fluido magnético PGLYD-SPION, (b) SPIONs $Fe_3O_4$ puro e (c) PGLYD. ....  | 89 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 6.7: (a – c) Micrografia de alta resolução TEM-HRTEM do fluido magnético formato octaedral truncado, (d – f) padrões correspondentes ao FFT da micrografia HRTEM e (g – i) formas cristalina 001-101-111 da célula padrão Wigner-Seitz. ....   | 90 |
| Figura 6.8: Micrografia do fluido magnético PGLYD-SPIONs visto pela microscopia de transmissão de elétron (TEM) da marca Hitachi modelo H7000 operando a 125 kV na escala de: (A) 10 nm, (B) 100 nm, (C) 100 nm. (D) Micrografia de alta resolução TEM-HRTEM do fluido magnético de SPIONs-PGLYD formato de esfera nas cavidades em escala de 10 nm. ....   | 91 |
| Figura 6.9: Análise de termogravimétrica da marca Shimadzu Co modelo TGA-50 variando de temperatura de 25 °C a 1000 °C para amostra de PGLYD-SPIONs: (a) TGA normalizado e (b) sua correspondente 1ª derivada da curva TGA.....   | 93 |
| Figura 6.10: Comparativo das curvas de magnetização versus campo magnético para SPIONs e PGLYD-SPIONs medida pelo magnetômetro com vibração da marca Lakeshore modelo 7400 a temperatura de 25 °C.....  | 93 |
| Figura 6.11: Ilustração das principais partes do protótipo. (a) Câmara toroidal, (b) Bobinas conectadas em paralelo envolvendo toróide, (c) Válvulas, (d)SPIONs magnetizados, (e) Reservatório de PGLYD-SPIONs, (f) SPIONs não magnetizados, (g) Bomba peristáltica, (h) Ímã permanente, (i) Computador para aquisição de dados, (j) Conversor shunt 1 mV/mA. Setas indicam fluxo de PGLYD-SPIONs. .... | 94 |
| Figura 6.12: Corrente elétrica induzida do fluxo do fluido magnético PGLYD-SPIONs no tempo. ....  | 97 |
| Figura 6.13: Ilustração da: corrente induzida e do campo magnético gerado versus velocidade angular. ....   | 98 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1: Comparativo de eficiência entre geradores. ....                     | 26 |
| Tabela 2.2: Parâmetros de custos de usinas de geração de energia elétrica. .... | 28 |
| Tabela 2.3: Rotações necessárias para respectivos número de polos. ....         | 32 |
| Tabela 3.1: Classificação dos colóides conforme as fases. ....                  | 51 |
| Tabela 3.2: Viscosidade dinâmica de substâncias a temperatura de 20°C. ....     | 58 |
| Tabela 3.3: Características não Newtonianas aplicadas em materiais. ....        | 65 |
| Tabela 3.4: Equivalência do número de Reynolds e tipo de escoamento. ....       | 68 |
| Tabela 3.5: Caracterização dos fluidos conforme número de Déborah. ....         | 68 |
| Tabela 5.1: Requisitos necessários do plano de prototipagem. ....               | 80 |
| Tabela 5.2: Representação de lista de materiais. ....                           | 82 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|          |  |
|----------|--|
| ABINEE   | Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica                   |
| AC       | Corrente alternada   |
| AJOT     | American Journal of Transportation   |
| ANEEL    | Agência Nacional de Energia Elétrica                                       |
| ANP      | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis                |
| CNPE     | Conselho Nacional de Política Energética                                   |
| CNPQ     | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico              |
| COVID-19 | Doença do Corona virus   |
| Da       | Unidade de massa Dalton. 1 Da equivale a $1,66 \times 10^{-27}$ kg         |
| De       | Número de Déborah. Caracteriza pela fluidez do fluido. Número adimensional |
| DT       | Design Thinking  |
| EDS      | Detector de Energia Dispersiva   |
| EIA      | U.S. Energy Information Administration                                     |
| EPE      | Empresa de Pesquisa Energética   |
| EUA      | Estados Unidos da América  |
| FDA      | U.S. Food and Drugs Administration   |
| FMM      | Força magneto motriz   |
| FTIR     | Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier                |
| IEA      | International Energy Agency  |
| IEEE     | Institute of Electrical and Electronic Engineers                           |
| JCPDS    | Joint Committee on Powder Diffraction Standards                            |
| kA/m     | Kilo Ampère por metro  |
| LAT-EFEI | Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá              |
| M        | Concentração Molar (mol/L)   |
| MEV      | Microscópio Eletrônico de Varredura  |
| MHD      | Magnetohidrodinâmico   |
| MP       | Medida Provisória  |
| NEI      | Instituto de Energia Nuclear   |
| NGCC     | Ciclo combinado a gás natural de alta eficiência                           |
| ONS      | Operador Nacional do Sistema Elétrico                                      |
| PANI     | Polianilina  |
| PC       | Computador pessoal   |
| PDP      | Planejamento do produto  |
| PGLYD    | Polyglycerol Dendrimer   |
| PIB      | Produto Interno Bruto  |
| PTFE     | Politetrafluoretileno  |

|        |  |
|--------|--|
| Re     | Número de Reynolds                         |
| Rem    | Número de Reynolds magnético               |
| RPM    | Rotações por minuto                        |
| RPS    | Rotações por segundo                       |
| SPIONs | Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles |
| T      | Tesla                                      |
| TW     | Terawatt                                   |
| TWh    | Terawatt-hora                              |
| TEM    | Microscopia de Transmissão de Elétron      |
| U.S.   | United States                              |
| UGE    | Usina de Gás Natural                       |
| UHE    | Usina Hidrelétrica                         |
| UNE    | Usina Nuclear                              |

# Sumário

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....   | 18 |
| 1.1   | Objetivo principal.....   | 19 |
| 1.2   | Objetivos específicos.....  | 20 |
| 1.3   | Justificativa.....  | 20 |
| 1.4   | Estrutura do trabalho.....  | 20 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 22 |
| 2.1   | Panorama para geração de energia.....   | 22 |
| 2.2   | Histórico.....  | 29 |
| 2.3   | Princípio de funcionamento.....   | 30 |
| 2.3.1 | Geradores Síncronos.....  | 30 |
| 2.3.2 | Geradores de Indução.....   | 34 |
| 2.3.3 | Geradores Termoelétricos.....   | 35 |
| 2.3.4 | Geradores Eólicos.....  | 39 |
| 2.3.5 | Geradores Fotovoltaicos.....  | 41 |
| 2.3.6 | Geradores Químicos.....   | 42 |
| 2.3.7 | Geradores Magnetohidrodinâmicos.....  | 44 |
| 3     | DESENVOLVIMENTO.....  | 49 |
| 3.1   | FLUIDOS MAGNÉTICOS.....   | 49 |
| 3.1   | Processos de fabricação dos fluidos magnéticos.....   | 54 |
| 3.2   | Estabilidade e as forças de integração dos fluidos magnéticos.....  | 56 |
| 3.3   | Estudo da hidrodinâmica nos fluidos magnéticos.....   | 57 |
| 3.4   | Modelo de força para fluidos magnéticos.....  | 59 |
| 3.5   | Propriedades reológicas dos fluidos magnéticos.....   | 60 |
| 3.6   | Modelos constitutivos reológicos de fluídos magnéticos.....   | 66 |
| 3.7   | Estudo sobre escoamento dos fluidos magnéticos no interior do toróide em regime laminar e em regime turbulento..... | 67 |
| 3.8   | Dendrímeros de Poliglicerol (PGLYD).....  | 70 |
| 3.9   | Dendrímero de poliglicerol encapsulado com monopartículas superparamagnéticas....                                   | 73 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4   | TÉCNICAS EXPERIMENTAIS .....  | 74  |
| 4.1 | Síntese eletroquímica do PGLYD-SPIONs .....   | 75  |
| 4.2 | Técnicas de caracterização para o PGLYD-SPIONs .....  | 76  |
| 5   | PROTÓTIPO DO MICROGERADOR .....   | 78  |
| 5.1 | Plano de prototipagem .....   | 79  |
| 5.2 | Construção do modelo virtual .....  | 81  |
| 5.3 | Levantamento de lista de materiais .....  | 81  |
| 5.4 | Confeção do modelo físico .....   | 83  |
| 5.5 | Testes no protótipo .....   | 83  |
| 6   | RESULTADOS E DISCUSSÕES .....   | 85  |
| 6.1 | Síntese eletroquímica da PGLYD-SPIONs .....   | 85  |
| 6.2 | Caracterização do PGLYD-SPIONs .....  | 88  |
| 6.3 | Geração de eletricidade por PGLYD-SPIONs .....  | 94  |
| 7   | CONCLUSÃO .....   | 99  |
|     | REFERÊNCIAS .....   | 102 |
|     | APÊNDICE .....  | 109 |
|     | APÊNDICE A – Planejamento inicial do produto sobre estudos de geração de energia pelo fenômeno magnetohidrodinâmico ..... | 109 |
|     | APÊNDICE B – Técnicas experimentais da polianilina (PANI) .....   | 110 |
|     | ANEXOS .....  | 137 |
|     | ANEXO A – Artigo publicado no IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS .....  | 137 |
|     | ANEXO B - EPE: Consumo Nacional de Energia Elétrica na Rede: 1995 - 2020 .....  | 139 |

# 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios para a humanidade neste século XXI é desenvolver novas tecnologias para produção de energia elétrica de forma sustentável para suprir a demanda mundial crescente [1].

O tema sobre preservação do meio ambiente é a principal política que norteia os países mais ricos e desenvolvidos. Estes impõem as metas aos demais países por meio de acordos comerciais de comprar produtos cujo meio de produção libera baixa emissão de carbono e manejo eficiente de matérias primas e de insumos. Do ponto de vista do setor elétrico, entende-se em consumir energia elétrica provenientes de fontes renováveis, uso racional de combustíveis não renováveis e armazenamento de energia elétrica [2].

As fontes de energia renovável trazem uma série de inovações na estrutura de fornecimento de energia elétrica por meio da transformação do patrimônio imobilizado de cada continente em microgeradores de energia para coletar energias renováveis, do emprego de novas tecnologias nas edificações e de suas estruturas capazes de armazenar energia intermitente, do uso da internet para transformar a rede elétrica de todo continente numa rede de compartilhamento de energia elétrica e da transição para veículos elétricos ou de célula de combustível que podem comprar e vender energia elétrica [3].

Dentro das energias renováveis, as que têm maior potencial para suprir a demanda crescente são:

- Energia hidráulica, obtida pela queda d'água dos rios para girar a turbina e gerar eletricidade numa usina hidrelétrica;
- Energia eólica, obtida através do movimento dos ventos rotacionando os aerogeradores;
- Energia solar, considerada uma fonte de energia inesgotável, obtida através da incidência de luz a painéis fotovoltaicos, ou do calor concentrado captado pelo duto, transformando em vapor d'água para acionar a turbina e gerar eletricidade na usina heliotérmica;
- Energia por biomassa, obtida através da queima de material vegetal orgânica como bagaço de cana, resíduo de vegetais, cavaco de madeira para acionar a turbina e gerar energia elétrica;

- Energia geotérmica, obtida pela captação de água quente e vapor d'água do magma nas divisas das placas tectônicas enviando por dutos até o gerador para acionar a turbina e transformar em energia elétrica;
- Energia oceânica, obtida pela energia cinética liberada pela grande amplitude das marés para o gerador e transformando-as em energia elétrica;
- Energia por fenômeno magnetohidrodinâmico (MHD), obtida pelo princípio da indução elétrica regida pela lei de Faraday através do movimento de fluidos condutores num duto sob um campo magnético aplicado.

As fontes de energia renováveis e as não renováveis atingirão o limite da expansão devido à redução gradativa de recursos naturais como petróleo, carvão mineral, gás natural entre outros e da escassez de espaços físicos necessários para construção de grandes usinas de geração de energia elétrica pelo aumento populacional.

A vida cotidiana das pessoas tem alterado profundamente a rotina de trabalho, de estudo e de lazer com a introdução de aparelhos de comunicação móvel inteligente (smartphones), conectividade de internet rápida (5G), comércio eletrônico (E-commerce) e dispositivos eletrônicos diversos. São aparelhos e sensores que funcionam a bateria recarregável ou a pilha descartável e que, somadas as centenas de milhões de unidades, geram um grande impacto ambiental quando descartados.

A tecnologia para reduzir a forma e tamanho de aparelhos eletrônicos fica condicionada ao tamanho e ao tipo de baterias para suprir a energia requerida para o funcionamento. As baterias possuem desvantagens como trocas periódicas, recargas em tomadas elétricas e de serem grandes e pesadas, muitas vezes, ocupam espaços significativos nos aparelhos.

Para contornar o dilema que cercam as baterias como fonte de energia com intuito de se manter o funcionamento pleno da parte crítica de um dispositivo ou melhorar a sua portabilidade, as técnicas de extração ou coleta de energia do meio ambiente vieram para suprir as limitações da bateria auxiliando na sua recarga ou até mesmo fornecer energia a algumas cargas específicas do dispositivo para reduzir o consumo da bateria.

## **1.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo em escala de bancada para a geração de energia elétrica na escala de micropotência através do fenômeno

da magneto hidrodinâmico (MHD) utilizando fluidos magnéticos e fazer uma análise de sua eficiência através de ensaios normalizados.

## **1.2 Objetivos específicos**

Como os objetivos específicos deste trabalho, têm-se o plano inicial para nortear desenvolvimento da ideia até o protótipo conforme a estratégia de planejamento do produto (PDP) tradicional e abordagem design thinking (DT) para fazer aderência ao planejamento inicial e entendimento mais acurado do protótipo.

## **1.3 Justificativa**

O uso de técnicas de captação de energia para suprir energia vem se tornando atrativa a uma larga variedade de microsistemas autônomos aplicado em tecnologia espacial, estações remotas de meteorologia, sensores sem fio e dispositivos portáteis como calculadoras, relógios de pulso e fones de ouvido Bluetooth.

A geração de energia pelo fenômeno MHD usada na geração de micro potência para alimentar os dispositivos eletrônicos de mesmo nível de potência poderá ser promissora pela versatilidade, funcionamento em locais inóspitos e sem necessidade de recarga. Tal qual como ocorreu com as células fotovoltaicas, os estudos futuros referente ao aumento dos níveis de potência por meio do aperfeiçoamento químico dos fluidos magnéticos, amplificação de sinais, melhoria nos equipamentos e componentes para o MHD poderão ser uma alternativa de geração de energia sustentável.

Em uma revisão na literatura de patentes, não foi encontrado até o momento, o uso de fluido magnético como núcleo de geradores de micropotência. Tal constatação, sugere um campo de aplicação um pouco explorado pelo fenômeno magnetohidrodinâmico.

## **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está subdividido em 7 capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma introdução, justificando a escolha do tema, o objetivo que se pretende alcançar e a organização da tese.

O capítulo 2 descreve os conceitos essenciais para a fundamentação teórica deste trabalho. São apresentados os conceitos relacionados ao processo de geração de energia elétrica por magneto hidrodinâmico.

O capítulo 3 apresenta o conceito sobre o fluido magnético e estudos iniciais sobre o comportamento do fluido em movimento dentro de uma câmara toroidal.

O capítulo 4 descreve o método experimental de síntese e caracterização dos fluidos magnéticos.

O capítulo 5 descreve as etapas de prototipagem do microgerador magnetohidrodinâmico para obtenção de corrente elétrica em microescala.

O capítulo 6 apresenta as discussões dos resultados obtidos pelo dispositivo e experimentação.

O capítulo 7 apresenta a conclusão do projeto e contribuições para estudos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Panorama para geração de energia**

O Brasil se consolidou na geração de energia elétrica por fontes renováveis pela política estratégica implementada aproveitando os recursos oferecidos pela sua área territorial de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, uma faixa litorânea de 7 mil quilômetros de comprimento dotado de extensão marítima de 370,4 Km de largura, solo fértil, grande biodiversidade das florestas tropicais e clima quente.

Em 2020, o Brasil possuía a capacidade instalada da ordem de 0,175 TW para a geração de energia elétrica e, na sua maior parte com 0,104 TW, originada por usina hidrelétrica. A partir desta capacidade, conseguiu-se gerar um total de 621,2 TWh de energia elétrica, dos quais 396,4 TWh foram de usinas hidrelétricas obtendo uma participação de 63,8% do total [4]. Paralelamente, o consumo de energia elétrica no Brasil em 2020 manteve-se no patamar de 475,6 TWh com queda de 1,4 % em relação ao ano anterior, devido à pandemia de gripe provocada pelo coronavírus (COVID-19) que teve uma queda aguda no consumo de energia elétrica no primeiro semestre [5].

Numericamente, passa-se a impressão de que houve excedente de energia elétrica em 2020, porém, se for contabilizadas as perdas técnicas e não técnicas e as diferenças de conceitos de carga global e consumo na rede, a geração efetiva estaria em torno de 493,7 TWh com diferença de 3,6% em relação ao consumo [4]. Maiores detalhes sobre o consumo de energia elétrica no Brasil encontram-se ao ANEXO B - EPE: Consumo Nacional de Energia Elétrica na Rede: 1995 - 2020.

De acordo com o plano decenal de expansão de energia de 2021 a 2030, simulou-se três cenários de crescimento do produto interno bruto (PIB) ao ano de 1,7% (pessimista), 2,9% (referência) e 4,1% (otimista) fixado o crescimento populacional anual na ordem de 0,4% ao ano, projetou-se a taxa de aumento no consumo de energia elétrica de 1,8% e 2,6% ao ano no primeiro e segundo quinquênios, respectivamente [6].

A busca por fontes renováveis para geração de energia elétrica deve ser realizada de forma assertiva e equilibrada por meio de estudos técnicos e comportamentais profundos sob um olhar holístico e planejamentos coerentes às projeções do cenário econômico, social e político no período em estudo. Dentre as várias nações, os Estados Unidos (EUA) foi selecionado por conter regiões desérticas e variadas características físicas onde consegue-se gerar um patamar superior a 4200 TWh de energia elétrica para uma população de 330 milhões

de habitantes no último ano. A matriz energética dos EUA composta em sua maioria, de usinas térmicas, responsável por 63,2 % e de 6,82 % vindo das usinas hidrelétricas o que se pode tornar um cenário provável que pode ocorrer no Brasil devido às mudanças climáticas [4].

Diante deste fato, o gerenciamento de geradores e seus respectivos tipos de fontes utilizados durante décadas para a geração de energia elétrica é necessário para prolongar a vida útil e alocar novos investimentos para novas fontes potenciais de geração, conforme Figura 2.1. O censo do departamento de Energia dos EUA (EIA) revela que a maioria das usinas movidas a carvão foram construídas antes da década de 1980. As usinas nucleares tiveram seu apogeu entre as décadas de 1960 e 1990. A partir do ano 2000, a geração de energia por gás natural iniciou o aumento de sua participação. Do ano 2010 em diante as fontes renováveis, lideradas pelas eólicas e solares, vieram para complementar a participação de geração de energia nos Estados Unidos [7].

Apesar de ser considerado um grande poluente, a principal fonte para geração de energia elétrica no mundo continua sendo o carvão mineral, que foi responsável em 2018 por gerar 10159,6 TWh, tendo participação de 38,0% do total de 26730 TWh. Segundo a Agência Internacional de Energia, as reservas atuais de carvão mineral podem suprir as usinas termelétricas por mais de 130 anos [8]. O carvão caracteriza-se por possuir um alto valor calórico, custo competitivo e encontra-se em abundância em países populosos com destaque às reservas da China, Estados Unidos e Rússia. Por outro lado, o carvão mineral possui alta concentração de monóxido de carbono, dióxido de carbono, enxofre e materiais particulados que são maiores causadores do efeito estufa, problemas respiratórios e aquecimento global. Os resíduos e gases do carvão são dispersados durante a sua queima para a geração de energia elétrica.

Segundo a Figura 2.1, os EUA em 2010 possuíam um total 1040 GW de capacidade de geração e 512 GW (49% do total) eram realizadas por usinas construídas até 30 anos. Dentre as usinas de até 30 anos, as de gás natural eram responsáveis pela geração de 296 GW (58%), enquanto que as usinas de carvão geravam 85 GW (17%).

American Journal of Transportation indicam alterações no mix de geração de eletricidade nos Estados Unidos pelos seguintes fatores [9]:

- Declínio do preço do gás natural;
- Desaceleração do crescimento da demanda por eletricidade;
- Implementação de regulamentos federais de emissão de poluição do ar;
- Atendimentos aos requisitos obrigatórios para usar fontes renováveis;

- Incentivos financeiros federais e estaduais por o uso de recursos renováveis;

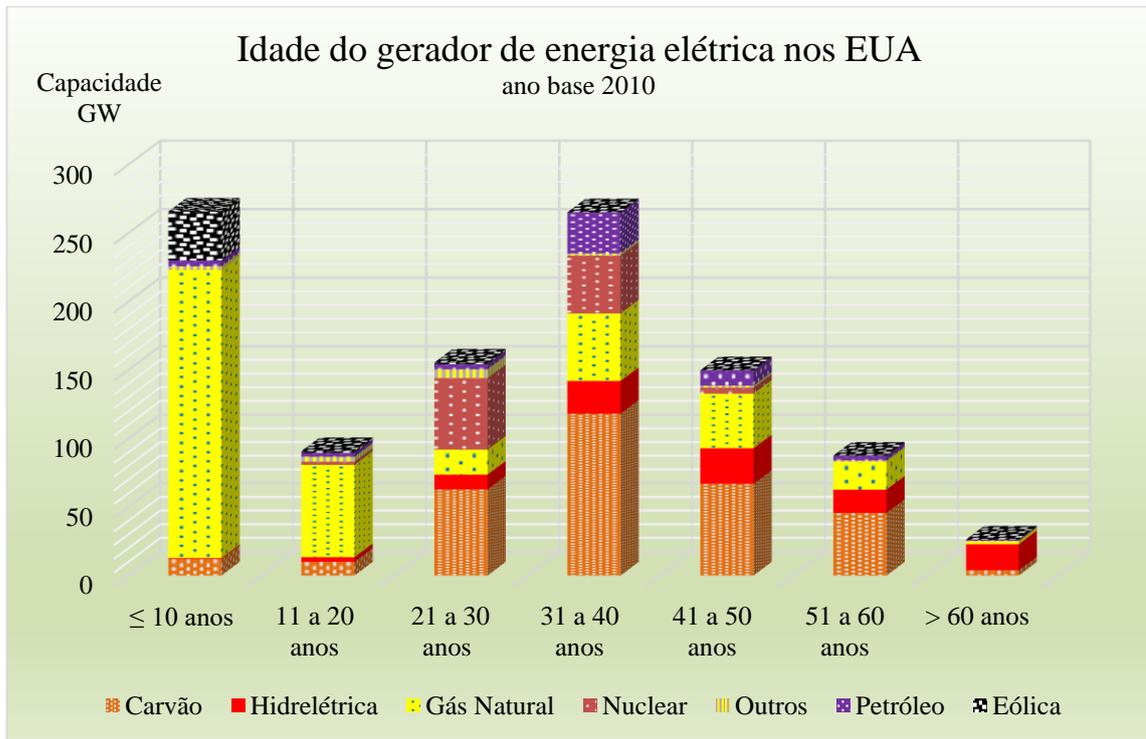


Figura 2.1: Idade e capacidade de geração elétrica por tipos de combustível.  
Fonte: [7].

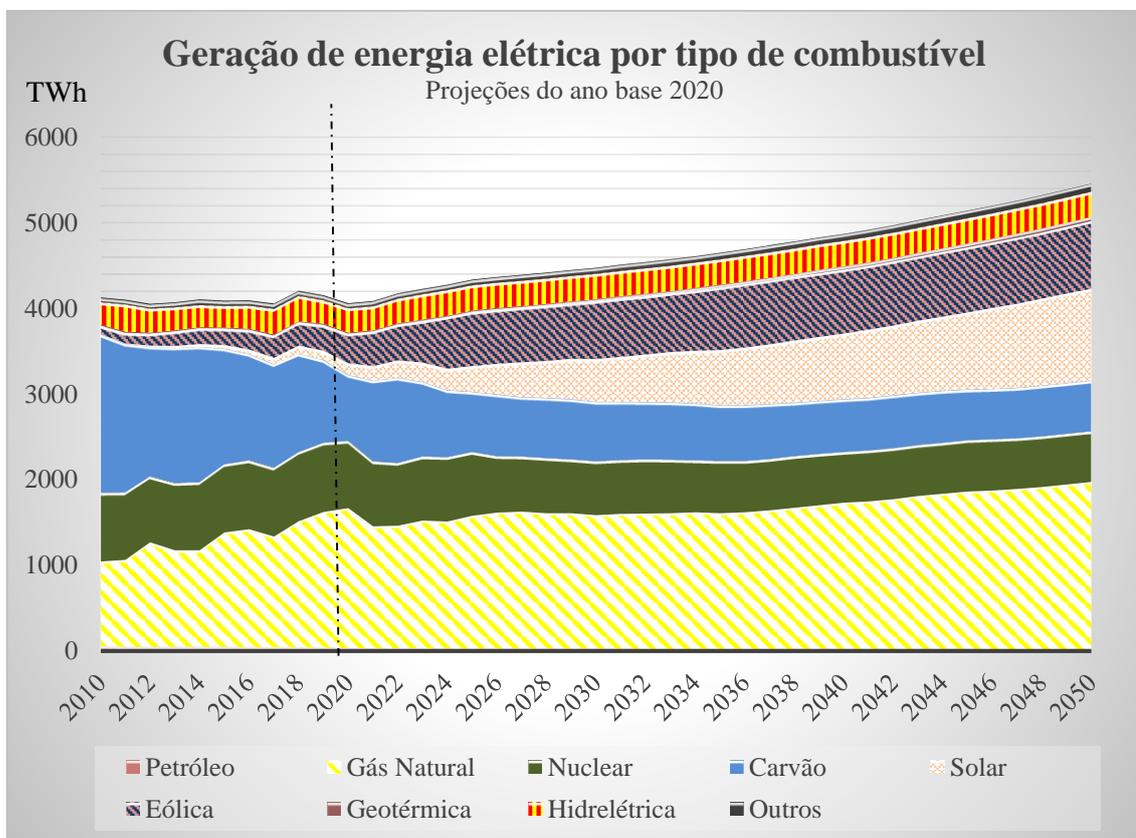


Figura 2.2: Geração de energia por tipo de combustível.  
Fonte: [9].

A construção de usinas de energia de ciclo combinado a gás natural de alta eficiência (NGCC) vem avançando em virtude dos preços relativamente baixos do gás natural, contribuindo em custos menores de fornecimento de energia comparados aos geradores de carvão. O tipo de construção faz com que a capacidade de geração de gás natural possa ser adicionada em incrementos menores para atender às mudanças previstas na demanda horária de eletricidade, em comparação aos geradores a carvão e reatores de energia nuclear. Finalmente, o gás natural produz menos emissões do que a queima do carvão [9].

A Figura 2.2 mostra que a geração de energia elétrica nos EUA por gás natural era responsável por 987,7 TWh em 2010, avançou para 1636,41 TWh em 2020 e tem projeção de atingir um patamar de 1953,11 TWh em 2050.

Por política de redução de emissões de poluentes, a participação do carvão mineral na geração de energia elétrica foi de 1847,29 TWh em 2010, reduziu-se para 773,88 TWh em 2020 e tem a projeção de se estabilizar em 593,27 TWh em 2050.

Enquanto que a energia nuclear foi responsável por 806,97 TWh de geração em 2010 até ocorrer o acidente nuclear de Fukushima no Japão em 2011. Após o acidente e sob pressões de ambientalistas, a energia nuclear gerou 784,79 TWh em 2020 e com previsão de geração em torno de 593,58 TWh em 2050.

A utilização de recursos renováveis para geração de energia elétrica vem crescendo nos últimos anos. Observa-se que as usinas eólicas geraram 94,65 TWh de energia elétrica em 2010, saltaram para o patamar de 342,85 TWh em 2020 e tem previsão de gerar 789,72 TWh em 2050. As usinas solares geraram 3,62 TWh de energia elétrica em 2010, saltaram para faixa de 132,44 TWh em 2020 e projeta-se uma geração de 1070,88 TWh por estas usinas em 2050.

A geração de energia pelo fenômeno MHD, pertencente à fonte de recursos renováveis, permaneceu no esquecimento por vários anos devido à falta de tecnologia de materiais ou sistemas que integrava o processo. Os estudos mostram que o MHD é um método de alta eficiência de geração de energia com baixa emissão de poluentes, cuja eficiência geral fica entre 55% a 60%, mas pode superar os 80% utilizando ímãs supercondutores em seu processo [10]. Um estudo comparativo de eficiência entre os principais geradores é mostrado na Tabela 2.1. Observa-se que, no futuro, as maiores eficiências a partir de 50% para geração de energia elétrica serão geração de potência MHD por ímãs supercondutores, tecnologias de células combustíveis e usinas solares.

Em termos de custo de energia elétrica, o cálculo é feito pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que avalia, supervisiona e divulga as tarifas praticadas pelas

concessionárias aos consumidores cativos. Aos consumidores livres do setor industrial, que se situam numa faixa de consumo específica determinada pela agência reguladora, o valor monetário por kWh de energia elétrica é negociado e sigiloso por meio de contratos de fornecimento com a distribuidora.

Tabela 2.1: Comparativo de eficiência entre geradores.

| Escala<br>No.: | Método   | Eficiência |                   |
|----------------|--|------------|-------------------|
|                |  | Presente   | Estimativa futura |
| 1              | Geração de potência MHD (eletroímã) por ímas supercondutores | ~ 50%      | Entre 60% e 80%   |
| 2              | Usinas termelétricas   | ~ 3%       | Até 13%           |
| 3              | Conversores termoiónicos                                     | ~ 15%      | Até 40%           |
| 4              | Células fotovoltaicas ou solares                             | ~ 15%      | -                 |
| 5              | Tecnologias de células combustíveis                          | ~ 50%      | Até 60%           |
| 6              | Usinas solares   | ~ 30%      | Até 50%           |
| 7              | Usinas eólicas   | ~ 30%      | -                 |
| 8              | Usinas geotérmicas   | ~ 15%      | -                 |

Fonte: [10].

Em termos gerais, a tarifa média da energia elétrica aplicada aos consumidores cativos e mostrada pela Figura 2.3 vem demonstrando elevação ao longo de 15 anos, com início em 2003, calculadas pela ANEEL [11].

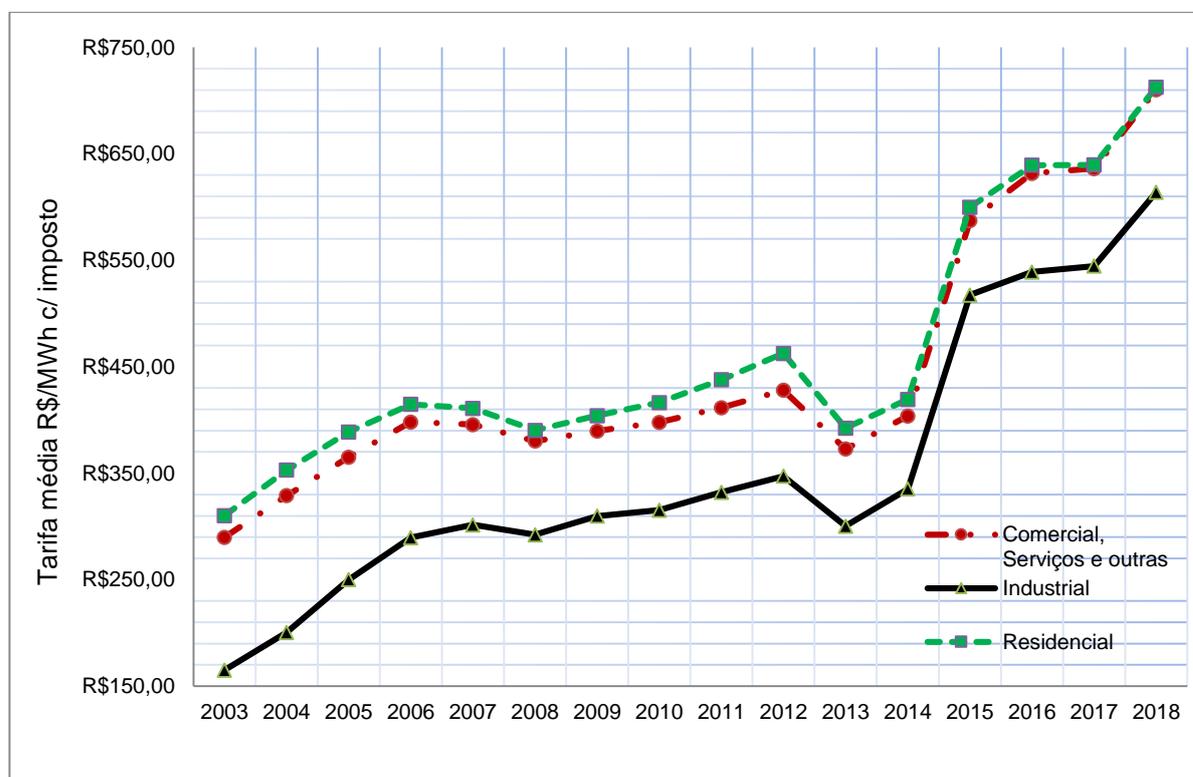


Figura 2.3: Histórico da tarifa média cobrada para os consumidores.

Fonte: Adaptado de [11].

A anomalia ocorrida no ano de 2013 e que merece destaque foi uma queda de preço forçada pelo governo com lastro na Medida Provisória (MP) 579, de 11 de setembro de 2012 e, mais tarde sancionada como Lei 12783/2013, a qual alterou de forma abrupta o marco regulatório vigente para o segmento de geração de energia elétrica. O objetivo do governo federal era buscar uma redução média de 20,2% nas tarifas ao consumidor final e deveria ser um ganho à sociedade. Infelizmente, nos anos seguintes, o efeito se inverteu e totalizou uma perda de R\$ 200 bilhões para o setor elétrico. Segundo Faria [12], os principais fatores causadores do prejuízo foram: metodologia de remuneração inadequada das usinas de geração de energia elétrica, a crise hídrica e a falta de diálogo entre governo e agentes executores.

O crescimento vegetativo da população ocasiona aumentos naturais de demanda de produtos e serviços para suprir as necessidades básicas de sobrevivência e de conforto da vida moderna. A energia elétrica é um produto que agrega o conforto e sobrevivência dependendo da situação e cenários onde ela se encontra.

Os investimentos em novos geradores de energia elétrica são calculados, basicamente, sobre:

- a) Custo de investimentos: são todo capital a ser utilizado para obras civis (barragens, vertedouro, diques, casa de força, estradas), equipamentos eletromecânicos (turbinas, geradores, pontes rolantes) e ações socioambientais (aquisição de terrenos, realocações da população, indenizações, construção de vilarejos);
- b) Custos operacionais: são despesas causadas pelo funcionamento das usinas elétricas que são subdivididos em custos fixos e variáveis na sua operação e manutenção. Para a operação da usina os custos fixos incluem: despesas com pessoal, material de consumo, custeio dos equipamentos necessários a operação normal, sistema de transmissão associados entre outros. Os custos variáveis na operação incluem: insumo para produção de energia elétrica, pagamento de terceiros para alguma operação etc. Para a manutenção os custos fixos incluem-se: estoque de peças de reposição mais relevantes, materiais de consumo necessárias para o trabalho de manutenção, folha de pagamentos da equipe etc. Os custos variáveis na manutenção incluem contratação de empresas especializadas para serviços específicos de manutenção, horas extras da equipe, etc. As despesas com seguro das instalações também são contempladas nos custos operacionais como compensação financeira pela utilização de recursos hídricos (CFURH) criada pela lei 9990 de 1989, que cobra um percentual monetário conforme quantidade de energia efetivamente gerada. Segundo a EPE [13], para outras fontes de geração de energia elétrica também existem estudos referente ao seguro das instalações.

- c) Custo de combustíveis: são aplicadas para as usinas que utilizam insumos para a produção de energia elétrica como: urânio, carvão mineral, gás natural, óleo diesel entre outros cujos valores seguem a valorização dos commodities nos mercados mundiais. Por enquanto, raios solares, ventos e águas não são valorados.
- d) Custo de descomissionamento: são custos que envolvem a descontaminação para finalizar a operação de uma usina nuclear.

Os investidores irão aplicar nas opções de melhor sustentabilidade que tenham boa governança ambiental, social e corporativa (ESG) e de rentabilidade, levando em conta o tempo de construção, potência típica e impactos ambientais conforme os itens descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Parâmetros de custos de usinas de geração de energia elétrica.

| Fatores                                      | Tipos de usinas            |                                  |                     |                |                 |           |                         |  |  |
|--|----------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------|-------------------------|--|--|
|  | Hidro elétrica longo prazo | Solar foto voltaica centralizada | Solar helio térmica | Eólica onshore | Eólica offshore | Nuclear   | Termo elétrica a carvão | Termo elétrica a gás natural ciclo simples | Termo elétrica a gás natural ciclo combinado |
| Custo de investimento (US\$/kW)              | 1352 ~ 2661                | 800 ~ 1300                       | 5600                | 1200 ~ 1600    | 4200 ~ 5000     | 5000      | 2500                    | 350 ~ 1500                                 | 600 ~ 1600                                   |
| Custo de operação e manutenção (US\$/kW/Ano) | 30 ~ 50                    | 20                               | 70                  | 100            | 210             | 110       | 100                     | 12,30 ~ 39,90                              | 9,3 ~ 35,05                                  |
| Potência típica (MW)                         | Acima de 300               | 25                               | 100                 | 100            | 400             | 1000      | até 1000                | 1000                                       | 1000   |
| Vida útil (anos)                             | 30                         | 20                               | 20                  | 20             | 20              | 60        | 25                      | 20   | 20   |
| Tempo de construção (anos)                   | 5                          | 1                                | 1                   | 2              | 2               | 7         | 4 ~ 5                   | 4 ~ 5                                      | 4 ~ 5  |
| Fator de capacidade média                    | 55                         | 30                               | 41                  | 40 ~ 47        | 50 ~ 60         | 85        | 70                      | 10 ~ 20                                    | 20 ~ 60                                      |
| Custo do combustível (US\$/MWh)              | -                          | -                                | -                   | -              | -               | 9         | 85                      | 45 ~ 70                                    | 30 ~ 45                                      |
| Custo de descomissionamento (US\$/kW)        | -                          | -                                | -                   | -              | -               | 200 ~ 500 | -                       | -  | -  |
| Eficiência (%)                               | -                          | -                                | -                   | -              | -               | 33        | 35                      | 35 ~ 42                                    | 52 ~ 60                                      |

Fonte: [14].

A grande questão é fornecer à população energia elétrica de forma constante, com qualidade, preço acessível e pronto para o uso dia e noite. Em uma análise prévia de custo e de tempo de construção, observa-se que a energia solar por placas fotovoltaicas tem o retorno rápido e de custo menor seguida da eólica onshore e da hidrelétrica [14]. Por esta lógica, a análise realizada em 2017 pela Bloomberg New Energy Finance (BNEF) mostra que os

investimentos na área de novas fontes e tecnologias de geração de energia serão de US\$ 10,4 trilhões ao redor do mundo e que deste montante, US\$ 7,4 trilhões (72%) serão aplicadas na parte solar e eólica. Para otimização de tamanho e elevação do armazenamento carga das baterias, principalmente, de íon de Lítio (Li), prevê-se que o mercado alcance o montante de US\$ 239 bilhões até 2040 [15].

## 2.2 Histórico

Desde eras remotas, a relação entre o magnetismo e a eletricidade sempre existiu. Os estudos relativos a isto que se iniciaram nesta época, paralelamente com Hans Christian Oersted e o italiano Gian Domenico Romagnosi (diz-se que até antes de Oersted). O experimento consistia em aproximar a bússola a um fio energizado e observar o movimento de sua agulha.

Em 1831, na Inglaterra, Michael Faraday descobre o gerador elementar que consistia de um ímã que se movimentava dentro de uma espira, ou vice-versa, provocando o aparecimento de uma força eletromotriz (f.e.m) indicada num galvanômetro [16]. Paralelamente, o americano Joseph Henry usando o mesmo princípio de Faraday, para melhorar o desempenho dos eletroímãs, fez o isolamento do fio no enrolamento para permitir maior densidade de espiras e, com isso, descobriu o fenômeno da auto-indutância, que é a propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente [17]. Essa indução magnética teve uma imediata aplicação na geração de correntes elétricas conforme mostrada na Figura 2.4.

O estudo sobre eletromagnetismo teve um grande avanço por meio da publicação do tratado sobre eletricidade e magnetismo formulado por James Clerk Maxwell, em 1873, onde a onda possui vetores de campos elétricos e magnéticos perpendiculares à direção de sua propagação [18].

Nikola Tesla descobriu o campo magnético rotativo em 1882, a base de quase todos os dispositivos que usam a corrente alternada. Tesla utilizou o princípio da rotação do campo magnético para a construção do motor de corrente alternada, que elimina a necessidade de barras de comutação do motor de corrente contínua [19]. Com o mesmo princípio, Tesla adaptou o sistema polifásico para a geração, transmissão, distribuição e utilização de energia elétrica.

Os experimentos realizados por Heinrich Hertz comprovaram as teorias de Maxwell, de que as ondas de rádio e as da luz são ondas eletromagnéticas, diferenciando-se apenas em sua frequência.

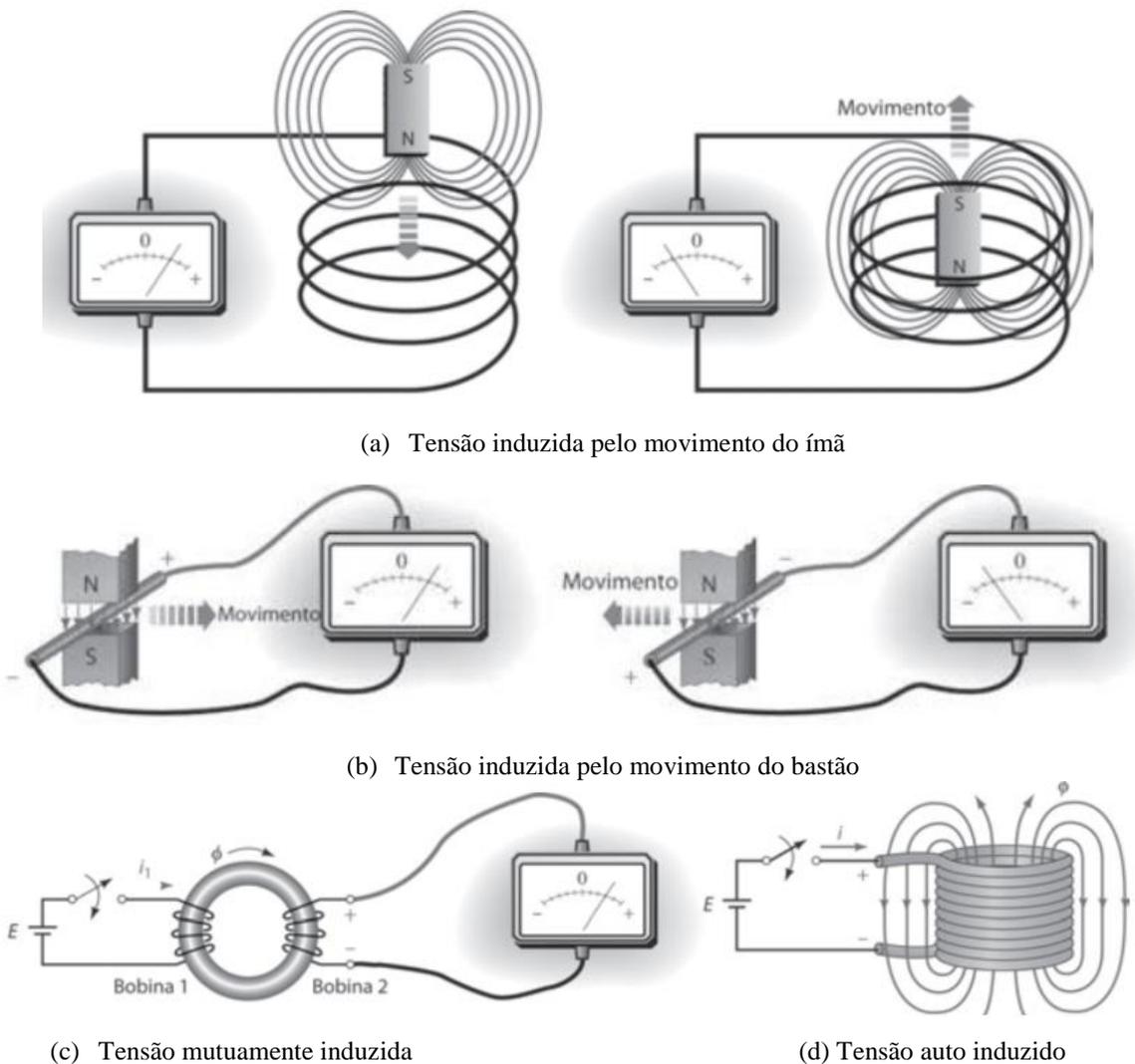


Figura 2.4: Ilustração dos experimentos de Faraday.  
Fonte: [17].

## 2.3 Princípio de funcionamento

### 2.3.1 Geradores Síncronos

Os geradores síncronos são os mais utilizados para geração de energia elétrica por apresentar qualidade superior pela facilidade de controlar a potência gerada em tensão e frequência. As características peculiares em fornecer alto torque, velocidade constante nas variações de carga e baixo custo de manutenção proporcionam inúmeras vantagens econômicas e operacionais ao usuário. O esquema da Figura 2.5 mostra um gerador síncrono aplicado numa usina hidrelétrica [20].

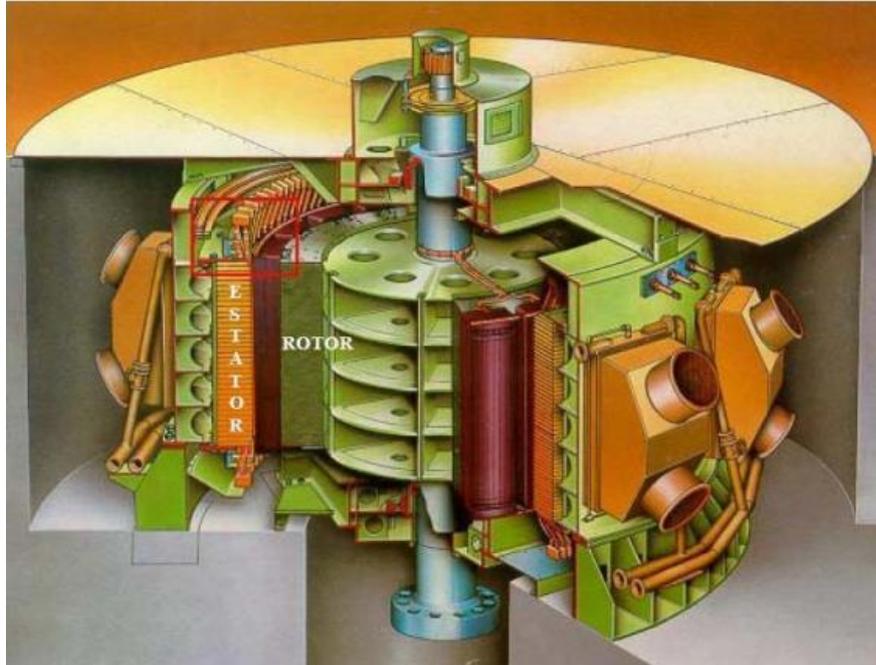


Figura 2.5: Corte de um gerador síncrono de uma usina hidrelétrica.  
Fonte: [21].

Uma máquina síncrona de 2 polos necessita girar a 3600 RPM para gerar uma tensão a uma frequência de 60 Hz. A designação de máquina síncrona é, devido à frequência elétrica estar sincronizada com a velocidade mecânica conforme mostra a Figura 2.6.

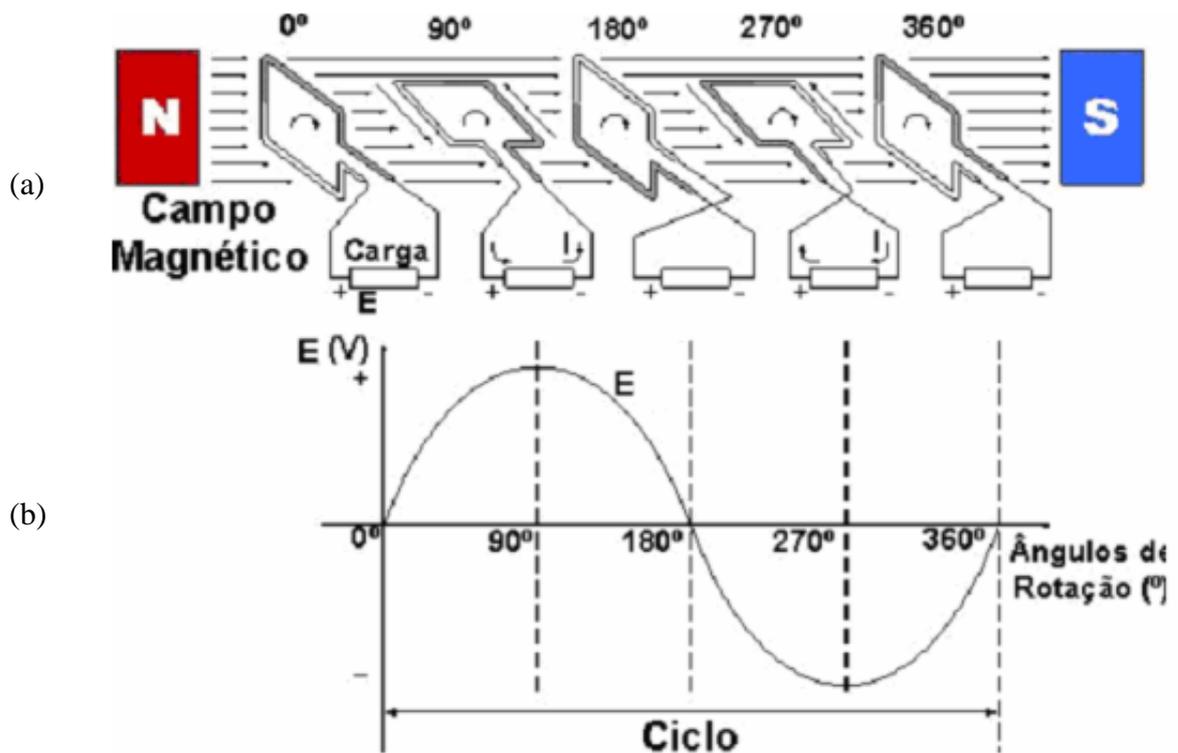


Figura 2.6: (a) distribuição espacial da indução magnética; (b) onda elétrica do gerador.  
Fonte: [21].

A distribuição radial da indução magnética de entreferro é mostrada na Figura 2.6 (a) em função do ângulo espacial ao longo da periferia do entreferro. A tensão resultante na bobina, conforme a Figura 2.6 (b), é uma função do tempo, tendo forma de onda senoidal. A tensão da bobina passa por um ciclo completo de valores para cada rotação da máquina de 2 polos.

A Tabela 2.3 mostra a rotação em RPM a ser gerada para produzir uma tensão a uma frequência 50 Hz e 60 Hz e alguns exemplos de unidade geradora de energia elétrica na frequência de 60 Hz.

Para entender os fenômenos que ocorrem numa máquina que possui mais de dois polos, basta concentrar a atenção sobre um único par de polos e reconhecer que as mesmas condições elétricas, magnéticas e mecânicas estão presentes em todos os outros pares de polos. Por esta razão é conveniente expressar ângulos em graus elétricos ou radianos elétricos em lugar de falar em graus geométricos ou mecânicos. Assim, a distância entre os eixos magnéticos de um polo N e um polo S é igual a  $180^\circ$  elétricos ou  $\pi$  radianos elétricos, independente do número de polos da máquina. A distribuição da indução magnética numa máquina de P polos correspondente a um par de polos é igual a  $360^\circ$  elétricos ou radianos elétricos.

Tabela 2.3: Rotações necessárias para respectivos número de polos.

| Frequência: 50 Hz |         | Frequência: 60 Hz |             | Exemplo  |
|-------------------|---------|-------------------|-------------|--|
| Nº de polos       | n [RPM] | n [RPM]           | Nº de polos | Unidade Geradora 60 Hz   |
| 2                 | 3000    | 3600              | 2           | UNE ANGRA II, UGE Araucária, geradores de usinas nucleares e termelétricas |
| 4                 | 1500    | 1800              | 4           | Geradores eólicos, geradores a vapor (carvão, biomassa)                    |
| 6                 | 1000    | 1200              | 6           | Geradores eólicos  |
| 14                | 428,57  | 514,29            | 14          | Geradores a diesel   |
| 36                | 166,67  | 200               | 36          | UHE Churchill Falls, EUA   |
| 56                | 107,14  | 128,57            | 56          | UHE Furnas, Brasil   |
| 72                | 83,33   | 100               | 72          | UHE Marimbondo, Brasil   |
| 78                | 76,92   | 92,31             | 78          | UHE Itaipu, seção brasileira   |
| 88                | 68,18   | 81,82             | 88          | UHE Luiz Gonzaga, Brasil   |
| 120               | 50      | 60                | 120         | UHE Cachoeira Dourada, Brasil  |

Fonte: [22].

Quanto à topologia do circuito magnético, a máquina síncrona é classificada em:

- Polos salientes;
- Polos lisos.

### 2.3.1.1 Polos salientes

A construção de polos salientes é mais indicada para os geradores hidroelétricos de até 800MW de potência, pois as turbinas hidráulicas funcionam com velocidades relativamente baixas (75 a 150 RPM) e um número relativamente grande de polos (48 a 96 polos) é necessário para produzir a frequência desejada. Além disso, existem vantagens mecânicas com esta utilização. A Figura 2.7 mostra um esquema de um rotor com polos salientes de uma máquina síncrona.

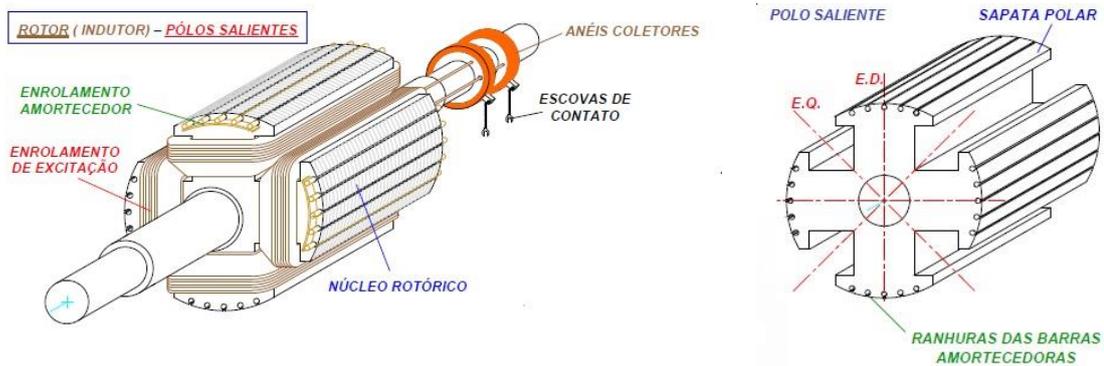


Figura 2.7: Esquema ilustrativo de polos salientes.  
Fonte: [23].

### 2.3.1.2 Polos lisos

A construção de polos lisos é mais indicada para as turbinas de vapor, turbinas a gás e turbo geradores de até 2000 MW de potência, pois, funcionam com velocidades relativamente altas (1800 a 3600 RPM), e um número pequeno de polos (4 a 8 polos) é necessário para produzir a frequência desejada. A Figura 2.8 mostra um esquema de um rotor com polos lisos de uma máquina síncrona.

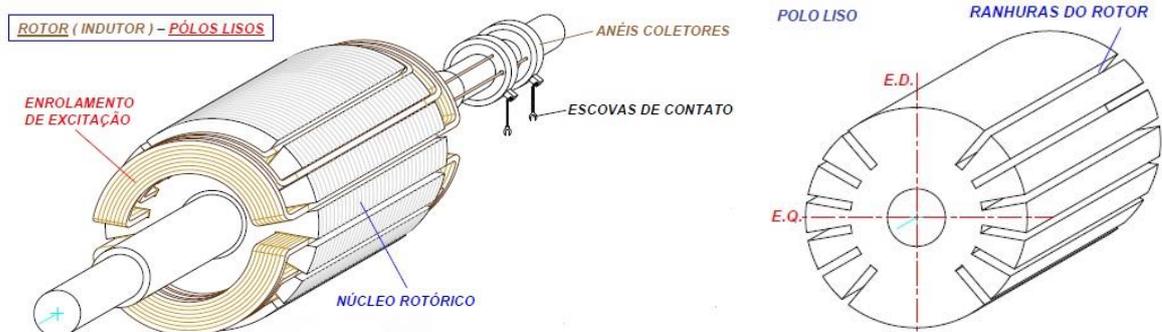


Figura 2.8: Esquema ilustrativo de polos lisos.  
Fonte: [23].

## 2.3.2 Geradores de Indução

O princípio de funcionamento da máquina de indução ou máquina assíncrona ocorre quando o enrolamento do estator produz um campo magnético girante que atravessa as espiras do rotor, induzindo nelas forças eletromotrizes. Seguindo este princípio, o uso de regulador de velocidade e de tensão pode ser dispensado. Dessa forma, pode-se considerar a máquina de indução como um transformador generalizado, devido à transformação de potência elétrica entre estator e rotor, com alteração de frequência e variação no fluxo de potência mecânica. A máquina de indução é muito utilizada no setor de conversão de frequência [24].

O gerador de indução elementar não é utilizado para a maioria das aplicações devido ao baixo desempenho que ela proporciona. Outro agravante, é o fato do gerador de indução isolado não conseguir produzir uma tensão no terminal pela inexistência de fonte de potência reativa para desenvolver o campo magnético [25].

A curva de uma máquina de indução é mostrada na Figura 2.9. Ela funciona como gerador se seus terminais de estator fossem conectados a uma fonte de tensão e seu rotor for acionado por uma máquina motriz acima da velocidade síncrona, ou seja, escorregamento ( $s$ ) negativo. A fonte de tensão determina que o campo girante do gerador de indução ficasse energizado, seguida por uma transferência da potência real para trazer o gerador a sua velocidade operação.

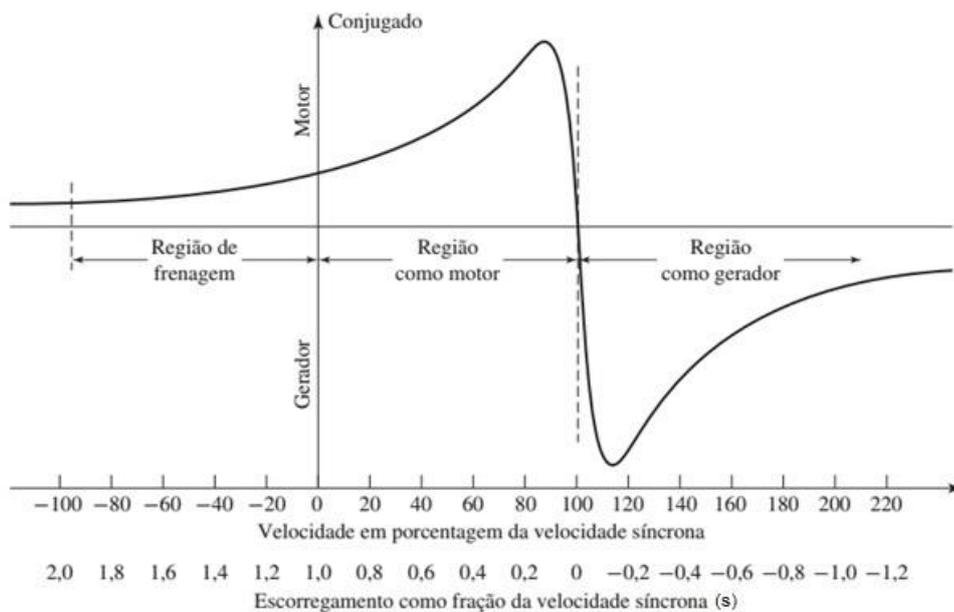


Figura 2.9: Curva de conjugado em relação ao escorregamento de uma máquina de indução, mostrando as regiões de frenagem e de funcionamento como motor e gerador.

Fonte: [24].

Um exemplo de aplicação seria em redes distribuídas de energia eólica. A turbina eólica de velocidade constante seria conectada ao gerador de indução por meio do eixo do rotor, que por sua vez, este converteria a energia eólica em energia elétrica a ser enviada ao sistema elétrico. O gerador de indução do tipo rotor gaiola de esquilo é, comumente, utilizado como aerogeradores, devido à simplicidade e robustez da sua construção, ao baixo custo de manutenção, à falta de exigência de sincronismo e ao amortecimento da força magnetomotriz (fmm) do rotor e do estator [25].

### 2.3.3 Geradores Termoelétricos

O gerador termoelétrico, mostrado na Figura 2.10, pode ser movido por duas fontes de energia:

- Não-renováveis: carvão mineral, gás natural, óleo diesel ou outros derivados do petróleo;
- Renováveis: bagaço da cana, palha de arroz, carvão vegetal, biomassa proveniente da avicultura ou suinocultura.

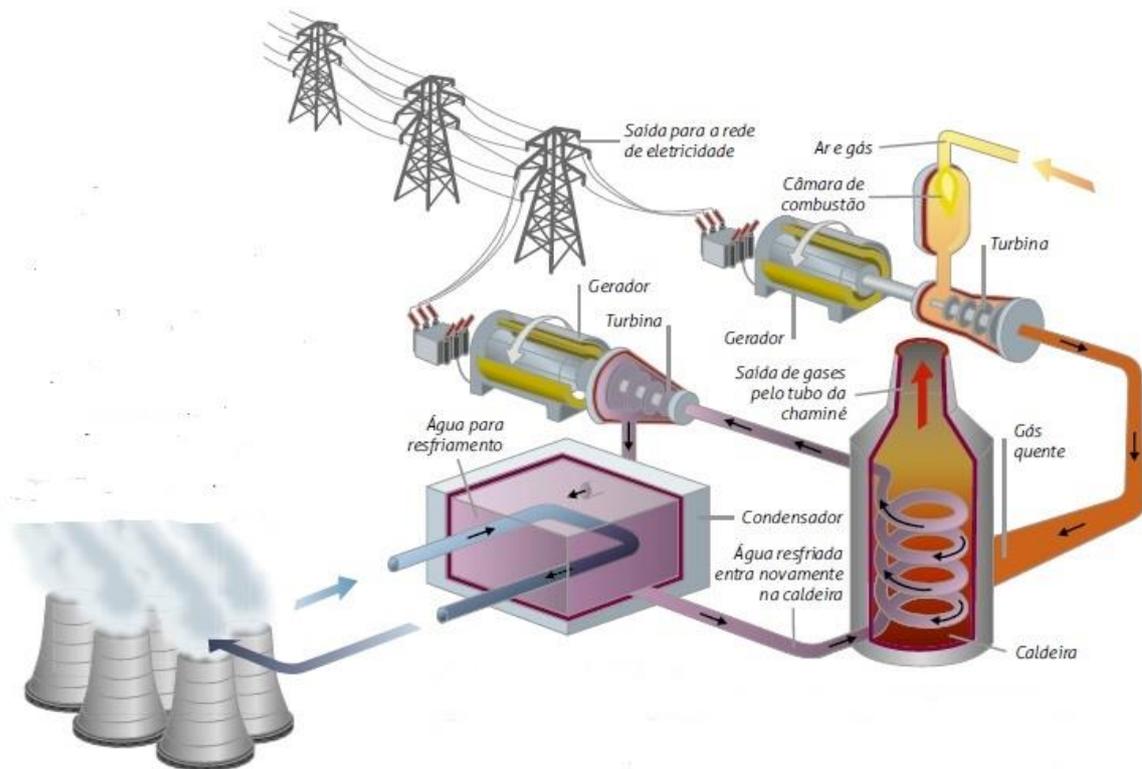


Figura 2.10: Ilustrativo de uma turbina a gás de ciclo combinado.  
Fonte: [26].

O processo de funcionamento de geradores termoelétricos está na conversão de energia térmica em energia mecânica que, por sua vez, é convertida em energia elétrica por meio de processos eletromagnéticos [27].

A eficiência de plantas tradicionais de energia a vapor, utilizando combustíveis fósseis, raramente é superior a 35%. Para a melhoria da eficiência acima de 50%, estudos foram realizados para aperfeiçoar o projeto de equipamentos e combinações de equipamentos com geração de energia dual: utilização de turbinas a gás de tecnologia avançada e ciclos de potência a vapor operando com a recuperação de calor de gases de exaustão de turbinas [28].

A utilização de ciclos térmicos tem-se mostrado muito relevante no setor de energia nuclear. A energia nuclear é uma energia extraída a partir do núcleo atômico por meio de reações nucleares controladas, e as usinas nucleares têm sido usadas para geração de energia elétrica a nível comercial desde a década de 1950. Parece irônico que as fontes de energia nuclear (fissão ou fusão), complexas e de alta tecnologia, sirvam apenas para aquecer a água, com a eletricidade sendo gerada há décadas por tecnologia antiga de turbina a vapor [29].

### 2.3.3.1 Reator de Fissão Nuclear

O funcionamento da maioria dos reatores a fissão nuclear é projetado para capturar a energia lançada pela fissão do Urânio-235 numa reação de cadeia controlada conforme ilustrado na Figura 2.11. A maioria desta energia aparece como calor que é utilizado para elevar o vapor. As fissões são iniciadas por nêutrons produzidos por fissões anteriores, o processo não é espontâneo.

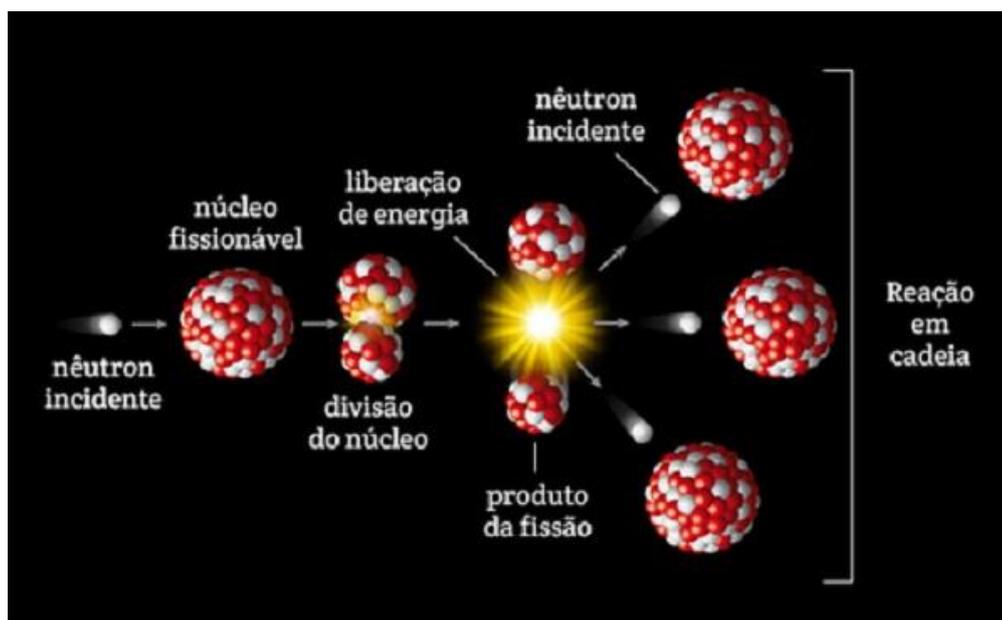


Figura 2.11: Ilustração do fenômeno de fissão nuclear.  
Fonte: [30].

Conforme mostra a Figura 2.12, a maioria dos reatores é composta por:

- Núcleo do reator: localizado no centro do reator, onde a reação nuclear toma o lugar. Ele contém o material físsil na forma de longas varetas de combustível que são dispostas verticalmente no núcleo.
- Reator de vaso de pressão: O vaso de pressão, usualmente feito a partir do aço, contém o núcleo do reator, as varetas de controle, o moderador de dispersão e o líquido de arrefecimento.
- Combustível da fissão: basicamente os materiais de fissão são isótopos particulares de urânio e plutônio.

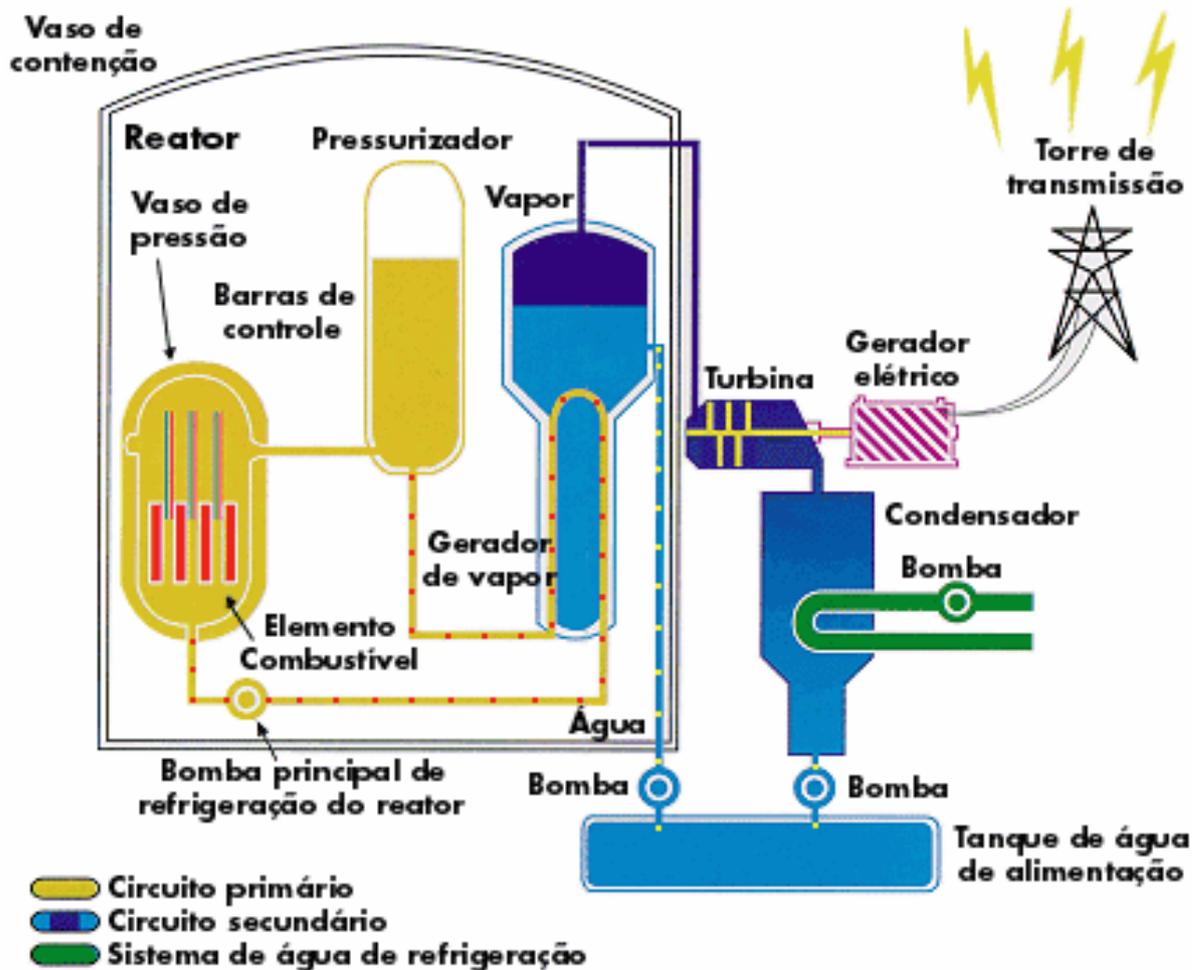


Figura 2.12: Esquema básico de um reator por fissão nuclear.  
Fonte: [31].

### 2.3.3.2 Reator de Fusão Nuclear

O principal desafio deste reator é recriar um ambiente solar, cuja temperatura pode chegar a 15 milhões de graus Celsius, na Terra. A reação é complicada, porém, o início que desencadeia uma série de reações é a fusão de 2 átomos com núcleo atômico mais elementar – núcleo de hidrogênio, seguido pela fusão dos seus produtos das reações iniciais para já criar um núcleo atômico mais complexo, numa cadeia de reações conhecidas como a cadeia p-p (próton-próton) [29]. Portanto, a fusão nuclear consiste na junção de átomos que possuem núcleos leves e dessa junção resulta um átomo com núcleo mais pesado. Considera-se uma temperatura de um ambiente solar onde os isótopos de hidrogênio (H), o deutério ( $H_2$ ) e o trítio ( $H_3$ ) se fundem. Esta fusão resulta na liberação de uma grande quantidade de energia e formam núcleos de Hélio (He) [31]. A Figura 2.13 mostra o princípio da fusão nuclear.

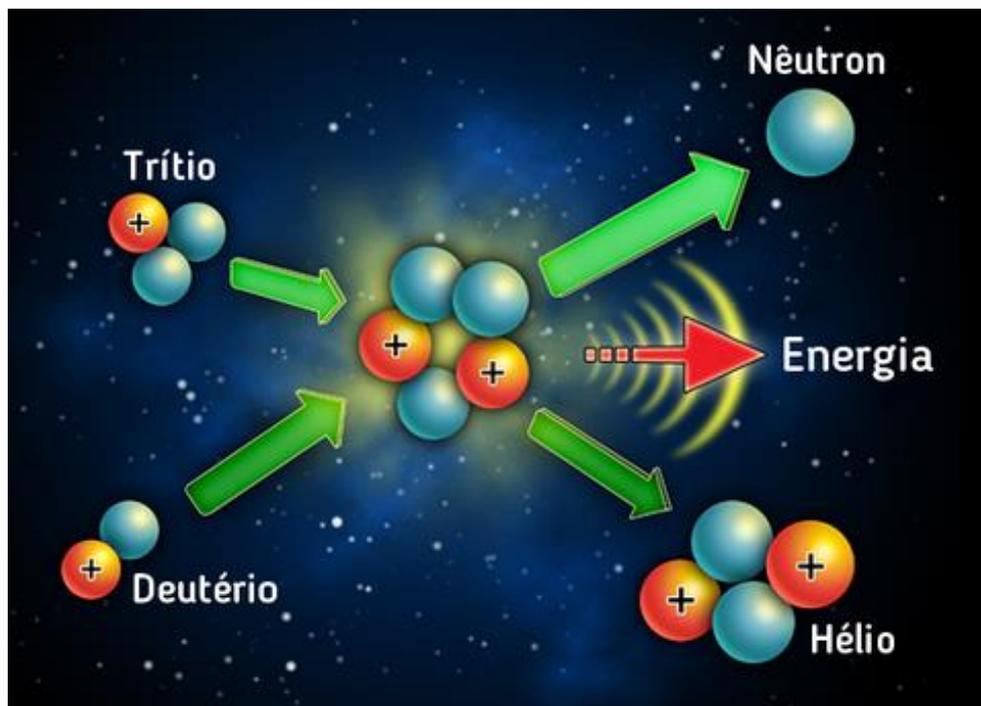


Figura 2.13: Ilustração do princípio da fusão nuclear.  
Fonte: [32].

Passado mais de meio século de muito estudo e pesquisa na tentativa de recriar um ambiente solar na Terra, todos os projetos de fusão nuclear para produção de energia elétrica em escala comercial foram fracassados, sendo o único que obteve sucesso foi uma bomba de hidrogênio. Apesar de que na demonstração em pequena escala, verificou-se que a teoria da fusão nuclear funciona e é viável. A Figura 2.14 mostra o esquema de um reator de fusão nuclear.

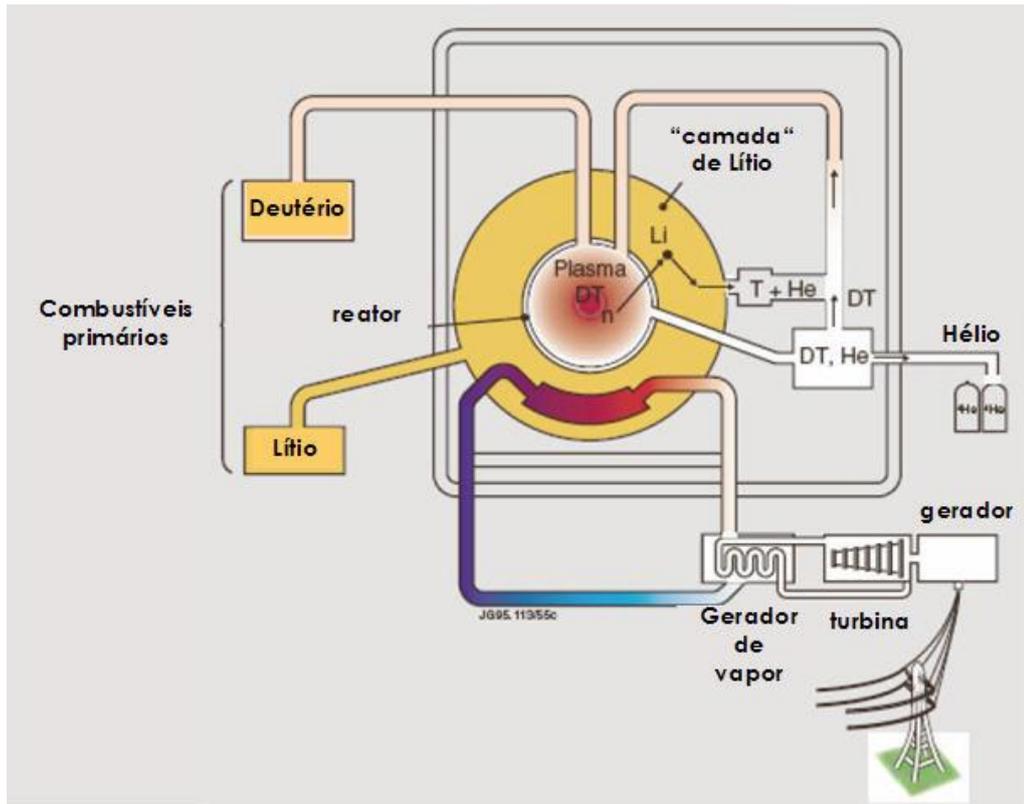


Figura 2.14: Esquema didático para um reator de fusão nuclear.

Fonte: [33].

Os maiores países consumidores de energia elétrica veem a fusão nuclear como uma fonte segura e de fornecimento longínquo. As vantagens mais relevantes da fusão incluem: nenhuma produção de gases de efeito estufa durante o processo, nenhuma produção de lixo atômico de vida longa, conseguindo reciclar todo o lixo dentro de 100 anos, processo seguro e fornecimento quase ilimitado de combustível. A expectativa é de que este tipo de geração pode representar 20% da produção de energia elétrica em 2100 [34].

### 2.3.4 Geradores Eólicos

Os moinhos de vento foram os primeiros precursores dos atuais aerogeradores utilizando o vento para moagem de grãos ou elevação de água. Levantamentos históricos mostram que os moinhos de vento de eixo vertical funcionavam nas fronteiras da antiga Pérsia, atual Irã por volta de 200 a.C. Estima-se que havia 50 mil moinhos de vento na Europa ocidental entre os anos de 1200 e 1850, principalmente na Alemanha, Inglaterra e Holanda. Na função de bombeamento de água, os moinhos tiveram uma evolução entre 1850 e 1930, principalmente nos EUA, onde havia 6 milhões deles. O uso como geradores elétricos acompanhou da eletricidade nos finais do ano de 1800, nos EUA e Dinamarca [27].

Após um longo período de estagnação, a energia eólica retomou o crescimento graças às crises do petróleo ocorridas na década de 1970, quando governos apresentaram incentivos para fontes alternativas de energia elétrica e diminuição da dependência de combustíveis fósseis.

Pode-se imaginar a turbina dos geradores eólicos como um grande cata-vento conectado ao eixo, que, por sua vez encontra-se acoplado a um conjunto de engrenagens que aciona um gerador de eletricidade, conforme mostrado na Figura 2.15.

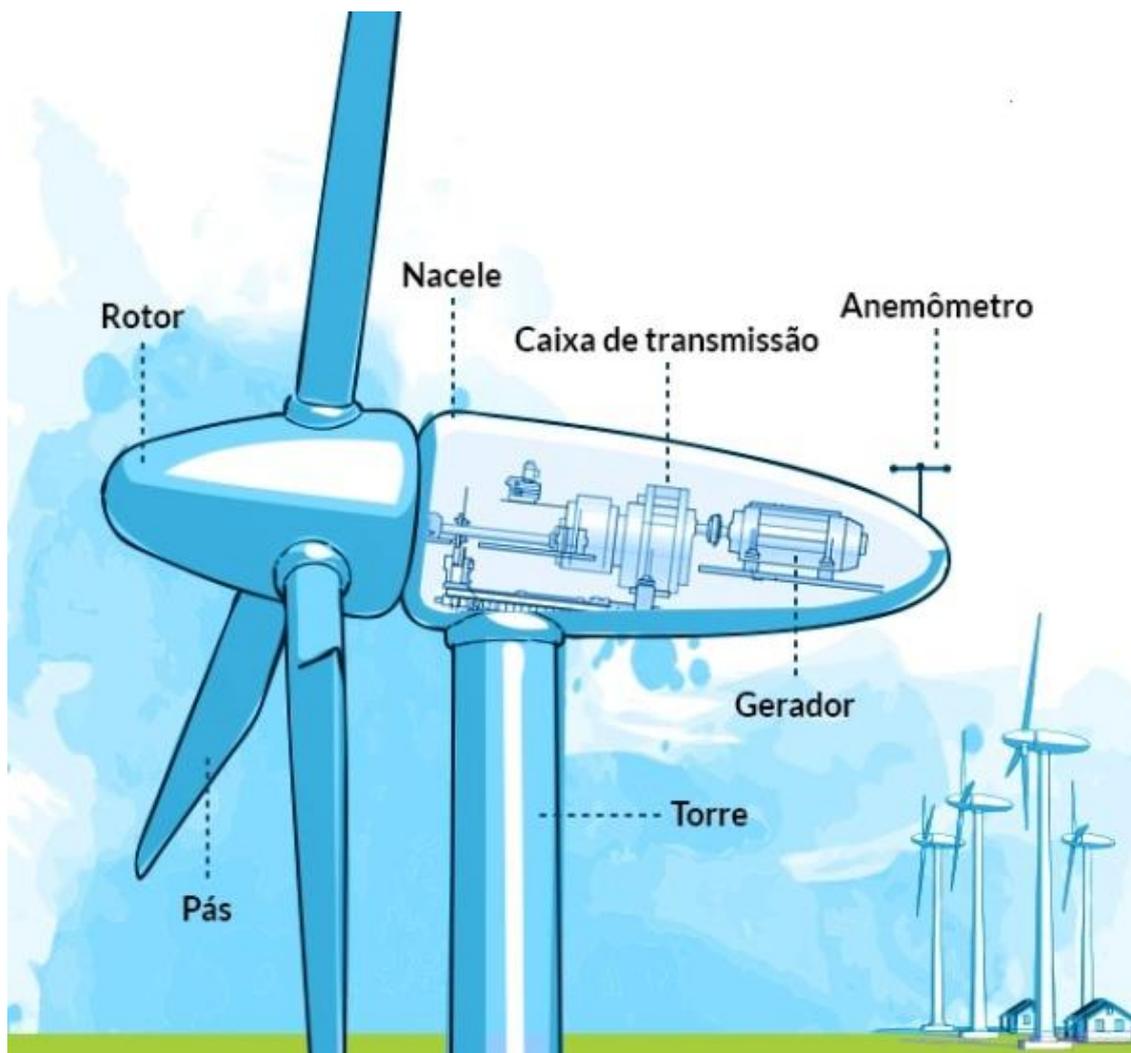


Figura 2.15: Componentes de um gerador eólico.  
Fonte: [35].

O princípio de operação trata-se de transformar energia mecânica em energia elétrica, cuja fonte primária e não poluente é o vento.

### 2.3.5 Geradores Fotovoltaicos

Os geradores fotovoltaicos vêm conquistando mercados nos últimos anos com a melhora da tecnologia de captação da fonte solar e redução de custo com aumento de escala.

O desenvolvimento das células fotovoltaicas pode ser dividido em quatro fases [27]:

Fase 1) Antes de 1970: Células fotovoltaicas voltadas às aplicações espaciais;

Fase 2) Década de 1970: Instalações em locais remotos de células fotovoltaicas em conjunto com baterias;

Fase 3) Final da década de 1990: Formação da paridade tarifária na geração distribuída, em consequência da geração fotovoltaica conectada à rede em conjunto com o pagamento de tarifas-prêmio pela energia gerada por esses sistemas;

Fase 4) A partir de 2020: Energia fotovoltaica tornando-se competitiva com fontes convencionais de energia na geração centralizada.

A geração fotovoltaica se mostra uma tecnologia robusta para o atendimento elétrico, como evidenciado pelos históricos de operação por mais de 35 anos. O desafio da integração por meio da inserção em massa de geração fotovoltaica ou eólica torna-se cada vez mais evidente. A necessidade de manter o equilíbrio entre oferta e demanda cobra ao operador a administrar cenários com súbitas variações das fontes intermitentes.

Observa-se, pela Figura 2.16, que regiões próximas à linha do equador apresentam menor variação da irradiação no decorrer do ano, no entanto, locais de grandes latitudes apresentam irradiação maior no verão e menor no inverno. Por exemplo, a irradiação anual na Holanda é da ordem de 992 kWh/m<sup>2</sup> enquanto na Tanzânia é em torno de 2026 kWh/m<sup>2</sup> [36]. Este fenômeno denomina-se efeito cosseno.

O elemento fundamental da geração fotovoltaica constitui-se da célula fotovoltaica, responsável por 60% dos custos de um painel solar e disponibilizada em módulos para oferecer maior proteção e robustez às células. Os materiais mais utilizados na fabricação das células solares são os semicondutores que estão distribuídos em silício cristalino, correspondendo a 89%, silício amorfo, com 10% da produção, telureto de cádmio, com 0,5% e uma parcela pequena dividida em índio, cobre e disseleneto e arseneto de gálio [36]. Uma ilustração do módulo fotovoltaico é mostrada na Figura 2.17.

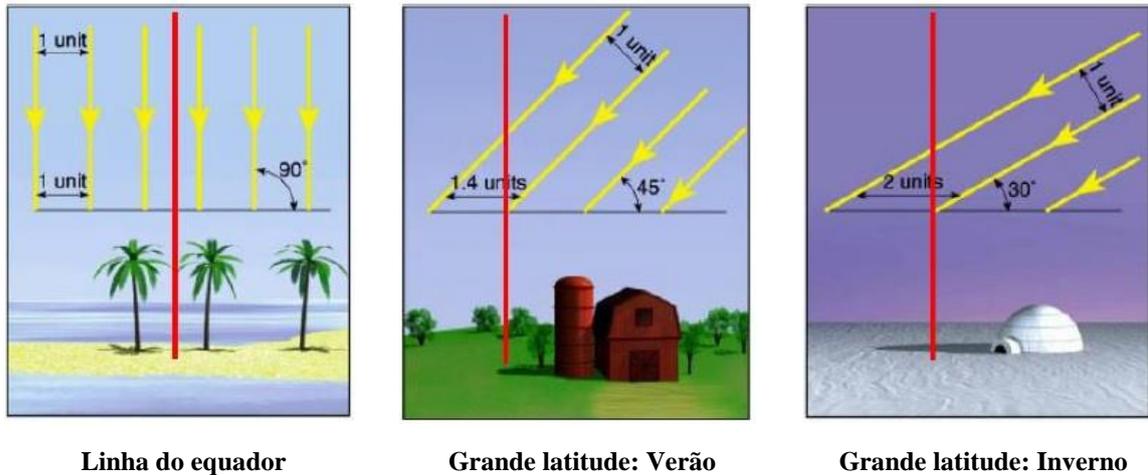


Figura 2.16: Ilustração sobre incidência solar em diferentes áreas.

Fonte: [27].

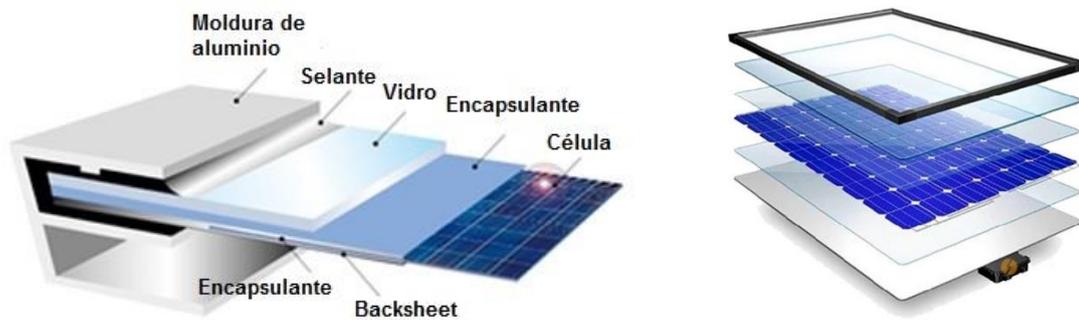


Figura 2.17: Composição do módulo fotovoltaico.

Fonte: [37].

### 2.3.6 Geradores Químicos

As células de combustível são equipamentos estáticos que convertem a energia química contida no combustível diretamente em energia elétrica emitindo baixo nível de ruído e danos ao meio ambiente conforme visto pela Figura 2.18 [38], [39].

As características fundamentais de projeto de uma célula combustível são [40]:

- O composto do eletrólito e seu material de origem;
- O uso de hidrogênio como combustível mais comum e adequado;
- O catalisador do ânodo possui carga negativa (-), composta de platina, tem a função de decompor o combustível em elétrons e íons;
- O catalisador do cátodo possui carga positiva (+), composta de níquel, tem a função de descarregar os íons e transforma em água;

- A membrana serve para isolamento elétrico concomitantemente elevada admitância à passagem do íons  $H^+$ ;
- A placa de campo de canais de fluxo que transporta a massa dos gases reagentes para difusão nos eletrodos até a camada do catalisador.

Atualmente, as células de combustível são aplicadas em geradores elétricos de pequeno porte na ordem de uma dezena de MW, apresentam baixo custo de produção, baixo nível de emissões de poluentes e elevado potencial de desenvolvimento. Por outro lado, as células de combustível necessitam de platina que é um metal caro e raro, apresentam problemas de manuseio, sofrem pressão econômica exercida por parte das indústrias de combustíveis fósseis e problemas para o transporte do hidrogênio [41].

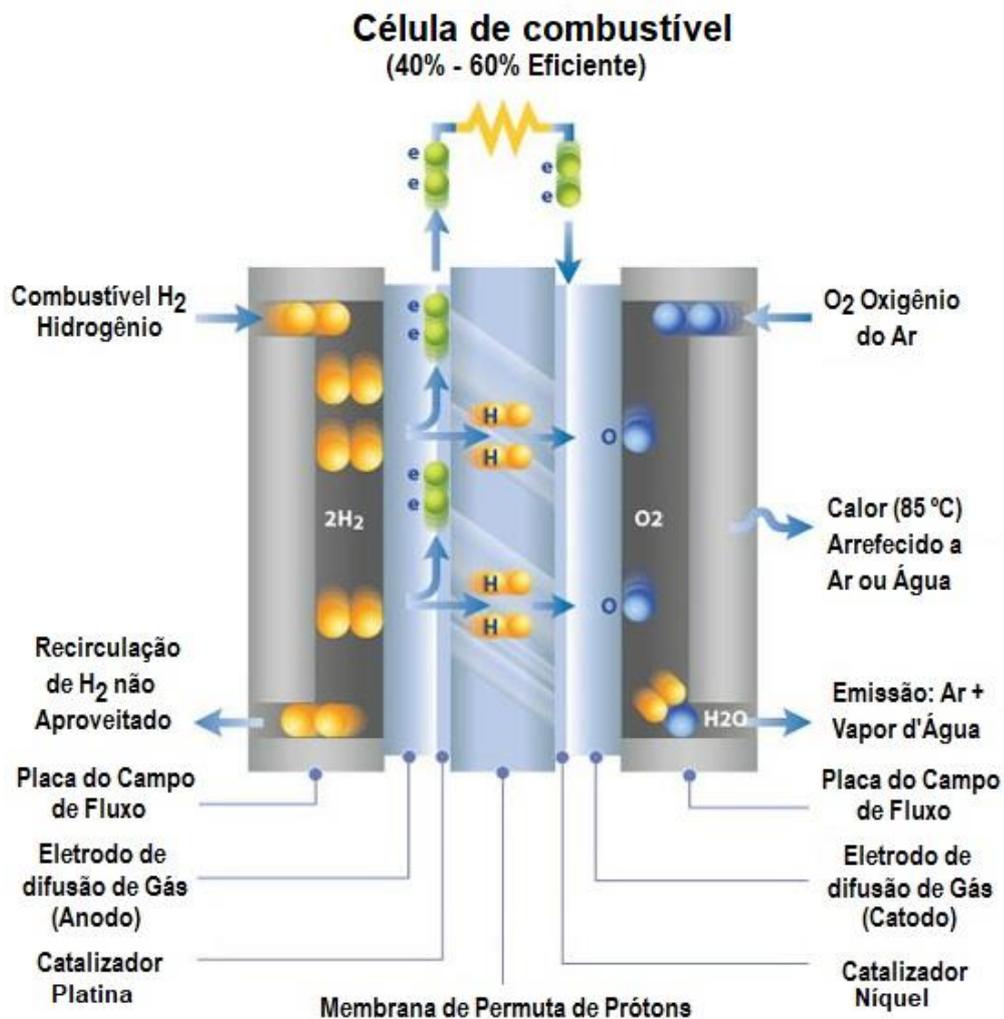


Figura 2.18: Ilustração sobre o funcionamento de uma célula de combustível.  
Fonte: [40].

### 2.3.7 Geradores Magnetohidrodinâmicos

A ideia inicial sobre o princípio de funcionamento dos geradores magnetohidrodinâmicos ou, simplesmente, MHD, se concentrou na região de alta potência pelo conhecimento apenas do gás plasma desde o final do século XIX.

Em 1942, o físico sueco Hannes Alfvén, ganhador do Prêmio Nobel em 1970, foi o primeiro a introduzir o termo sobre o fenômeno MHD. Na definição de Alfvén, a magnetohidrodinâmica é uma combinação de duas ciências bem estabelecidas: a mecânica dos fluidos, que estuda o fluxo de gases e líquidos, e o eletromagnetismo, que desenvolve as relações entre os campos elétricos e magnéticos [42].

O pensamento inicial sobre o fenômeno MHD era de que o fluido no estado líquido ou gasoso, com ionização total ou parcial, ganharia propriedade condutora significativa a somente a alta temperatura. Para se ter uma ideia, o campo magnético na superfície terrestre situa-se entre  $20 \mu\text{T}$  e  $60 \mu\text{T}$ , para equipamentos de ressonância magnética aplicada em humanos encontra-se na região entre  $0,5 \text{ T}$  e  $2,0 \text{ T}$  e em laboratórios consegue-se, normalmente, um campo magnético na faixa  $10 \text{ T}$  com o máximo valor obtido foi de até  $1200 \text{ T}$  [43].

Neste cenário, o fluido condutor impulsionado por bomba peristáltica se movimenta dentro de uma tubulação sob um campo magnético criando um campo elétrico induzido neste fluido cuja magnitude é igual ao produto da velocidade do fluido pela componente perpendicular do campo magnético em direção ao movimento. Considerando que este campo elétrico seja uniforme, as correntes variarão internamente no fluido e serão captadas por bobinas envolvidas na tubulação [44].

O gerador elétrico utilizando o fenômeno MHD converte diretamente a entalpia do gás dentro da energia elétrica utilizando o plasma. O processo é conhecido desde 1832, com base nos estudos de Michael Faraday referente à indução eletromagnética. Este estudo consistia que a bobina da armadura girava num campo magnético de um gerador rotacional convencional. O princípio do MHD segue com a mesma analogia; ele utiliza um fluido condutivo que movimenta através do campo magnético.

A geração de energia em MHD é um processo de conversão de energia onde a potência elétrica é extraída num gerador MHD devido à força de Lorenz da corrente de saída e o campo magnético aplicado age para desacelerar o trabalho do plasma; o trabalho do plasma por sua vez perde sua entalpia que é convertida em energia elétrica [45]. Fazendo uma analogia, é pensar o sistema MHD como um gerador elétrico; em vez de possuir fios condutores

(condutores sólidos) utiliza gases ou líquidos ionizados em alta temperatura. A Figura 2.19 mostra o princípio básico de funcionamento de um gerador MHD.

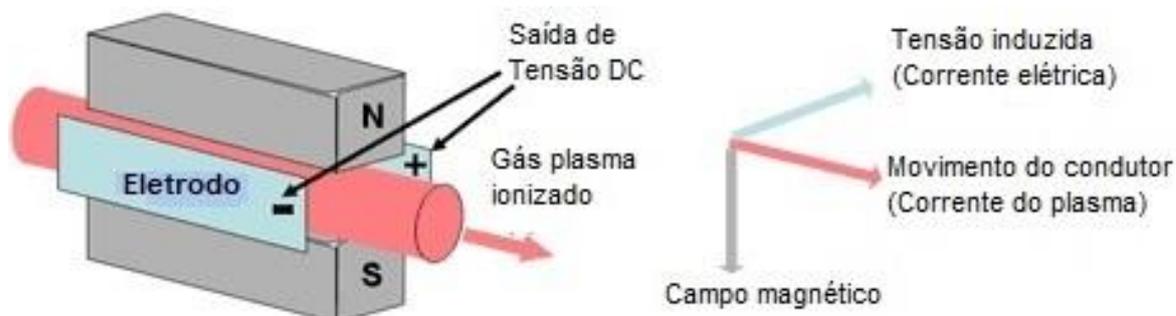


Figura 2.19: Princípio básico do gerador MHD.  
Fonte: [45].

A partir deste princípio, consegue-se utilizar a propriedade do MHD em dispositivos de baixa potência pela combinação de ambos os campos elétricos e magnéticos produzido pela velocidade de um fluido condutor que fora o resultado da dissolução do eletrólito nele [46].

Quanto aos dispositivos de baixa potência, entende-se por pequenos aparelhos eletrônicos portáteis como telefones celulares, smartphones, notebooks, tablets entre outros que permitem ao usuário se comunicar com outras pessoas, entreter com vídeos ou navegar na internet em qualquer lugar que haja a cobertura de sinais e se deslocando livremente. Esses aparelhos, na maioria, operam com baterias recarregáveis e ficam sujeitos à sua recarga e a vida útil. Outra inconveniência é que qualquer carregador de bateria precisa de um cabo de força e uma base ou conector para conectar o aparelho eletrônico à tomada. O carregador pode ser um potencial causador de choque elétrico ao usuário se estiver carregando as baterias numa tomada próximo à água. Além disso, há um risco de perder o cabo de força ou quebrar o pino do plug [47].

A redução de tamanho e aumento da funcionalidade dos aparelhos eletrônicos portáteis estão tornando mais viáveis a integração de objetos utilizados no dia a dia como relógios, óculos, vestuários entre outros. A tendência de redução de tamanho dos aparelhos pode avançar nos projetos de baixo consumo de energia e abrir oportunidade para captação de energia do meio ambiente para alimentar diretamente os circuitos eletrônicos e diminuir o consumo de baterias [36].

Uma das formas de captar a energia por MHD para alimentar pequenos aparelhos eletrônicos de baixo consumo pode ser obtida através do movimento dinâmico e calor térmico do ser humano ou de animais por dispositivo de monitoramento remoto e do meio ambiente.

Por meio deste dispositivo pode-se converter a energia cinética, radiação eletromagnética, radiofrequência, energia luminosa e energia térmica em energia elétrica [36].

Até o momento, a maior parte das pesquisas está relacionada à geração de energia de longa duração através dos movimentos do ser humano que se concentra em atividades cotidianas como a caminhada ou corrida. Neste contexto, a aplicação do MHD para gerar energia ocorreu no desenvolvimento de um microsistema gerador montado num calçado de tênis [48]. A Figura 2.20 ilustra o esquema de um microgerador elétrico que utiliza o conversor MHD acoplado em dois pequenos tanques nos calçados. O princípio de funcionamento é fazer a circulação do fluido magnético dentro dos calçados ao pressionar a parte frontal do pé (LMP I) e o calcanhar (LMP II). Ao pressionar os pés, o fluido magnético passa pela válvula de checagem (I) e atravessa dentro do gerador MHD para gerar a eletricidade e armazenar no calcanhar (LMP II). Ao pressionar o calcanhar (LMP II), o fluido magnético atravessa pela válvula de checagem (II) e passa pelo gerador MHD II para gerar eletricidade e retorna na bolsa da parte frontal. Todo esse movimento ocorre alternadamente.

Quanto às pesquisas sobre a captura de energia pelo meio ambiente, os dispositivos de conversão utilizam o efeito termoelétrico, transdutores piezoelétrico e indução eletromagnética pela sua robustez. O dispositivo de extração de energia pelo meio ambiente por indução eletromagnética em conjunto com fluidos magnéticos vem sendo pesquisado por não requerer partes móveis. A ausência de partes móveis neste tipo de dispositivo e o cuidado em se manter sempre distante da água e do oxigênio evitam que as conexões sofram corrosão.

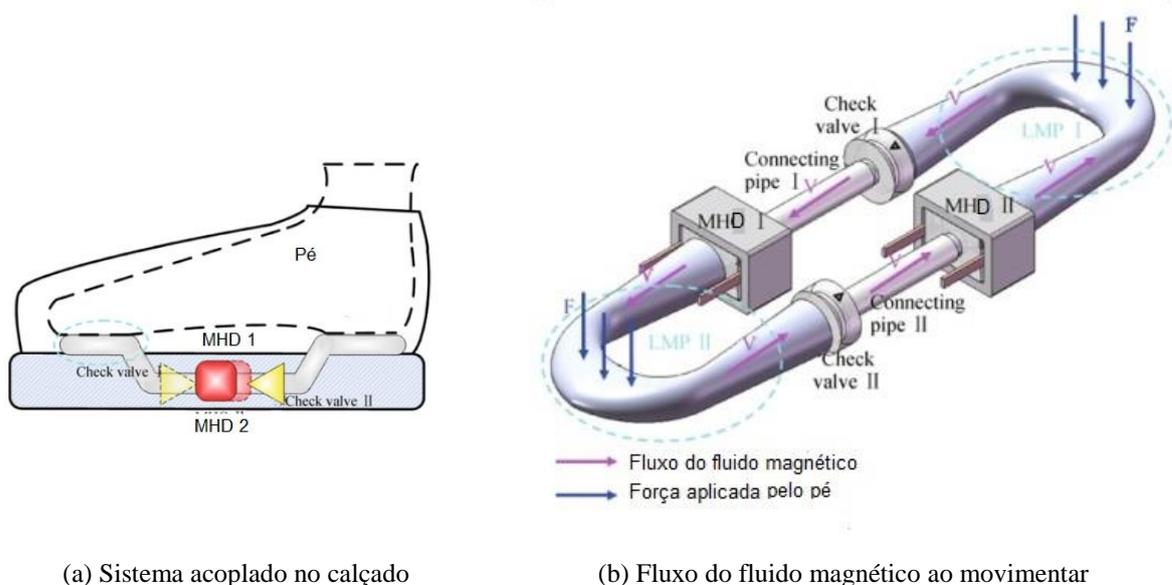


Figura 2.20: Esquema de funcionamento do micro gerador por MHD de um calçado.  
Fonte: [48].

Em aplicações da medicina, tais como implantes médicos ou dispositivos invasivo no corpo e operados por bateria, o carregamento indutivo permite a recarga e alimentação através da pele ao invés de sonda, o que reduz o risco de infecção. Este carregador indutivo permite o aumento da durabilidade da bateria por não forçar o liga/desliga constante, evitar o rompimento de soquetes e quebra de cabos anexados [47].

A Figura 2.21 mostra uma vista em corte de um dispositivo móvel sobre uma unidade de carregamento por indução magnética contendo fluido magnético.

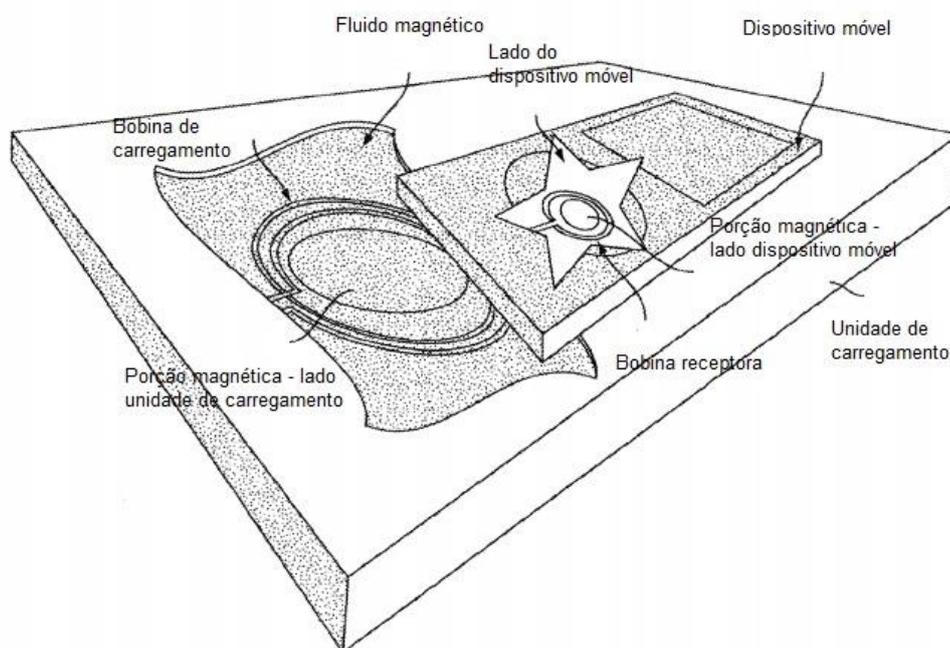


Figura 2.21: Vista em corte do dispositivo móvel sobre uma unidade de carregamento por indução magnética.  
Fonte: [47].

O dispositivo móvel é composto por uma bateria recarregável e uma bobina receptora conectada eletromagneticamente com esta bateria. A unidade de carregamento indutivo possui um alojamento para alinhar o dispositivo móvel na parte superior junto à bobina de carregamento e a camada de fluido magnético fica posicionada adjacente à bobina de carregamento [47].

Por este método, a energia da unidade de carregamento é enviada para o dispositivo móvel diretamente à bateria por meio do acoplamento indutivo. Mais especificamente, ao realizar a recarga do dispositivo móvel, a bateria é posicionada de tal forma que a bobina receptora fique próxima à bobina de carregamento localizada na parte superior do carregamento indutivo. Quando a unidade de carregamento é energizada, um campo eletromagnético alternado é gerado pela bobina de carregamento que é convertido em corrente elétrica pela

bobina de recepção contida no dispositivo móvel. Ambas as bobinas criam um fluxo magnético que é direcionado por uma ponte através da camada de fluidos magnéticos. Esta ponte, ordenada pelo fluido magnético consegue, intensificar e direcionar o fluxo magnético das bobinas o que melhora a eficiência do processo de carregamento, reduz interferência de acoplamento entre campos magnéticos produzida pelas bobinas de carregamento e pelo alinhamento do dispositivo móvel e unidade de carregamento, minimiza a perda térmica e encurta o tempo de recarga [49].

## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 FLUIDOS MAGNÉTICOS

Os fluidos magnéticos comercializados são dispersões coloidais estáveis contendo partículas magnéticas nanométricas misturados em composto orgânico de origem vegetal ou animal, hidrocarbonetos aromáticos, polímeros condutores, alifáticos de origem petroquímica.

A estabilidade da dispersão coloidal é atingida mediante a utilização de agentes tensoativos alquilfenóis etoxilados [50]. Apesar de serem amplamente utilizados em indústrias têxteis pela ótima relação custo-benefício, os alquilfenóis etoxilados podem trazer riscos ao meio ambiente e a saúde humana devido à biodegradação lenta, ser tóxico para espécies aquáticas e potenciais desreguladores endócrinos para os humanos. Esses agentes estão incluídos atualmente na lista dos Contaminantes Emergentes de Água da comunidade internacional. Isso é um dos fatores que motivam o desenvolvimento de uma nova formulação de fluido magnético com uso mínimo de líquido portador (CL) a base de petróleo e inserindo partículas nanométricas de óxido de ferro (SPIONs), deixando-o ambientalmente amigável e obtendo dispersões estáveis para utilização em MHD [51], [52].

O desafio para a preparação de fluidos magnéticos é manter o composto ativo e íntegro durante um longo período. A delimitação encontrada fica na estabilidade física e química uma vez que as partículas que compõem o fluido tendem a se aglomerar, precipitando e perdendo suas propriedades magnéticas num curto espaço de tempo.

Na definição clássica de mecânica dos fluidos, uma suspensão magnética é um material composto pela adição de pequenas partículas de material magnético num fluido base. O fluido magnético é uma classe especial de suspensões magnéticas nas quais o diâmetro médio das partículas que compõem a suspensão é da ordem de 10 nm, denominada de colóide (suspensão coloidal), formada por materiais magnéticos à base de óxido de ferro – magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ), maguemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ou hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) e o fluido base. Denominado de líquido portador não magnético ou, simplesmente, líquido carregador, o fluido base pode ser de natureza polar na sua solução aquosa ou apolar na solução não aquosa e a sua origem pode ser de caráter orgânico (polianilina, óleos sintéticos, álcool, éster) ou inorgânico (água, ácidos).

Para identificação efetiva, Shaw [53] define os colóides como estruturas esféricas cujo diâmetro se encontra entre 1 nm a 1000 nm conforme ilustração na Figura 3.1.

A faixa inferior aos colóides (0,1 nm) denomina-se solução verdadeira, são soluções homogêneas translúcidas tais como: álcool hidratado, açúcar na água, sal de cozinha na água etc. A faixa superior aos colóides (acima de 1000 nm) denomina-se suspensão, são misturas com grandes aglomerados de átomos, íons e moléculas tais como: fuligem, terra suspensa em água etc [54].

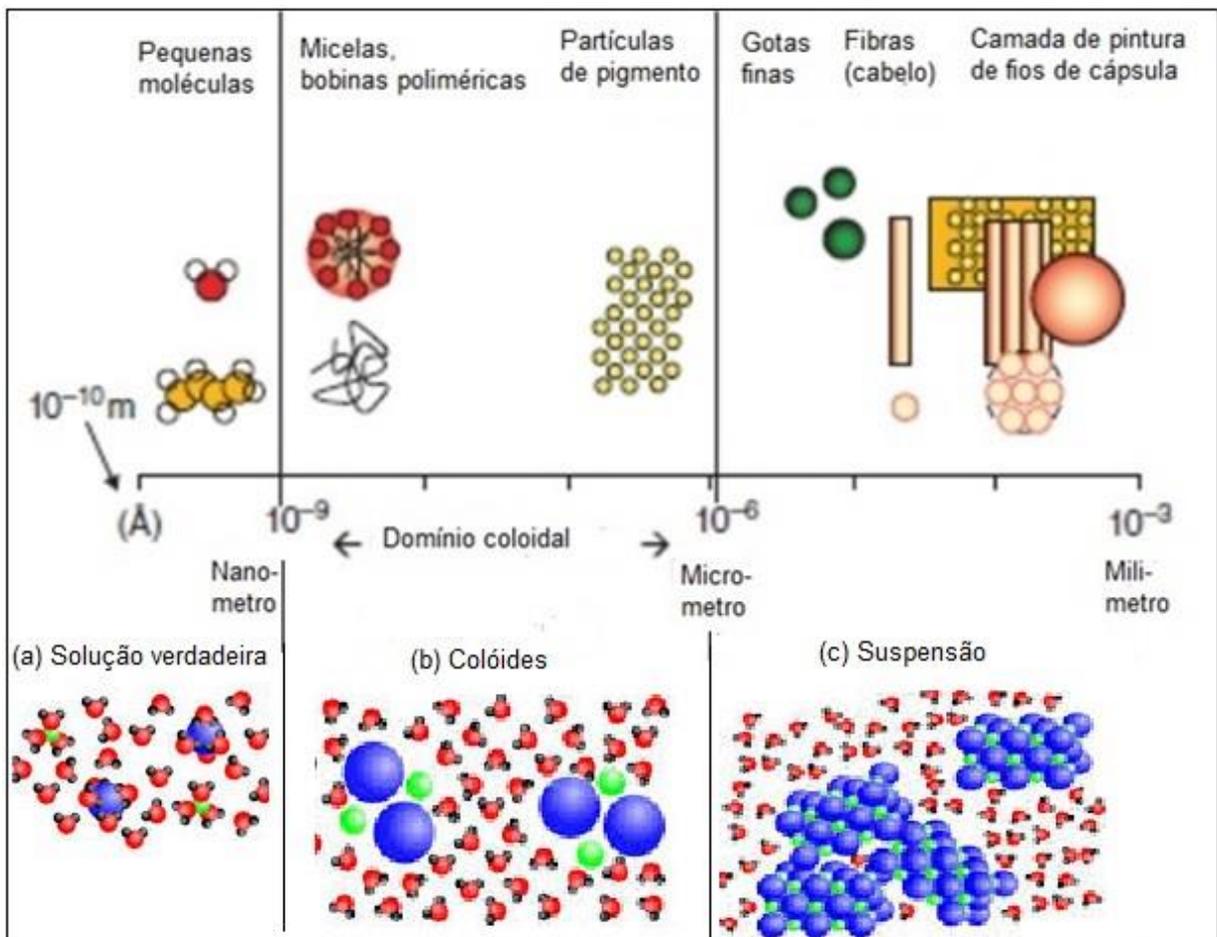


Figura 3.1: Ilustração em escalas do sistema coloidal e interfaces.

Fonte: [54].

A maioria dos colóides é polidisperso, isto é, possui partículas de tamanhos diferentes é composta por uma fase dispersa e uma fase contínua, conforme visto na Tabela 3.1.

Para diferenciar dispersões coloidais de soluções verdadeiras, aplica-se uma luz e verifica-se a sua dispersão, pois, as partículas dispersas possuem tamanhos semelhantes ao comprimento da luz visível. Este fenômeno é denominado de efeito de Tyndall, conforme ilustrado pela Figura 3.2 [55].

As macromoléculas dissolvidas num solvente chegam a dimensões coloidais e causam espalhamento de luz difícil de ser observado a olho nu [56].

Os colóides possuem deslocamento aleatório de partículas macroscópicas em suspensão num fluido em virtude de choques das moléculas do próprio fluido denominado de movimento browniano . A ilustração do movimento Browniano pode ser visto na Figura 3.3.

Existem colóides monodispersos cujas macromoléculas possuem o mesmo tamanho e massa molecular que foram obtidos pelos pesquisadores, principalmente, de polímeros sintéticos, de metais, de óxidos metálicos e cloreto de prata [57].

Tabela 3.1: Classificação dos colóides conforme as fases.

|               |                                     | Fase Contínua                              |   |  |
|---------------|-------------------------------------|--|---|--|
|               |                                     | Gás  | Líquido   | Sólido                                 |
| Fase Dispersa | Polidispersa                        |  |   |  |
|               | Gás                                 | Nenhum                                     | Espuma<br>(espuma de sabão, extintor de espuma) | Espuma sólida<br>(isopor, poliuretana) |
|               | Líquido                             | Aerossol Líquido<br>(desodorante, neblina) | Emulsão<br>(leite, maionese)                    | Emulsão sólida<br>(margarina, pérola)  |
| Sólido        | Aerossol Sólido<br>(fumaça, poeira) | Sol, Gel<br>(tinta, creme dental)          | Sol Sólido<br>(vidro, plástico pigmentado)      |  |

Fonte: [57].

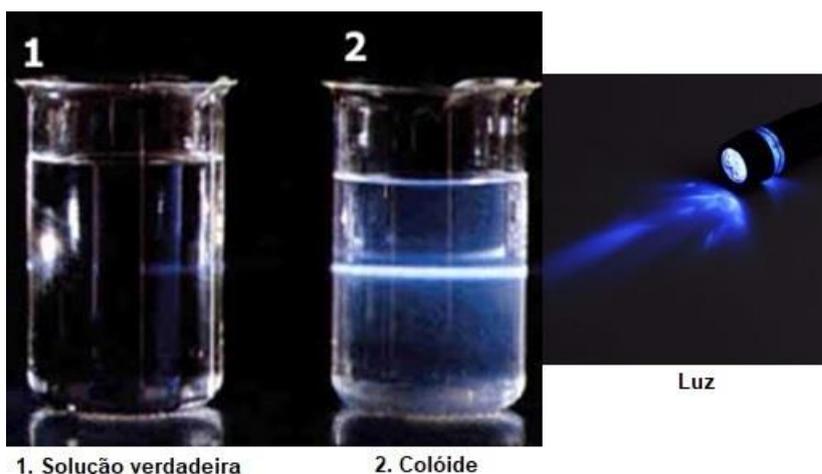


Figura 3.2: Ilustração do efeito Tyndall para diferenciação de colóides.

Fonte: [56].

Segundo Hira et al [58], os três tipos de óxidos de ferro - magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ), maguemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ou hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) - são as formas mais comuns de se encontrar na natureza e, no

campo científico da nanotecnologia, apresentam uma propriedade inimitável de magnetismo denominada de superparamagnetismo para tamanhos de até 20 nm.

As nanopartículas de óxido de ferro superparamagnéticas (SPIONs) possuem uma propriedade de, quando a aplicação de um campo magnético externo, elas se magnetizam até o ponto de saturação e, na remoção do campo magnético, não retem nenhuma interação magnética residual [59].

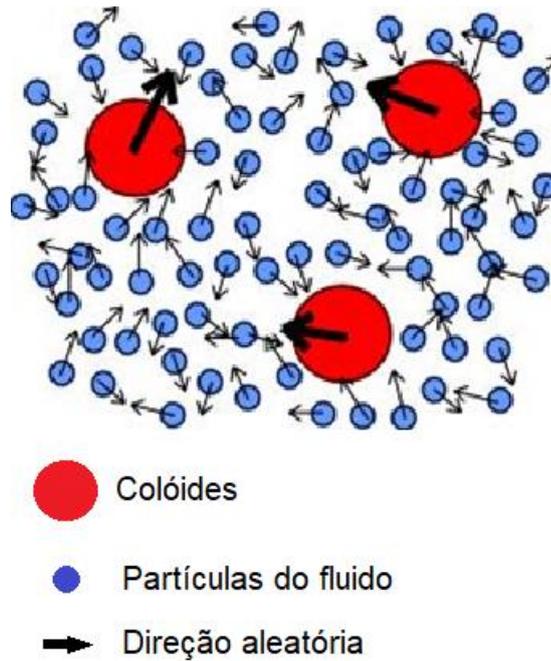


Figura 3.3: Esquema de um movimento Browniano.  
Fonte: [60].

A aplicação dos SPIONs é das mais diversas no campo da biologia, medicina, geologia e engenharia devido à sua baixa toxicidade, uma alta razão entre superfície e volume e técnicas simples de separação [61]. A Figura 3.4 mostra os principais materiais magnéticos utilizados para trabalhos em nanotecnologia.



(a) Magnetita



(b) Maguemita



(c) Hematita

Figura 3.4: Ilustração de materiais magnéticos a base de óxido de ferro.

Fonte: [62] e [63].

O movimento das partículas que compõem um fluido magnético é regido por um conjunto de forças de curto alcance (dipolo magnético e forças de Van der Waals) e forças gravitacionais que atuam na escala da partícula e que irão determinar a estabilidade da suspensão [64].

O seu tamanho das partículas deve ser controlado e mantido entre 3 a 15 nm para evitar que as partículas se precipitem por forças gravitacionais [65]. Nesta faixa de tamanho, as partículas se mantêm em suspensão por meio de movimentos brownianos originados pela agitação térmica molecular do líquido portador, isto é, na escala nanométrica, a força gravitacional é anulada pelos movimentos brownianos criando um fluido magnético bem sintetizado e estável. A manipulação dos fluidos magnéticos pode ser feita por um campo magnético externo sem a necessidade de contato físico.

O ferrofluido é formado de núcleo magnético, representado na cor cinza, camada de material não magnética em cinza clara e cabeças polares do polímero estabilizador conforme ilustrado na Figura 3.5. A estrutura do ferrofluido faz com que a sua propriedade de atração seja sensível ao campo magnético variável, isto é, o ferrofluido não apresenta nenhuma magnetização de rede quando há ausência de campo magnético e se magnetiza quando se aproxima de um campo magnético. Num ferrofluido típico, a sua saturação magnética ocorre na ordem de 20 kA/m quando submetido a um campo magnético com intensidade de 200 kA/m. Dessa forma, o ferrofluido pode ser manipulado nas suas propriedades químicas, físicas e magnéticas de acordo com a aplicação [66].

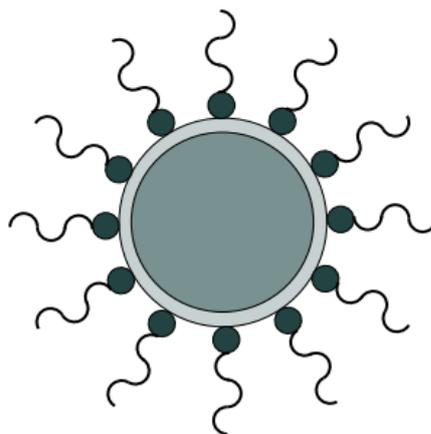


Figura 3.5: Esquema de partícula constituinte de ferrofluido.  
Fonte: [66].

Satiko Kodama, artista japonesa, vem utilizando o ferrofluido aplicado às artes com trabalhos surpreendentes conforme mostrado na Figura 3.6 [67]. Observe-se que todo

ferrofluido submetido a um campo magnético forma um conjunto de cones simbolizando a excitação ao campo magnético.

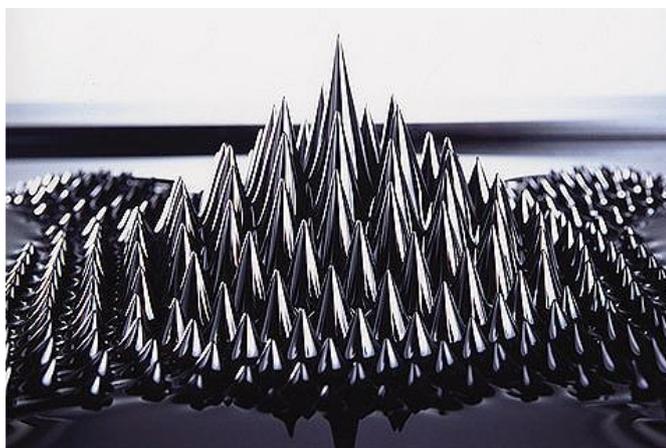


Figura 3.6: Ilustrativo de ferrofluido típico submetido a um campo magnético variável.  
Fonte: [67].

### 3.1 Processos de fabricação dos fluidos magnéticos

Os SPIONs dos fluidos magnéticos podem ser fabricados com vários materiais como níquel, cobalto, ferro ou infinidade de óxidos de ferro. Neste trabalho, utilizou-se a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pela abundância do material [68].

No ilustrativo mostrado na Figura 3.7, verificou-se que o método químico predomina em 90% de síntese dos SPIONs pelo seu alto rendimento e baixo custo de produção, seguido do método físico com 8% de participação e o método biológico com 2% [58]. Dentro do método químico, as técnicas mais utilizadas são a coprecipitação, hidrotérmica e microemulsão. O destaque fica para a técnica de microemulsão ou método de duas fases que consiste, inicialmente, na produção de um pó seco magnético de nanopartícula de óxido de ferro pelo método químico e físico. Na segunda fase, o pó nanométrico é disperso dentro de um fluido com o auxílio de uma força intensiva ou agitação ultrasônica, misturando forte para cisalhar e aplicar o jateamento de esferas para deixá-lo homogeneizado [58].

A maioria dos métodos de síntese dos fluidos magnéticos sintéticos sofre de vários inconvenientes, como o uso de solventes petroquímicos tóxicos e perigosos conforme estudos realizados por Subko et. al [69].

O estudo e a pesquisa na produção dos fluidos magnéticos foram direcionados para o método eletroquímico de única fase tanto para sintetizar os SPIONs quanto para acoplar os SPIONs dentro das cavidades do PGLYD de origem vegetal possibilitando menor impacto ao meio ambiente.

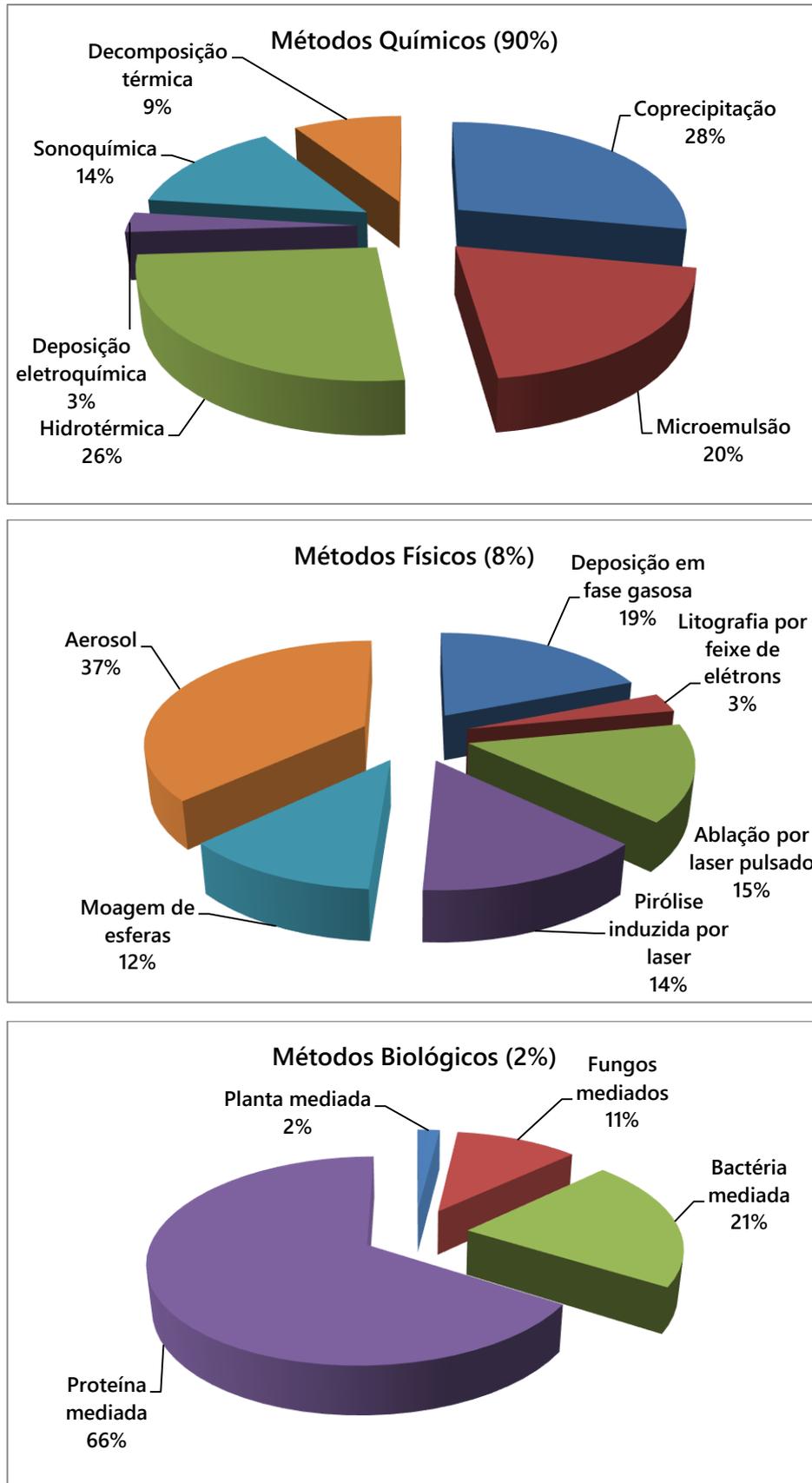


Figura 3.7: Métodos de síntese de SPIONs (a) Químicos, (b) Físicos, (c) Biológicos.

Fonte: [58].

## 3.2 Estabilidade e as forças de integração dos fluidos magnéticos

O estudo de sistemas de particulados com extensa faixa de interações é importante em várias áreas da engenharia e da física. O processo de separação líquido-sólido por sedimentação diferencial é um dos vários exemplos onde o entendimento da abordagem da suspensão média é importante para prever o tempo de separação de importantes processos industriais. Os trabalhos publicados sobre assunto mostram que as partículas podem ser movimentadas sob a ação individual ou combinações de cinco forças principais: gravitacionais, campo magnético externo, interações hidrodinâmicas, flutuações térmicas brownianas e interações dipolo-dipolo magnéticas [70].

Segundo Krutikova and Ivanov [71], para um fluido magnético acompanhado de formação de agregado do tipo gota de tamanho entre 1 e 5  $\mu\text{m}$ , cujo número de ferropartículas dentro do agregado gira em torno de 10.000 ~ 1.000.000, o papel das forças de Van der Waals na separação de fases do ferrofluido é fundamental ao ser adicionado à interação dipolar magnética para encontrar a fase de transição, denominada de fluidos de Stockmayer. Sem as forças de Van der Waals, a simulação computacional de fluidos dipolares com esferas duras ou moles não é observada na fase de condensação.

Em seu estudo, Pakhomov, et al. [72] utilizou o ferrofluido contendo nanopartícula de Cobalto (Co) revestido com ácido oleico ( $\hat{\Omega}$ mega 9) cuja substância formou um surfactante de, aproximadamente, 20 nm de diâmetro adicionado a um recipiente de diclorobenzeno com característica de amplo intervalo de concentração. Nesta circunstância, foi investigado que o comportamento magnético do material em função da frequência e temperatura era a variação da frequência de relaxação da rotação Browniana de nanopartículas magnéticas num ferrofluido pela ligação de moléculas orgânicas. Portanto, utilizando-se desta ferramenta é possível utilizar suspensões de nanopartículas ferromagnéticas revestidas com moléculas orgânicas para imitar as biomoléculas em solução ou medir relaxamento em corrente alternada (ac) para biosensores.

O trabalho de Gontijo and Cunha [70] envolveu o fluido magnético em forma de suspensão coloidal de partículas muito pequenas em solução aquosa sob a influência de interações hidrodinâmicas e magnéticas nas partículas. Verificou-se que o envolvimento físico dessas suspensões é complexo incluindo mecanismos diferentes e possibilidades de interações entre partículas. Os autores tiveram dificuldades para inserir as condições de simulação devido ao movimento denominado de difusão de vorticidade, no qual partículas dispersadas num fluido exercem forças nas partículas da vizinhança, e pelo subproduto da difusão denominado de auto dispersão hidrodinâmico do fluido que inibe a separação de partículas. Para solucionar a

convergência da propriedade de suspensão em massa do reagente, foi utilizada a simulação computacional de técnica de soma de grade de Ewald. A abordagem estatística foi utilizada para prever quantidades macroscópicas das suspensões magnéticas em líquido diluído levando-se em consideração da existência de duas propriedades: a) as flutuações de velocidade das partículas induzida pelas interações hidrodinâmicas convergem com o tamanho do sistema para uma suspensão misturada; b) flutuações de velocidade durante a sedimentação de uma suspensão diluído aleatório das esferas rígidas num material para separações de 20 interpartículas.

### **3.3 Estudo da hidrodinâmica nos fluidos magnéticos**

Quando se fala em hidrodinâmica dos fluidos, vem a palavra reologia de origem grega, rheo (fluxo) e logos (ciência), cujo termo foi sugerido pelos cientistas Bingham e Crawford em 1929. Dessa forma, a reologia é um ramo da física que investiga as propriedades dos corpos que sofrem deformação quando submetido a tensões ao longo de um intervalo de tempo [73].

As principais propriedades determinantes para o estudo da matéria são: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

Conforme Ciornei, et al. [74], a viscosidade de um fluido reflete a propriedade de ser capaz de transmitir forças de atrito entre partículas ou exibir resistência a fluxos de cisalhamento. Devido a isto, a viscosidade do fluido depende da pressão e temperatura. Para fluidos de maior viscosidade (asfalto, betume), a temperatura é mais significativa do que a pressão.

Já para os fluidos de baixa viscosidade (água), a pressão é mais significativa do que a temperatura [75]. Para efeitos comparativos, os valores de viscosidade dinâmica de algumas substâncias são exibidas na Tabela 3.2 a uma temperatura de 20 °C [56].

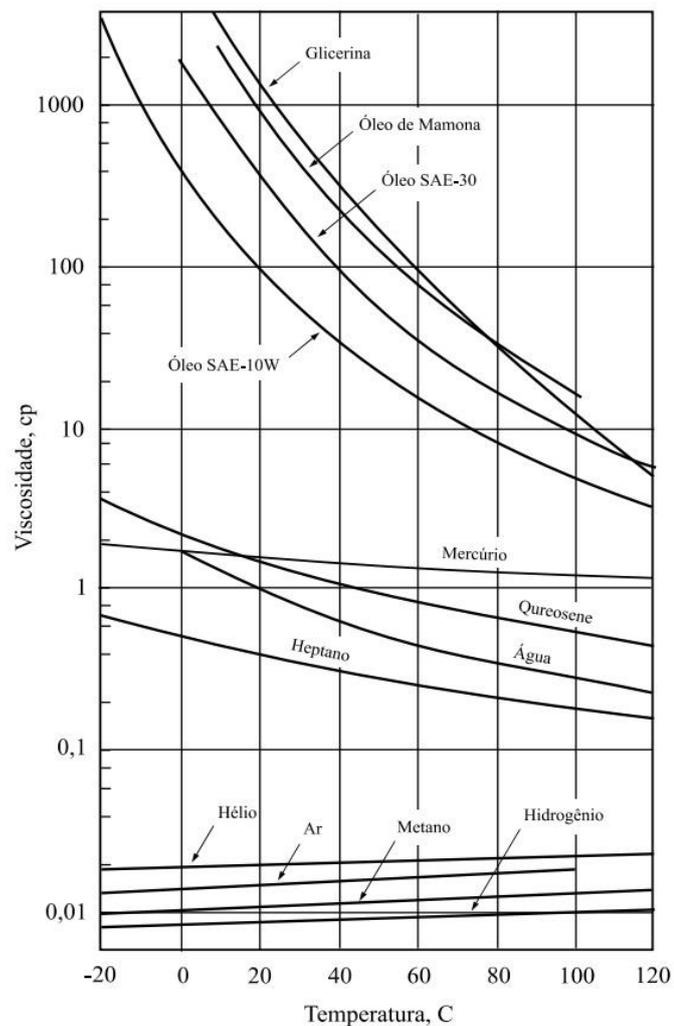
Segundo Stuckenbruck [76], as viscosidades dinâmicas dos fluidos variam em maior ou em menor grau com a temperatura conforme o tipo de composição mostrado na Figura 3.8.

A elasticidade é uma propriedade que permite aos materiais retornar a sua forma original após a remoção das tensões. As tensões mecânicas aplicadas sobre ele precisam ser controladas e manipuladas sobre o material na região elástica. Acima desta, o material entra na zona plástica até ocorrer a ruptura [75].

Tabela 3.2: Viscosidade dinâmica de substâncias a temperatura de 20°C.

| Substância       | Viscosidade [Pa.s] |
|------------------|--------------------|
| Ar               | 0,0000174          |
| Acetona          | 0,000326           |
| Água             | 0,0010030          |
| Leite            | 0,01               |
| Azeite de oliva  | 0,1                |
| Óleo de mamona   | 1,0                |
| Mel líquido      | 10                 |
| Polímero fundido | 1000               |
| Asfalto          | 100000             |

Fonte: [56].

Figura 3.8: Viscosidade dinâmica por temperatura em fluidos.  
Fonte: [76].

A plasticidade é a deformação permanente do material após esta sofrer uma aplicação da tensão superior à região elástica. Nos campos menores dezenas de micrometros, observa-se pela Figura 3.9 que as estruturas se alteram a uma tensão mecânica aplicada dependendo do tipo de formatação que se encontram em condição original. Este fenômeno é encontrado nas microestruturas de dispersões, emulsões, suspensões, soluções poliméricas e fusões [75].

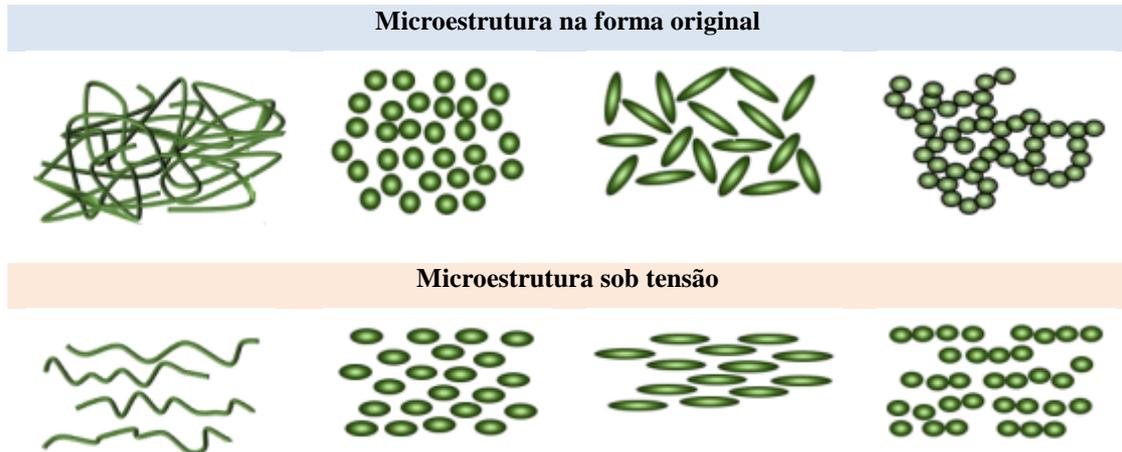


Figura 3.9: Reação de diferentes microestruturas à aplicação de uma tensão.  
Fonte: [75].

A aplicação da reologia pode ser realizada em sólidos, líquidos e gases com intuito de expandir o conhecimento molecular da matéria, aprimorar o controle de qualidade na produção e melhorar o critério de aceitação do produto. Por ser multidisciplinar, a reologia atua em diferentes áreas do conhecimento como na medicina, na indústria alimentícia, na indústria de tintas e plásticos e até na construção civil [56].

Segundo Bisco [77], existem dois grandes desafios na reologia:

- Estabelecimento de uma relação quantitativa entre deformação e tensão de cisalhamento ao longo do tempo para o material em estudo;
- Desenvolvimento de relações entre o comportamento reológico de um material e a sua estrutura, composição e condições ambientais (temperatura e pressão).

### 3.4 Modelo de força para fluidos magnéticos

Para o entendimento do conceito de deformação e gradiente, considera-se um fluido contido entre duas placas planas paralelas de área  $A$  separadas por uma altura  $y$ . Aplica-se uma força  $\vec{F}$  na parte superior para movimentar a placa a uma velocidade  $V$  para o sentido do lado direito, conforme a Figura 3.10. Cria-se uma força contrária de mesma intensidade da  $\vec{F}$

denominada de força de cisalhamento devido às forças de coesão do fluido com as paredes da placa e entre as camadas de fluido, em caso de regime laminar [78].

A força de cisalhamento é em função do gradiente de velocidade  $\frac{dv_x}{dy}$  entre as placas. Idealmente, supondo que não haja deslizamento do fluido nas paredes das placas, a velocidade do fluido será igual a zero na placa inferior e igual a  $V$  na placa superior.

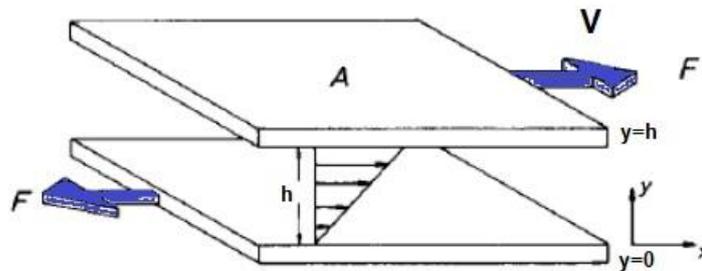


Figura 3.10: Força de cisalhamento aplicada sobre um fluido.  
Fonte: [79].

A lei de Newton aplicada a viscosidade é uma relação linear entre a tensão de cisalhamento dada pelo produto da força de cisalhamento e da sua área com o gradiente local de velocidade que define a viscosidade dinâmica do fluido ( $\eta_d$ ) [79].

De acordo com Gallo [80], os fluidos newtonianos abrangem todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos como, por exemplo, água, leite, soluções de sacarose, óleos vegetais. A força de cisalhamento é dada pela equação (1):

$$\tau_{yx} = \eta_d \frac{dv_x}{dy} \quad (1)$$

Onde:

$\tau_{yx}$ : tensão de cisalhamento na direção x [g/cm.s<sup>2</sup>]

$\frac{dv_x}{dy}$ : gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento [s<sup>-1</sup>]

$\eta_d$ : viscosidade dinâmica, cP [centi Poise] = 10<sup>-2</sup> g/cm.s = 0,001 kg/m.s = 10<sup>-3</sup> N.s = 1 mPa.s = 0,001 Pa.s

Os fluidos que não seguem a lei de Newton da viscosidade são denominados de fluidos não newtonianos, isto é, a razão entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento não é constante.

### 3.5 Propriedades reológicas dos fluidos magnéticos

A classificação dos fluidos podem ser realizados pelo comportamento reológico determinado pelas medidas de tensão em função da taxa de cisalhamento conforme Figura 3.11.

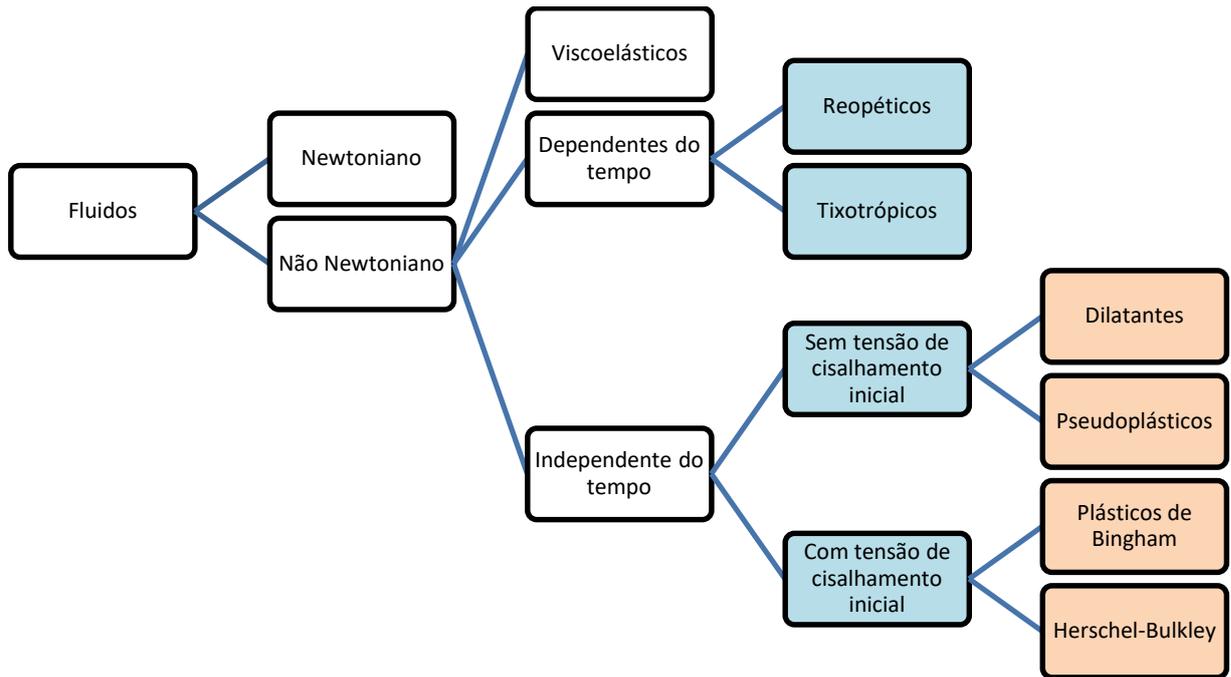


Figura 3.11: Classificação dos fluidos.

Fonte: [80].

Os estudos sobre os fluidos magnéticos vêm sendo conduzidos com ênfase em fluidos não newtonianos. De acordo com Alves [56], os fluidos não newtonianos possuem 3 classificações com base nas propriedades reológicas. São elas:

a) Fluidos não newtonianos independentes do tempo:

São fluidos que independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento para que as propriedades reológicas se alterem. A Figura 3.12 mostra o comportamento dos fluidos incluídos nesta categoria. Dentro deste grupo, pode-se subdividir mais 2 categorias:

a1.1) Sem tensão de cisalhamento inicial: compreende a maior parte dos fluidos não newtonianos cujo início de escoamento não necessita aplicação de tensão de cisalhamento. Esta categoria pode-se ramificar em mais 2 itens:

a1.1.1) Dilatantes: são substâncias que aumentam a viscosidade aparente mediante a tensão de cisalhamento aplicada com taxa de crescimento menor que a do fluido newtoniano. Os exemplos de substâncias são: soluções de açúcar, suspensões de amido, areia, silicato de potássio e soluções de farinha de milho. Os modelos de Ostwald-de-Waele ou Modelo Power Law podem ser aplicadas para os dilatantes e são dados dada pela equação (2):

$$\tau_{yx} = -K \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

Onde:

$\tau_{yx}$ : tensão de cisalhamento na direção x [g/cm.s<sup>2</sup>]

$\frac{dv_x}{dy}$ : gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento [s<sup>-1</sup>]

K: índice de consistência do fluido

n: inclinação da curva somente para n<1

a1.1.2) Pseudoplásticos: são substâncias que aumentam a viscosidade aparente mediante a tensão de cisalhamento aplicada com taxa de crescimento maior que a do fluido newtoniano com  $n < 1$ . Os modelos de Ostwald-de-Waele ou Modelo Power Law podem ser aplicados aos pseudoplásticos. São exemplos desta substância: melão de cana, caldos de fermentação e polpa de frutas.

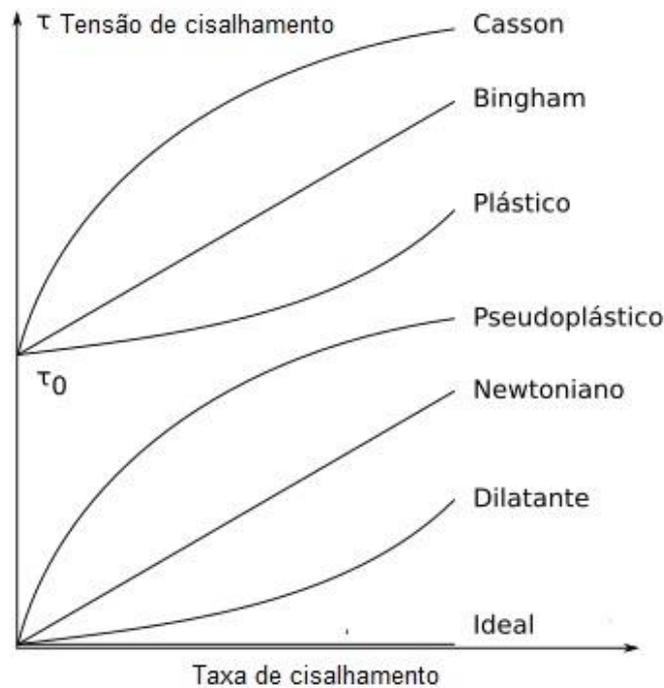


Figura 3.12: Fluidos não Newtonianos independentes do tempo.  
Fonte: [80].

a1.2) Com tensão de cisalhamento inicial: são substâncias que necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para escoar. Pode-se subdividir em 3 categorias:

a1.2.1) Plásticos de Bingham: são fluidos que apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação a partir de uma determinada tensão de cisalhamento. O modelo que caracteriza este tipo de plástico é dado pela equação (3).

$$\tau_{yx} = \pm\tau_0 - \eta_0 \frac{dv_x}{dy}, \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0|$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0|$$
(3)

$\tau_{yx}$ : tensão de cisalhamento na direção x [g/cm.s<sup>2</sup>]

$|\tau_0|$ : tensão inicial de cisalhamento

$\frac{dv_x}{dy}$ : gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento [s<sup>-1</sup>]

$\eta_0$ : constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos.

a1.2.2) Herschel-Bulkey: denominado também de Bingham generalizado. A grande diferença comparada com os plásticos de Bingham é a não linearidade da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação mostrada pelo expoente adimensional n. A equação (4) descreve a característica do fluido desta categoria.

$$\tau_{yx} = \pm\tau_0 - \eta_0 \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^n, \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0|$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0|$$
(4)

Onde:

$\tau_{yx}$ : tensão de cisalhamento na direção x [g/cm.s<sup>2</sup>]

$\eta_0$ : constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos.

n : expoente adimensional característica específica de cada fluido

$|\tau_0|$ : tensão inicial de cisalhamento

$\frac{dv_x}{dy}$ : gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento [s<sup>-1</sup>]

a1.2.3) Modelo de Casson: observando comportamentos de fluidos, tais como, purê de tomate, sangue, iogurte entre outros foi proposta uma abordagem ao modelo Bingham generalizado elevando todos os fatores a 1/2 e condicionando a fórmula matemática aos novos parâmetros conforme mostrado pela equação (5).

$$|\tau_{yx}| = |\tau_0| - \left|\eta_0 \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^n\right|^{\frac{1}{2}}, \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0|$$
(5)

$$|\tau_{yx}| = |\tau_0|, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0|$$

Onde:

$|\tau_{yx}|$ : módulo de tensão de cisalhamento na direção x [g/cm.s<sup>2</sup>]

$\eta_0$ : constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos

n: expoente adimensional característica específica de cada fluido

$|\tau_0|$ : módulo da tensão inicial de cisalhamento

$\frac{dv_x}{dy}$ : gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento [s<sup>-1</sup>]

b) Fluidos não newtonianos dependentes do tempo:

São fluidos que apresentam variações de suas propriedades com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento conforme mostrado pela Figura 3.13. Estão divididos em 2 categorias:

b1) Tixotrópicos: nesta categoria, os fluidos têm a viscosidade reduzida com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento e voltam a ser mais viscosos quando cessa a aplicação.

Produtos como: petróleo cru, tintas, ketchup, emulsões, suspensões concentradas, soluções protéicas fazem parte desta categoria.

b2) Reopéticos: os fluidos nesta categoria apresentam aumento da viscosidade com o tempo de aplicação da tensão e retornam a viscosidade inicial quando esta força cessa. É o processo inverso dos tixotrópicos. Um exemplo deste fluido seria a argila bentonita.

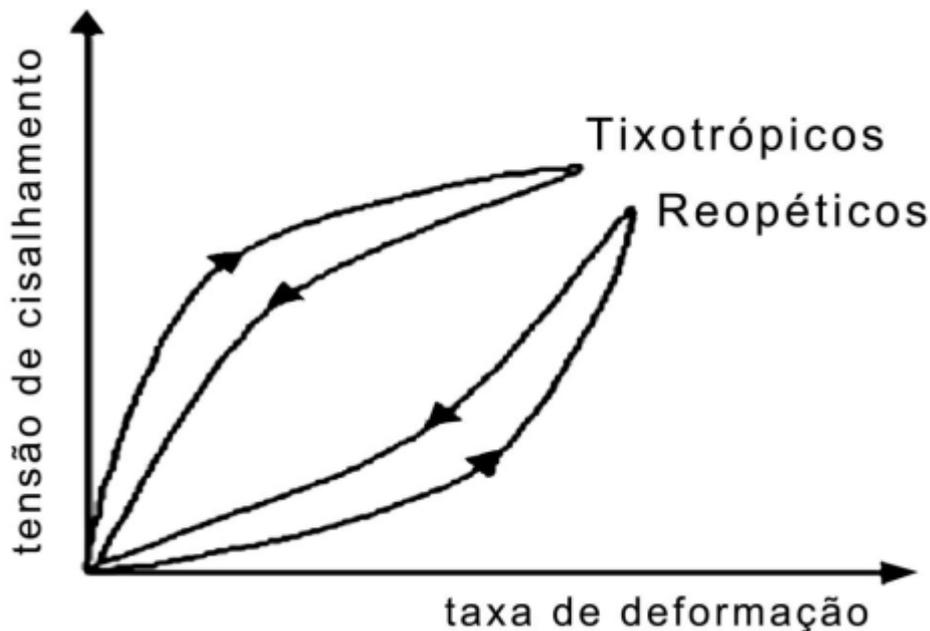


Figura 3.13: Fluido não Newtoniano dependentes do tempo.

Fonte: [80].

c) Viscoelásticos:

São fluidos que possuem comportamentos específicos, um mesclado de propriedades elásticas e viscosas acopladas, cujas características são de líquidos viscosos com propriedades elásticas descritas em 1957 pelo modelo de Maxwell e de sólidos com propriedades viscosas descritas pelo modelo de Kelvin-Voigt [56]. São exemplos de viscoelásticos: goma xantana, saliva, massas de farinha de trigo, gelatinas, queijos, líquidos poliméricos, glicerina, plasma, biopolímeros e ácido hialurônico. A equação (6) caracteriza o modelo de um fluido viscoelásticos.

$$\tau_{ij} + t_0 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} = -\eta_d \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Onde:

$\tau_{ij}$ : Tensão de cisalhamento num fluido

$t_0 = \eta_d / G$ : tempo característico do fluido em estudo

$\eta_d$ : viscosidade dinâmica, cP [centi Poise] =  $10^{-2}$  g/cm.s = 0,001 kg/m.s =  $10^{-3}$  N.s = 1 mPa.s = 0,001 Pa.s

G: módulo de rigidez cisalhante do fluido [N/m<sup>2</sup>] ou [lbf/in<sup>2</sup>]

$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t}$ : variação da tensão de cisalhamento no tempo normal ao plano

$\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$  ou  $\frac{\partial v_j}{\partial x_i}$ : taxa de distorção de um material deformado

Para clarificar o assunto, a Tabela 3.3 mostra alguns produtos que utilizam as propriedades dos fluidos não Newtonianos para oferecer facilidade no dia a dia.

Tabela 3.3: Características não Newtonianas aplicadas em materiais.

| <b>Exemplo de fluido</b>  | <b>Categoria</b>                 | <b>Propriedades não Newtonianas.</b>  |
|---------------------------|----------------------------------|---|
| Creme dental              | Plástico de Bingham              | Permanece na escova e comporta-se mais líquido durante a escovação.                         |
| Lamas de perfuração       | Plástico de Bingham              | Boa propriedade de lubrificação e habilidade para transportar detritos.                     |
| Tintas anti-respingo      | Tixotrópicos                     | Grosso dentro da lata, fino no pincel ou rolo.  |
| Cola de papel de parede   | Pseudoplásticos e viscoelásticos | Bom espalhamento e propriedades adesivas.   |
| Clara do ovo              | Viscoelásticos                   | Fácil dispersão de ar dentro da clara até se estabilizar e tornar a clara em neve.          |
| Polímeros fundidos        | Viscoelásticos                   | Propriedades de formação de roscas.   |
| Massa de modelar          | Viscoelásticos                   | Flui se esticado lentamente, mas, irá quebrar se bater de maneira cortante.                 |
| Agregado de cimento úmido | Dilatante e tixotrópico          | Permite compactação nas quais pequenos impulsos produzem assentamento completo.             |
| Tintas para impressão     | Pseudoplásticos                  | Espalha facilmente em alta velocidade, mas, não corra excessivamente em baixas velocidades. |
| Óleo cru ceroso           | Viscoplástico e tixotrópico      | Flui prontamente num tubo, mas é difícil reiniciar o fluxo.                                 |

Fonte: [78].

Quanto à direção do escoamento, existem dois tipos de fluido:

- Escoamento laminar: ocorre quando as partículas de um fluido se movimentam ao longo de trajetórias bem definidas formando lâminas ou camadas. Neste escoamento, a viscosidade age no fluido para amortecer a tendência de aparecimento da turbulência, isto é, o fluido escoar sem se misturar de forma significativa com as partículas. Por isso, esse fenômeno ocorre em baixas velocidades e em fluidos com alto valor de viscosidade.
- Escoamento turbulento: ocorre quando as partículas de um fluido se movimentam de forma irregular com movimentos aleatórios produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida, isto é, o movimento do fluido é aleatório fazendo com que as variáveis como velocidade e pressão apresentem alterações aleatórias no espaço e no tempo. Este fenômeno ocorre em fluidos com baixo valor de viscosidade como, por exemplo, a água [81]. A

caracterização da turbulência é responsável pelo escoamento, movimento rotacional, tridimensional, fenômeno altamente difusivo, altamente dissipativo e contínuo.

A Figura 3.14 ilustra o escoamento laminar como uma linha vermelha retilínea; no transitório, a linha inicia um pequeno desbalanceamento e no escoamento turbulento, a linha torna-se completamente desbalanceada com aumento da amplitude.

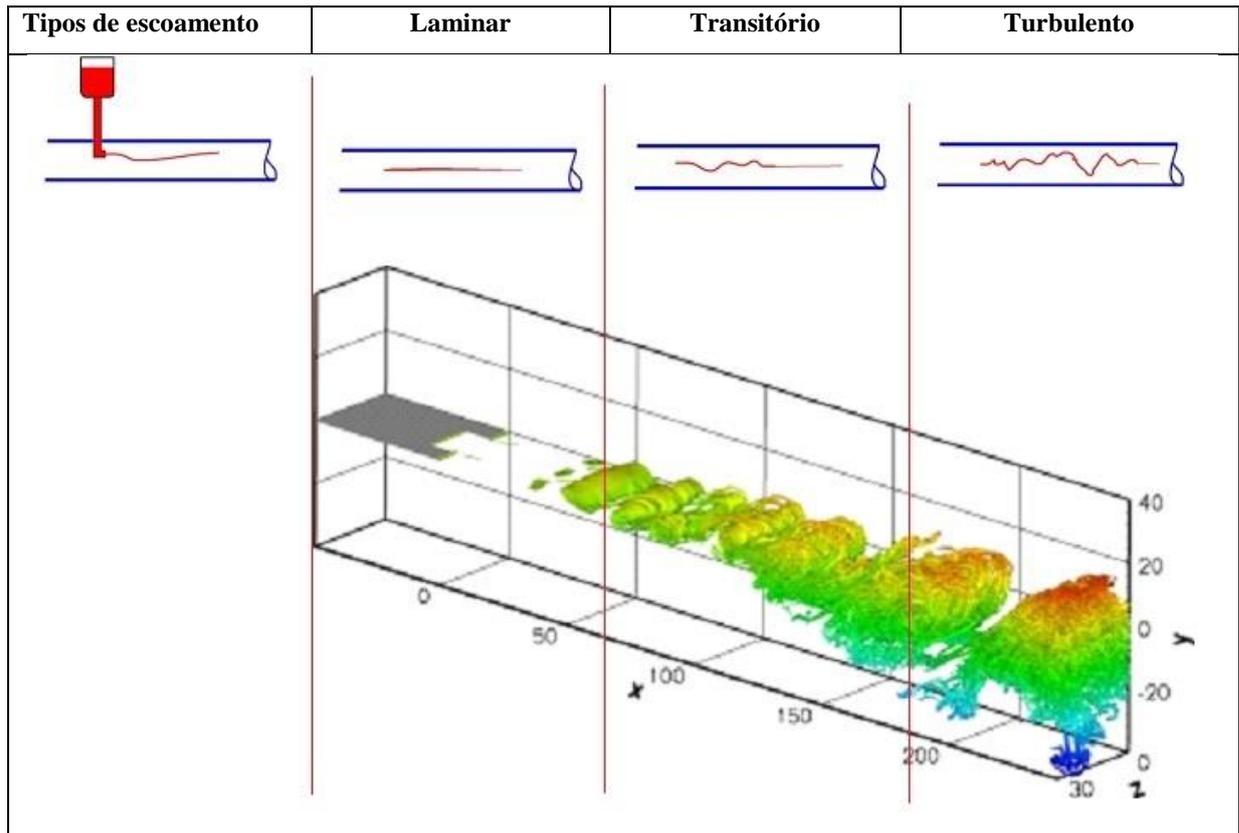


Figura 3.14: Ilustrativo de escoamento de um fluido.  
Fonte: [82].

### 3.6 Modelos constitutivos reológicos de fluidos magnéticos

Rosensweig [50] verificou-se que a viscosidade dos fluidos magnéticos varia diretamente com a variação do campo magnético. Ele levou em conta que as viscosidades de todos os nanofluidos são inferiores às do fluido de base, devido à auto-lubrificação das nanopartículas e essas, por sua vez, são altamente solvatadas no meio de dispersão. A viscosidade dos fluidos magnéticos varia diretamente com aumento do campo magnético, pois, é o resultado da formação e rearranjo de novas estruturas – em forma de cadeia ou semelhantes a gotas. Esse aglomerado possui propriedades viscoelásticas ou quaisquer efeitos de fluidos não Newtonianos quando submetidos a um campo magnético. Em teoria, quando um campo

magnético é aplicado, o momento magnético das partículas irá se alinhar ao longo do campo [65].

Há uma situação de maior dificuldade, quando o campo magnético através do eixo de rotação de partículas fica perpendicular à vorticidade do fluxo. Nesta situação, a rotação das partículas causada pelo torque viscoso no fluido leva a um desalinhamento do momento magnético da direção do campo criando um torque magnético contra o torque viscoso. O torque magnético em oposição ao torque viscoso, dificulta a rotação livre das partículas magnéticas no fluxo aumentando a viscosidade do fluido [65].

A situação de menor dificuldade, ocorre quando o campo magnético através do eixo de rotação das partículas fica paralelo à vorticidade do fluxo. Nesta situação, a rotação das partículas causada pelo torque viscoso no fluido leva a um alinhamento do momento magnético da direção do campo sem criar um torque magnético contra o torque viscoso. Sem o efeito do torque magnético em oposição ao torque viscoso, o momento magnético da partícula em relação à direção do campo não é perturbado pela rotação da partícula.

Nas últimas décadas, o fascínio ao fluido magnético vem recebendo muitas contribuições a respeito do tema no mundo todo para o entendimento de sua fase e as dinâmicas dos fluidos dipolares. As equações de Maxwell explicam a dinâmica dos fluidos magnéticos.

### **3.7 Estudo sobre escoamento dos fluidos magnéticos no interior do toróide em regime laminar e em regime turbulento**

Os estudos mais objetivos sobre escoamento de um fluido dentro de um tubo ou superfície foi conduzido pelo engenheiro irlandês e físico Osborne Reynolds. Foi criado um número adimensional ( $Re$ ) mostrado na equação (7) que leva o seu nome e cujo significado físico é uma razão entre as forças de inércia e as forças de viscosidade [83].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta_d} = \frac{v \cdot L}{\xi} \quad (7)$$

Onde:

$\rho$ : massa específica do fluido

$\eta_d$ : viscosidade dinâmica do fluido

$v$ : velocidade do escoamento

$D$ : diâmetro da tubulação

$\xi$ : viscosidade cinemática

$L$ : comprimento do fluido

O número de Reynolds possibilita avaliar rapidamente se o escoamento do fluido é laminar ou turbulento conforme Tabela 3.4. Além disso, o número de Reynolds constitui a base

do comportamento de sistemas reais e pode-se fazer um rápido comparativo dinâmico de dois sistemas utilizando apenas este número.

Tabela 3.4: Equivalência do número de Reynolds e tipo de escoamento.

| <b>Escoamento laminar</b> | <b>Escoamento de transição</b> | <b>Escoamento turbulento</b> |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Re < 2000                 | 2000 < Re < 2400               | Re > 2400                    |

Fonte: [56].

Para um fluido viscoelástico, cuja característica encontra-se entre a de líquidos viscosos e sólidos elásticos, existe um parâmetro que identifica a predominância do fluido para um dos lados verificando a relação entre o tempo de deformação a qual está sujeito e o tempo de resposta do mecanismo durante o experimento ou simulação computacional. Esta relação adimensional mostrada pela equação (8) foi elaborada pelo engenheiro civil israelense chamado Markus Reiner que batizou de número de Déborah (De), em homenagem bíblica a juíza de Israel [73].

$$De = \frac{t_c}{t_p} \quad (8)$$

Onde:

$t_c$ : Tempo de deformação ou tempo necessário para que o material atinja 63,2% ou  $[1-(1/e)]$  de sua resposta elástica

$t_p$ : Tempo de resposta

A Tabela 3.5 mostra os efeitos predominantes do fluido conforme o número de Déborah. Dessa forma, para um alto valor  $De$ , o fluido comporta-se como um sólido; para um baixo  $De$  comporta-se como um líquido. Nessa condição, cria-se uma implicação de que o material pode parecer sólido devido a duas condições: longo tempo característico de relaxação ou processo de deformação relevante muito rápido.

Tabela 3.5: Caracterização dos fluidos conforme número de Déborah.

| <b>Efeitos viscosos dominantes</b><br><b>Líquido</b> | <b>Viscoelásticos</b> | <b>Efeitos elásticos dominantes</b><br><b>Sólido</b> |
|--|-----------------------|--|
| $De < 0,5$   | $0,5 < De < 1,0$      | $De > 1,0$   |

Fonte: [73].

Os estudos de Gogosov [84] e Kamiyama and Koike [85] mostraram que a viscosidade do fluido magnético varia conforme a intensidade do campo magnético aplicado na superfície ou em tubos. A viscosidade é mais alta no fluido magnético quando o campo magnético atua perpendicularmente à direção do fluido do que ao campo em paralelo.

Para a modelagem de um fluido magnético por via de equações, as principais variáveis dependentes pertinentes são: o tipo de fluxo do fluido e a forma de aplicação do campo magnético. Por isso, vários trabalhos publicados sobre os fluidos magnéticos incluem estudos magnéticos e hidrodinâmicos [84].

O magnetismo dos fluidos magnéticos originam-se a partir das nanopartículas de óxido de ferro superparamagnéticas (SPIONs) dispersados num líquido portador (CL) [86]. Na ausência do campo magnético, os SPIONs não exibem nenhuma propriedade magnética por apresentar orientações aleatórias. Entretanto, quando um campo magnético é introduzido nos SPIONs, estes se alinham com o campo magnético conforme a Figura 3.15. Portanto, os fluidos magnéticos magnetizados exibem propriedades magnéticas na presença do campo magnético, que a partir do seu movimento dinâmico, geram uma variação do fluxo magnético no tempo e induz uma corrente elétrica captada pelas bobinas acopladas no dispositivo.

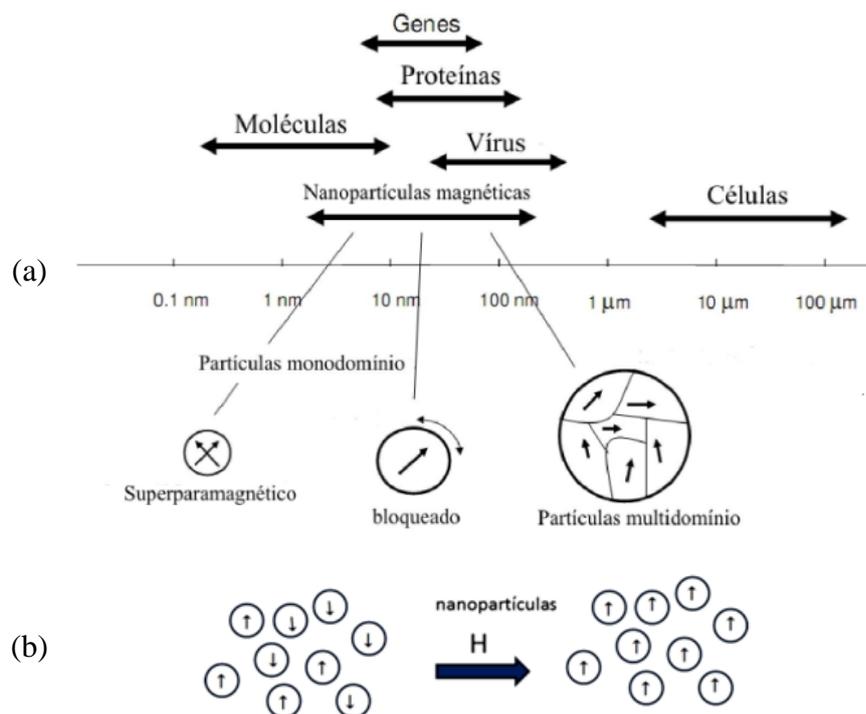


Figura 3.15: (a) Ilustração comparativa entre nanopartículas magnéticas e outros materiais (a) e (b) comportamento das nanopartículas na ausência e presença do campo magnético H.

Fonte: [87].

A ideia inicial do dispositivo constitui num formato de toróide, mostrado na Figura 3.16. O fluido magnético, contido dentro da câmara toroidal, circula no sentido horário a uma velocidade,  $V$ , resultado do produto entre a velocidade angular  $\omega$  e do raio do toróide  $R$ . O controle e ajuste do fluxo é feito pela bomba peristáltica.

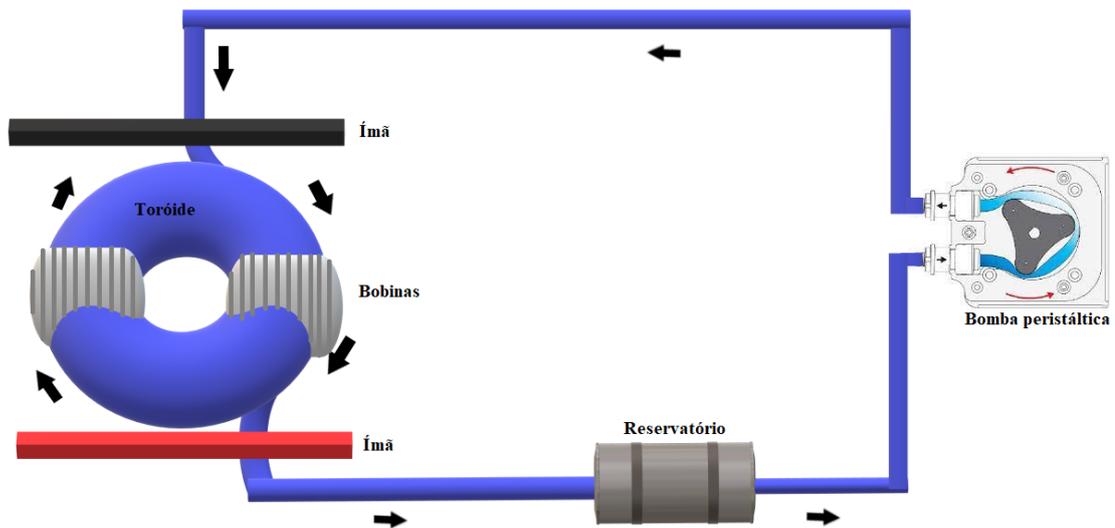


Figura 3.16: Fluido magnético circulando internamente no toróide.  
Fonte: Próprio autor.

Para a exibição dos monodomínios magnéticos é necessária a instalação de ímãs de neodímio sobre a câmara toroidal. Recorrendo às leis de Faraday-Maxwell, as bobinas envolvidas na parte externa do toróide captam em micro corrente liberado pelo movimento do fluido magnético.

Os estudos realizados por Walter Elsasser e Edward Bullard [88] chegaram ao consenso de que ao elevar a velocidade do fluido a um determinado patamar, as equações eletrodinâmicas ficariam mais significativas do que a própria consistência dos fluidos como: viscosidade e temperatura.

### 3.8 Dendrímeros de Poliglicerol (PGLYD)

Os dendrímeros de poliglicerol (PGLYD) foi aplicado pela melhor performance de síntese da magnetita pelas suas características favoráveis como uniformidade molecular, superfície multifuncional e presença de cavidades internas [89].

Os dendrímeros pertencem a uma classe de materiais versáteis que podem ser sintetizados para gerar arquiteturas moleculares similares às observadas em sistemas biológicos. O significado de dendrímero vem de origem grega “dendri”: galho de árvore e “meros”: parte, conforme mostrada na ilustração da Figura 3.17.

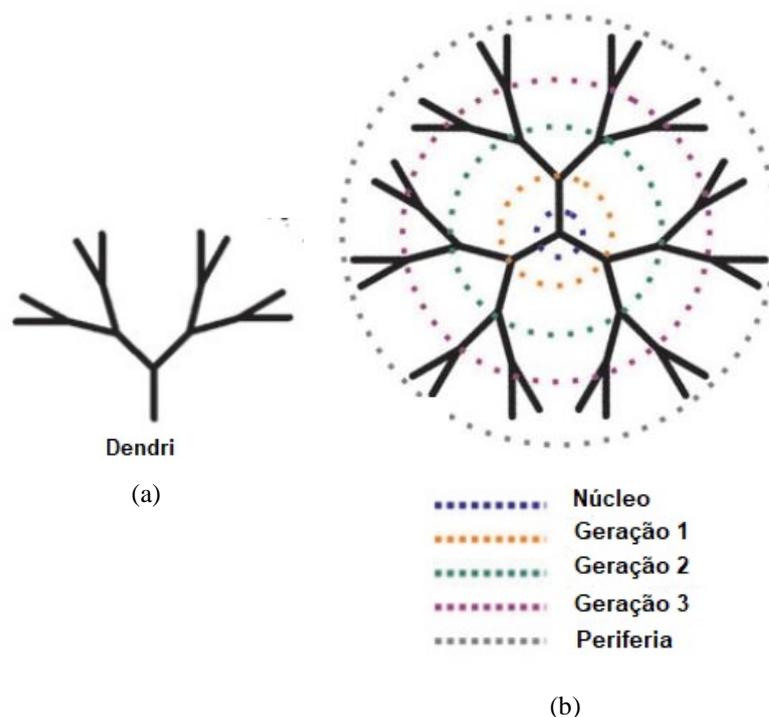


Figura 3.17: Ilustração da anatomia de: (a) “dendri” galho de árvore, (b) dendrímero representado por linha sólida e as regiões chaves do dendrímero representados por linhas pontilhadas coloridas.

Fonte: [90].

Os primeiros trabalhos sobre dendrímeros foram publicados por grupos de pesquisas distintos liderados por F.Vogtle em 1978, R. G. Denkewalter em 1981, D. A. Tomalia em 1985 e G. R. Newkome também em 1985. O assunto dendrímero é de um impacto tão grande nas vidas das pessoas, com aplicações nas mais variadas áreas do conhecimento, que centenas de outros grupos foram se formando em diversos países, inclusive o Brasil [90].

Os PGLYD são caracterizados pela combinação de uma arquitetura dendrítica bem delineada, de boa estabilidade e ser compacta, pela baixa dispersão do peso molecular conforme visto na Figura 3.18. À temperatura ambiente, o dendrímero é altamente viscoso, solúvel em água e em solventes orgânicos polares. Outra propriedade relevante do PGLYD é possuir alta densidade de grupos de hidroxila (-OH), ter ligações éter e trabalhar em baixa temperatura de transição vítrea. Por ter a presença de grupos de hidroxilas, o dendrímero de poliglicerol apresenta uniformidade molecular não paralela, superfície multifuncional e presença de cavidades internas. Essas propriedades específicas contidas no PGLYD fazem com que tornem apropriados para uma ampla variedade de alta tecnologia incluindo aplicações biológicas, químicas e medicinais [91].

Evidencia-se que a grande vantagem do poliglicerol e seus derivados é possuir baixa citotoxicidade. Esta vantagem do PGLYD foi reconhecida pela agência americana do FDA (Food

and Drug Administration) pelo mérito e aprovado sua aplicação para as indústrias farmacêuticas e alimentícia [92].

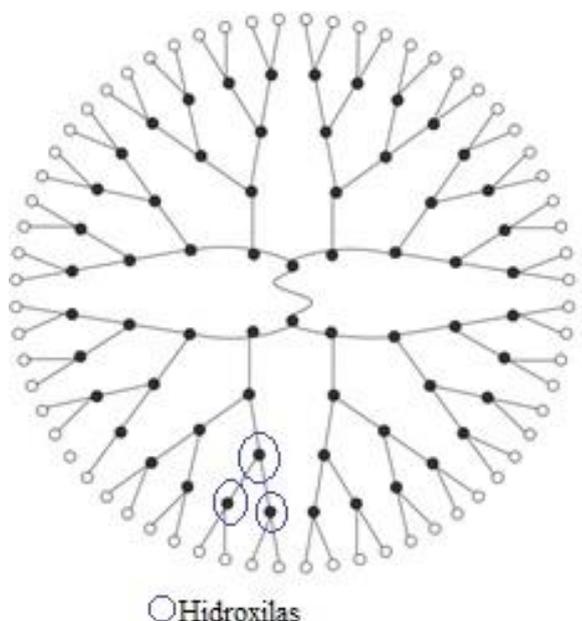


Figura 3.18: Ilustração típica de um dendrímero poliglicérol.  
Fonte: [93].

Os trabalhos de Tomalia, et al. [94] chegaram a conclusão de que as técnicas de propagação sequenciada no tempo do dendrímero permitiam:

- Monodispersidade, ou seja, construir controlando o peso molecular;
- Topologia, isto é, controlar as ramificações;
- Versatilidade no desenho e disposição dos grupos terminais para biocatalisadores;
- Auto-replicação, isto é, ter a liberdade em criar repetições de estruturas químicas;
- Simetria das ramificações para criar topologias poliméricas uniformes.

O dendrímero à base de poliglicérol (PGLYD) originária da matéria prima do glicérol (subproduto do processo de produção do biodiesel) confere ao Brasil vantagens competitivas por ser um dos maiores produtores de grãos. Além disso, PGLYD possui uma vantagem ambiental e econômica por ser reciclável e de um bom custo benefício [95].

Por ter o melhor controle no processo de fabricação, a sintetização do PGLYD é feita pelo método divergente, no qual o monômero se inicia a partir do núcleo, vai se adicionando sucessivas camadas de monômeros em sua volta até obter o dendrímero desejado de acordo com as gerações [96].

O estudo de Teixeira [95] prevê que, a cada 90 m<sup>3</sup> de biodiesel produzido por reação de transesterificação de óleos vegetais, são gerados 10 m<sup>3</sup> de glicerina. O governo brasileiro, a partir da Lei 11097 de 2005, introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira que, a partir de Janeiro de 2008, foi obrigado a adicionar 2% de biodiesel no diesel fóssil até chegar aos 10% em 2018. A resolução de nº 16 emitida em 29 de Outubro de 2018 pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) determina a progressão obrigatória de conteúdo do biodiesel, que atualmente está em 10% sobre o diesel fóssil, para patamares de até 15% em 2023 [97].

Dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) mostram que em 2019, foram produzidos 5,9 milhões de metros cúbicos de biodiesel e gerados 494,6 mil metros cúbicos de glicerina no processo.

Além disso, o PGLYD possui uma elevada funcionalidade e biocompatibilidade o que faz desse polímero um transportador eficaz para diversas finalidades químicas, médicas e de engenharia [90].

### **3.9 Dendrímero de poliglicerol encapsulado com monopartículas superparamagnéticas**

O uso de dendrímeros como hospedeiro para as partículas metálicas foram mostradas nos estudos de Gröhn, et al. [98], Zheng and Dickson [99] e Bronstein and Shifrina [100]. A descoberta da característica do dendrímero em possuir uma estrutura globular e ser um polímero altamente ramificado com cavidades internas foram descritas por Tomalia [101] e Grayson and Frechet [102], o que permitiu enormes oportunidades para a produção de fluidos magnéticos altamente estáveis com SPIONs encapsulados nas cavidades internas do dendrímero por meio de interações hidrofóbicas ou eletrostáticas. Dentre as técnicas de inserção de SPIONs nas cavidades do dendrímero, foi selecionado o método eletroquímico de única etapa por oferecer aumento de estabilidade dos fluidos magnéticos, evitar aglomerações indesejáveis de particulados e eliminar o processo de secagem, armazenamento, transporte e dispersão dos SPIONs.

## 4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

O estudo sobre a avaliação das propriedades dos fluidos magnéticos pertinentes para o desenvolvimento do protótipo foi realizado por meio de técnicas experimentais da Figura 4.1.

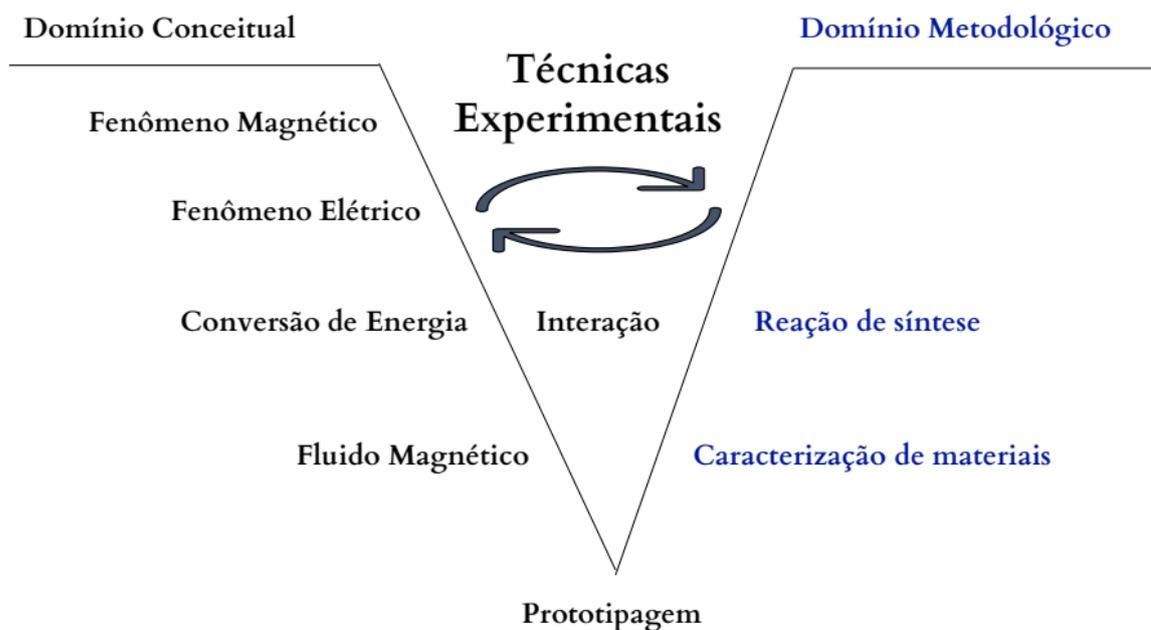


Figura 4.1: Ilustração da interação das técnicas experimentais para a prototipagem.

Fonte: Próprio autor.

Segundo a Figura 4.1, após a escolha do fluido magnético, o passo seguinte foi estudar e analisar as condições de movimento e tamanho necessários para que este fluido conseguisse gerar uma corrente elétrica dentro de uma câmara toroidal.

As reações inorgânicas ou orgânicas de síntese (ou adição) ocorrem quando duas ou mais substâncias sofrem reações de liberação de energia (exotérmica) ou de absorção de energia (endotérmica) originando um único produto, isto é,  $A + B \rightarrow C$  mostrado na Figura 4.2 [103]. Os reagentes A e B podem envolver um conjunto de duas moléculas complexas tanto pela combinação de moléculas intermediárias quanto pelas matérias-primas não reagidas cujo processo pode tornar reações de síntese mais complexas.

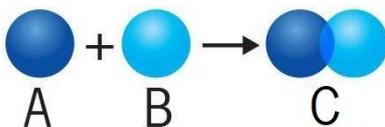


Figura 4.2: Esquema de reação de síntese para substância inorgânica.

Fonte: [103].

Uma reação de síntese bem sucedida significa maximizar a criação de moléculas desejadas e reduzir ou mitigar as moléculas de subprodutos indesejáveis. Os fatores que influenciam para o sucesso são:

- Segurança no manuseio e reações químicas perigosas;
- Qualidade da matéria prima e sua procedência;
- Controle dos parâmetros de reação;
- Equipamentos de reação;
- Velocidade da reação;
- Gerenciamento de isolamento e pureza do produto.

Obtida o fluido magnético desejado, realizou-se a caracterização de suas propriedades físico-químicas conforme as especificações técnicas.

#### 4.1 Síntese eletroquímica do PGLYD-SPIONS

O PGLYD foi sintetizado em laboratório a partir do anel aniônico pelo método de abertura divergente do carbonato de glicerol, mostrado pela Figura 4.3, utilizando parcialmente o glicerol desprotonado como núcleo central e iniciador para polimerização aniônica.



Figura 4.3: Ilustração da estrutura e fórmula do carbonato de glicerol.  
Fonte: [104].

O peso molecular de 1,7 kDa (Dalton) foi determinado pelo espectro de massa Maldi sob referência de Maldi-Tof-MS (Brucker Biflex) e com 28 hidroxilas por moléculas foi altamente solúvel em água em altas concentrações.

A síntese do fluido magnético do PGLYD-SPIONS foi baseado na redução eletroquímica potenciostática de íons de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  na razão de 2:1 M de  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  para formar nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) estabilizados pelo PGLYD.

O fluido magnético foi preparado dentro de uma célula eletroquímica contendo um simples par de eletrodos contendo 10 mL de PGLYD e  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  na razão de 2:1 M.

A placa de platina medindo 0,5 cm de largura e 7 cm de comprimento foi empregado como catodo, o eletrodo de platina medindo 0,1 cm por 7 cm foi para o anodo durante a voltametria cíclica seguindo a redução eletroquímica  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  com um eletrólito composto de 0,1M de  $\text{FeCl}_3$ , 1M de NaCl e 1M de PGLYD (com base na concentração total  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ).

As medições eletroquímicas foram realizadas no potenciostato/galvanostato Omnimetra PG-3901 com software NOVA na versão 1.8 no arranjo convencional de 3 eletrodos: (1) catodo para placa de platina (0,5 cm x 7 cm), (2) anodo para eletrodo de platina (0,1 cm x 7 cm), (3) Ag/AgCl como eletrodo de referência e (4) eletrólito composto de 0,1 M  $\text{FeCl}_3$ , 1 M NaCl e 1 M PGLYD, conforme mostrado na Figura 4.4. A célula foi mantida num banho ultrassônico a temperatura ambiente de 25°C.

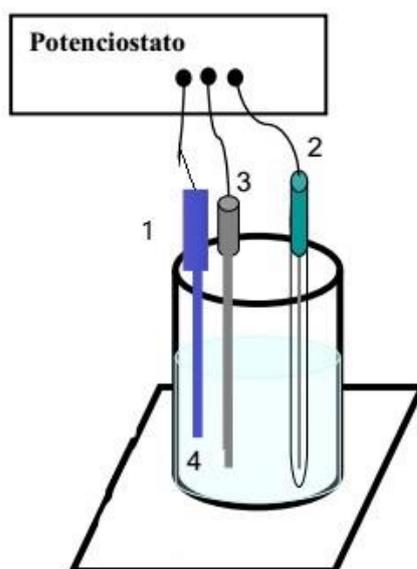


Figura 4.4: Ilustração da medição eletroquímica.  
Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Técnicas de caracterização para o PGLYD-SPIONs

As técnicas de caracterização de um fluido magnético PGLYD-SPIONs consistem em avaliar suas propriedades físico químicas relevantes para o funcionamento no protótipo.

A primeira etapa do processo denominada de difração de raio-X foi avaliar a presença dos óxidos de ferro no fluido magnético. O equipamento utilizado foi o difractômetro de raio X da marca Rigaku com a fonte de radiação  $\text{CuK}\alpha$ , cobrindo uma faixa de  $2\theta$ , variando de  $10^\circ$

a 50°, com incremento de 0,05° pelo detector linear. As dispersões foram depositadas num baixo substrato de silício (Si) na retaguarda e deixadas evaporando sob em temperatura ambiente.

A segunda etapa foi verificar o tamanho e o formato dos núcleos dos SPIONs contidos no fluido magnético para certificar que são nanopartículas através da microscopia eletrônica de transmissão (TEM). A amostra foi submetida ao microscópio da marca Hitachi modelo H7000 operando a 125 kV e equipado com fonte de elétron termiônica W. O processo de preparação foi descansar as amostras de poliglicerol sobre a malha de carbono revestida de cobre e deixadas expostas à temperatura ambiente para evaporar a umidade.

A terceira etapa foi verificar se o fluido magnético reage conforme os monodomínios magnéticos característicos dos SPIONs através do magnetômetro. O processo consistiu em aplicar um campo magnético sobre o fluido magnético para verificar se existe uma resposta de direção à ação do campo magnético e cessa este direcionamento imediatamente quando o campo magnético é desligado. O modelo do magnetômetro com vibração na amostra utilizado foi da marca Lakeshore modelo 7400 cuja função foi colher os dados de magnetização normalizada em relação ao mesmo peso correspondente do fluido magnético.

Finalmente, a quarta e última etapa, consistiu na realização da análise termogravimétrica (TGA) sobre o fluido magnético para verificar o comportamento de degradação do material em função da temperatura.

Os termogramas foram analisados quantitativamente na superfície das nanopartículas de PGLYD para normalizar os dados magnéticos à massa do núcleo inorgânico. O equipamento TGA utilizado foi da marca Shimadzu Co modelo TGA-50 com amostra de 5 mg de fluido magnético PGLYD-SPION colocada dentro do cadinho de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) exposto a uma variação de temperatura de 25 °C a 1000 °C a uma taxa de aumento de 10 °C.min<sup>-1</sup> num ambiente isento do gás carbono neutralizado pela circulação do gás Nitrogênio (N) a um fluxo de 40 mL.min<sup>-1</sup>.

## 5 PROTÓTIPO DO MICROGERADOR

A etapa do projeto que faz a passagem do abstrato contido nas ideias e pensamentos para uma forma física que represente a realidade e propicie validações é denominada de protótipo.

O desenvolvimento do protótipo do microgerador foi projetar um carregador pequeno e portátil para fornecer energia elétrica a um dispositivo de baixo consumo. A premissa do projeto foi definir que o fornecimento de energia elétrica deveria ter origem de uma fonte renovável, ecológica e abundante na natureza. Para isso, foi utilizado a técnica do planejamento do produto e o design thinking.

O planejamento do produto (PDP) tradicional foi confeccionado e avaliado no início do doutorado para nortear o desenvolvimento do protótipo conforme mostrado pelo APÊNDICE A – Planejamento inicial do produto sobre estudos de geração de energia pelo fenômeno magnetohidrodinâmico.

Para a busca de solução de problemas e questões levantadas no protótipo e com aderência ao planejamento do produto, foi aplicada uma abordagem denominada de Design Thinking, um pensamento abduutivo, no qual se entende o “design” como disciplina para promover bem-estar na vida das pessoas conforme a Figura 5.1. Foi realizado um breve mapeamento das funções e os aspectos específicos para melhor identificar as barreiras e gerar alternativas viáveis para o protótipo [105].

O Design Thinking foi aplicado no protótipo por ser complexo e para verificar problemas capciosos que possam estar implícitos cujos métodos e ferramentas de planejamento do projeto não conseguem ser aplicados eficazmente. O que importa para a resolução deste tipo de problema é o levantamento de um conjunto de soluções que satisfaçam a conjuntura temporal e o escopo do projeto [106].

A utilização de protótipos de rápida confecção dentro do planejamento de projeto tem a função de manter a performance do processo de desenvolvimento contínuo e ganhar tempo para eventuais atrasos.

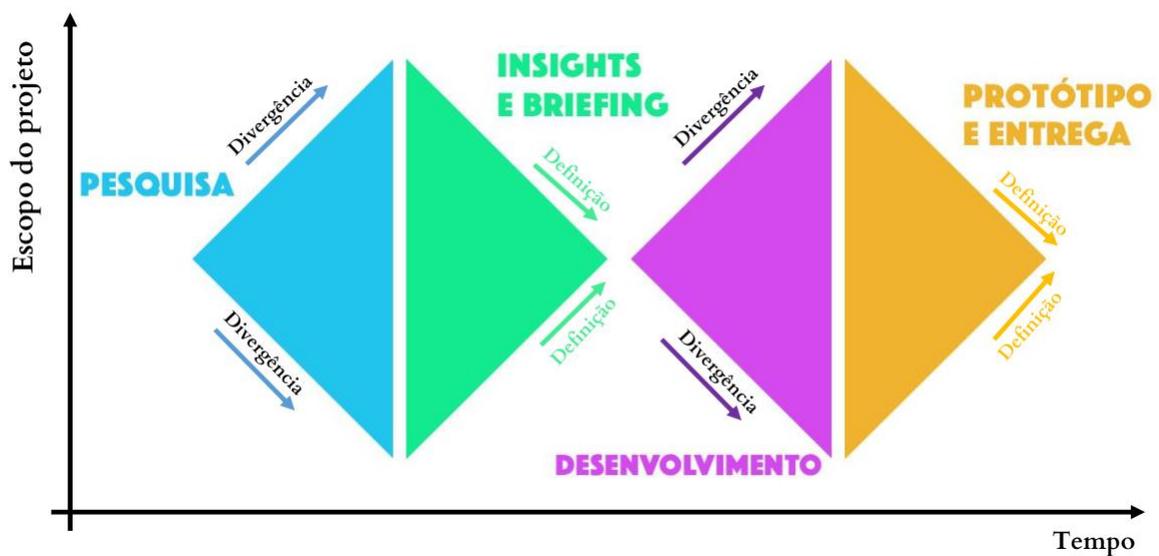


Figura 5.1: Esquema ilustrativo do Design Thinking.  
Fonte: [107].

Além disso, o processo de prototipagem permitiu melhor qualidade na geração de ideias, convergência na comunicação, mais objetividade na interação, aprendizagem mais efetiva e menos custosa com as falhas, ampliação da capacidade de soluções e mais assertividade na confecção de soluções.

## 5.1 Plano de prototipagem

O plano de prototipagem para o microgerador foi confeccionado para ter uma referência construtiva e os requisitos necessários para cada item avaliado conforme mostrada pela Tabela 5.1.

Realizada a definição dos requisitos, o projeto foi desmembrado em grupos de atividades para o processo prático de prototipagem:

- Construção do modelo virtual: o modelo do toróide foi confeccionado com auxílio do software de CAD próprio para modelagem tridimensional e renderização para obtenção de um visual mais refinado;
- Levantamento de lista de materiais: organizar a lista de itens com suas características para serem feitos ou comprados e verificar potenciais fornecedores de materiais;
- Confecção do modelo físico: são processos de criação de forma do objeto, preparação de arquivos para processamento, conexões de equipamentos, ligação de tubos, instalações eletrônicas e montagem;

- Testes: são eventos necessários para validar a geração de corrente do protótipo com base nos estudos realizados.

Tabela 5.1: Requisitos necessários do plano de prototipagem.

| <b>Referência construtiva</b>                    | <b>Requisitos</b>   |
|--|---|
| Função do protótipo                              | Apresentar soluções de fluxo de fluido, transformação de grandeza e geração de corrente.<br>Modelo funcional próximo ao produto final.  |
| Quantidade e tipos de protótipos a serem criados | Criação de um protótipo físico de função e um esquema de funcionamento.   |
| Iterações necessárias sobre o protótipo          | Não aplicável.  |
| Subsistemas e funcionalidade                     | O presente protótipo foi montado em partes para assegurar o funcionamento de subsistemas de bombeamento, geração magnetohidrodinâmica, conversão eletromagnética, visualização do sinal de corrente. Os subsistemas serão interligados por dutos onde passa o fluido magnético e cabos onde passa a eletricidade                      |
| Requisito do projeto e escala de construção      | O projeto será construído em escala 1:1.<br>O intuito do protótipo é verificar o funcionamento conforme projetado mesmo que a construção não seja rigorosa em termos de performance de processo do produto final.   |
| Seleção de técnicas de manufatura e montagem     | As técnicas de manufatura e montagem são: usinagem da peça toroidal, abertura de cavidades internas à peça toroidal, conexão de subsistemas via duto ou cabo, checagem peça a peça e teste elétrico.  |
| Seleção de materiais                             | O núcleo do projeto é a placa de politetrafluoretileno (PTFE) para construção de câmara toroidal onde ocorrerá os fenômenos eletromagnéticos estudados. Esse processo foi terceirizado por envolver equipamentos e pessoal especializado.<br>Os equipamentos de medição de corrente e bomba peristáltica encontram-se no laboratório. |

## 5.2 Construção do modelo virtual

O protótipo do microgerador foi construído a partir da placa de politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente por TEFLON, que foi usinada para formar uma câmara toroidal de raio interno 21,3 mm e raio externo de 50,7 mm com espessura de parede de 1 mm (0,1 cm).

A capacidade máxima de armazenamento de líquido, inicialmente, foi de 133,375 cm<sup>3</sup> (133,375 mL), descontando a espessura de parede conforme mostrado na Figura 5.2.

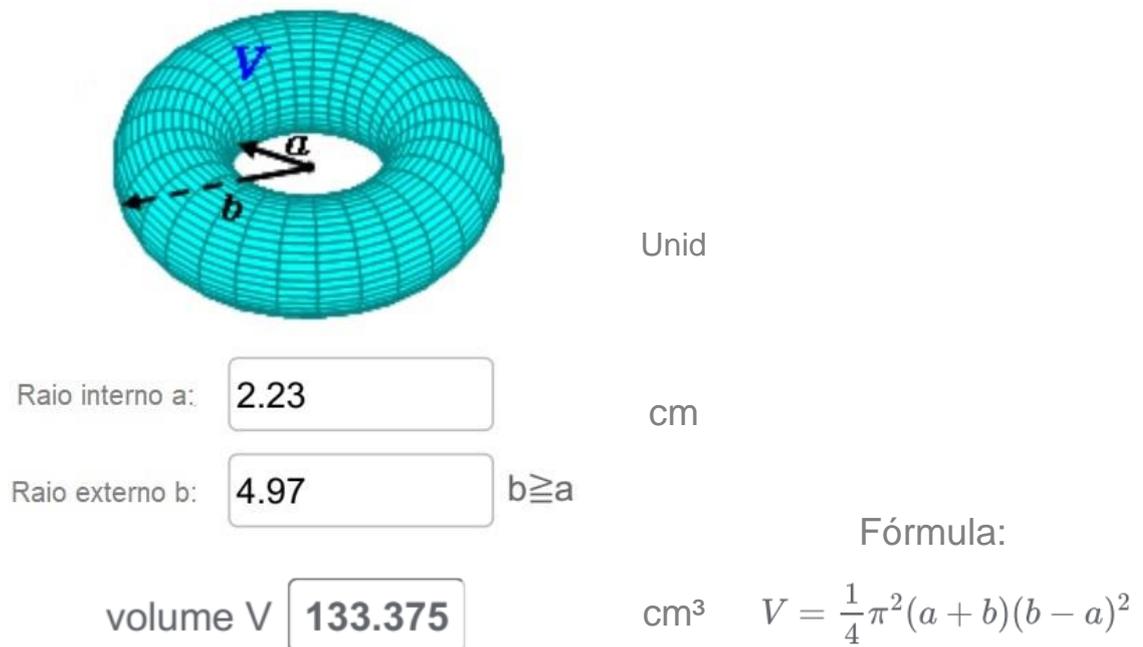


Figura 5.2: Representação de cálculo do volume do toróide.  
Fonte: Próprio autor.

A cavidade do toróide foi preenchida com 40g de fluido magnético de PGLYD-SPION.

A cavidade deve suportar a dinâmica do fluido magnético que gira entre 50 a 200 rotações por segundo (rps) controlada pela bomba peristáltica. Convertendo a rotação em velocidade retilínea com base no raio maior de 4,97 cm, pode variar entre 12,6 m/s e 62,5 m/s.

## 5.3 Levantamento de lista de materiais

Como qualquer preparação, este protótipo necessita de uma lista de materiais e serviços para a sua confecção conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Representação de lista de materiais.

| Item | Código          | Descrição   | Qtd  | Função   |
|------|-----------------|---|------|--|
| 1    | P/N TEF001G001A | Placa de politetrafluoretileno (PTFE) 12 cm x 12 cm x 3,5 cm  | 1 un | Construir a câmara toroidal  |
| 2    | P/N FMG001T001A | Fluido magnético PGLYD-SPION – dendrímero de poliglicerol com nanopartículas de óxido de ferro superparamagnético | 40g  | Material para gerar eletricidade   |
| 3    | P/N SAC001I001A | Sistema de aquisição de corrente  | 4 un | Transformar o escoamento do fluido em grandeza de corrente elétrica                        |
| 4    | P/N SIP001C001A | Sistema de excitação do fluido magnético  | 1 un | Colocar o fluido magnético em movimento por bomba peristáltica                             |
| 5    | P/N RES001R001A | Reservatório de fluido magnético  | 1 un | Local de enchimento e Equalização do transporte de fluido                                  |
| 6    | P/N MAN001M001A | Mangueira para escoamento do fluido   | 1 m  | Conectar os dispositivos para circular o fluido  |
| 7    | P/N VAL001V001A | Válvula de controle   | 2 un | Controlar o escoamento do fluido   |
| 8    | P/N SIP001C001A | Sistema de intercambialidade da placa   | 1 un | Fazer o encaixe adequado da câmara toroidal com a mangueira para reduzir a perda de carga  |
| 9    | P/N MON001M001A | Computador e Monitor para leitura da grandeza elétrica  | 1 un | Visualizar a onda de corrente gerada   |
| 10   | P/N NEO001M001A | Ímã de neodímio – cubo de 12 cm <sup>3</sup>  | 1 un | Excitatriz magnética inicial para partida do fluido magnético na região das bobinas        |
| 11   | P/N ACE001A001A | Materiais de fiação elétricas, etiquetas, conectores, fixadores, bornes.  | 1 un | Kit de materiais para conexões elétricas, fixação de componentes e organização do conjunto |

Fonte: Próprio autor.

Os códigos criados destinam-se para organização de partes e peças para facilitar a procura e informatizá-los num banco de dados.

Uma lista de materiais organizada e bem descrita traz uma série de vantagens competitivas para fazer a melhor aquisição de produtos e serviços através de uma análise comparativa entre comprar e internar a produção, gerenciamento de prioridades na aquisição do produto, pesquisa com mais efetividade de potenciais fornecedores e solicitação de orçamentos padronizados aos fabricantes.

## **5.4 Confeção do modelo físico**

O modelo físico é a construção do protótipo propriamente dito.

O protótipo foi concebido pela junção de um circuito hidráulico e eletromagnético.

O circuito hidráulico compreendeu a câmara toroidal devidamente usinada com abertura de canais para circulação do fluido magnético no material PTFE. O canal de saída da câmara toroidal foi conectado por uma mangueira à válvula de controle de fluxo. Saindo pela válvula de controle, o novo trecho foi conectado por outro segmento de mangueira a um reservatório para equalização do volume de fluido. A saída do reservatório foi conectada por uma nova mangueira à bomba peristáltica do fabricante Sigma-Aldrich que tem a função de manter a velocidade de deslocamento do fluido magnético. A excitatriz composta de ímã de neodímio foi instalada estrategicamente próxima as quatro bobinas para que o fluido magnético tivesse uma excitação inicial somente no momento de partida. O novo trecho de mangueira montado foi conectado a saída da bomba para a outra válvula de controle e desta retornando novamente à câmara toroidal, fechando o circuito hidráulico.

O circuito eletromagnético compreendeu quatro bobinas dispostas em paralelo, envolvidas na região externa da câmara toroidal, e os terminais separados em polos positivo e negativo aterrado. Os polos positivo e negativo foram conectados por fios a placa do sistema de aquisição instalada no computador para captura do sinal de corrente gerado e de sua ordem de grandeza. O sinal de corrente resultado da circulação do fluido magnético PGLYD-SPION pode ser visualizado pelo monitor do computador na escala de miliAmpère.

## **5.5 Testes no protótipo**

Antes de realizar os testes no protótipo, uma verificação visual ordenada e criteriosa foi efetuada. A principal preocupação foi nas conexões do circuito hidráulico para que não houvesse vazamentos por mangueira danificada, baixo torque de aperto dos conectores e dano à câmara toroidal.

Na parte do circuito eletromagnético, foi verificada a existência de fiação solta, o tempo de captura do sinal e sua resposta correta na ordem de grandeza pelo monitor.

Com as verificações efetuadas, iniciou-se o processo de enchimento de 40 g do fluido magnético na câmara toroidal e a mesma quantidade no reservatório para manter o fluxo contínuo em todo sistema durante o funcionamento do protótipo.

O sistema de aquisição foi ativado, o ímã de neodímio ativado para excitar as bobinas inicialmente, as válvulas abertas e acionada a bomba peristáltica.

O procedimento foi de ajuste fino no controle de fluxo da bomba peristáltica para manter os 40 g de fluido dentro câmara toroidal, regulagem das válvulas para ajustar a velocidade do fluido na faixa entre 50 a 200 rps e ajuste de escala da corrente na placa de aquisição para melhorar a visualização no monitor.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Síntese eletroquímica da PGLYD-SPIONs

O resultado final desta operação mostrou que nanopartículas se mantiveram monodispersas em tamanho e o tamanho das nanopartículas pode ser sintonizado pela variação da razão metal/dendrímero. O PGLYD encapsulado os SPIONs pode ser sintetizado pelo sequestro dos íons de Ferro dentro de uma cavidade apropriada do dendrímero seguido pela redução eletroquímica conforme mostrada pela Figura 6.1.

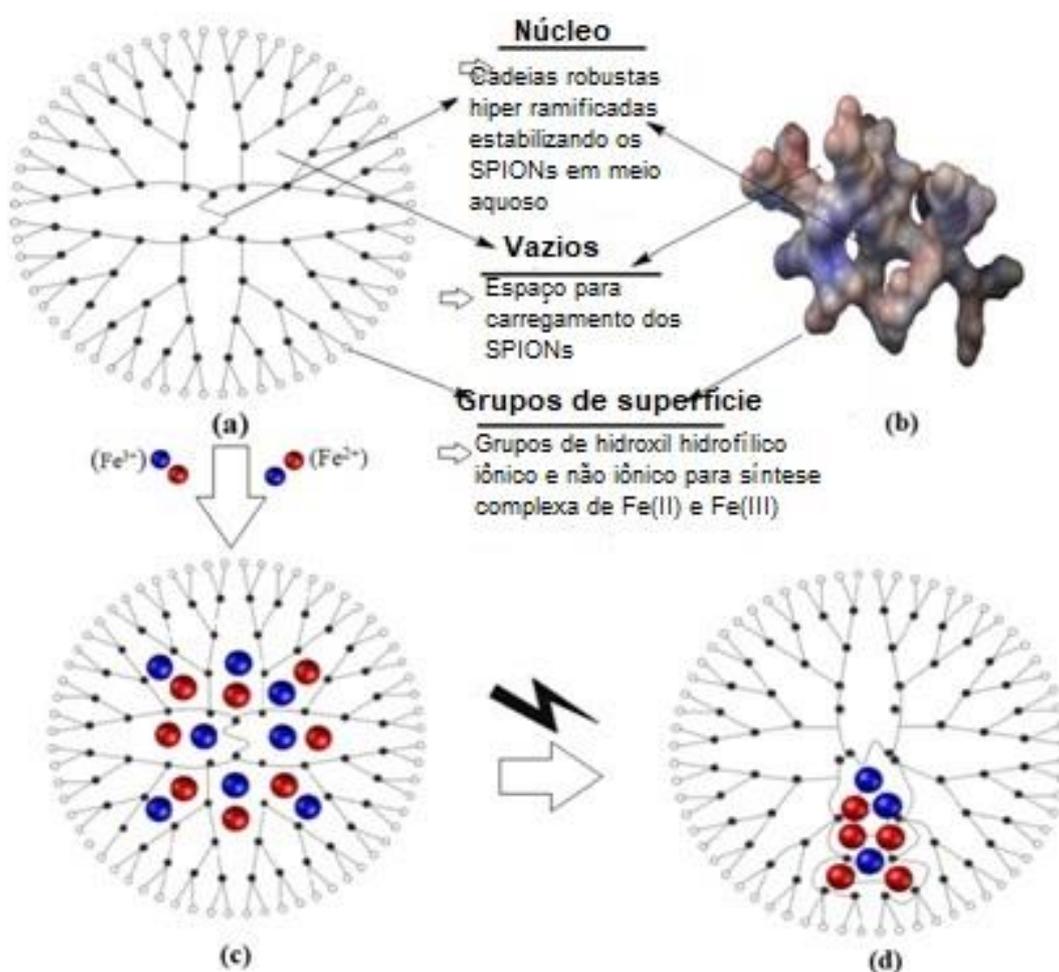


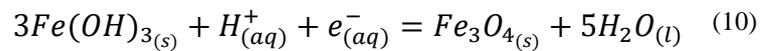
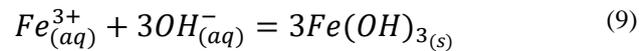
Figura 6.1: Ilustração da preparação potencioestática do fluido magnético dentro do PGLYD-SPIONs, (a) PGLYD absorve íons  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ , (c) nas suas cavidades ocorrem as interações eletrostáticas entre íons metálicos e grupos funcionais do dendrímero e (d) formação da magnetita através da redução eletroquímica, (b) Mapa eletrostático do grupo funcional do PGLYD indicado em vermelho para carga (-) e em azul para carga (+).

Fonte: Próprio autor.

Ao realizar uma pesquisa bibliométrica referente às publicações de trabalhos e patentes, não foi encontrada o uso da técnica de redução eletroquímica para acoplar os íons de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  dentro das cavidades do PGLYD até o presente momento. Comparada aos métodos tradicionais de síntese na produção de fluidos magnéticos, a redução eletroquímica oferece grande vantagem no que se refere à redução direta dos íons férrico e ferroso dentro das cavidades do PGLYD sem a necessidade de buscar iniciadores químicos, solventes ou catalisadores ou etapas de purificação. Isto resulta no processo menos agressivo ao meio ambiente para obter os fluidos magnéticos adequadas propriedades magnéticas para aplicações tecnológicas [108].

Conforme a Figura 6.1, o processo de fabricação inicia-se: (a) através da absorção dos íons de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  nos vazios do poliglicerol, (c) em seguida, os íons de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  dentro das cavidades do PGLYD ocorrem interações eletrostáticas com grupos funcionais do dendrímero e (d) resulta na formação da magnetita através da redução eletroquímica.

A redução eletroquímica para a formação da magnetita ocorre seguindo as fórmulas (9) e (10) abaixo:



Ao passar a corrente elétrica na nova PGLYD, esta consegue separar os íons de forma que no mesmo poliglicerol tenha regiões com carga predominantemente mais positiva e outras regiões com carga mais negativa. Conforme a Figura 6.2, observa-se que o mapa de potencial eletrostático da PGLYD-SPIONs distribui-se em regiões de carga negativa (vermelho) e de carga positiva (azul).

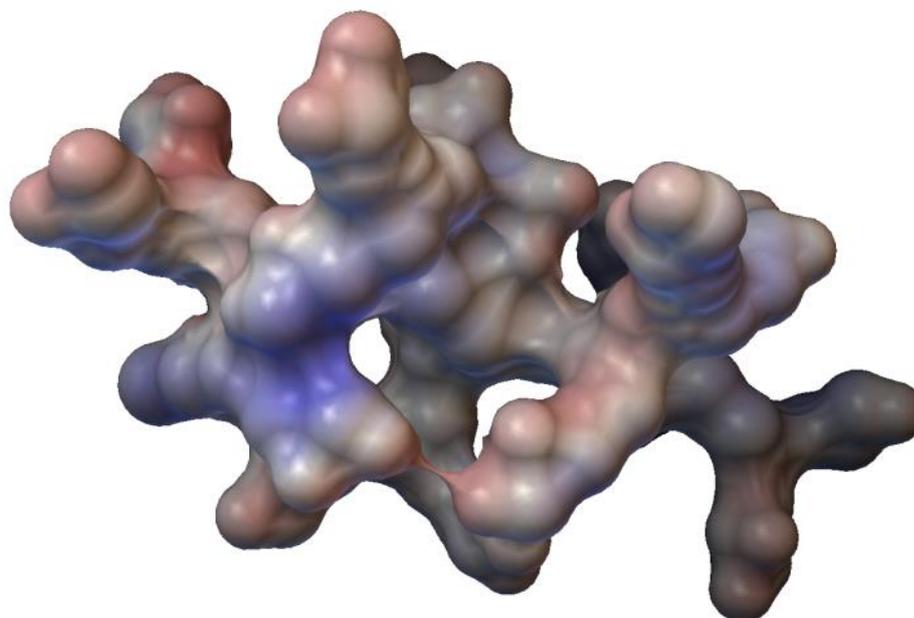


Figura 6.2: Ilustração do mapa de potencial eletrostático PGLYD-SPIONs.  
Fonte: Próprio autor.

A medição do perfil da corrente mostra a síntese potenciostática do fluido magnético PGLYD- SPIONs ao longo do tempo. O PGLYD poderá reter altas concentrações de  $\text{Fe}^{3+}$  dentro de suas cavidades e sem ser ativado eletroquimicamente conforme Figura 6.3.

A pequena diferença no ponto médio do potencial observado nos ions  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  da Figura 6.4 sugere que as moléculas de PGLYD são fortemente envolvidas pelas atrações eletrostáticas com os SPIONs dispersados dentro da estrutura de cavidade dendrítica.

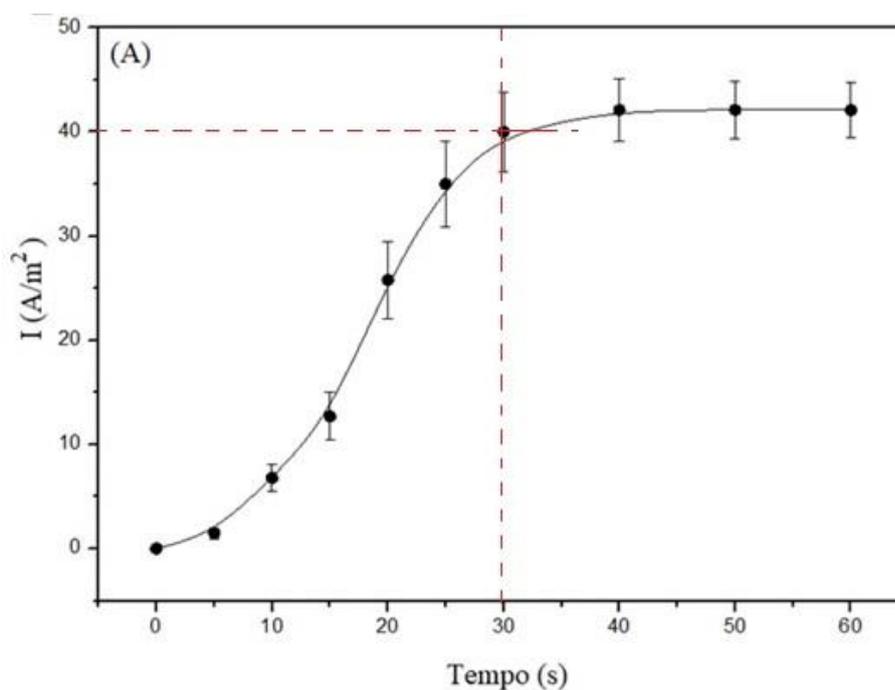


Figura 6.3: Perfil de corrente ao longo do tempo para síntese potenciostática da amostra do PGLYD-SPION.  
Fonte: Próprio autor.

Avaliação comparativa por voltametria cíclica mostrada na Figura 6.4 entre o eletrólito de  $\text{Fe}^{3+}$  (aquosa) (a) e o PGLYD com nanopartículas de  $\text{Fe}^{3+}$  (b). Observou-se que os dois picos foram atingidos quando o catódico (redução) apresentou valores negativos de corrente e, o anódico (oxidação), valores positivos de corrente. Os respectivos valores de pico catódico foram registrados a um potencial ao redor de 0,46 V / 0,52 V; e para o anódico (oxidação) foram registrados ao redor de 0,72 V / 0,80 V.

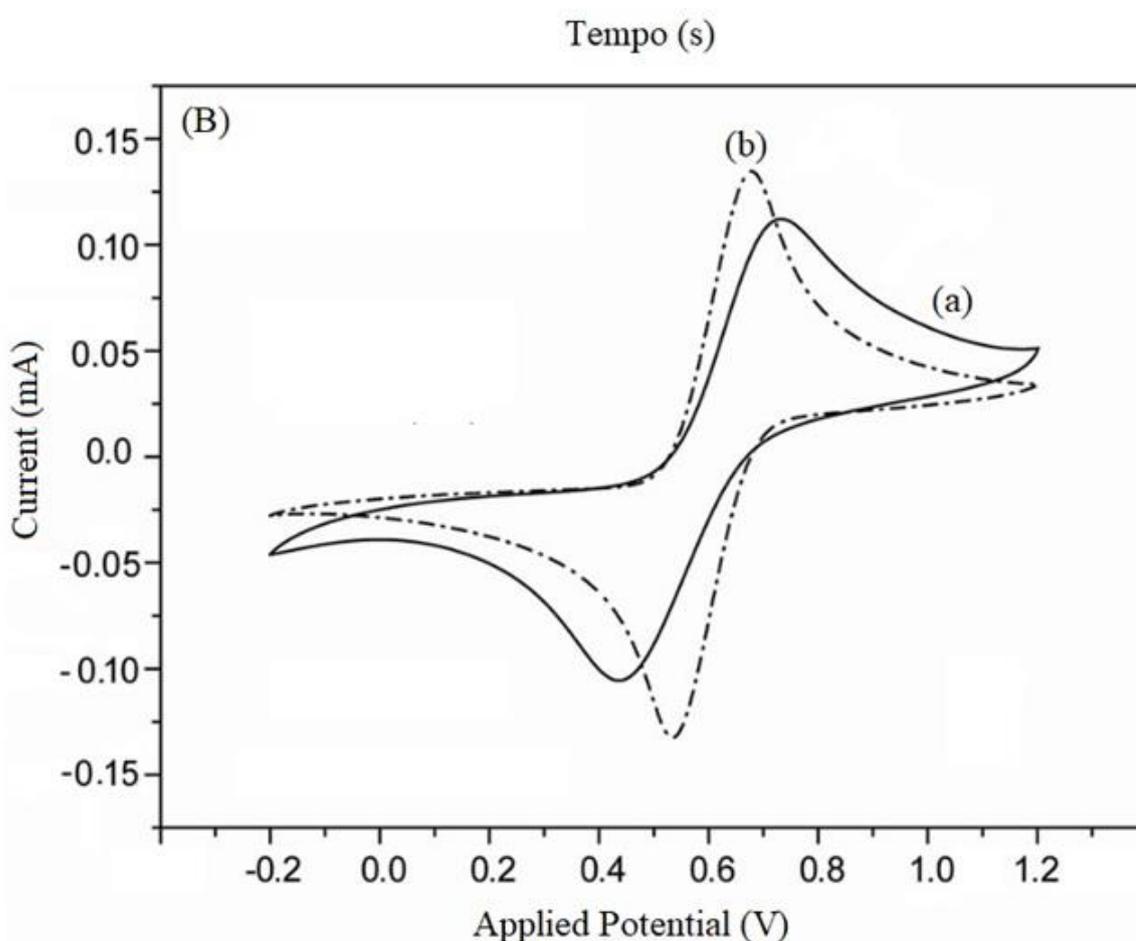


Figura 6.4: Voltamograma cíclicos obtidos na síntese aplicando faixa de potencial de -0,2 V a 1,2V vs. (Ag/AgCl) para eletrólito de  $\text{Fe}^{3+}$ (a) e poliglicerol incrustado com nanopartículas de  $\text{Fe}^{3+}$ (b) . Com velocidade de varredura igual a  $50 \text{ mV.s}^{-1}$  a temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Fonte: Próprio autor.

## 6.2 Caracterização do PGLYD-SPIONs

A estrutura cristalina do PGLYD-SPIONs foi verificada pela análise de difratômetro de raio X da marca Rigaku. A Figura 6.6 mostra reflexões características dos picos evidenciando que o fluido contém a magnetita isenta de outras fases de óxido de ferro evidenciados pelos picos de Bragg obtidos a  $2\theta$  nos valores  $30,5^\circ$  (220),  $35,9^\circ$  (311),  $43,5^\circ$

(400),  $53,5^\circ$  (422),  $57,3^\circ$  (511),  $63,1^\circ$  (440) e  $74,1^\circ$  (533) com boa padronização de referência JCPDS 00-003-0863 mostrada pela Figura 6.5.

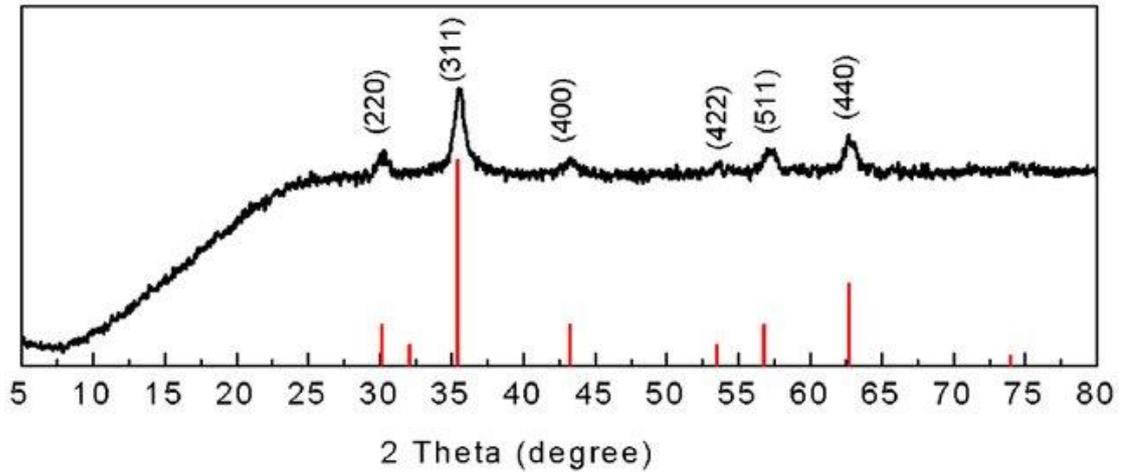


Figura 6.5: Curva padrão de referência JCPDS 00-003-0863 do SPIONs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> puro.  
Fonte: [109].

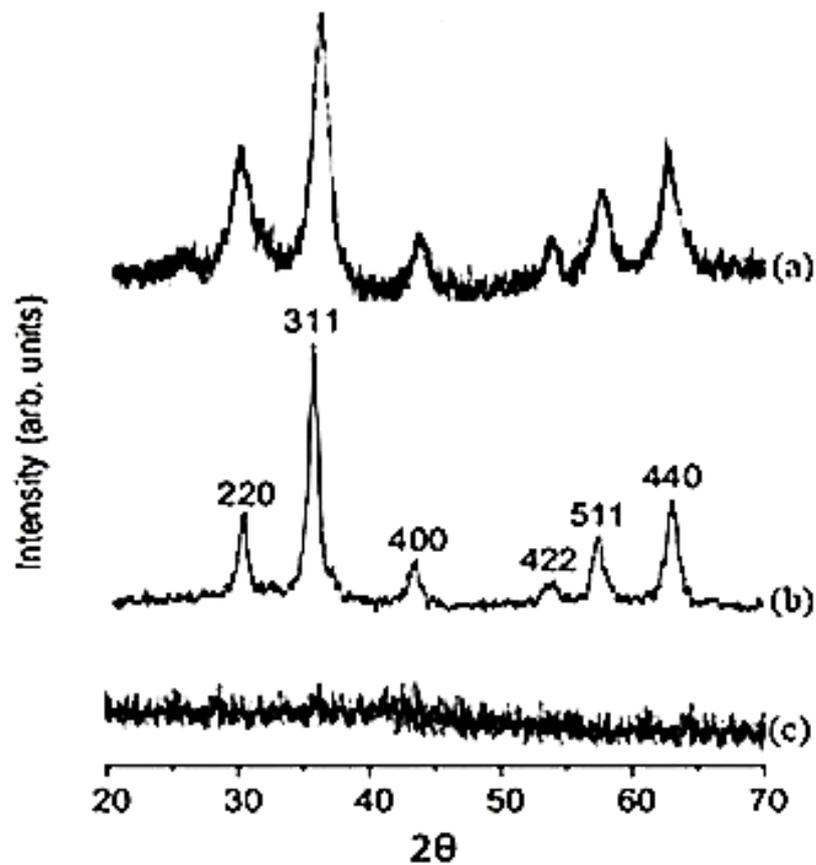


Figura 6.6: Comparativo de picos de Bragg por Difratômetro de raio X da marca Rigaku com fonte de radiação CuK $\alpha$  na faixa de  $2\theta$  variando de  $10^\circ$  a  $50^\circ$  com incremento de  $0,05^\circ$  destacando os picos de difração para: (a) Fluido magnético PGLYD-SPION, (b) SPIONs Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> puro e (c) PGLYD.

Fonte: Próprio autor.

As nanopartículas foram sintetizadas adequadamente no formato octaedral truncado, observou-se a cor cinza recorreu-se ao padrão denominado de célula padrão Wigner-Seitz conforme mostrado pela Figura 6.7 e descrito no trabalho de Zheng et. al. [110].

A morfologia do PGLYD-SPIONs foi observada através da microscopia de transmissão de elétron (TEM) mostrada pela Figura 6.8. A presença do PGLYD é observado como uma nuvem cinzenta incorporando as nanopartículas dos SPIONs, e evidencia a íntima interação entre ambos.

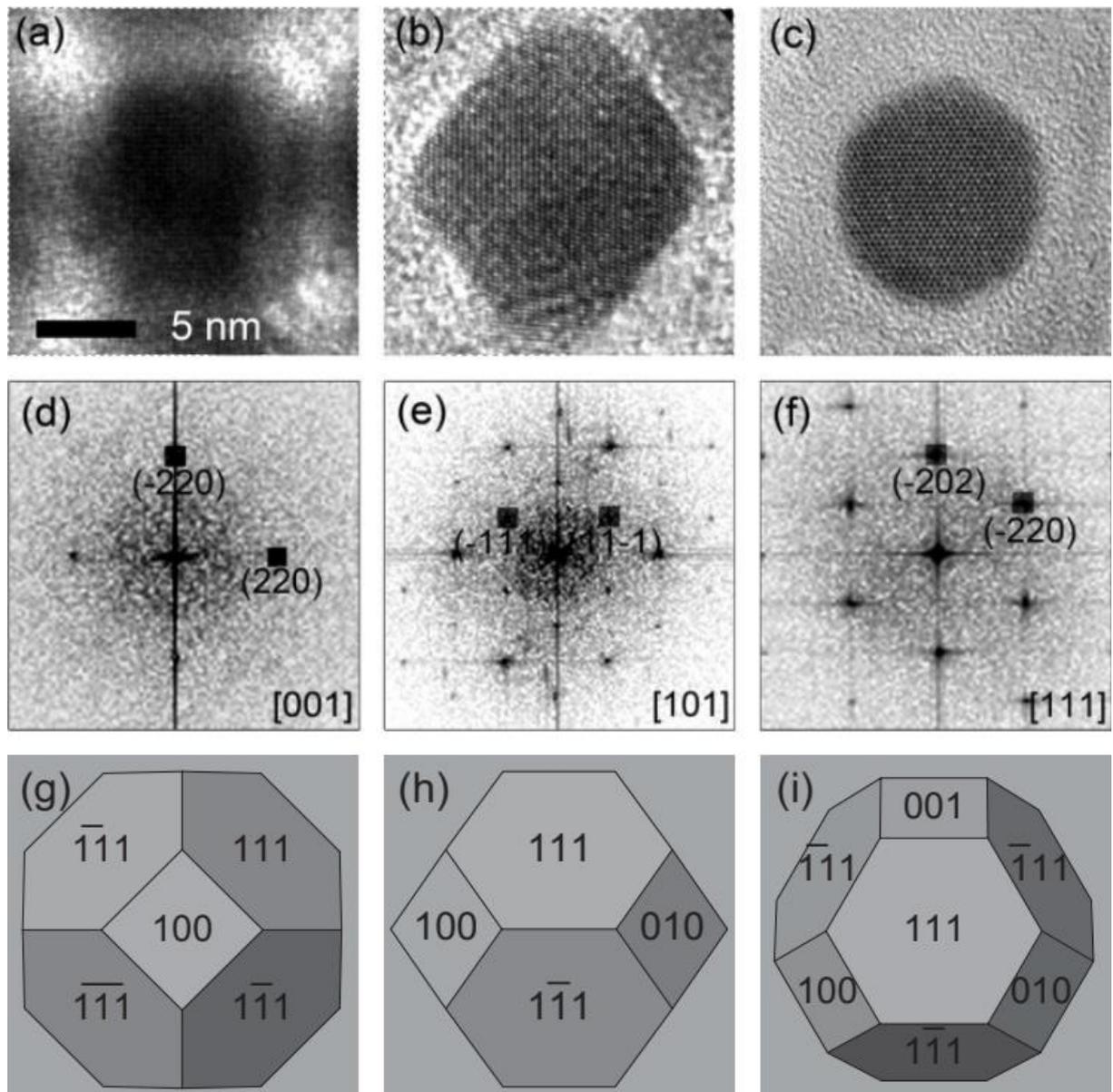


Figura 6.7: (a – c) Micrografia de alta resolução TEM-HRTEM do fluido magnético formato octaedral truncado, (d – f) padrões correspondentes ao FFT da micrografia HRTEM e (g – i) formas cristalina 001-101-111 da célula padrão Wigner-Seitz.

Fonte: [110].

Considerando o desvio padrão de 5 nm do equipamento TEM, o tamanho provável da amostra dos SPIONs manteve-se entre 10 a 19 nm. É bem conhecido que o tamanho dos SPIONs na faixa entre 10 a 20 nm oferece o melhor desempenho magnético quando eles tornam monodomínio magnético a partir de múltiplos domínios magnéticos conforme estudos realizados por Ho, et al. [111]

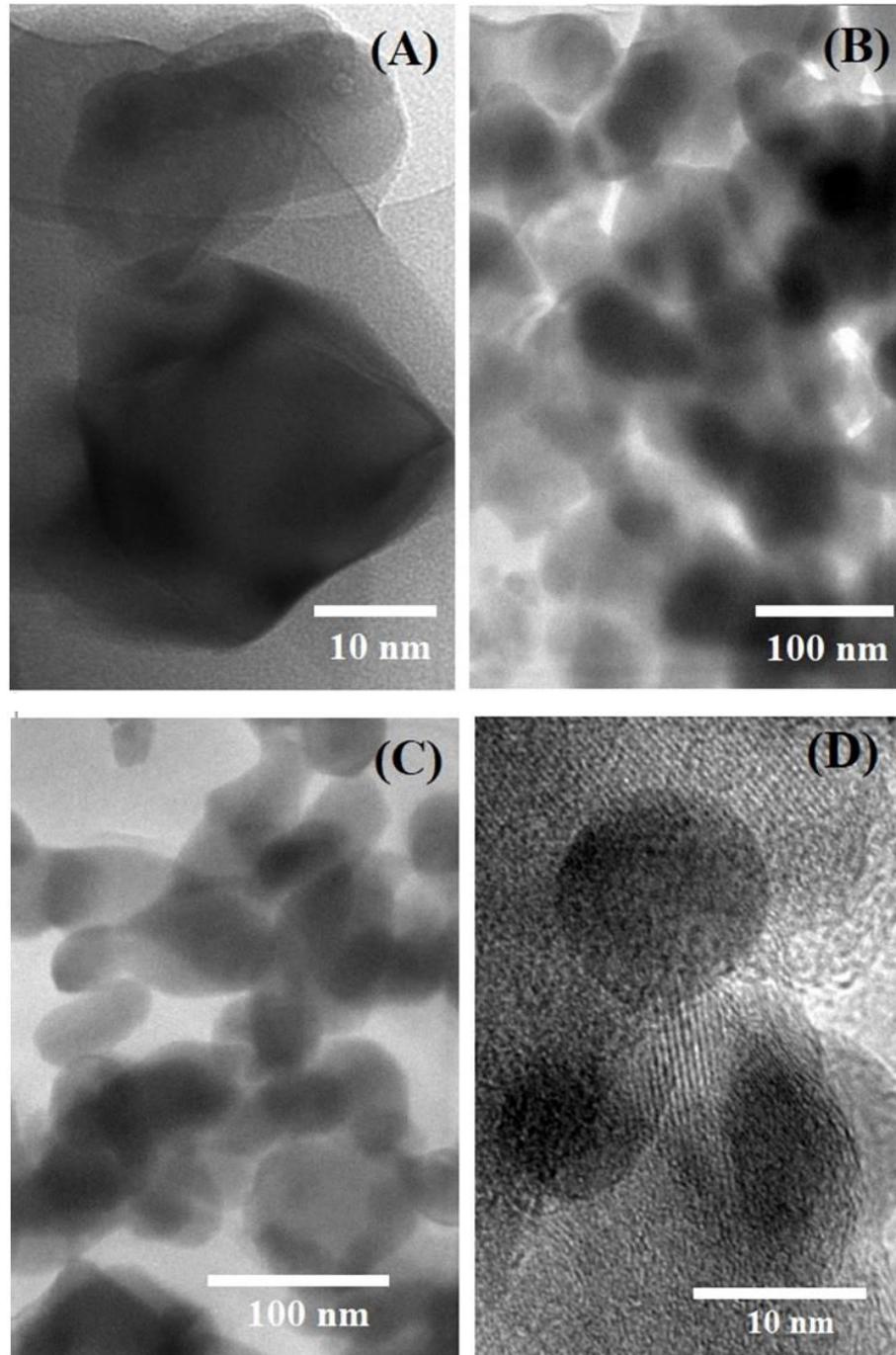


Figura 6.8: Micrografia do fluido magnético PGLYD-SPIONs visto pela microscopia de transmissão de elétron (TEM) da marca Hitachi modelo H7000 operando a 125 kV na escala de: (A) 10 nm, (B) 100 nm, (C) 100 nm. (D) Micrografia de alta resolução TEM-HRTEM do fluido magnético de SPIONs-PGLYD formato de esfera nas cavidades em escala de 10 nm.

Fonte: Próprio autor.

A estabilidade térmica do PGLYD-SPIONs foi avaliada pela análise termogravimétrica (TGA) para verificar a sua degradação como perda da massa, faixa de temperatura de trabalho que mantém a composição química íntegra, combustão da substância e reações de desidratação causada pelo aquecimento.

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada pelo equipamento da marca Shimadzu Co modelo TGA-50 e os resultados são mostrados na Figura 6.9. A decomposição do PGLYD-SPIONs com massa inicial de 40 g ocorre em dois estágios. No primeiro estágio, a temperatura de 342 °C, PGLYD-SPIONs exibe perda de massa de 8,3%, ou seja, 3,32 g. No segundo estágio, a temperatura de 435 °C, foi observada a perda de 54,09%, ou seja, 21,64 g que pode ser atribuída para a perda orgânica da estrutura PGLYD. Considerando a perda dos SPIONs como o peso da fração da nanopartícula de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  no PGLYD-SPIONs foi calculado para levar em conta 53% do total de peso do fluido magnético, isto é, reduziu de 40 g para 21,20 g.

O fluido magnético PGLYD-SPIONs exibe a propriedade ferromagnética do SPION e corresponde às curvas de magnetização na ausência do ciclo de histerese, característica de materiais superparamagnéticos, conforme a Figura 6.10. A redução da saturação magnética ( $M_s$ ) de 79,56  $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$  pela fase dos SPIONs para 61,86  $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$  para o fluido magnético PGLYD-SPIONs é resultado do efeito de revestimento nos SPIONs com PGLYD. Uma vez que o PGLYD aparece não contribuir para valores de magnetização, o  $M_s$  observado parece estar convergente ao valor de  $M_s$  reportado para valores de nanopartículas puras de SPIONs no trabalho de Sun et. al [112]. O baixo valor de  $M_s$  para fluido magnético PGLYD-SPIONs pode ser atribuído ao efeito simultâneo das interações entre nanopartículas como resultado da presença de interações dipolo–dipolo da anisotropia de superfície entre PGLYD e SPIONs relatado por Caruntu et. al [113].

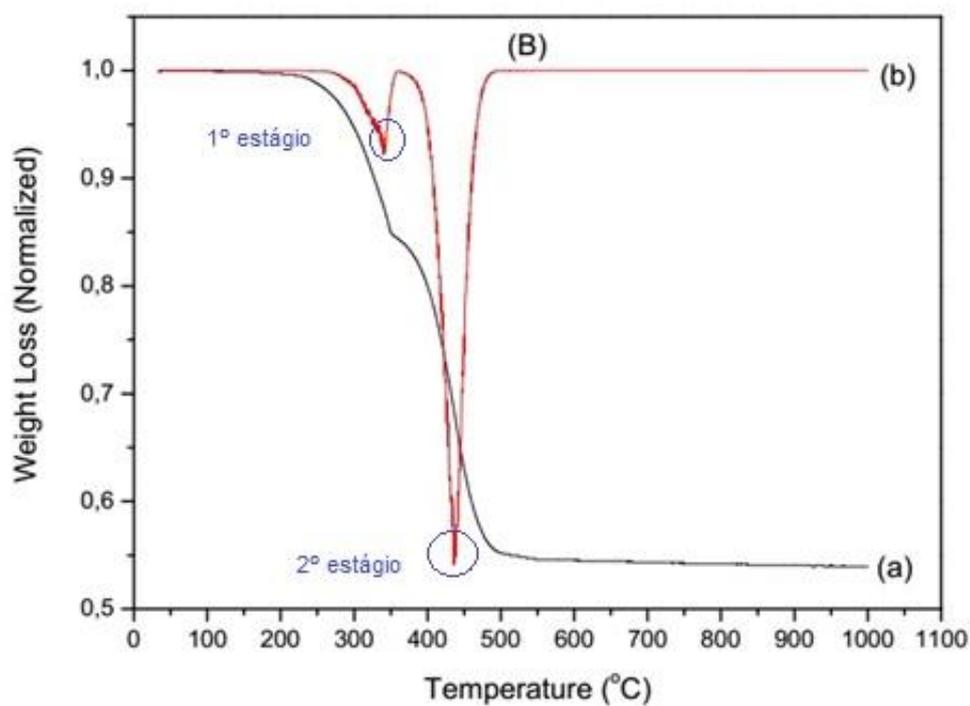


Figura 6.9: Análise de termogravimétrica da marca Shimadzu Co modelo TGA-50 variando de temperatura de 25 °C a 1000 °C para amostra de PGLYD-SPIONs: (a) TGA normalizado e (b) sua correspondente 1ª derivada da curva TGA.

Fonte: Próprio autor.

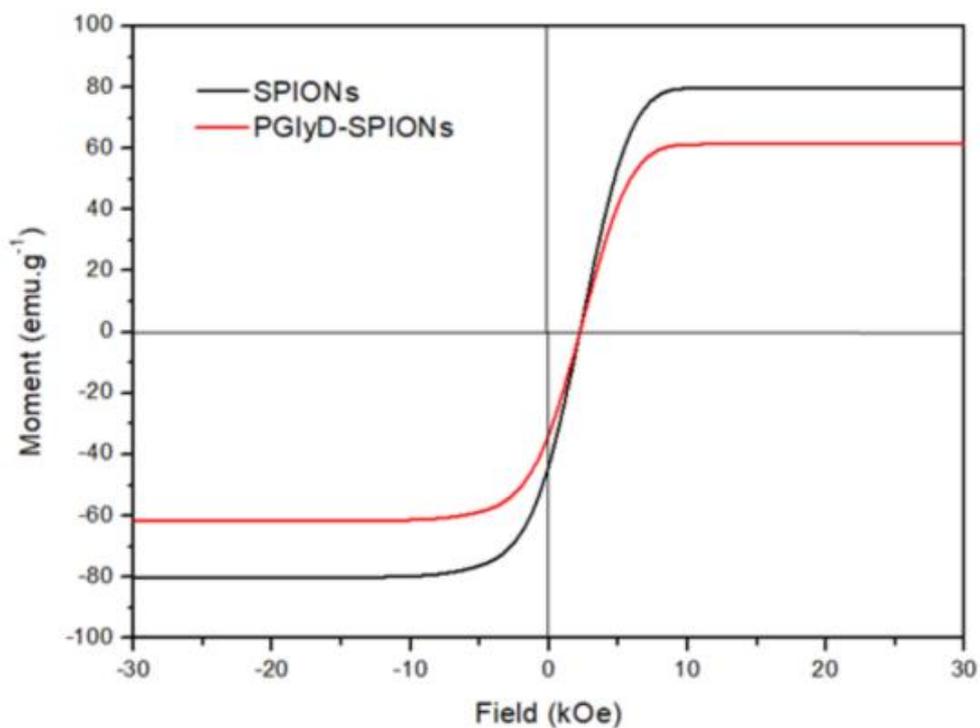


Figura 6.10: Comparativo das curvas de magnetização versus campo magnético para SPIONs e PGLYD-SPIONs medida pelo magnetômetro com vibração da marca Lakeshore modelo 7400 a temperatura de 25 °C.

Fonte: Próprio autor.

### 6.3 Geração de eletricidade por PGLYD-SPIONs

O fluxo do PGLYD-SPIONs magnetizado através da câmara toroidal gera um fluxo magnético variável no tempo, que pode ser utilizado para induzir uma força eletromotiva na bobina acoplada adjacente ao toróide. Este processo gera uma corrente na bobina e, com isso, pode ser usado para transdutor de movimento PGLYD-SPIONs em eletricidade. A Figura 6.11 fornece um esboço das partes principais da configuração experimental do gerador de energia usado neste trabalho.

De acordo com a lei de Faraday-Maxwell, a corrente elétrica induzida pela variação do fluxo do campo magnético nas bobinas em relação à variação do campo magnético no tempo é descrito pela equação (11) [114] :

$$\nabla \times \mathbf{E} (x, y, z, t) = - \frac{\partial \mathbf{B} (x, y, z, t)}{\partial t} \quad (11)$$

Onde:

- E:** Campo elétrico
- B:** Campo magnético

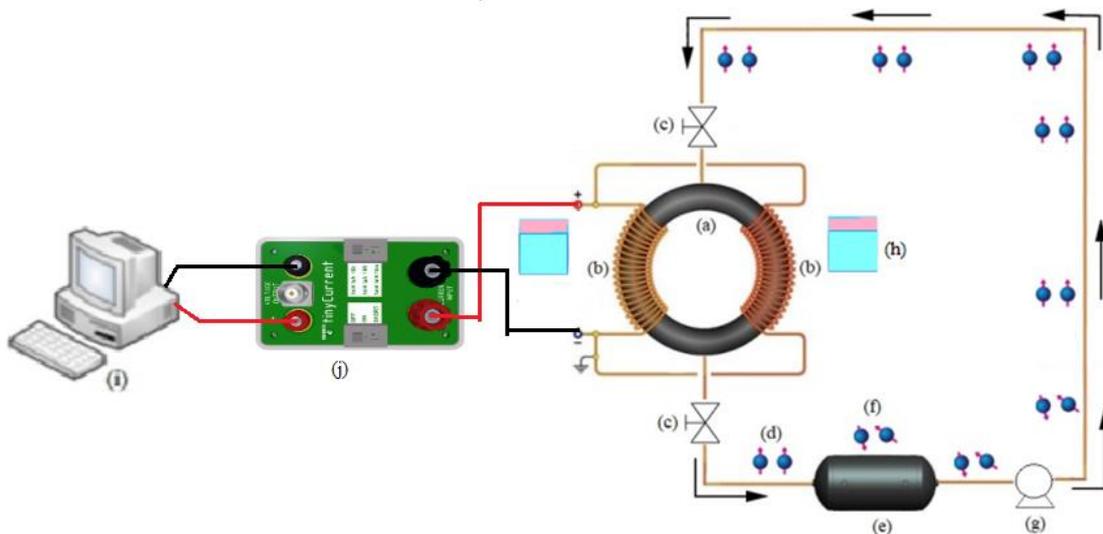


Figura 6.11: Ilustração das principais partes do protótipo. (a) Câmara toroidal, (b) Bobinas conectadas em paralelo envolvendo toróide, (c) Válvulas, (d) SPIONs magnetizados, (e) Reservatório de PGLYD-SPIONs, (f) SPIONs não magnetizados, (g) Bomba peristáltica, (h) Ímã permanente, (i) Computador para aquisição de dados, (j) Conversor shunt 1 mV/mA. Setas indicam fluxo de PGLYD-SPIONs.

Fonte: Próprio autor.

Considerando o fluxo do fluido PGLYD-SPION através do tubo toroidal, as coordenadas de um ponto da envoltória não são fixas, mas se altera em função do tempo. A equação (11) mostra o campo  $\mathbf{E}$  variável no tempo não é conservativo ( $\nabla \times \mathbf{E} \neq 0$ ), e o trabalho

realizado para assumir o controle sobre um caminho fechado no campo elétrico variando no tempo é devido à energia originado da variação do campo magnético no tempo.

A Figura 6.12 mostra a corrente induzida nas bobinas como um fluxo no tempo. A passagem do fluido PGLYD-SPIONs dentro da câmara toroidal rapidamente aumenta a corrente elétrica induzida até o fluido magnético estiver dentro da bobina. Como o fluido magnético passa através da bobina, o fluxo magnético através da bobina começa a decrescer, e consequentemente, a corrente elétrica é revertida.

Dessa forma, conforme as equações de Maxwell, há outras fontes de campos elétricos e magnéticos quando estes campos variam em função do tempo. As equações eletrodinâmicas de Maxwell podem ser escritas forma diferencial como a seguir [114]:

$$\text{Lei de Faraday da indução} \quad \text{rot } \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (12)$$

$$\text{Lei de Ampère} \quad \text{rot } \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (13)$$

$$\text{Lei de Gauss para campos magnéticos} \quad \text{div } \mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (14)$$

$$\text{Lei de Ohm} \quad \mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (15)$$

Onde:

|           |                       |            |  |
|-----------|-----------------------|------------|--|
| <b>V:</b> | Velocidade do campo   | $\mu_0$ :  | Permeabilidade magnética. Valor no vácuo: $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$   |
| <b>E:</b> | Campo elétrico        | $\sigma$ : | Condutividade elétrica. Valor no núcleo externo $3 \sim 5 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  |
| <b>B:</b> | Campo magnético       | $\nabla$ : | Operador Nabla ou Diferencial $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right) = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}$ |
| <b>J:</b> | Densidade de corrente |            |  |

A lei de Faraday da indução representada pela equação (12) mostra a relação de que a circulação do campo elétrica é criada pela variação no tempo do fluxo do campo magnético nas bobinas. A circulação do fluido magnético dentro da tubulação no formato de toróide simplificou as análises devido às coordenadas do ponto não serem fixas e se alteram com o tempo. Além disso, a equação demonstra que a variação no tempo do campo elétrico não é conservativa, e que o trabalho feito para levar uma carga elétrica numa trajetória fechada do campo elétrico variando com o tempo é devido à energia gerada pelo campo magnético.

A lei de Ampère representada pela equação (13) mostra que a circulação do campo magnético dos ímãs permanentes gera uma densidade de corrente limitada ao diâmetro do toróide amplificada com a permeabilidade magnética. Neste caso específico, a corrente de deslocamento é muito pequena podendo ser desprezada [83].

Conforme a lei de Gauss para campos magnéticos, equação (14), foi demonstrado que não existe monopolos magnéticos, ou seja, o ímã pode ser fatiado em pequenas partes que continua com os polos Norte (N) e Sul (S).

A lei de Ohm, representada pela equação (15), mostra a densidade de corrente gerada pelo fluido magnético em movimento dentro da câmara sob um campo magnético.

Realizando uma manipulação matemática em substituir a equação (15) na (13) e tomando o rotacional em ambos os lados, tem-se uma nova equação (16):

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \mu_0 \sigma [\nabla \times \mathbf{E} + \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})] \quad (16)$$

Utilizando identidade vetorial (17) abaixo:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{B} \quad (17)$$

E substituindo a equação (13) na (16) e aplicando a propriedade (17) tem-se:

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \left[ -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \right] \quad (18)$$

Para clarificar a equação, a constante foi renomeada e ajustada os termos da equação (18) conforme segue:

$$\eta = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \quad (19)$$

Em que  $\eta$  é a difusividade magnética, cujo valor no núcleo terrestre é de  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Logo, a equação (18) torna-se:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \quad (20)$$

A equação (20) mostra que o comportamento temporal e espacial do campos magnéticos originada pelo fluxo magnético na câmara toroidal são dependentes da dissipação magnética e calor de difusão, respectivamente. Desde que o número de Reynolds magnético (Rem) na câmara toroidal ser considerado fluxo laminar, a criação de linhas de campo magnético é superior às suas perdas por dissipação.

Usando a identidade vetorial  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B}$  (17) e a lei magnética de Gauss  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  (14), a equação de indução (21) pode ser escrita:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{Re_m} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (21)$$

A equação (9) é a equação de transporte do campo magnético e representa a conversão da energia mecânica na energia magnética por uma força eletromotiva do módulo, criado pelo movimento do PGLYD-SPIONs na câmara toroidal.

A equação (22) é controlada pela  $Re_m$  que mostra a razão entre as forças da inércia e viscosidade [115].

$$R_{em} = \mu_0 \sigma V L \quad (22)$$

Onde:

- L: Comprimento do toróide
- V: Velocidade do fluido magnético PGLYD-SPIONs

Para valores baixos de  $R_{em}$ , a velocidade angular do fluxo do fluido magnético na tubulação toroidal pode ser definido pela seguinte equação (23):

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (23)$$

Onde:

- R: Raio do toróide
- V: Velocidade do fluido magnético PGLYD-SPIONs

A Figura 6.13 mostra a relação entre a corrente induzida produzida pelo fluxo do fluidomagnético na câmara toroidal e a velocidade angular.

Os resultados mostram que é possível alcançar uma geração de corrente induzida de, aproximadamente, 300  $\mu$ A na velocidade angular de 100 rps.

O campo magnético gerado pela rotação do fluido magnético PGLYD-SPIONs atingiu um pico por volta de 500 mT.

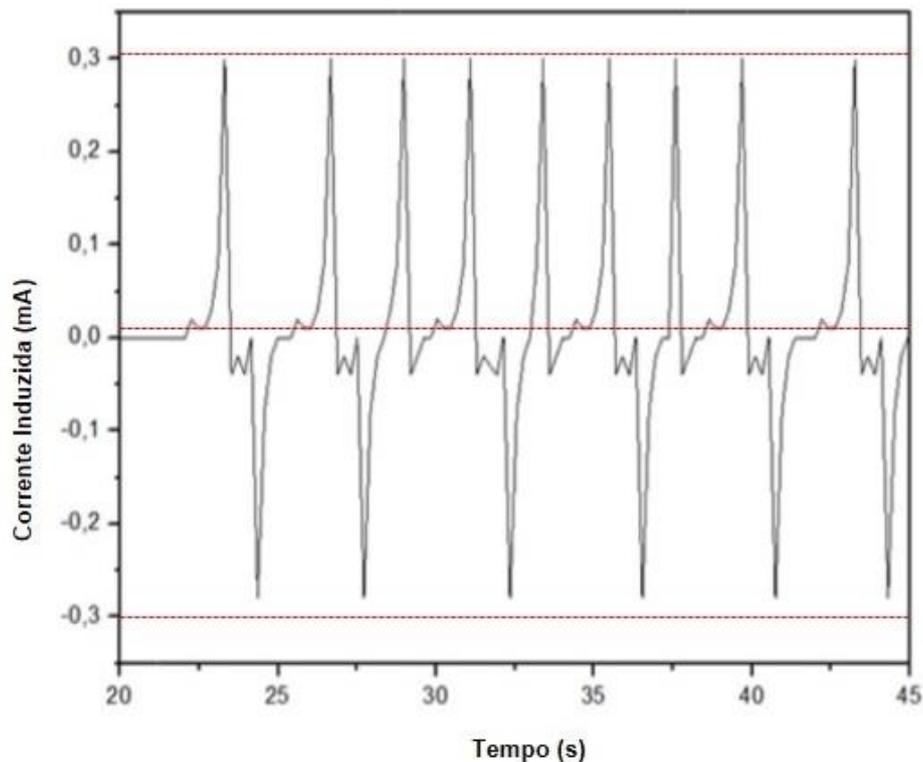


Figura 6.12: Corrente elétrica induzida do fluxo do fluido magnético PGLYD-SPIONs no tempo.  
Fonte: Próprio autor.

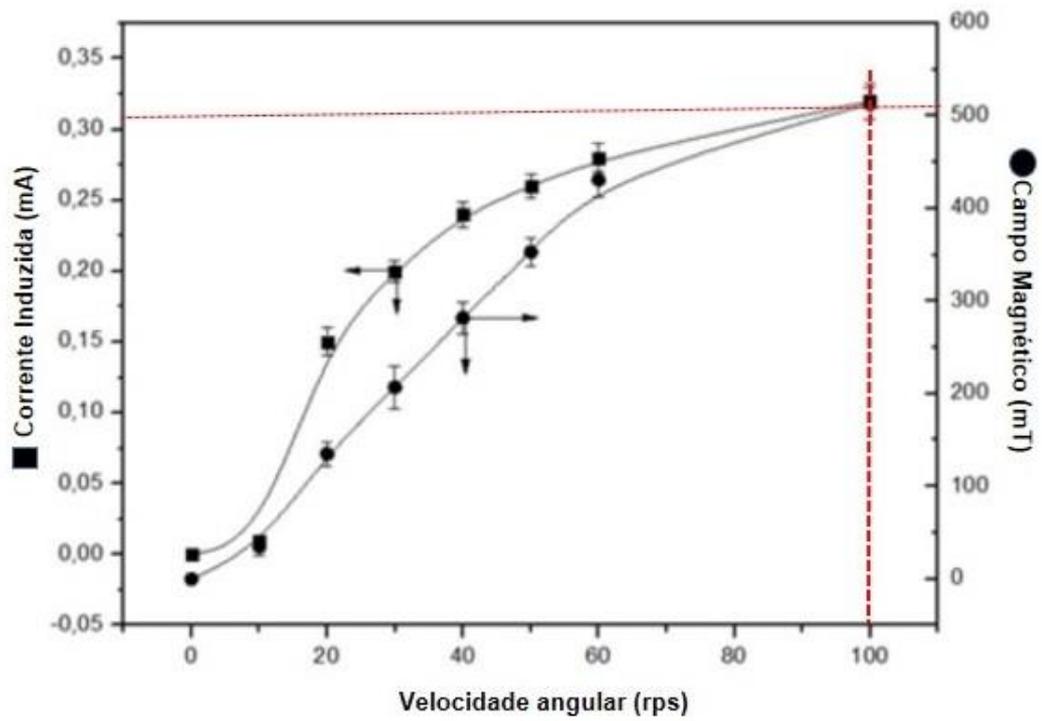


Figura 6.13: Ilustração da: ■ corrente induzida e do ● campo magnético gerado versus velocidade angular.  
Fonte: Próprio autor.

## 7 CONCLUSÃO

O microgerador utilizando o fluido PGLYD-SPIONs atendeu os requisitos de projeto e obteve um resultado promissor no formato da câmara toroidal. A câmara toroidal desenvolvida para receber o fluido magnético foi a melhor configuração para manter em circulação o fluido a velocidade constante e conseqüentemente gerar uma microcorrente excitada por meio de bobinas. A utilização da substância dendrímero de poliglicerol com a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) aplicada na microgeração de energia elétrica marca o ineditismo deste trabalho. No campo da nanotecnologia, algumas propriedades como monodomínios magnéticos podem alterar comportamentos triviais vistos no campo métrico e podem gerar energia elétrica de micropotência para pequenos sensores ou auxiliar no prolongamento das baterias evitando recargas em demasia.

O saldo positivo obtido pelo desenvolvimento do protótipo do microgerador foi resultado de um planejamento bem elaborado e acordado com os orientadores. Este planejamento foi aperfeiçoado, à medida que as pesquisas foram avançando e os conhecimentos sobre o tema foram sedimentando. Além disso, as reuniões periódicas com os orientadores, aprimoramento contínuo do processo de pesquisa e o acompanhamento próximo das atividades descritas no planejamento foram vitais também para a publicação do artigo na revista IEEE Transactions on Magnetic.

Vários aspectos foram analisados antes da conformação do protótipo. As técnicas experimentais foram importantes para entender sobre fenômenos condutores em polímeros representados pela polianilina, processos químicos para preparos de solução e utilização de equipamentos de medição para verificação de compostos.

Por meio do uso das técnicas experimentais durante o projeto, foi possível verificar os dados obtidos com os trabalhos de assuntos similares para adequar, melhorar e otimizar o desenvolvimento do protótipo.

Na fase de confecção do microgerador, além do planejamento do produto, foi utilizado o plano de prototipagem da técnica de Design Thinking (DT) para atualização rápida do produto. Este recurso foi utilizado para melhorar a qualidade de ideias do plano inicial, aprimorar a comunicação, criar um ambiente de interação mais objetiva, inserção de novos conhecimentos aprendidos, revisão de partes e peças do protótipo e ser mais objetivo no processo construtivo.

O principal material da microgeração é o fluido magnético que no tópico de reações e caracterização dos materiais, as duas substâncias estabilizadores de magnetita denominadas de polianilina (PANI) e poliglicerol (PGLYD) apresentaram propriedades similares às referências pesquisadas.

A justificativa em não utilizar a PANI, mesmo sendo um polímero condutor, foi devido à sua estrutura molecular linear causando baixa aderência durante a síntese da magnetita e possuir facilidade de polidispersão, o que dificultaria no processamento do fluido magnético.

O dendrímero possui uma estrutura globular e altamente ramificada com cavidades internas, permitindo enormes oportunidades para a produção de fluidos magnéticos altamente estáveis desde que os SPIONs sejam encapsulados nas cavidades internas do dendrímero por meio de interações hidrofóbicas ou eletrostáticas. As amostras de PGLYD-SPIONs mostraram característica superparamagnetismo evidenciado por coercividade zero e remanescência no laço de magnetização.

Para se chegar até o funcionamento efetivo do microgerador por MHD, foi necessário realizar o planejamento do produto (PDP) no início do curso com detalhes para que fosse um norteador num longo caminho a ser percorrido. O planejamento com os orientadores mostrou a realidade dura para concretizar o microgerador e render uma publicação em periódico internacional.

O plano de prototipagem da técnica de Design Thinking (DT) auxiliou o planejamento do produto a atualizar os requisitos, aprimorar as partes e peças e focar nas questões mais importantes do protótipo para conseguir adquirir os insumos e fazer a montagem do microgerador.

A aplicação prática do microgerador por MHD é diversa como recarregar aparelhos celulares, a exemplo de pesquisas que vem sendo realizadas pela Apple, utilizar em calçados para recarregar sensores e relógios, fornecer eletricidade em dispositivos eletrônicos localizados em locais de difícil acesso ou aplicação em veículos elétricos autônomos para alimentar os sensores mais críticos em caso de pane na bateria.

As perspectivas deste microgerador são promissoras e os estudos futuros poderiam ser aprofundados nos seguintes tópicos:

- Ampliação da capacidade das células de fluidos magnéticos PGLYD-SPIONs do microgerador por meio de ampliação da arquitetura de circuitos magnéticos e hidrodinâmicos.

- Pesquisa para miniaturização do tamanho físico do dispositivo utilizando materiais maleáveis e flexíveis.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. C. Ives and M. H. Ives, "The Great 21st Century Energy Challenge," Institute for New Economic Thinking at the Oxford Martin School, U.K.2016.
- [2] K. SCHWAB, *A quarta revolução industrial*: EDIPRO, 2016.
- [3] J. Rifkin, *A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo*, 2012.
- [4] EPE, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica," ed: Ministério das Minas e Energia, 2021.
- [5] EPE, "BALANÇO COVID-19 Impactos nos mercados de energia no Brasil 1º semestre de 2020," M. d. M. e. Energia, Ed., ed: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.
- [6] EPE, "Plano Decenal de Expansão de Energia 2030," ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia Empresa de Pesquisa Energética, 2021.
- [7] EIA. (2011, 05/05/2018). *Age of electric power generators varies widely*. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=1830>
- [8] IEA, *Electricity information overview* 2018 ed.: International Energy Agency, 2018.
- [9] AJOT. (2016, 05/05/2018). *How is the fuel mix for U.S. electricity generation changing?* Available: <https://ajot.com/news/how-is-the-fuel-mix-for-u.s.-electricity-generation-changing>
- [10] V. D. Dhareppagol and A. Saurav, "The Future Power Generation with MHD Generators Magneto Hydro Dynamic generation...", *International Journal of Advanced Electrical and Electronics Engineering (IJAEED)*, vol. 2, 2013.
- [11] ANEEL. Tarifa média de fornecimento com tributos [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>
- [12] D. M. C. d. Faria, "Regulação econômica da geração hidrelétrica: análise da renovação das concessões pela lei 12.783/2013 e propostas de ajuste ao modelo," Universidade de São Paulo, 2016.
- [13] EPE, "Anuário estatístico de energia elétrica 2018," 2018.
- [14] EPE, "Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050," ed: Empresa de Pesquisa Energética, 2018.
- [15] BNEF, "Custos globais de energia eólica e solar cairão cada vez mais rápido, enquanto o carvão desaparece, mesmo na China e na Índia," ed: Bloomberg New Energy Finance, 2017.
- [16] J. A. Edminister, *Electromagnetismo*: McGraw-Hill, 1992.
- [17] A. H. Robbins and W. C. Miller, *Análise de Circuitos - Volume 1: Teoria e Prática* Cengage, 2010.
- [18] T. Roque and A. A. P. Videira, "A noção de modelo na virada do século xix para o século xx," *Scientiae Studia*, vol. 11, pp. 281-304, 2013.
- [19] N. Tesla and D. H. Childress, *The fantastic inventions of Nikola Tesla*: Adventures Unlimited, 1993.
- [20] I. L. Kosow, *Máquinas elétricas e transformadores*: Globo, 2005.
- [21] J. L. B. Duarte, "UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS INTELIGENTES NAS METODOLOGIAS DE MANUTENÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS," UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007.
- [22] J. Nascif. (2016, 20/06/2018). *EL 04 Motores elétricos*. Available: <http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2013/03/EL04-motores-eletricos-numero-de-polos-rotacao-e-deslizamento-tecem.pdf>

- [23] I. E. Chabu. (2015, 02/06/2018). *Parte 2 - Máquinas Sincronas*. Available: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1264958/mod\\_resource/content/1/PEA%202400%20Notas%20de%20aula\\_4\\_revB.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1264958/mod_resource/content/1/PEA%202400%20Notas%20de%20aula_4_revB.pdf)
- [24] C. Kingsley Jr, S. D. Umans, and A. E. Fitzgerald, *Máquinas Elétricas-: Com Introdução à Eletrônica de Potência*: Bookman, 2006.
- [25] N. Jenkins, J. B. Ekanayake, and G. Strbac, *Distributed generation*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [26] CNPQ, "Energia e meio ambiente soluções para o futuro," XXIV ed. Brasília, 2010, p. 93.
- [27] M. TOLMASQUIM, "Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão e Nuclear," *Rio de Janeiro: EPE*, p. 417, 2016.
- [28] H. Van Ness, J. Smith, and M. ABBOT, *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*: LTC, 2007.
- [29] Electropaedia. (2005, 05/05/2018). *Nuclear Energy - The Practice* Available: [http://www.mpoweruk.com/nuclear\\_practice.htm](http://www.mpoweruk.com/nuclear_practice.htm)
- [30] Significados. (2018, 13/08/2018). *Significado de Fissão nuclear*. Available: <https://www.significados.com.br/fissao-nuclear/>
- [31] E. M. Cardoso, "A Energia Nuclear," 3ª Edição ed: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012, p. 52.
- [32] Todamateria. (2016, 10/10/2018). *Fusão Nuclear*. Available: <https://www.todamateria.com.br/fusao-nuclear/>
- [33] N. J. d. C. Graça, "Reatores de fusão: confinamento magnético e confinamento inercial," Dissertação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015.
- [34] CCFE. (2012, 10/10/2018). *Why fusion is needed*. Available: [http://www.ccf.ac.uk/Why\\_fusion.aspx](http://www.ccf.ac.uk/Why_fusion.aspx)
- [35] A. P. Picolo, A. J. Bühler, and G. A. Rampinelli, "Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica," *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 36, 2014.
- [36] L. Mateu and F. Moll, "Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics," in *VLSI Circuits and Systems II*, 2005, pp. 359-373.
- [37] RitekSolar. (2018, 28/07/2018). *Green Ritek*. Available: <http://www.riteksolar.com.tw/eng/index.php>
- [38] H. Villullas, E. Ticianelli, and E. González. (2002) Células a combustível: Energia Limpa a partir de fontes renováveis. *Química Nova na escola*. 7.
- [39] H. Wendt, M. Götz, and M. Linardi, "Tecnologia de células a combustível," *Química Nova*, vol. 23, pp. 538-546, 2000.
- [40] A. L. Lenz, "Como uma Célula de Combustível e o Hidrogênio Funcionam?," ed, 2013.
- [41] PortalEnergia. (2016, 05/11/2018). *Vantagens e desvantagens das células de combustível*. Available: <https://www.portal-energia.com/celulas-de-combustivel-vantagens-e-desvantagens/>
- [42] J. Heywood, "Magnetohydrodynamics," *Physics Education*, vol. 3, p. 260, 1968.
- [43] D. Nakamura, A. Ikeda, H. Sawabe, Y. Matsuda, and S. Takeyama, "Record indoor magnetic field of 1200 T generated by electromagnetic flux-compression," *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, p. 095106, 2018.
- [44] R. J. Moreau, *Magnetohydrodynamics* vol. 3: Springer Science & Business Media, 2013.
- [45] Mhdenergy. (2018, 08/06/2018). *MHD Superconducting Generators* Available: <http://concentratingsolarpowerutility.com/HighlyDisruptiveTechnology.htm>
- [46] R. Chaabane, A. Bouras, and S. Ben Nasrallah, "Numerical magneto hydro dynamic flow simulation of velocity and pressure for electrically conducting, incompressible

- fluids," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 29, pp. 299-306, 2007.
- [47] E. S. Jol, I. Kamei, and W. Z. Jones, "Induction charging system," ed: Google Patents, 2016.
- [48] D. Dai, J. Liu, and Y. Zhou, "Harvesting biomechanical energy in the walking by shoe based on liquid metal magnetohydrodynamics," *Frontiers in Energy*, vol. 6, pp. 112-121, 2012.
- [49] M. Campbell. (2016, 05/01/2021). *Apple invention uses ferrofluids to enhance induction charging performance*. Available: <https://appleinsider.com/articles/16/10/25/apple-invention-uses-ferrofluids-to-enhance-induction-charging-performance>
- [50] R. E. Rosensweig, "Magnetic fluids," *Annual review of fluid mechanics*, vol. 19, pp. 437-461, 1987.
- [51] D. M. Bila and M. Dezotti, "Desreguladores endócrinos no meio ambiente: efeitos e consequências," *Química nova*, vol. 30, p. 651, 2007.
- [52] F. V. da Silva, J. L. Rodrigues, B. L. Batista, and D. P. de Oliveira, "Alquilfenóis e alquilfenóis etoxilados: uma visão ambiental," *Revista Brasileira de Toxicologia*, vol. 20, 2007.
- [53] D. J. Shaw, *Introdução à Química dos Colóides e de Superfícies*: E. Blücher, 1975.
- [54] D. Petri. (2018). *Colóides e Superfícies*.
- [55] H. E. Toma, D. G. da Silva, and U. Condomitti, "Nanotecnologia Experimental," *Sustinere-Revista de Saude e Educacao*, vol. 5, pp. 179-180, 2017.
- [56] P. Alves. (2018, 05/02/2019). *Fluidos - Conceitos fundamentais*. Available: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1645373/mod\\_resource/content/1/Primeira%20aula%20-%20fluido.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1645373/mod_resource/content/1/Primeira%20aula%20-%20fluido.pdf)
- [57] M. J. Junior and L. C. Varanda, "O mundo dos colóides," *Química nova na escola*, 1999.
- [58] A. Ali, Z. Hira, Z. Muhammad, I. ul Haq, A. R. Phull, J. S. Ali, *et al.*, "Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles," *Nanotechnology, science and applications*, vol. 9, p. 49, 2016.
- [59] S. A. WAHAJUDDIN, "Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: magnetic nanoplatforms as drug carriers.," *International journal of nanomedicine*, vol. 7, pp. 3445-3471, 2012.
- [60] A. Franzol and M. C. Rezende, "Estabilidade de emulsões: um estudo de caso envolvendo emulsionantes aniônico, catiônico e não-iônico," *Polímeros*, vol. 25, pp. 1-9, 2015.
- [61] I. Martínez-Mera, M. Espinosa-Pesqueira, R. Pérez-Hernández, and J. Arenas-Alatorre, "Synthesis of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles without surfactants at room temperature," *Materials Letters*, vol. 61, pp. 4447-4451, 2007.
- [62] USP. (2019, 01/03/2019). *Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI)*. Available: <http://www.pmi.poli.usp.br/>
- [63] H. I. o. Mineralogy. (2019, 22/04/2019). *mindat.org*. Available: <https://www.mindat.org/>
- [64] R. G. Gontijo, "Micromecânica e microhidrodinâmica de suspensões magnéticas," Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UnB - Universidade de Brasília, 2013.
- [65] A. Joseph and S. Mathew, "Ferrofluids: synthetic strategies, stabilization, physicochemical features, characterization, and applications," *ChemPlusChem*, vol. 79, pp. 1382-1420, 2014.
- [66] S. May, "Rotational Relaxation Dynamics of Ferrofluid System," Master of Science, The University of Hull, Hull, 2007.

- [67] M. Majzoub. (2012, Janeiro de 2012) Magnetic Appeal - SACHIKO KODAMA SETS THE LAWS OF ATTRACTION *Ragmag* [Culture Clash]. Available: [https://issuu.com/ragmag/docs/ragmag\\_jan\\_2012](https://issuu.com/ragmag/docs/ragmag_jan_2012)
- [68] S. S. Pappel, "Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles," USA Patent, 1965.
- [69] V. I. Subko, Y. I. Dikanskii, D. V. Zubko, S. A. Kunikin, and G. I. Sitsko, "Electrical and magnetic properties of kerosene-based magnetic fluid subjected to the action of electric and magnetic fields," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 91, pp. 806-811, 2018.
- [70] R. Gontijo and F. R. Cunha, "Numerical simulations of magnetic suspensions with hydrodynamic and dipole-dipole magnetic interactions," *Physics of fluids*, vol. 29, pp. 062004-1-21, 2017.
- [71] E. Krutikova and A. O. Ivanov, "The role of van der Waals forces in ferrofluid phase separation," in *12th International Conference on Magnetic Fluids*, 2010, pp. 49-53.
- [72] A. B. Pakhomov, Y. Bao, and K. M. Krishnan, "Effects of surfactant friction on Brownian magnetic relaxation in nanoparticle ferrofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, pp. 10Q305-1-3, 2005.
- [73] A. Shenoy, "Rheology of Filled Polymer Systems 313–322," *The Netherlands: Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- [74] F. Ciornei, S. Alaci, D. Amarandei, L. Irimescu, I. Romanu, and L. Acsinte, "Method and device for measurement of dynamic viscosity," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, p. 012041.
- [75] Malvern. (2016, 22/04/2019). *A Basic Introduction to Rheology*. Available: [www.malvern.com/contact](http://www.malvern.com/contact)
- [76] S. Stuckenbruck. (2012). *Escoamento de líquidos e gases em dutos*.
- [77] A. P. R. Bisco, "A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais," Dissertação de mestrado, UFMG, 2009.
- [78] R. P. Chhabra and J. F. Richardson, *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [79] H. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, "An introduction to rheology," 1989.
- [80] J. M. A. S. Gallo, "Avaliação do comportamento reológico e das propriedades sensoriais de molhos comerciais para salada tratados por irradiação," Universidade de São Paulo, IPEN, 2013.
- [81] J. F. A. d. Souza, L. R. d. Oliveira, J. L. L. d. Azevedo, I. D. Soares, and M. M. Mata, "Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem," *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 29, pp. 21-41, 2011.
- [82] E. Krämer. (2013, 27/04/2019). *Laminar-Turbulent Transition in Aerodynamics Boundary Layers*. Available: <http://www.gauss-centre.eu/qauss-centre/EN/Projects/CSE/kraemer-LAMTUR.html>
- [83] P. A. Davidson, *An Introduction to Magnetohydrodynamics*: Cambridge University Press, 2001.
- [84] V. Gogosov, "Hydrodynamics of magnetic fluids," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 65, pp. 301-306, 1987.
- [85] S. Kamiyama and K. Koike, "Hydrodynamics of magnetic fluids," *Brazilian Journal of Physics*, vol. 25, pp. 83-100, 1995.
- [86] F. Spizzo, P. Sgarbossa, E. Sieni, A. Semenzato, F. Dughiero, M. Forzan, *et al.*, "Synthesis of ferrofluids made of iron oxide nanoflowers: Interplay between carrier fluid and magnetic properties," *Nanomaterials*, vol. 7, p. 373, 2017.
- [87] R. A. Tasca, J. R. Almeida, D. G. Silva, F. M. Melo, and H. E. Toma, "Desenvolvendo habilidades e conceitos de nanotecnologia no ensino médio por meio de experimento

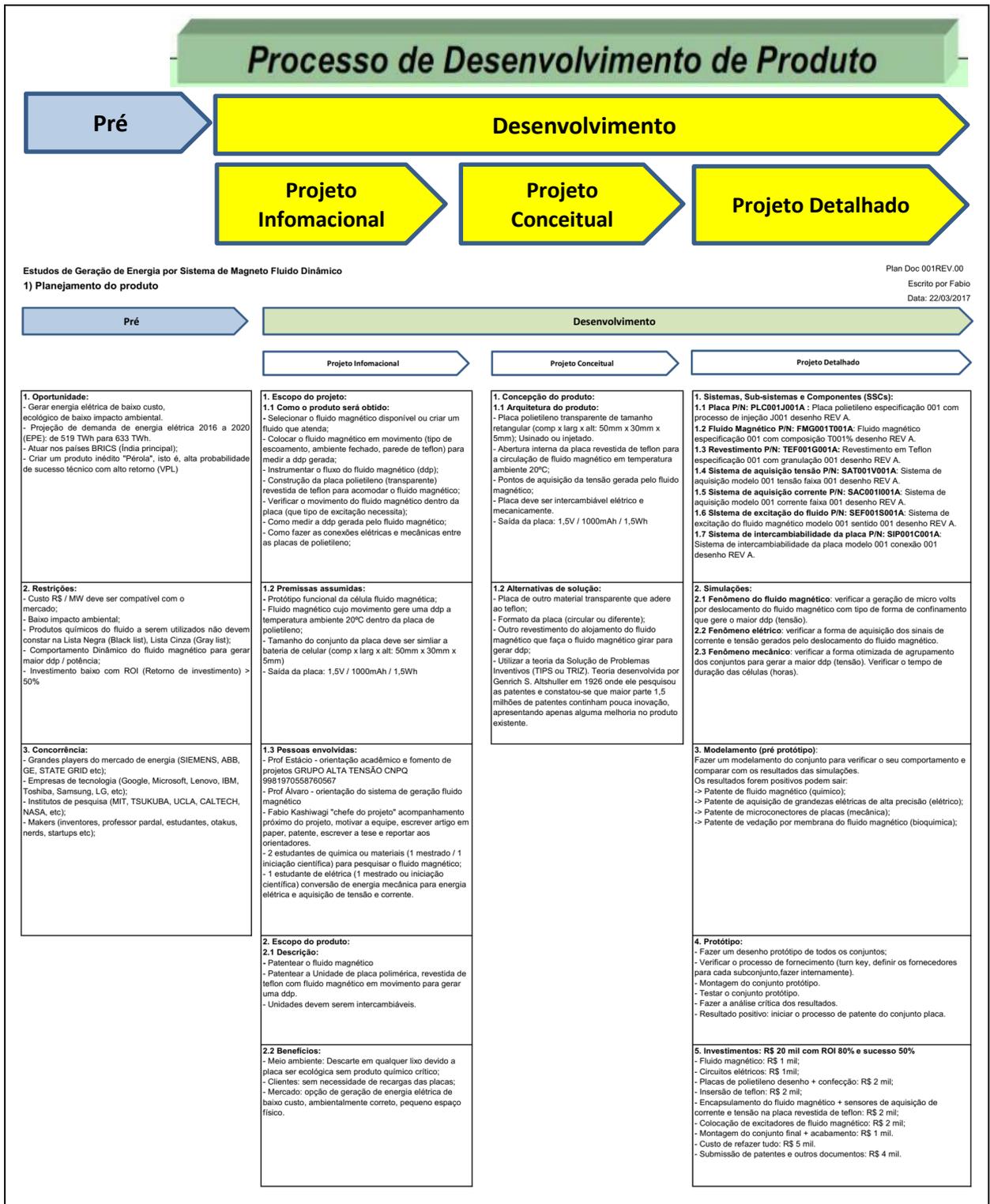
- didático envolvendo preparação e aplicação de nanopartículas superparamagnéticas," *Química nova na escola*, vol. 37, pp. 236-240, 2015.
- [88] G. A. Glatzmaier and P. H. Roberts, "Dynamo theory then and now," *International Journal of Engineering Science*, vol. 36, pp. 1325-1338, 1998.
- [89] D. A. Tomalia, "Dendrimer molecules," *Scientific American*, vol. 272, pp. 62-66, 1995.
- [90] C. C. Lee, J. A. MacKay, J. M. Fréchet, and F. C. Szoka, "Designing dendrimers for biological applications," *Nature biotechnology*, vol. 23, p. 1517, 2005.
- [91] Y. Cheng and T. Xu, "The effect of dendrimers on the pharmacodynamic and pharmacokinetic behaviors of non-covalently or covalently attached drugs," *European journal of medicinal chemistry*, vol. 43, pp. 2291-2297, 2008.
- [92] J. F. Topan, "Dendrímeros: uma estratégia para a veiculação de um fármaco anticâncer," Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto - SP, 2016.
- [93] F. N. Kashiwagi, E. T. Neto, M. E. Gonzalez, A. A. De Queiroz, and A. A. de Queiroz, "Electric Current Generation From Dendrimer-Based Magnetofluid Flow in a Toroidal Chamber," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 56, pp. 1-7, 2020.
- [94] D. A. Tomalia, H. Baker, J. Dewald, M. Hall, G. Kallos, S. Martin, *et al.*, "A new class of polymers: starburst-dendritic macromolecules," *Polymer Journal*, vol. 17, p. 117, 1985.
- [95] G. T. Teixeira, Doutorado, Instituto de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- [96] R. M. Moura, "Avaliação do potencial antiproliferativo do Dendrímero de Poliglicerol associado ao celecoxibe em linhagens celulares de carcinoma epidermoide de cabeça e pescoço," Universidade de São Paulo, 2014.
- [97] CNPE, M. d. M. e. Energia, Ed., ed. Brasil: Conselho Nacional de Política Energética, 2018.
- [98] F. Gröhn, G. Kim, B. J. Bauer, and E. J. Amis, "Nanoparticle formation within dendrimer-containing polymer networks: Route to new organic– inorganic hybrid materials," *Macromolecules*, vol. 34, pp. 2179-2185, 2001.
- [99] J. Zheng and R. M. Dickson, "Individual water-soluble dendrimer-encapsulated silver nanodot fluorescence," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 124, pp. 13982-13983, 2002.
- [100] L. M. Bronstein and Z. B. Shifrina, "Dendrimers as encapsulating, stabilizing, or directing agents for inorganic nanoparticles," *Chemical reviews*, vol. 111, pp. 5301-5344, 2011.
- [101] D. A. Tomalia, "Birth of a new macromolecular architecture: dendrimers as quantized building blocks for nanoscale synthetic polymer chemistry," *Progress in Polymer Science*, vol. 30, pp. 294-324, 2005.
- [102] S. M. Grayson and J. M. Frechet, "Convergent dendrons and dendrimers: from synthesis to applications," *Chemical Reviews*, vol. 101, pp. 3819-3868, 2001.
- [103] Mettler and Toledo. (2020, 25/02/2021). *Reações de Síntese Fornecendo Moléculas Importantes para Pesquisa, Indústria e Comércio*. Available: [https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1\\_AutoChem\\_Applications/L2\\_ReactionAnalysis/synthesis-reactions.html](https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/synthesis-reactions.html)
- [104] V. P. Indran, A. S. H. Saud, G. P. Maniam, Y. H. Taufiq-Yap, and M. H. A. Rahim, "Viable glycerol carbonate synthesis through direct crude glycerol utilization from biodiesel industry," *Waste and biomass valorization*, vol. 8, pp. 1049-1059, 2017.
- [105] M. Vianna, Y. Vianna, I. K. Adler, B. Lucena, and B. Russo, *Design thinking: inovação em negócios*. Rio de Janeiro: Design Thinking, 2018.
- [106] P. G. Rowe, *Design thinking*, 1º Ed ed.: MIT press, 1987.
- [107] D. Council. (2018). *The Guardian: The benefits of design thinking*. Available: <https://www.designcouncil.org.uk/>

- [108] M. Starowicz, P. Starowicz, J. Żukrowski, J. Przewoźnik, A. Lemański, C. Kapusta, *et al.*, "Electrochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles with controlled size," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 13, pp. 7167-7176, 2011.
- [109] J. Wang, G. Meng, K. Tao, M. Feng, X. Zhao, Z. Li, *et al.*, "Immobilization of lipases on alkyl silane modified magnetic nanoparticles: effect of alkyl chain length on enzyme activity," 2012.
- [110] R. Zheng, H. Gu, B. Xu, K. K. Fung, X. Zhang, and S. P. Ringer, "Self-Assembly and Self-Orientation of Truncated Octahedral Magnetite Nanocrystals," *Advanced Materials*, vol. 18, pp. 2418-2421, 2006.
- [111] D. Ho, X. Sun, and S. Sun, "Monodisperse magnetic nanoparticles for theranostic applications," *Accounts of chemical research*, vol. 44, pp. 875-882, 2011.
- [112] S. Sun, H. Zeng, D. B. Robinson, S. Raoux, P. M. Rice, S. X. Wang, *et al.*, "Monodisperse mfe<sub>2</sub>o<sub>4</sub> (m= fe, co, mn) nanoparticles," *Journal of the American chemical society*, vol. 126, pp. 273-279, 2004.
- [113] D. Caruntu, G. Caruntu, and C. J. O'Connor, "Magnetic properties of variable-sized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles synthesized from non-aqueous homogeneous solutions of polyols," *Journal of physics D: Applied physics*, vol. 40, p. 5801, 2007.
- [114] R. Fitzpatrick, *Maxwells Equations and the Principles of Electromagnetism*: Laxmi Publications, Ltd., 2010.
- [115] K. R. Schumacher, J. J. Riley, and B. A. Finlayson, "Turbulence in ferrofluids in channel flow with steady and oscillating magnetic fields," *Physical Review E*, vol. 83, p. 016307, 2011.
- [116] G. Kaur, R. Adhikari, P. Cass, M. Bown, and P. Gunatillake, "Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications," *Rsc Advances*, vol. 5, pp. 37553-37567, 2015.
- [117] M. E. Leyva, F. G. Garcia, A. A. A. de Queiroz, and D. A. W. Soares, "Electrical properties of the DGEBA/PANI-Ag composites," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 22, pp. 376-383, 2011.
- [118] H. Okamoto and T. Kotaka, "Structure and properties of polyaniline films prepared via electrochemical polymerization. I: Effect of pH in electrochemical polymerization media on the primary structure and acid dissociation constant of product polyaniline films," *Polymer*, vol. 39, pp. 4349-4358, 1998.
- [119] C. Thiemann and C. M. Brett, "Electrosynthesis and properties of conducting polymers derived from aminobenzoic acids and from aminobenzoic acids and aniline," *Synthetic metals*, vol. 123, pp. 1-9, 2001.
- [120] M. G. Xavier, "Polimerização da anilina e 3-metiltiofeno sobre eletrodos de ouro modificados com monocamadas automontadas de dodecanotiol," Universidade de São Paulo, 2004.
- [121] E. S. Medeiros, J. E. Oliveira, N. Consolin-Filho, L. Paterno, and L. H. Mattoso, "Uso de polímeros condutores em sensores. Parte 1: Introdução aos polímeros condutores," *Embrapa Instrumentação-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 2012.
- [122] G. M. do Nascimento and M. L. Temperini, "Elucidando os estados de oxidação do nitrogênio através da espectroscopia de absorção de raios-X na borda K do nitrogênio," *Química Nova*, vol. 29, p. 823, 2006.
- [123] W. Wu, Z. Wu, T. Yu, C. Jiang, and W.-S. Kim, "Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, surface functional strategies and biomedical applications," *Science and technology of advanced materials*, 2015.
- [124] L. C. Oliveira, J. D. Fabris, and M. C. Pereira, "Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão," *Química Nova*, vol. 36, pp. 123-130, 2013.

- [125] A. Andrade, D. Souza, M. Pereira, J. Fabris, and R. Domingues, "Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles coated with silica through a sol-gel approach," *Cerâmica*, vol. 55, pp. 420-424, 2009.
- [126] H. Park, P. Ayala, M. A. Deshusses, A. Mulchandani, H. Choi, and N. V. Myung, "Electrodeposition of maghemite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles," *Chemical Engineering Journal*, vol. 139, pp. 208-212, 2008.
- [127] L. H. C. Mattoso, "Polianilinas: síntese, estrutura e propriedades," *Química nova*, vol. 19, pp. 388-399, 1996.
- [128] Z. Takai, M. Mustafa, and S. Asman, "Preparation of high performance conductive polyaniline magnetite (PANI/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanocomposites by Sol-Gel Method," *Asian J. Chem*, vol. 30, pp. 2625-2630, 2018.
- [129] F. G. de Souza, J. A. Marins, J. C. Pinto, G. E. de Oliveira, C. M. Rodrigues, and L. M. T. Lima, "Magnetic field sensor based on a maghemite/polyaniline hybrid material," *Journal of Materials Science*, vol. 45, pp. 5012-5021, 2010.
- [130] M. A. El-Ghaffar, K. Shaffei, A. F. Zikry, M. B. Mohamed, and K. A. Marzouq, "Novel Conductive Nano-composite Ink Based on Poly Aniline, Silver Nanoparticles and Nitrocellulose," *Egypt. J. Chem.*, vol. 59, pp. 429-443, 2016.
- [131] M. Trchová, I. Šeděnková, E. Tobolková, and J. Stejskal, "FTIR spectroscopic and conductivity study of the thermal degradation of polyaniline films," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 86, pp. 179-185, 2004/10/01/ 2004.
- [132] A. Maliska, "Apostila de microscopia eletrônica de varredura e microanálise," *Florianópolis, SC*, 2010.
- [133] J. Konopka, "Quantitative differentiation of three iron oxides by EDS," *Microscopy and Microanalysis*, vol. 19, pp. 1046-1047, 2013.

# APÊNDICE

## APÊNDICE A – Planejamento inicial do produto sobre estudos de geração de energia pelo fenômeno magnetohidrodinâmico



## APÊNDICE B – Técnicas experimentais da polianilina (PANI)

Apesar da PANI ser um polímero condutor, ela mostrou uma instabilidade durante a síntese da magnetita. Além disso, a PANI possui uma estrutura linear polimérica obtendo um elevado índice de polidispersão [116].

### B.1 Polímero condutor: Polianilina (PANI)

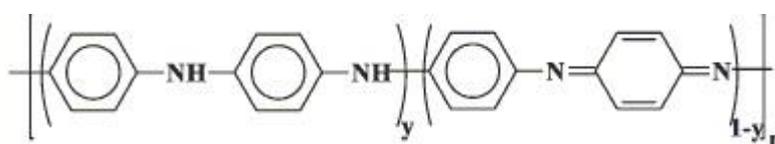
A pesquisa sobre a polianilina (PANI) despertou interesse em meados da década de 1980 devido às suas características de estabilidade química e térmica, valor da condutividade entre 30 e 200 S.cm<sup>-1</sup>, relativa facilidade de polimerização, baixo custo de síntese e às suas interessantes propriedades de oxi-redução [117], [118], [119] e [120].

A classe dos polímeros condutores intrínsecos (PIC) possibilitou a condução da eletricidade do mesmo fenômeno a um metal ou semicondutor com as vantagens de um polímero.

#### B.1.1 Polimerização da PANI

A polimerização é um processo químico para fabricação de polímeros que é uma macromolécula resultante da combinação de vários monômeros de estrutura química simples com camada de valência livre.

A estrutura química da PANI é formada por unidades repetitivas de espécies oxidadas não condutoras (1-y) e reduzidas condutoras (y). O valor de y podendo variar de 0 (zero) completamente oxidado contendo somente nitrogênios imina ( $-N=$ ) a 1 (um) completamente reduzido contendo somente nitrogênios amina ( $-NH-$ ) conforme mostrada na Figura B.1.



Unidades reduzidas

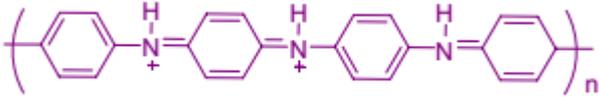
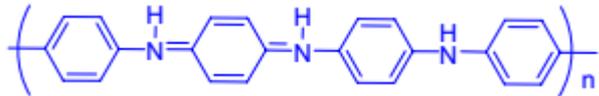
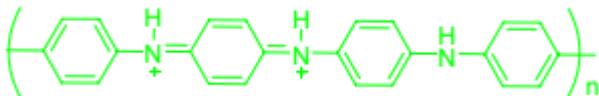
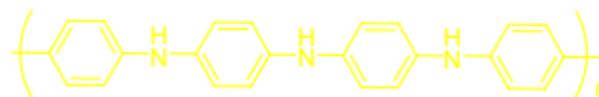
Unidades oxidadas

Figura B.1:Fórmula geral da polianilina.

Fonte: [117].

Os valores de y indicam os estados de oxidação para PANI que se diferenciam por apresentarem cores particulares na prática conforme mostrada na Tabela B.1. A polianilina torna-se condutora em estados moderadamente oxidados a base esmeraldina por meio de dopagem por protonação sob o qual o número de elétrons permanece inalterado [121].

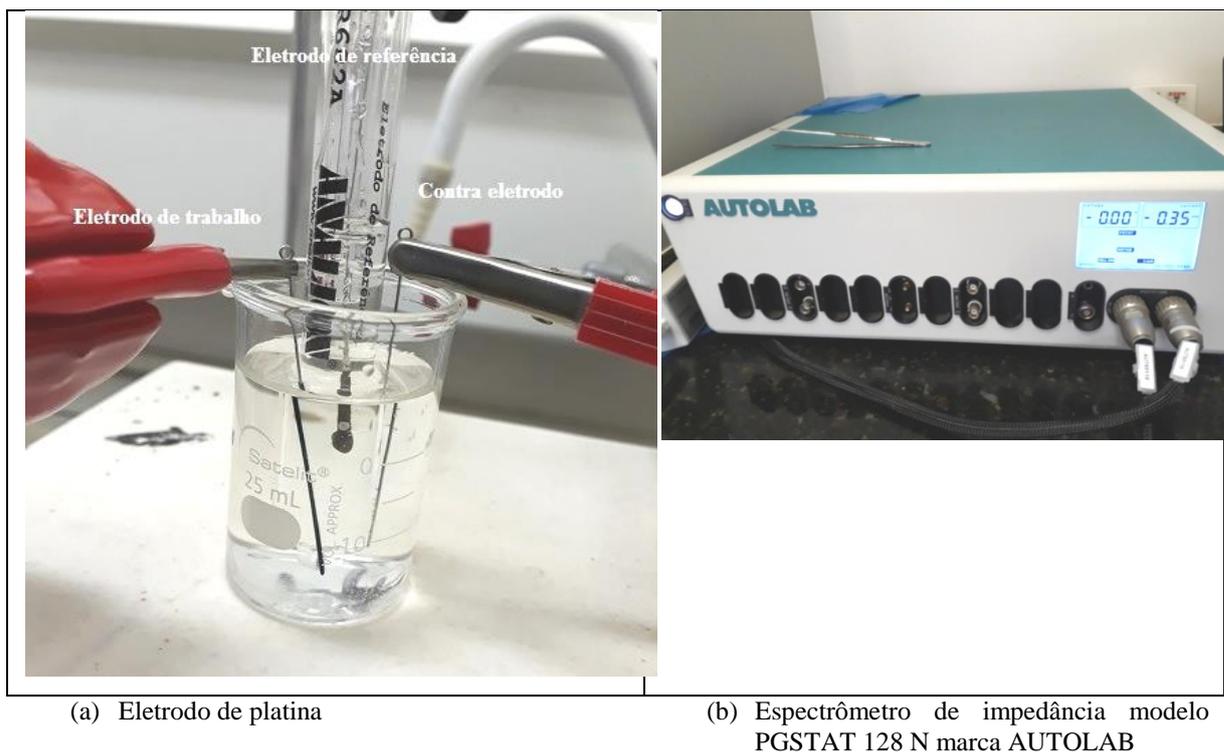
Tabela B.1: Cores associadas para cada estado redox da polianilina.

| y    | Estado de oxidação             | Cor           | Estrutura  |
|------|--------------------------------|---------------|--|
| 0,0  | Pernigranilina<br>(isolante)   | Violeta       |  |
| 0,25 | Nigranilina<br>(isolante)      | Azul          |  |
| 0,50 | Esmeraldina<br>(condutora)     | Verde escuro  |  |
| 1,00 | Leucoesmeraldina<br>(isolante) | Amarelo claro |  |

Fonte: [122].

A polianilina foi sintetizada pelo método eletroquímico por oferecer a vantagem da não necessidade de um agente oxidante ou um catalisador e obter o polímero diretamente na forma de um filme fino sobre a superfície do substrato tornando viável o uso de técnicas espectroscópicas. A voltametria cíclica (VC) é uma técnica eletroanalítica cujas informações qualitativas e quantitativas de uma solução química ou de superfície são obtidas a partir do registro de curvas corrente-potencial denominado de voltamograma.

A Figura B.2 mostra o esquema de uma célula eletroquímica utilizada para caracterização e síntese eletroquímica da PANI de 0,5 mol. L<sup>-1</sup> (Aldrich) no eletrodo de trabalho de platina e o contra-eletródo também é de platina ambos submersos em solução de HCl de concentração de 1,0 mol.L<sup>-1</sup>. O eletrodo de referência (Ag/AgCl) ficou submerso em solução de ácido clorídrico (HCl) de 1,0 mol.L<sup>-1</sup> (NEON).



(a) Eletrodo de platina

(b) Espectrômetro de impedância modelo PGSTAT 128 N marca AUTOLAB

Figura B.2: Fotografia do esquema de uma célula eletroquímica.

Fonte: Próprio autor.

O eletrodo de platina contendo PANI foi caracterizado por voltametria cíclica (VC) utilizando o equipamento potenciostato / galvanostato Autolab modelo PGSTAT 128N (interface NOVA), operando no modo potenciostato, na faixa de potencial de 1,0 V a - 0,2 V. A resposta da polimerização denominada de voltamograma cíclica é mostrada na Figura B.3. Observa-se que, sendo a direção da varredura de potenciais invertida em um potencial de interesse e a velocidade de varredura mantida linearmente constante, a aplicação deste intervalo de potenciais programado e controlável gera uma resposta de corrente entre o eletrodo de trabalho e o contra-eletrodo (CE), ocorrendo reações de oxidação e redução na interface eletrodo/solução ou na superfície do eletrodo. Neste caso, obteve um único pico anódico (3,0 / 2,4) mV ( $A^*/A$ ) indicando a não estabilidade de cátions radicais devido à desprotonação.

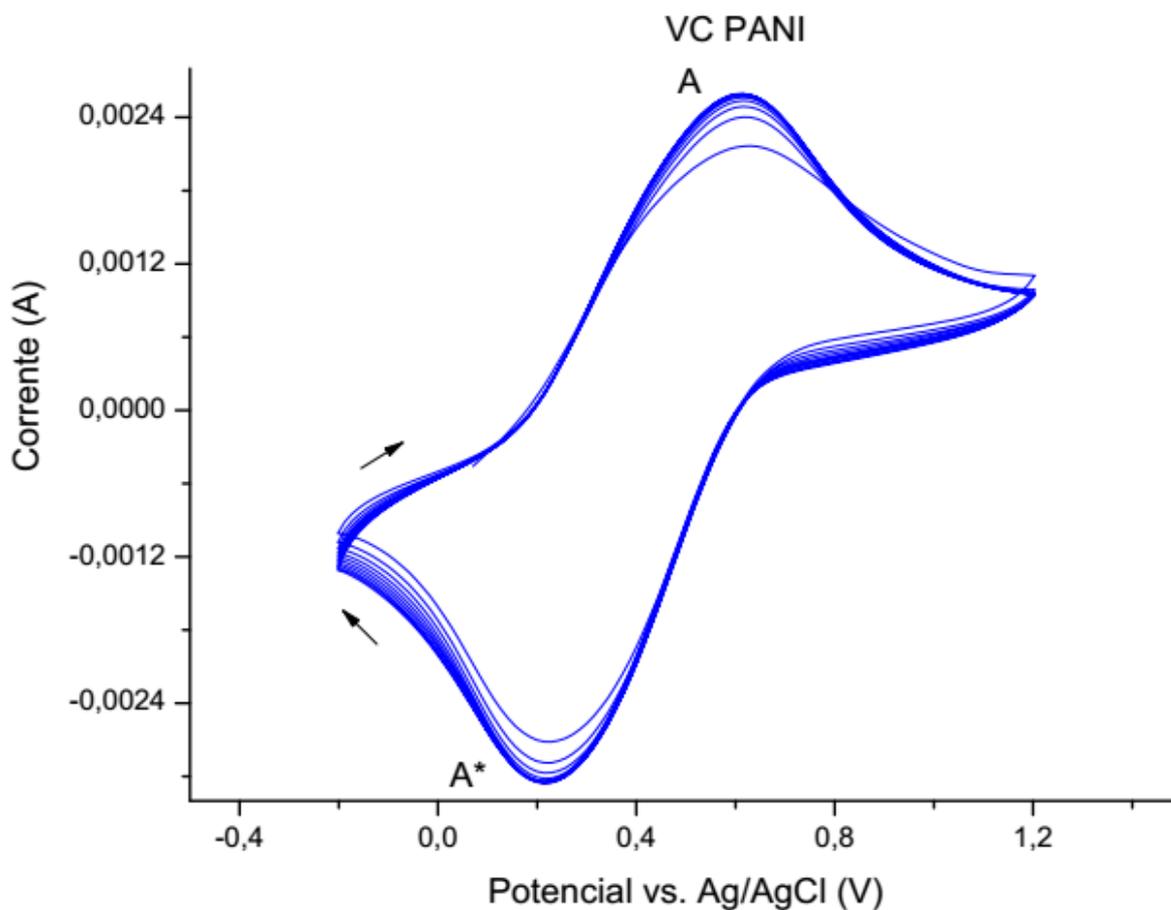


Figura B.3: Voltamograma cíclicos obtidos na síntese da polianilina em solução de  $0,5 \text{ mol. L}^{-1}$  de anilina em  $1 \text{ mol. L}^{-1}$  de HCl. Faixa de potencial de  $-0,2 \text{ V}$  a  $1,2 \text{ V}$  vs. (Ag/AgCl) com 10 ciclos. Com velocidade de varredura igual a  $100 \text{ mV.s}^{-1}$ .

Fonte: Próprio autor.

A célula eletroquímica foi conectada ao Potenciostato da marca AUTOLAB modelo PGSTAT versão 128N com interface a um computador PC. Um software de impedância eletroquímica NOVA foi usada para medidas de impedância uma faixa de frequência entre 10 mHz e 100kHz.

A Figura B.4 mostra o eletrodo de platina (Pt) com a PANI logo após a retirada da solução de ácido clorídrico. Observa-se uma camada úmida e espessa de polianilina formada sobre o eletrodo.

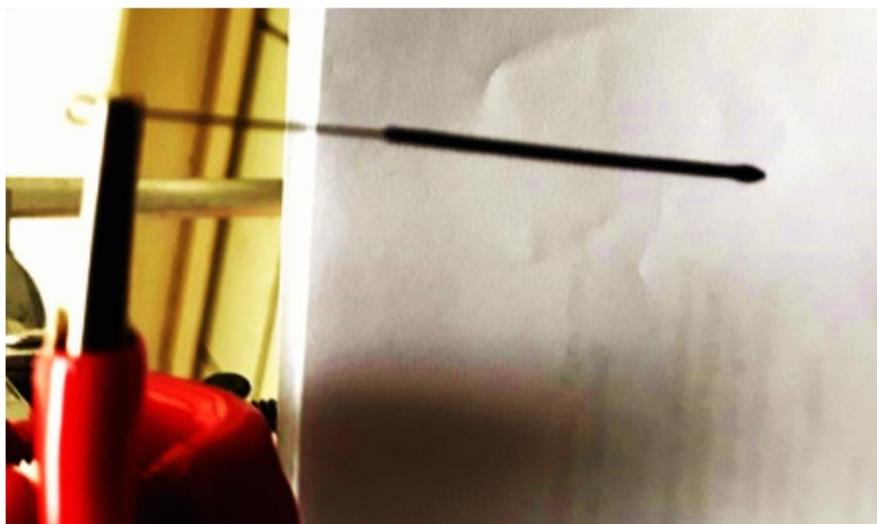


Figura B.4: Fotografia do eletrodo de trabalho revestido de PANI no momento da retirada da solução de HCl.

Fonte: Próprio autor.

Para realizar as análises, o eletrodo de platina contendo a polianilina foi colocado para secagem dentro da estufa de secagem de circulação forçada de modelo Venticell da marca MMM Medcenter Eirichtungen ajustada a uma temperatura constante de 60 °C sob pressão de 1 atm por 3 minutos para eliminar o excedente de umidade e, conseqüentemente, o seu volume foi reduzido conforme mostrada na Figura B.5.

Observa-se que a PANI teve diminuição do volume mostrando as desvantagens desta técnica evidenciadas pela dificuldade em obter filmes mais espessos sem que desprendam da superfície do substrato e baixos valores de massa molecular dos polímeros eletrodepositados.



Figura B.5: Fotografia do eletrodo de trabalho revestido de PANI após secagem na estufa a temperatura constante de 60 °C sob pressão de 1 atm por 3 min.

Fonte: Próprio autor.

### B.1.2 Síntese de nanopartícula de óxido de ferro

Segundo Wu, et al. [123], a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) é um óxido de ferro comum que possui uma estrutura cúbica de espinélio invertida com 32 íons de oxigênio ( $\text{O}^{2-}$ ) formando um cubo de face centrada (FCC) e cátions de Fe ocupando intersítios tetraédricos e octaédricos, conforme mostra a Figura B.6.

Os elétrons podem pular entre os interstícios tetraédricos no ambiente octaedal dos íons  $\text{Fe}^{2+}$  que ocupa na sua totalidade a metade do sítio octaedral e os íons  $\text{Fe}^{3+}$  que estão divididos entre os sítios octaédricos restantes e os sítios tetraédricos na proporção de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} = 1/2$  na estequiometria a temperatura ambiente, rendendo a magnetita um importante material meio metálico [123]. Dessa forma, com os íons  $\text{Fe}^{3+}$  divididos igualmente entre as posições tetraédricas e octaédricas, não existe momento magnético resultante de presença destes íons. Entretanto, todos os íons  $\text{Fe}^{2+}$  residem nos interstícios octaédricos ocupando a metade do sítio, sendo estes íons responsáveis pela magnetização de saturação ou, pelo comportamento magnético do material [124]. E os íons de  $\text{Fe}^{2+}$  podem ser substituídos completamente por outros íons bivalentes como Cobalto (Co), Manganês (Mn) ou Zinco (Zn) entre outros para que a magnetita se transforme num semiconductor tipo n ou tipo p e possua a menor resistividade entre os óxidos de ferro pelo pequeno intervalo entre banda de valência e condução no valor de 0,1 eV [123].

Devido à atração dipolar anisotrópica, nanopartículas magnéticas não modificadas de óxidos de ferro tendem a se agregar dentro de largos clusters e, então, perde-se a propriedade específica associada com domínio único. Além disso, a reatividade das partículas de óxido de ferro é forçada a aumentar bastante e como suas dimensões são reduzidas, elas sofrem rápida biodegradação quando expostos diretamente aos sistemas biológicos. Portanto, revestimentos adequados são essenciais para prevenir tais limitações [125].

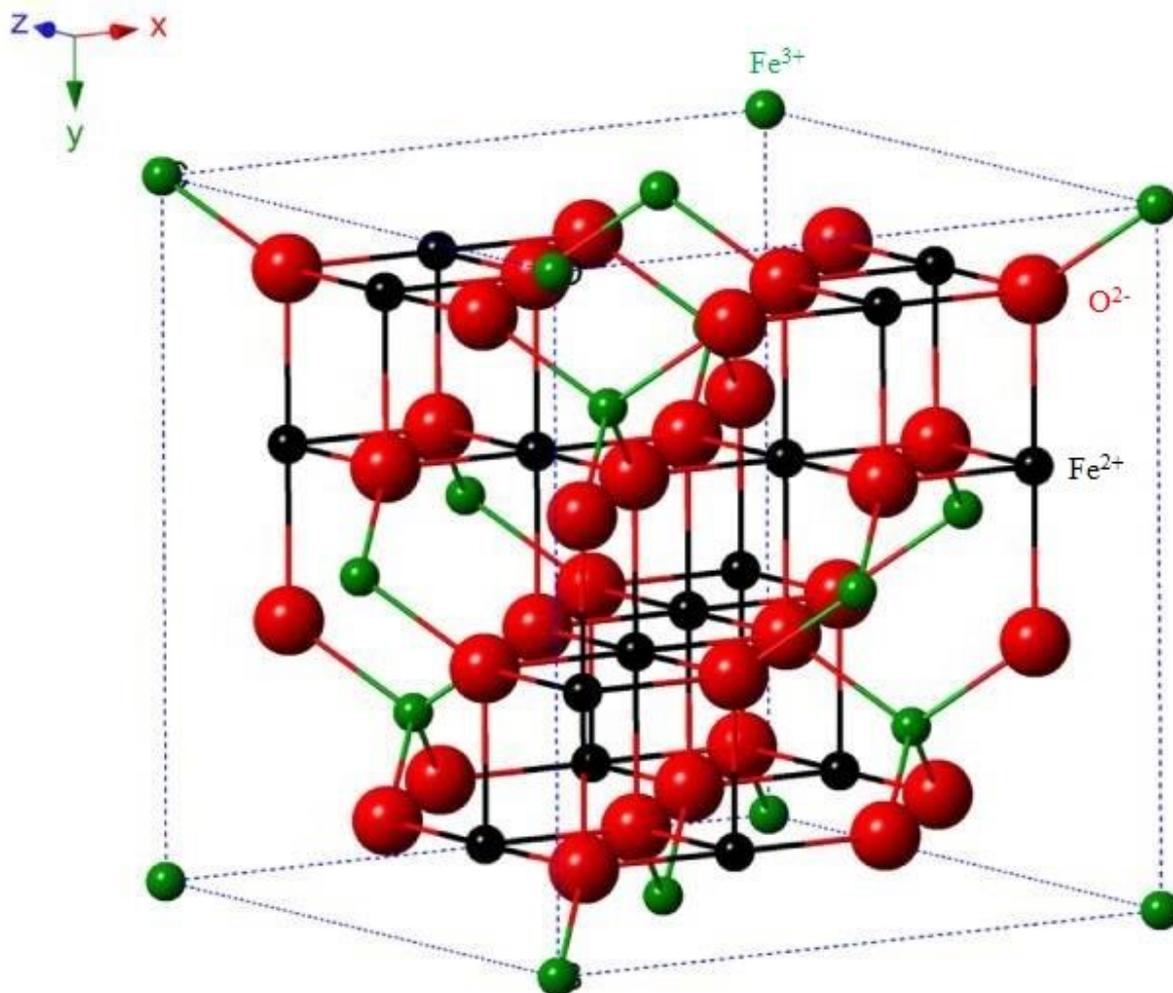


Figura B.6: Ilustração da estrutura cristalina da Magnetita em posições tetraédricas e octaédricas.

Fonte: [123].

Para realizar a síntese do óxido de ferro foi utilizada a técnica da eletrodeposição que consiste na passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos de platina ocasionando o fenômeno da eletrólise, na qual um dos eletrodos tem a deposição do material evidenciando a redução de cátion. Segundo Park, et al. [126], esta técnica é uma alternativa promissora para fabricação de nanopartícula por ser de baixo custo, simples, rápida, ter escala de produção, trabalhar em temperatura ambiente e ter o controle do processo.

Na preparação da nanopartícula de magnetita foram utilizados duas concentrações: 0,10 mol.L<sup>-1</sup> (1,3515 g) e 0,01 mol.L<sup>-1</sup> (0,1351 g) de cloreto de ferro III hexahidratado (FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O) com pureza mínima de 99%, ambos foram dissolvidos em 0,10 mol.L<sup>-1</sup> de ácido clorídrico (HCl) diluído para o volume total de 50 mL. A cor da solução é amarela escura conforme Figura B.7.

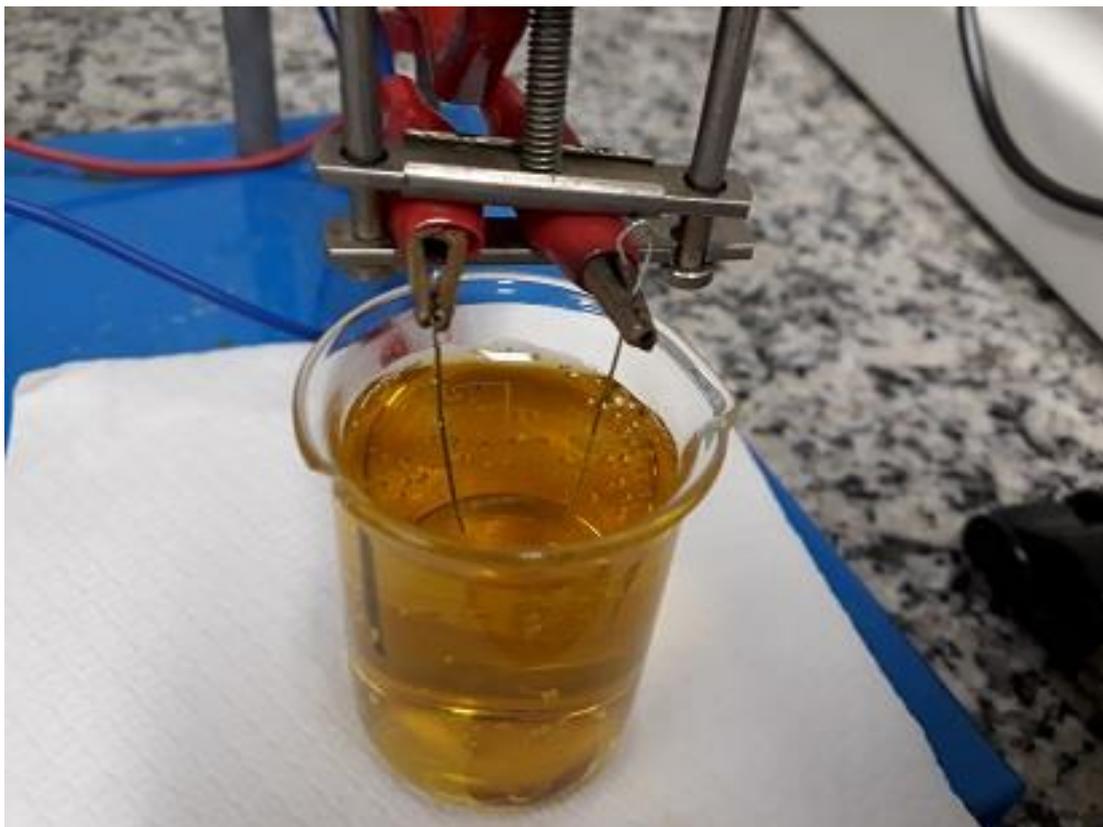


Figura B.7: Fotografia da solução aquosa de  $\text{FeCl}_3$  com volume de 50 mL resultado da dissolução de  $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$  de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  com pureza de 99% em ácido clorídrico de concentração  $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$  a temperatura de ambiente  $25^\circ\text{C}$ .

Fonte: Próprio autor.

A célula eletroquímica foi conectada ao Galvanostato do fabricante AUTOLAB do modelo PGSTAT versão 128N com interface a um computador PC. Um software de impedância eletroquímica NOVA foi usada para medidas de impedância entre 10 mHz e 100 kHz. Os parâmetros de ajustes aplicados foram corrente elétrica de 50 mA e tempo de ensaio de 900 s.

O potencial excitado foi realizado conforme a Figura B.8. Após o término do experimento, o eletrodo de platina foi imediatamente retirado da solução. Verifica-se que o eletrodo de platina ficou incrustado de magnetita, conforme a Figura B.9.

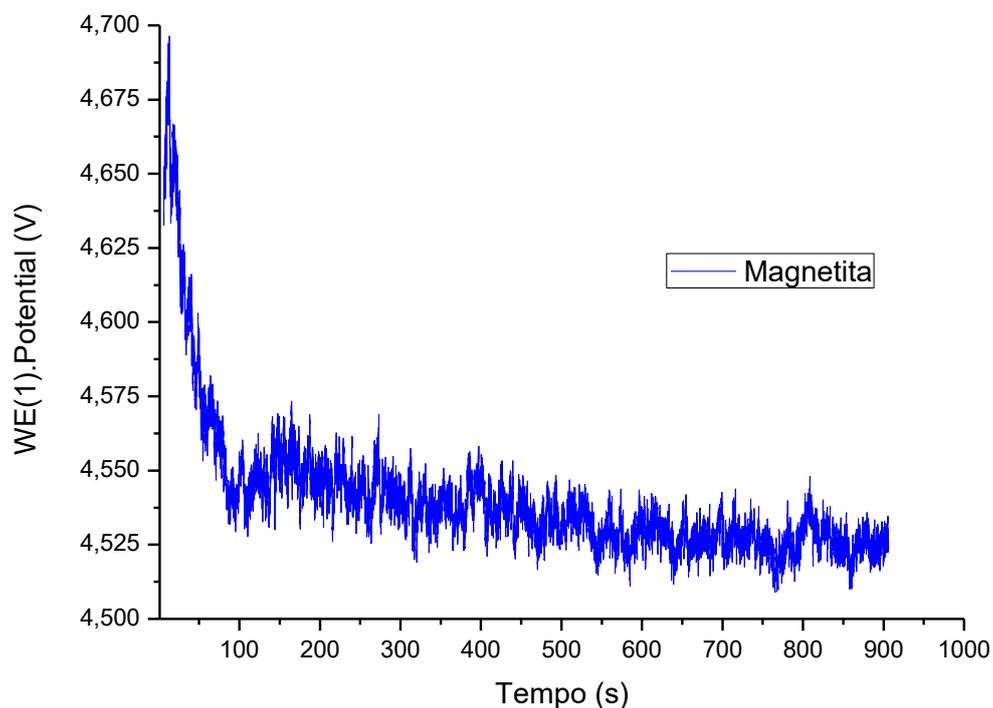


Figura B.8: Curva galvanostática obtida nas condições de temperatura ambiente de 25 °C, aplicada uma corrente elétrica de 50 mA e tempo de 900 segundos para magnetita.

Fonte: Próprio autor.



Figura B.9: Ilustração do eletrodo de platina incrustada de magnetita após o processo de eletrodeposição.

Fonte: Próprio autor.

Foram realizados 2 ensaios para obtenção da nanopartículas de magnetita.

No primeiro ensaio foi utilizado a concentração de 0,1 M de cloreto de ferro III hexahidratado, obtendo cerca de 8,0 mg de magnetita após 15 min., de eletrólise.

No segundo ensaio foi utilizado uma concentração 10 vezes menor (0,01 M) de cloreto de ferro III hexahidratado para obter 1,6 mg de magnetita após 15 min.

A Tabela B.2 mostra a eficiência das duas concentrações de sais e os custos estimados para a obtenção da magnetita.

A estimativa de custos levantados no ambiente laboratorial da universidade e de escala muito pequena no processo eletroquímico para a síntese do óxido de ferro ficou ao custo de R\$ 37,73/g utilizando a concentração de 0,1 M de cloreto de ferro III hexahidratado e para concentração de 0,01 M o valor ficou em R\$ 74,63 /g.

Tabela B.2: Custo de produção de nanopartículas de magnetita.

| Item | Produto  | Embalagem  | Valor (R\$) | Conc. 0,1M<br>(1,3515 g) | Conc. 0,01 M<br>(0,13515 g) |
|------|--|------------|-------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1    | FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O com 99% de pureza   | 500 g      | R\$ 75,00   | R\$ 0,20                 | R\$ 0,02                    |
| 2    | HCl a 37% [8,4 mL para 0,1 M] / 20   | 1000 mL    | R\$ 55,00   | R\$ 0,0231               | R\$ 0,0231                  |
| 3    | Eletrodo de Platina (Pt) [uso 10000x]  | 2 unidades | R\$ 260,00  | R\$ 0,0026               | R\$ 0,0026                  |
| 4    | Água deionizada [50 mL]  | 20 L       | R\$ 20,00   | R\$ 0,05                 | R\$ 0,05                    |
| 5    | Energia elétrica CEMIG – Bandeira vermelha 2<br>Tipo: Residencial<br>Tempo: ¼ h, Tensão: 5 V,<br>Corrente: 50 mA,<br>Potência: 0,250 W | R\$ / KWh  | R\$ 0,63684 | R\$ 0,000398             | R\$ 0,000398                |
| 6    | Produção de magnetita  | mg         | -           | 8,00                     | 1,60                        |
| 7    | Custo de produção  | R\$        | -           | R\$ 0,30                 | R\$ 0,12                    |
| 8    | Custo em gramas  | R\$ / g    |             | R\$ 37,73                | R\$ 74,63                   |

Fonte: Próprio autor.

No mercado, a magnetita em pó com pureza de 100%, textura fina e granulada fina custa por volta de R\$ 10,00/g. Já a magnetita com pureza de 80% de mesma textura e granulada fina custa por volta de R\$ 1,50/g. O valor de um frasco de ferrofluido a base de hidrocarboneto líquido, na composição de 3% a 15% de magnetita da marca Ferrotec custa em torno de R\$ 1,76/g.

A Tabela B.3 mostra o custo de produção somente dos insumos e materiais para a obtenção da magnetita na UNIFEI e o valor do ferrofluido praticado no mercado. Isso mostra a variação do custo de produção da amostra em baixa escala comparada ao produto industrializado utilizando o processo produtivo dedicado para atividade.

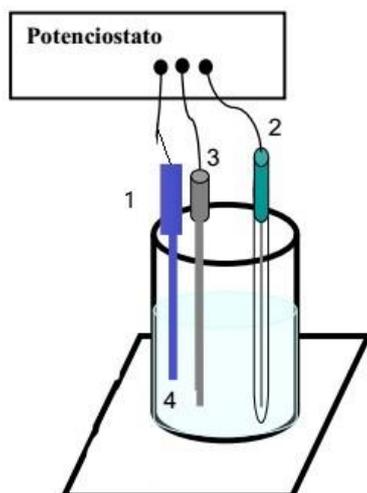
Tabela B.3: Comparativo de custo da magnetita obtida na UNIFEI e vendida no mercado nacional.

| Item | Produto  | Valor (R\$ / g) |
|------|--|-----------------|
| 1    | Magnetita UNIFEI em pó pureza 99% conc. 0,1 M<br>FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O                        | R\$ 37,73       |
| 2    | Magnetita UNIFEI em pó pureza 99% conc. 0,01 M<br>FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O                       | R\$ 74,63       |
| 3    | Magnetita MERCADO em pó pureza 100%, textura fina e granulada fina. Valor médio no mercado.                  | R\$ 10,00       |
| 4    | Magnetita MERCADO em pó pureza 80% textura fina e granulada fina. Valor médio no mercado.                    | R\$ 1,50        |
| 5    | Ferrofluido marca FERROTEC líquido preparado a base de hidrocarboneto na composição de 3% a 15% de Magnetita | R\$ 1,76        |

Fonte: Próprio autor.

### B.1.3 Polimerização da polianilina em eletrodo incrustado de magnetita

A primeira tentativa de ensaio para evitar a oxidação da magnetita e manter as suas propriedades magnéticas, foi polimerizar a polianilina sobre o eletrodo incrustado de magnetita conforme mostrada no esquema da Figura B.10.



Legenda:

1-Eletrodo de trabalho incrustado de magnetita (WE);

2-Eletrodo de referência (RE);

3-Contra eletrodo de platina (CE);

4-Eletrólito contendo  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  de anilina e  $1 \text{ mol.L}^{-1}$  de ácido clorídrico (HCl)

Figura B.10: Esquema da célula eletroquímica com eletrodo de trabalho incrustado de magnetita a ser revestido pela PANI.

Fonte: Próprio autor.

O experimento utilizado foi a voltametria cíclica, mostrada na Figura B.11 que consiste em submergir o eletrodo de platina incrustado de magnetita a uma solução de ácido clorídrico (HCl) em 0,5 M e conectar os eletrodos a uma fonte de corrente variável.

Foi fixada a tensão para 5 V e a corrente foi elevada gradativamente de acordo com avaliação visual até a aderência da PANI no eletrodo de trabalho. A Tabela B.4 mostra os valores de corrente aplicados e a reação do eletrodo de trabalho.

Tabela B.4:Tentativas de polimerização da PANI em óxido de ferro.

| Corrente [mA] | Observações     | Reação do eletrodo de trabalho com a PANI             |
|---------------|-----------------|---|
| 1,0           | Pequenas bolhas | Não ocorreu   |
| 1,5           | Pequenas bolhas | Não ocorreu   |
| 2,0           | Pequenas bolhas | Não ocorreu   |
| 2,5           | Pequenas bolhas | Não ocorreu   |
| 3,0           | Pequenas bolhas | Não ocorreu   |
| 3,5           | Bolhas médias   | Não ocorreu   |
| > 4,0         | Grandes bolhas  | Ocorreu. Desprende a magnetita do eletrodo de platina |

Fonte: Próprio autor.

As tentativas de elevar o valor da corrente elétrica não obtiveram êxito devido ao surgimento de bolhas de hidrogênio no eletrodo de trabalho. A cada aumento no valor da corrente, as bolhas intensificaram no eletrodo de trabalho causando o desprendimento quase total da magnetita conforme mostra a Figura B.12.

Não se chegou ao ponto de aderência da PANI no eletrodo de trabalho mesmo fazendo a varredura no valor da corrente.

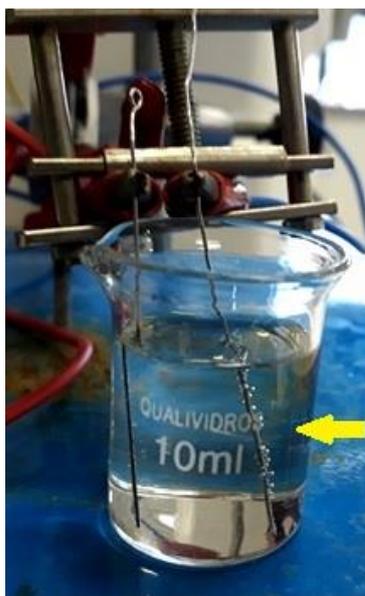


Figura B.11: Fotografia no instante momento do surgimento de bolhas de hidrogênio durante a tentativa de polimerização da polianilina no eletrodo incrustado de magnetita na solução contendo  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  de anilina e  $1 \text{ mol.L}^{-1}$  de ácido clorídrico conectado a uma corrente elétrica de 4 mA e potencial de 5 V em temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ .

Fonte: Próprio autor.



Figura B.12: Ilustração do eletrodo de trabalho com desprendimento da magnetita após ataques intensos de bolhas de hidrogênio.

Fonte: Próprio autor.

O voltamograma cíclico eletrodeposição da PANI no eletrodo de trabalho (WE) incrustado de magnetita em solução de  $1 \text{ mol.L}^{-1}$  de HCl, com velocidade de varredura igual a  $20 \text{ mV.s}^{-1}$  fez os dois primeiros ciclos completos, A Figura B.13 mostra o primeiro ciclo completo correspondendo os pares de redox:  $(2,5 \times 10^{-4} / 4,0 \times 10^{-4}) \text{ V}$  (A\*/A) e  $(2,2 \times 10^{-4} / 3,5 \times 10^{-4}) \text{ V}$  (D\*/D), correspondendo, respectivamente, as transições da base leucoesmeraldina (amarelo) / sal esmeraldina (verde) e sal esmeraldina (verde) / sal pernigranilina (violeta). Porém, a intensidade e força das bolhas de hidrogênio (hidrólise) foram fortes suficientes para a degradação da magnetita incrustadas no eletrodo de platina que o ensaio cessou no terceiro ciclo. Os picos adicionais intermediários  $(2,2 \times 10^{-4} / 1,8 \times 10^{-4}) \text{ V}$  (B\*/B) e  $(1,8 \times 10^{-4} / 1,9 \times 10^{-4}) \text{ V}$  (C\*/C) entre os pares de redox evidenciam a degradação do polímero por reações de formação de ligações cruzadas, hidrólise ou cisão de cadeia [127].

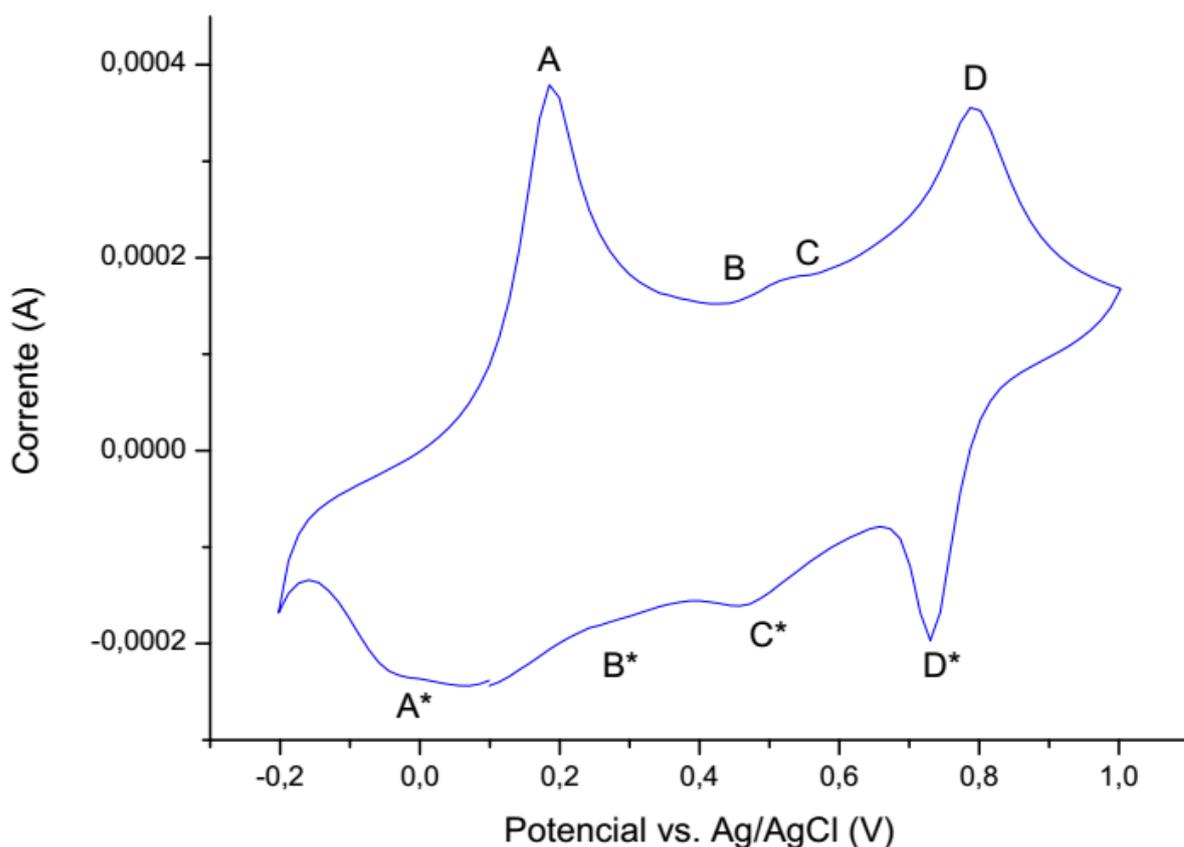


Figura B.13: Voltamograma cíclico da caracterização da PANI eletrodepositada no eletrodo de trabalho incrustada de magnetita em solução de  $1 \text{ mol.L}^{-1}$  de HCl, com velocidade de varredura igual a  $20 \text{ mV.s}^{-1}$ , na faixa de potencial de -0,2 a 1,0 V no segundo ciclo.

Fonte: Próprio autor.

### B.1.4 Síntese do óxido de ferro no eletrodo revestido de PANI

A segunda tentativa foi inverter o processo da primeira tentativa, que é realizar a síntese da magnetita no eletrodo revestido de PANI.

Para isto, utilizou-se a técnica do galvanostato onde foi aplicada uma corrente de 50 mA durante 1200 s no eletrodo submersa num béquer de 50 mL contendo 0,10 mol.L<sup>-1</sup> de FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O com pureza de 99% em ácido clorídrico de concentração 0,10 mol.L<sup>-1</sup> conforme a Figura B.14.

A Figura B.15 mostra o eletrodo de trabalho coberto de PANI submersa a uma solução ácida de cloreto de ferro para a síntese da magnetita sobre a polianilina.

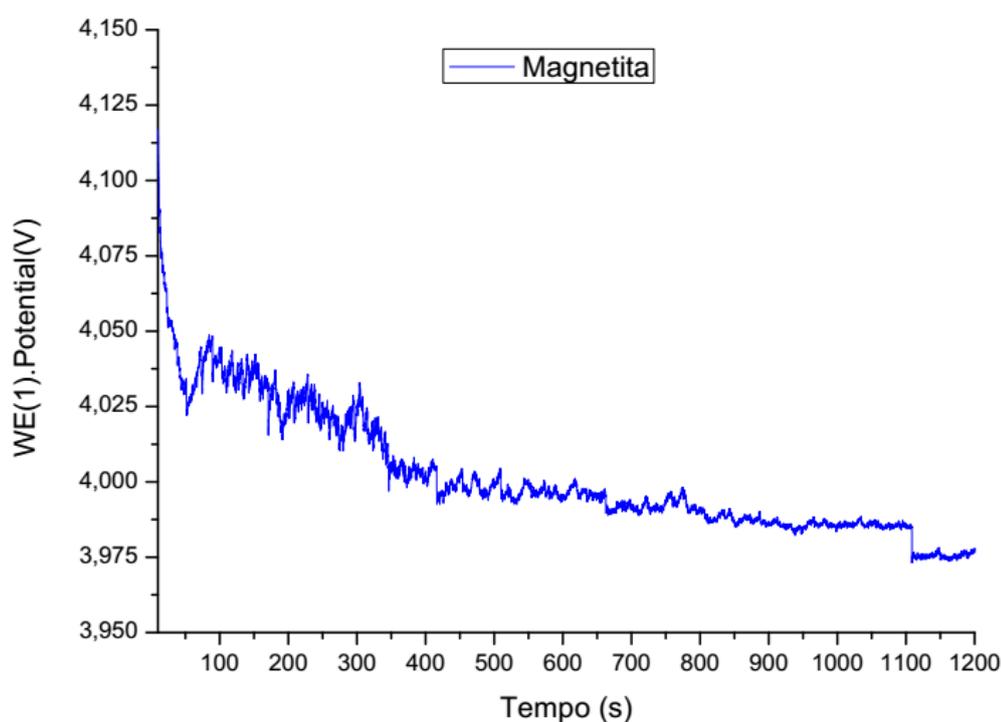


Figura B.14: Curva galvanostática obtida nas condições de temperatura ambiente de 25 °C, aplicada uma corrente elétrica de 50 mA e uma tensão média de 4,0 V durante o tempo de 1200 segundos para síntese da magnetita no eletrodo de trabalho (WE) contendo a polianilina.

Fonte: Próprio autor.



Figura B.15: Fotografia do experimento da síntese da magnetita sobre o eletrodo incrustado de polianilina submersa no béquer contendo uma solução  $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$  de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  com pureza de 99% em HCl de concentração  $0,10 \text{ mol.L}^{-1}$  a temperatura ambiente a  $25^\circ\text{C}$ , aplicando corrente elétrica de 50 mA.

Fonte: Próprio autor.

## B.2 Caracterização de materiais da PANI

Para saber as melhores aplicações e antecipar o comportamento do material criado, é preciso avaliar as propriedades físicas e químicas a partir da amostra. Esse processo denomina-se caracterização de materiais.

### B.2.1 Espectroscopia na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) na PANI Magnetita

Para assegurar que a amostra PANI-Magnetita contém as duas substâncias aderidas, a caracterização foi realizada por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Esta consiste em coletar os dados da amostra por meio da radiação infravermelho (IV) onde todos os comprimentos de onda da faixa usada são guiados através de um interferômetro. Após passar pela amostra, o sinal medido forma o interferograma. Aplicando neste sinal a transformada de Fourier, obtém-se em um espectro idêntico ao da espectroscopia IV convencional dispersiva. A vantagem dos espectrofotômetros FTIR é o custo ser mais acessível devido à simplicidade no projeto de construção do equipamento interferômetro a de um monocromador.

A FTIR utilizada no experimento foi o modelo IRTracer-100 da marca SHIMADZU com sinal ruído de 60 000:1, resolução de  $0,25\text{ cm}^{-1}$ , velocidade de análise de 20 espectros por segundo, reconhecimento automático de acessórios e câmara interna para amostra isolada a gás Nitrogênio. O equipamento funciona em conjunto com um computador de processamento CORE i3 e uma tela de cristal líquido (LCD) de 20 polegadas.

O espectro obtido a partir FTIR da amostra em pó da solução PANI-Magnetita, encontra-se na Figura B.16. Observa-se que o pico das nanopartículas de magnetita pura surge em  $665\text{ cm}^{-1}$ , atribuído à vibração de alongamento Fe – O e em  $3300\text{ cm}^{-1}$  pelo alongamento de N – H. O alongamento C = C vibratório e deformação do anel benzenóide e de quinóide aparecem, respectivamente, em  $1520\text{ cm}^{-1}$  e  $1547\text{ cm}^{-1}$ . O pico  $1383\text{ cm}^{-1}$  representa o alongamento vibratório C – N da amina secundária aromática; enquanto os picos  $1120\text{ cm}^{-1}$  e  $900\text{ cm}^{-1}$  demonstram que C – N estão fora do plano plana em 1,4 anel de benzeno distribuído. Estes evidenciam a presença de nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) na PANI [128].

A polianilina foi obtida no laboratório LAT-EFEI conforme mostrada na fotografia da Figura B.17. As características da polianilina apresentam bandas de absorção características em faixa de alongamento N-H para amina secundária a  $3336\text{ cm}^{-1}$ , a banda de abaulação N-H para aminas secundárias surge a  $665\text{ cm}^{-1}$ . As bandas principais de PANI protonadas aparecem a  $1501\text{ cm}^{-1}$  C=C anéis de quinonóides. A banda aparecendo a  $2318\text{ cm}^{-1}$  representa a vibração de alongamento de sal de amina terciária ( $\text{NH}^+$ ). A faixa que indica a formação do polímero é a banda localizada a  $1130\text{ cm}^{-1}$ . As bandas consideradas mais importantes da FTIR são  $1130\text{ cm}^{-1}$  e  $2318\text{ cm}^{-1}$  onde foram encontrados alta condutividade elétrica e alto grau de concentração de elétrons na PANI [129], [130].

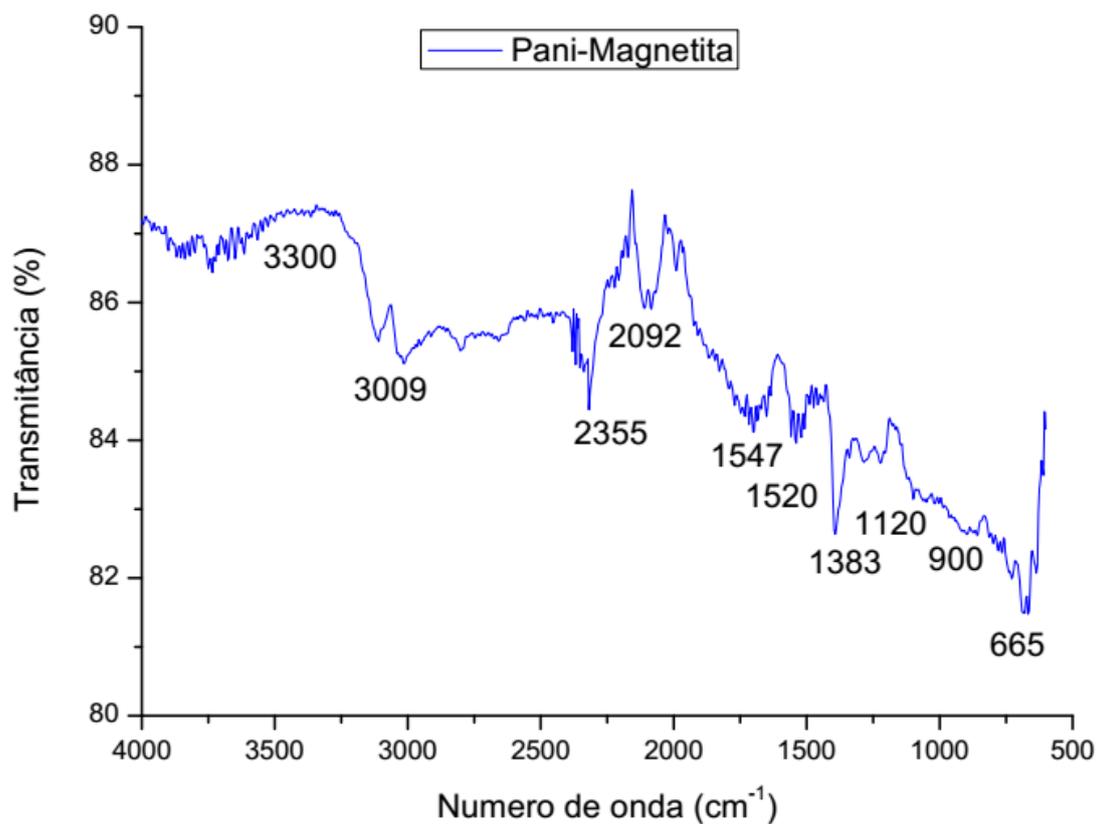


Figura B.16: Espectro de transmissão da solução PANI-Magnetita.

Fonte: Próprio autor.

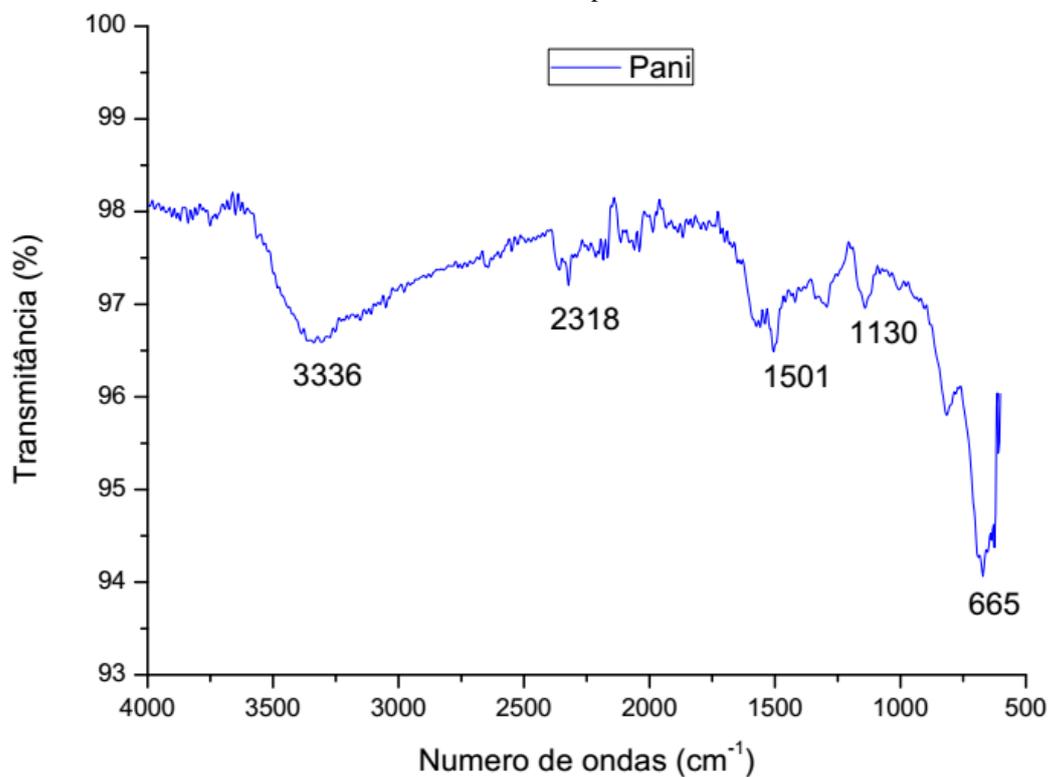


Figura B.17: Espectro de transmissão da Polianilina.

Fonte: Próprio autor.

Foi feita uma comparação com o trabalho de Trchová, et al. [131] para verificar as duas amostras: apenas com a PANI e a síntese da magnetita na PANI. Ambas as amostras foram feitas com HCl (ácido clorídrico) a 0,1M.

As amostras de nº 1, 2 e 3 foram retiradas do experimento da Trchová, et al. [131] e as amostras de nº 5 e 6 foram obtidas no Laboratório do LAT-EFEI conforme a Tabela B.5. As amostras realizadas no laboratório LAT-EFEI foram de quantidade suficiente para apresentar uma convergência satisfatória nos espectros de bandas de absorvência para o número de onda relevante às propriedades.

Os principais elementos que caracterizam a PANI nas respectivas faixas de número de ondas são: Q: vibração de anel quinonóide; B: vibração de anel de benzeno; str.: vibração por estiramento; pl.: vibração no plano; out of pl: vibração fora do plano.

Tabela B.5: Posições das bandas principais de absorção da PANI.

| No. | Amostra   | Q    | B    | C – N<br>Str. | C – N<br>Str. | C – N + t<br>Str.. | - NH <sup>+</sup> =<br>Str.<br>C – H in<br>pl. | C – H<br>Out of<br>pl. | 800 –<br>700<br>cm <sup>-1</sup> | 600 –<br>500<br>cm <sup>-1</sup> |
|-----|---|------|------|---------------|---------------|--------------------|--|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1   | PANI . HCl<br>(30°C)  | 1578 | 1497 | 1375          | 1306          | 1250               | 1140   | 822,<br>806            | 708                              | 516                              |
| 2   | PANI . HCl<br>(150°C)                                       | 1587 | 1500 | 1379          | 1308          | 1236               | 1155,<br>1046 C -<br>Cl                        | 838                    | 727                              |                                  |
| 3   | PANI . HCl<br>base  | 1590 | 1505 | 1378          | 1318          | 1246               | 1163,<br>1151,<br>1017,<br>957                 | 833                    | 712                              |                                  |
| 4   | PANI (25°C)<br>LAT-EFEI                                     | 1590 | 1501 | 1390          | 1308          | 1250               | 1130   | 800                    | 750                              | 665                              |
| 5   | Fe <sub>4</sub> O <sub>3</sub> . PANI<br>(25°C) LAT<br>EFEI | 1547 | 1520 | 1383          | 1300          | 1250               | 1120   | 900                    | 750                              | 665                              |

Fonte: Adaptado de [131].

## B.2.2 Microscopia de varredura (MEV) sobre a magnetita

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) se tornou um instrumento fundamental para análise de materiais que necessitam de aumento acima de  $10^4$  vezes permitindo entender as correlações de microestrutura, seus defeitos e propriedades, além de, prever as propriedades do material quando as correlações são estabelecidas conforme mostrada na Figura B.18. O perfil construtivo é composto, basicamente, da coluna óptico eletrônica (canhão de elétrons e sistema de redução do diâmetro do feixe eletrônico - demagnificação), da unidade de varredura, da câmara de amostra, do sistema de detectores e do sistema de visualização de imagem.

O funcionamento da microscopia eletrônica é fazer irradiar um fino feixe de elétrons numa área ou microvolume a ser analisado. O resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra é uma série de radiações emitidas do tipo: elétrons secundários, raio x característicos, elétrons retroespalhados, fótons entre outros. As informações das características sobre a amostra (cristalografia, composição, topografia da superfície etc) são fruto da correta captação das radiações [132].



Figura B.18: Fotografia de microscópio eletrônico de varredura modelo MA15EVO XFLASH 6I10 da marca ZEISS.

Fonte: Próprio autor.

Dentre as radiações emitidas pelo MEV, os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. A medida que a amostra sofre a varredura do feixe de elétrons primários estes sinais sofrem modificações de acordo com as variações da superfície. A imagem de topografia da superfície da amostra é fornecida pelos

elétrons secundários, os quais são responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução. A imagem característica de variação de composição é fornecida pelos elétrons retroespalhados.

A Figura B.19 mostra a fotografia da câmara de alto vácuo para armazenar a amostra a ser analisada no MEV.

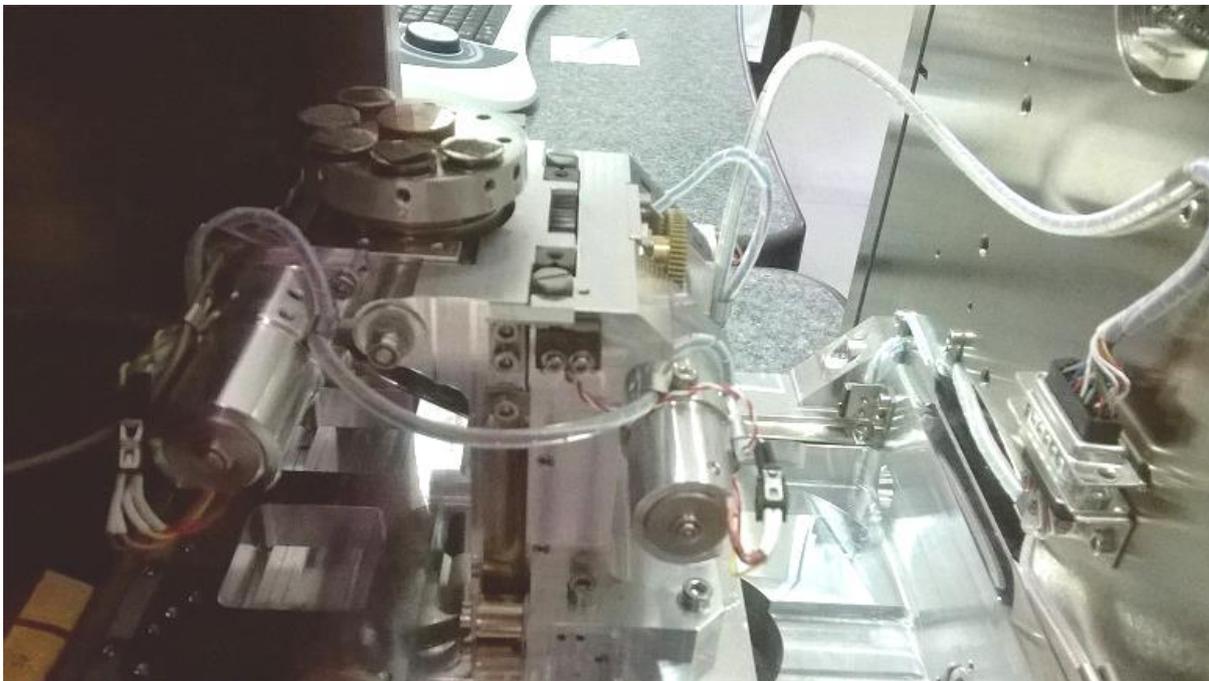


Figura B.19: Fotografia da câmara de alto vácuo de um MEV modelo MA15EVO XFLASH 6110 da marca ZEISS.

Fonte: Próprio autor.

Em conjunto com o MEV, utiliza-se o detector de energia dispersiva (EDS), que é um dispositivo sólido aplicado para detectar os raios X e converter sua energia em cargas elétricas. Quando as cargas elétricas são processadas, geram um sinal que identifica a energia dos raios-X e, conseqüentemente, seus elementos. Os raios-X, em sua interação com o sólido, perdem sua energia, originando as cargas elétricas, que são coletadas pelo detector de estado sólido, tanto as cargas positivas como as negativas.

Antes de serem analisadas, a todas as amostras foi aplicada uma técnica padrão de metalização a ouro pelo plasma do equipamento da marca Quorum Technologies do modelo Q150R E5 para ter melhor nitidez de imagem na microscopia de varredura, conforme a Figura B.20. O tempo de metalização durou por nove minutos para cada amostra. Isso foi para certificar que a amostra é um metal.



Figura B.20: Metalizador para deposição de ouro nas amostras modelo Q150R E5 da marca Quorum Technologies com vácuo de  $2 \times 10^{-3}$  mbar. Tempo de deposição: 9 minutos. Corrente de pulverização: 0 ~ 80 mA.

Fonte: Próprio autor.

Geralmente, os elementos em maior quantidade na amostra são identificados com elevada precisão, porém, quando os elementos estão presentes em quantidades pequenas ou apresentam somente traços, os erros de interpretação podem ocorrer em consequência das interferências, artefatos e multiplicidade das raias espectrais para cada elemento.

Assim, para a micro análise química por energia dispersiva (EDS), considera-se que:

- Acima de 10% em peso, o elemento está presente em grande quantidade;
- Entre 1% e 10%, está presente em pequena quantidade;
- Menor que 1% identifica-se apenas o traço.

O espectro consiste de picos característicos e do contínuo (background). O "background" fornece a tensão de aceleração do microscópio, no restante é um sinal inconveniente, pois, não fornece nenhuma informação sobre os elementos presentes na amostra.

Para verificar se o material incrustado é de fato a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), foram realizados o MEV e o EDS. Havia duas formas de magnetita:

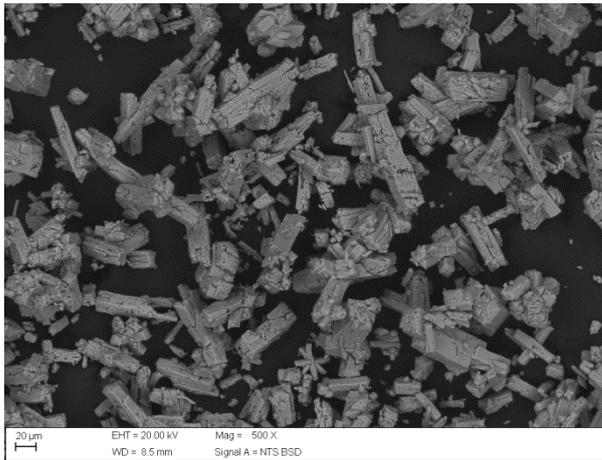
a) Imantada: a magnetita foi submetida a campos magnéticos

A magnetita foi aproximada por um ímã durante um minuto. Em seguida, aplicou-se o MEV conforme a Figura B.21.

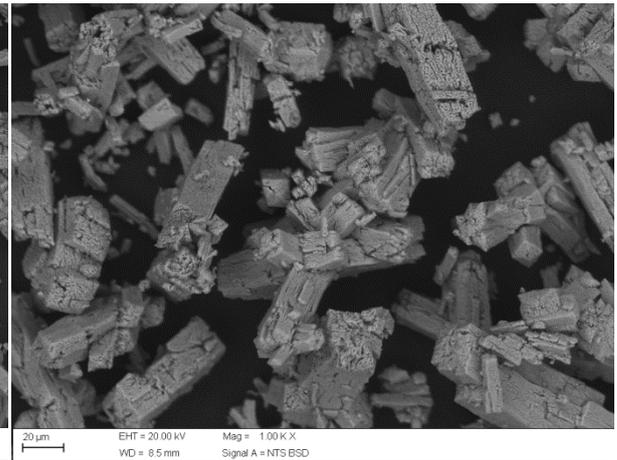
Aplicando o EDS com energia inicial de 20kV verifica-se a presença dos elementos principais da magnetita monitorado por pico de alpha tipo K de ferro. Observam-se, na Figura B.24, os picos mais altos dos espectros os elementos ferro (Fe) e oxigênio (O) em grande quantidade. O elemento carbono (C) pode ser produto de algum vestígio da mistura.

De acordo com Konopka [133], na amostra bem preparada do óxido de ferro, os picos de Fe e O apresentados e seus percentuais na composição de acordo com o padrão mostrado pela Tabela B.6 evidenciam se tratar da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

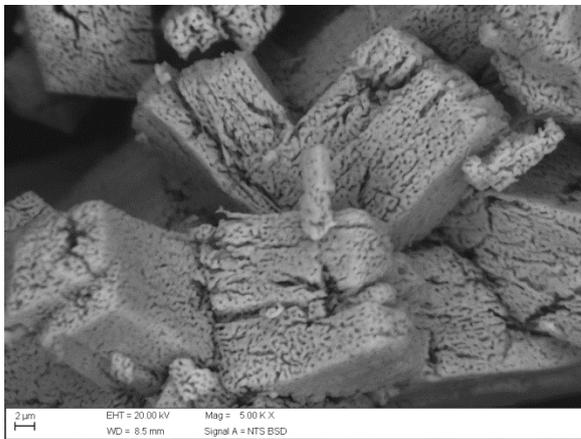
Escala: 20µm e Zoom: 500x



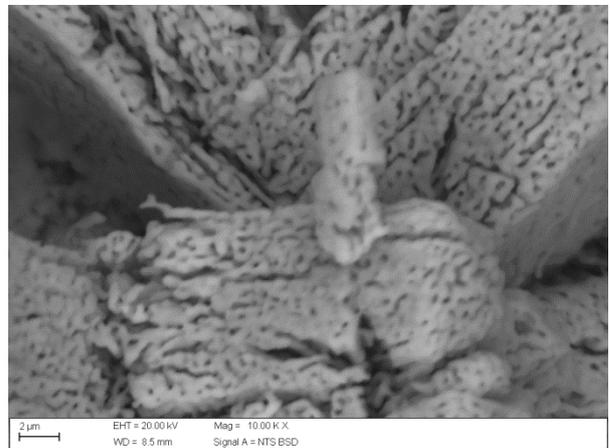
Escala: 20µm e Zoom: 1000x



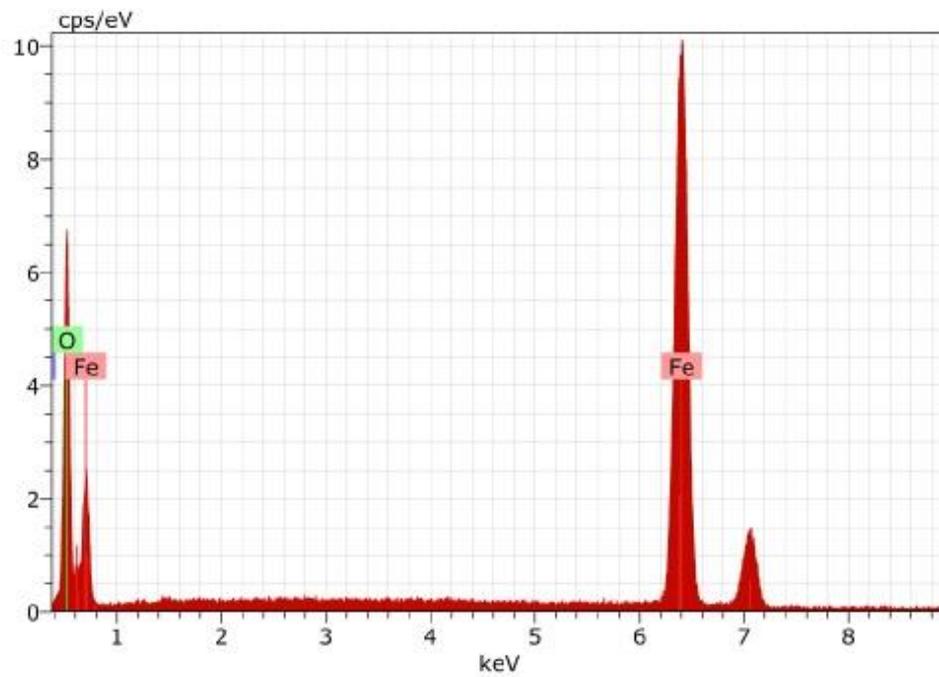
Escala: 2µm e Zoom: 5000x



Escala: 2µm e Zoom: 10000x

Figura B.21: Micrografia MEV de amostras  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  agregadas por imantação.

Fonte: Próprio autor.



AMHV:20.0kV Puls th.:4.34kps

| El     | AN | Series   | unn. C<br>[wt.%] | norm. C<br>[wt.%] | Atom. C<br>[at.%] | Error (1 Sigma)<br>[wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Fe     | 26 | K-series | 93.94            | 75.12             | 45.33             | 2.55                      |
| O      | 8  | K-series | 27.05            | 21.63             | 45.57             | 3.75                      |
| C      | 6  | K-series | 4.06             | 3.24              | 9.10              | 1.15                      |
| Total: |    |          | 125.05           | 100.00            | 100.00            |                           |

Figura B.22: Espectro EDS de amostra  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  imantada e sintetizada.

Fonte: Próprio autor.

Tabela B.6: Valor padrão da composição da magnetita.

| Magnetita | Nº atômico | wt. %  |
|-----------|------------|--------|
| Fe        | 26         | 72,36  |
| O         | 8          | 27,64  |
| Total     |            | 100,00 |

Fonte: [133].

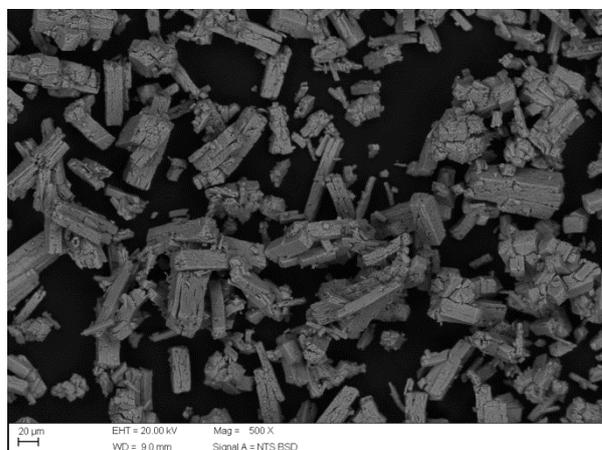
b) Isolado: Nenhuma interferência magnética ocorreu na magnetita.

A aplicação da MEV aconteceu diretamente na magnetita, conforme mostra a Figura B.23.

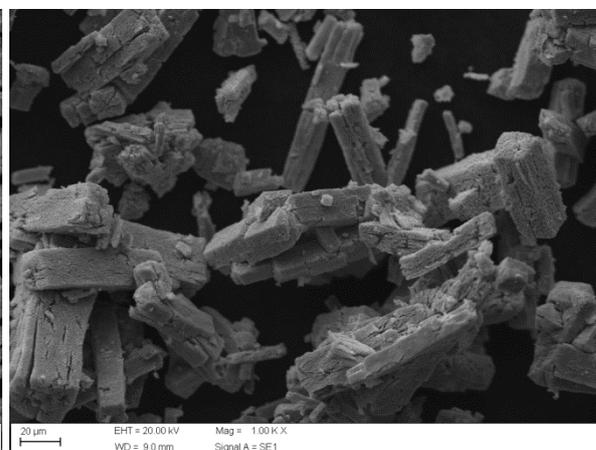
Aplicando o EDS com energia inicial de 20kV, verifica-se a presença dos elementos principais da magnetita da série K, conforme mostra Figura B.24. Observa-se que a influência da imantação não altera a composição química ou estrutural da matéria.

Por meio desta técnica EDS consegue-se diferenciar os vários tipos de óxidos de ferro como a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Escala: 20 $\mu\text{m}$  e Zoom: 500x



Escala: 20 $\mu\text{m}$  e Zoom: 1000x



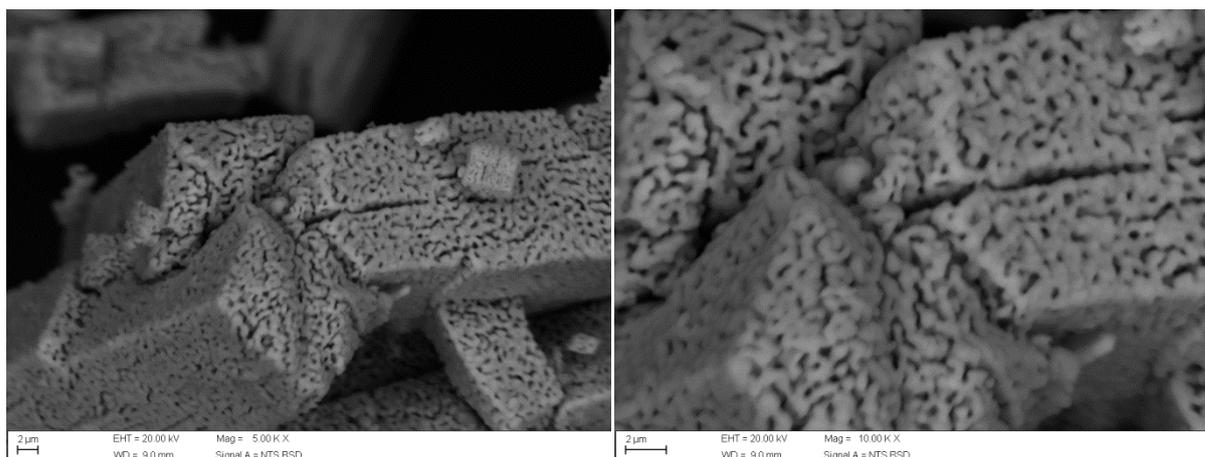
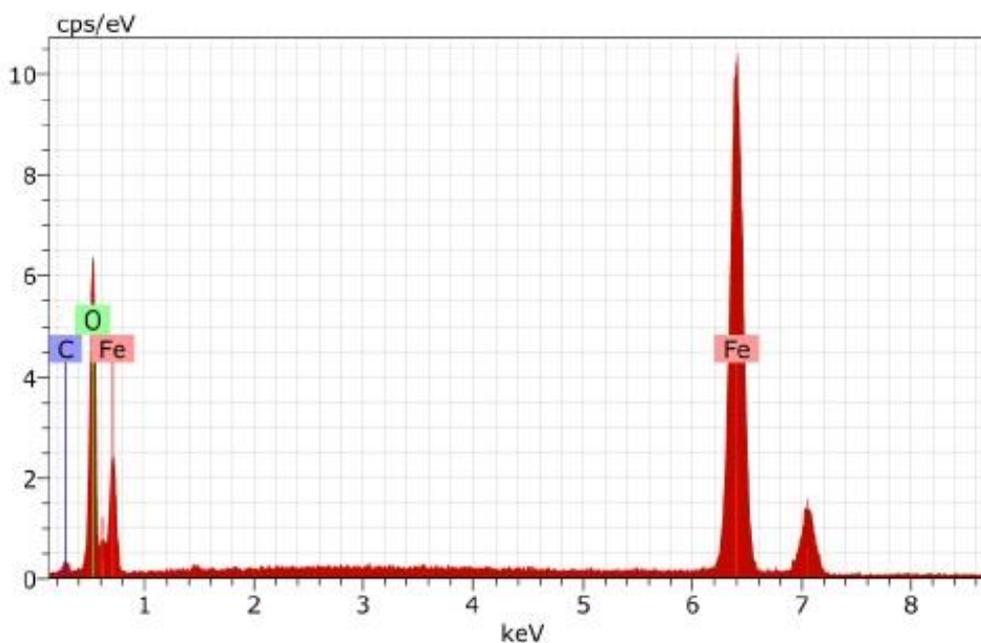
Escala: 2 $\mu$ m e Zoom: 5000xEscala: 2 $\mu$ m e Zoom: 10000x

Figura B.23: Micrografia MEV de amostras  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  agregadas isentas de imantação.

Fonte: Próprio autor.



AM HV:20.0kV Puls th.:4.41kcps

| El     | AN | Series   | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error (1 Sigma) [wt.%] |
|--------|----|----------|---------------|----------------|----------------|------------------------|
| Fe     | 26 | K-series | 94.30         | 76.30          | 46.89          | 2.56                   |
| O      | 8  | K-series | 25.38         | 20.53          | 44.05          | 3.53                   |
| C      | 6  | K-series | 3.92          | 3.17           | 9.06           | 1.11                   |
| Total: |    |          | 123.60        | 100.00         | 100.00         |                        |

Figura B.24: Espectro EDS de amostra  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  não imantada e sintetizada.

Fonte: Próprio autor.

### B.2.3 Microscopia de alta resolução para os compostos

Para verificar a aderência de compostos no eletrodo de platina, foi utilizado o microscópio metalográfico, modelo TMN-07T-PL, da marca OPTON. O funcionamento do microscópio metalográfico se difere do biológico pela variedade do tipo de objetivas, enfoque e lentes de ampliação máxima ao invés da variação de luz refletida.

Inicialmente, o eletrodo de platina foi submetido ao microscópio e fotografado com a câmera para verificar a sua superfície. Em seguida, analisou-se a aderência da polianilina e da magnetita na superfície do eletrodo de platina.

Para o microscópio foram observados os três eletrodos com os tipos de materiais sedimentados.

O microscópio trinocular utilizado localiza-se no laboratório de alta de tensão LAT-EFEI conforme fotos ilustrativas na Figura B.25.

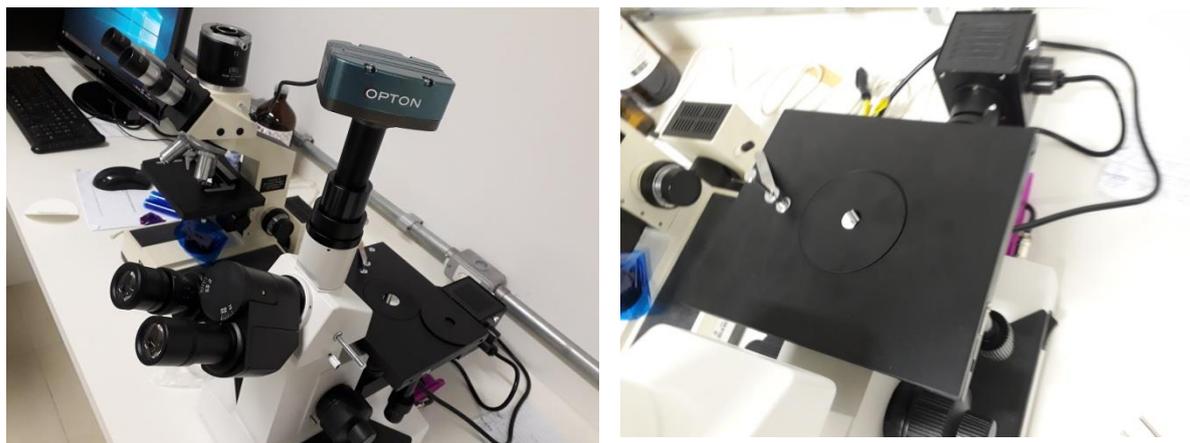


Figura B.25: Fotografia do microscópio óptico de reflectância trinocular marca OPTON modelo TMN-07T-PL.

Fonte: Próprio autor.

Foi observado que a superfície do eletrodo platina (Pt) encontrava-se na cor prateada com ressaltos naturais característicos do material conforme Figura B.26.

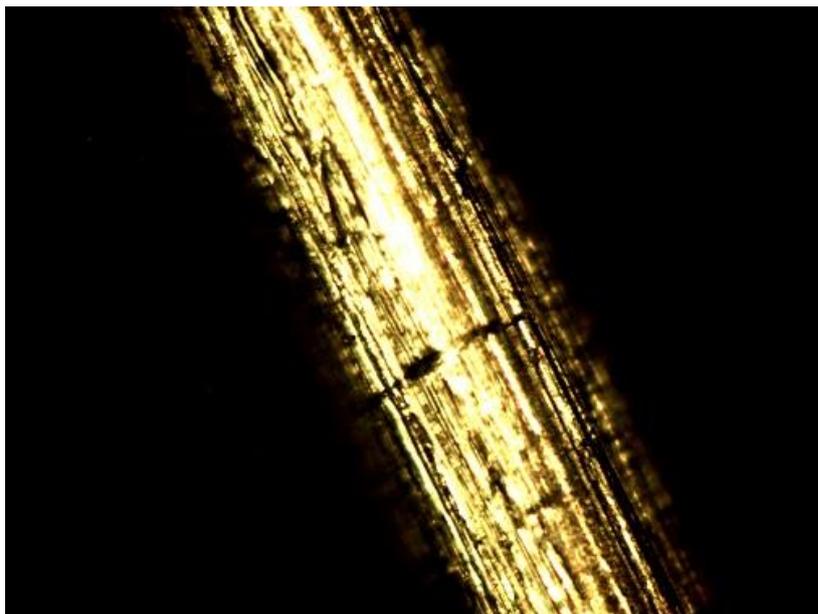


Figura B.26: Micrografia da superfície do eletrodo de platina utilizado para eletrodeposição da PANI/Magnetita com ampliação de 1000x.

Fonte: Próprio autor.

#### **B.2.4 Microscopia: Eletrodo eletrodeposido com a PANI**

A segunda verificação foi mostrar que a PANI incrustou em volta do eletrodo pelo processo de eletrodeposição. Pelo microscópio, observou-se uma fina camada esverdeada que encobriu o eletrodo de platina mostrada pela Figura B.27. A cor verde evidenciou que a PANI neste estado era condutora.

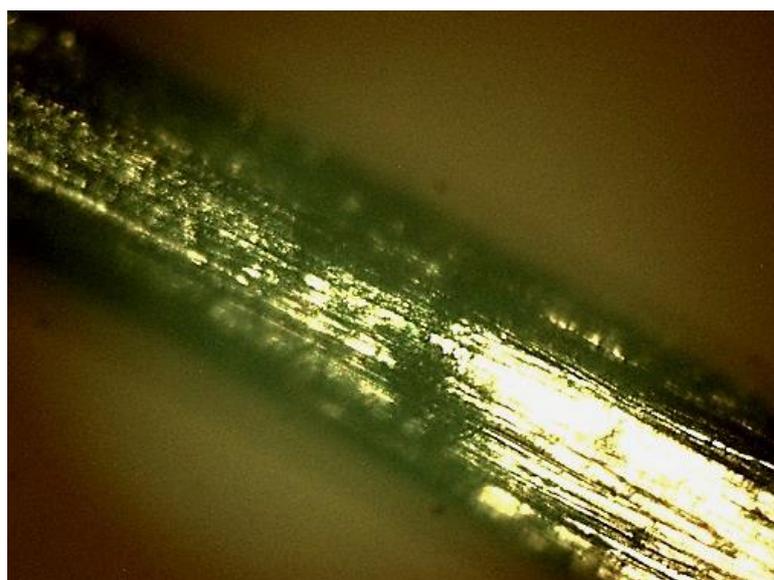


Figura B.27: Micrografia de reflectância da superfície do eletrodo de platina contendo polianilina em sua superfície com ampliação de 1000x.

Fonte: Próprio autor.

### B.2.5 Microscopia: Eletrodo eletrodepositado com PANI e Magnetita

Nesta última verificação, a formação destes composto ocorreu em duas etapas: na primeira etapa o eletrodo foi eletrodepositado com a PANI; na segunda etapa foi realizada a deposição da magnetita sobre a PANI incrustado no eletrodo. O eletrodo resultante foi observado pelo microscópio na Figura B.28, mostrando que houve a alteração na coloração para um tom mais escuro, aparecimento de pontos pretos indicando a inclusão da magnetita nos poros irregulares na superfície da PANI.

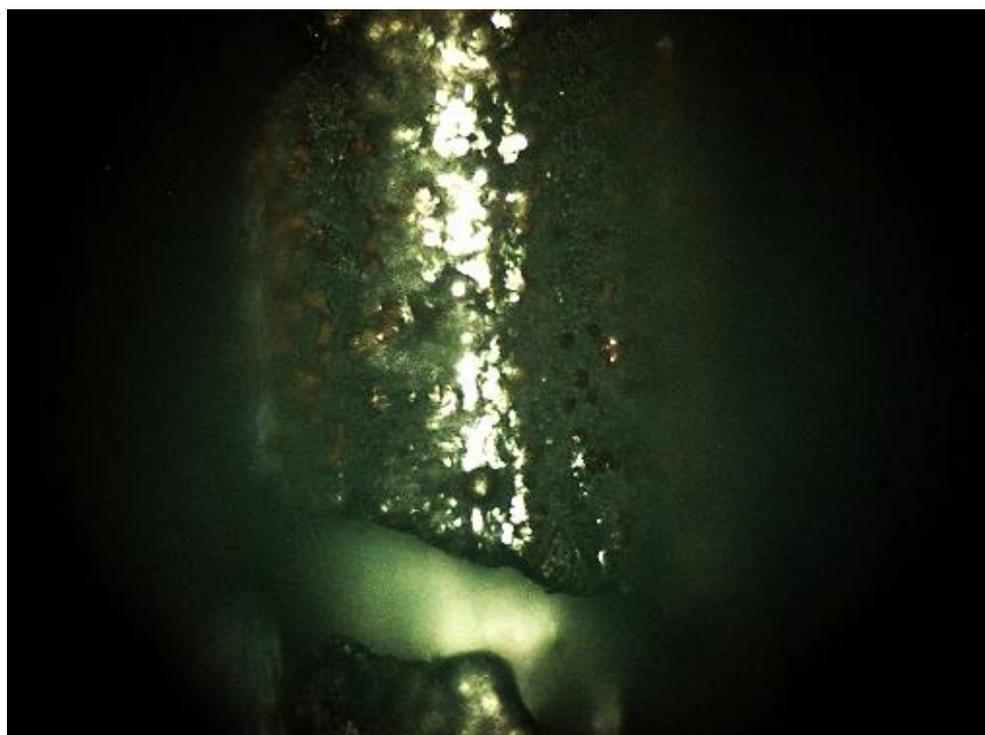


Figura B.28: Micrografia de reflectância da superfície do eletrodo eletrodepositado de polianilina/magnetita com ampliação de 1000x.

Fonte: Próprio autor.

Naturalmente, a platina por ser classificado como material paramagnético, visto que não é atraída pela força do ímã natural. Porém, o eletrodo de platina revestido com camada de PANI e magnetita torna-se ferromagnético na parte envolvida o que é comprovado com a aproximação de ímãs.

## ANEXOS

## ANEXO A – Artigo publicado no IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS

IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 56, NO. 6, JUNE 2020 4600307

## Electric Current Generation From Dendrimer-Based Magnetofluid Flow in a Toroidal Chamber

Fabio N. Kashiwagi<sup>1</sup>, Estácio T. W. Neto<sup>1</sup>, Maria E. L. Gonzalez<sup>1</sup>,  
Alfredo A. A. E. De Queiroz<sup>2</sup>, and Alvaro A. A. de Queiroz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>High Voltage Laboratory “Prof. Manuel Luís Barreira Martinez” (LAT-EFEI)/Institute of Electrical Systems and Energy (ISEE), Federal University of Itajubá (UNIFEI), Itajubá-Minas Gerais 37500-903, Brazil  
<sup>2</sup>São Carlos Institute of Physics, University of São Paulo (USP), São Carlos 13566-590, Brazil

Nowadays, the sustainable power generation is the global movement to reduce the environmental impact of fossil fuel. In this framework, new materials are vital in enabling technologies that can offer promising solutions for a sustainable energy future. Magnetofluid (MFs) holds great promise for innovation to power generation. MFs are homogenous combinations of a base fluid and nanoparticles with permanent magnetic dipoles. In this article, the MF composed by polyglycerol dendrimer (PGlyD) as a base fluid for superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) was used to generate a time-varying magnetic flux and induce an electromotive force in a coil. The MF has been prepared from *in situ* electrosynthesis of 10–19 nm diameter SPIONs inside the cavities of PGlyD and characterized using X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TG/DTA), and transmission electron microscopy (TEM). The magnetization of the PGlyD-SPIONs underflow in a toroidal channel creates a time-varying magnetic flux and induces an electromagnetic force in a coil around the torus generating an electric current. The flow of the magnetized PGlyD-SPIONs in the toroidal chamber was able to give an output current of 0.3 mA. This development of power generators based on PGlyD-SPIONs will be promising for portable electronics.

**Index Terms**—Electricity, ferrofluid, nanoparticles, polyglycerol dendrimer (PGlyD).

### I. INTRODUCTION

ONE of the greatest challenges for humanity in this century is to make the transition to a sustainable energy future. The growth of the global economy and the continued expansion of the human population in urban areas pose major challenges in the process of generating and consuming electricity. Thus, the urgent development of new technologies for sustainable energy production to meet the growing world demand for energy is the great challenge of the 21st century [1].

Currently, alternative clean source of energy based on magnetic fluids (MFs) appears to be a promising technology to generate energy, and many research groups have been devoted to the design of devices for producing electricity through electromagnetic induction [2]–[9]. The principle of the proposed devices is to convert the kinetic energy of moving MFs in a magnetic circuit into reciprocally electrical energy.

MFs are liquids that exhibit magnetism in the presence of magnetic fields. The magnetism of the MFs comes from the superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs) dispersed in a carrier liquid (CL) [10]. It is a well-known phenomenon that the nanometer-scale SPIONs exhibit magnetic monodomains, presenting a uniform magnetization state at any field finite-size since the surface effects dominate the magnetic behavior of individual nanoparticles [11].

Although not in a magnetic field the dispersed SPIONs assume random orientation. The random orientation leads the MFs to not exhibit any magnetic properties. However, when a magnetic field is introduced each of the SPIONs aligns with the magnetic field. Then, the magnetized MFs generate a time-varying magnetic flux linking the coils to induce an electric current [12].

MFs are a homogeneous combination of a CL-based petrochemical and SPIONs to form a highly stable dispersion [13], [14]. This highly stable dispersion is necessary because, in addition to the magnetization property characteristic of the solid magnetic materials, it is also desirable that MFs exhibit the fluidity characteristic of the liquids.

The specialized applications of MFs to power generation impose strict requirements on their characteristics, such as homogeneity in chemical composition, size distribution uniformity of SPIONs, crystal structure, the stability of magnetic properties, and especially low toxicity to humans and environment [15]. Many of these properties depend decisively on particle size, shape, composition, and structure, and therefore, rigorous control of the synthesis of MFs is necessary [16]–[19]. Development of environment-friendly MFs, minimizing the use of petrochemical CL, and obtaining stable dispersions constitute one of the important engineering problems.

Poly(glycerol) dendrimers (PGlyDs) are hydrophilic, biocompatible, monodisperse, cascade-branched macromolecules with a highly flexible surface chemistry that facilitates functionalization of SPIONs [20], [21]. Their well-defined and symmetric structure is crucial to their successful and reproducible use as CL for SPIONs protecting them from aggregation. The numerous functional groups and internal cavities within PGlyD [21] makes this material an interesting

Manuscript received December 31, 2019; revised February 14, 2020; accepted March 1, 2020. Date of publication March 9, 2020; date of current version May 15, 2020. Corresponding author: A. A. A. de Queiroz (e-mail: dealenquer@gmail.com).  
Color versions of one or more of the figures in this article are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.  
Digital Object Identifier 10.1109/TMAG.2020.2979673

0018-9464 © 2020 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.  
See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

Figura A1.1: Artigo aprovado no IEEE Transactions on Magnetics.

# IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS

A PUBLICATION OF THE IEEE MAGNETICS SOCIETY

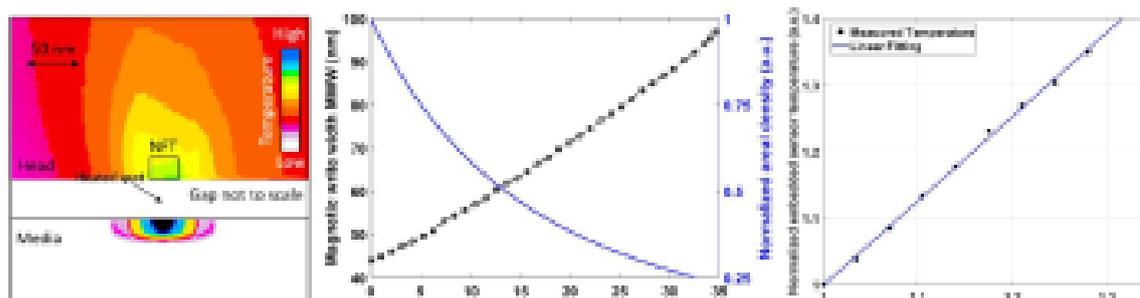
JUNE 2020

VOLUME 56

NUMBER 6

IEMGAQ

(ISSN 0018-9464)



(a) Illustration of temperature distribution on the head and disk due to HAMR heat source. (b) Percentage change in optical power of laser diode (left) and normalized areal density (right) as functions of magnetic write width MWW. (c) Normalized temperature of an embedded temperature sensor as a function of percentage change in optical power of laser diode. From the paper,

"Temperature-Induced Near-Field Transducer Failure in Heat-Assisted Magnetic Recording" by T. D. Trinh, S. Rajauria, R. Smith, E. Schrock, Q. Dai, and F. E. Talke, Art. no. 3300304.



Figura A1.2: Capa da revista IEEE Transactions on Magnetics.

## ANEXO B - EPE: Consumo Nacional de Energia Elétrica na Rede: 1995 - 2020

| EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE<br>DIRETORIA DE ECONOMIA DA ENERGIA E MEIO AMBIENTE – DEA<br>SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E ENERGÉTICOS –<br>SEE<br>CONSUMO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA NA REDE POR CLASSE: 1995 - 2013 |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| CONSUMO (GWh)   | 1995           | 1996           | 1997           | 1998           | 1999           | 2000           | 2001           | 2002           | 2003           |
| <b>BRASIL</b>   | <b>243.074</b> | <b>257.330</b> | <b>273.280</b> | <b>284.522</b> | <b>292.188</b> | <b>307.529</b> | <b>283.257</b> | <b>293.226</b> | <b>306.987</b> |
| RESIDENCIAL   | 63.576         | 68.581         | 74.089         | 79.340         | 81.291         | 83.613         | 73.622         | 72.718         | 76.162         |
| INDUSTRIAL  | 111.626        | 117.128        | 121.717        | 121.979        | 123.893        | 131.278        | 122.539        | 130.927        | 136.221        |
| COMERCIAL   | 32.276         | 34.388         | 38.198         | 41.544         | 43.588         | 47.626         | 44.434         | 45.222         | 47.531         |
| OUTROS  | 35.596         | 37.234         | 39.276         | 41.659         | 43.416         | 45.011         | 42.663         | 44.359         | 47.073         |
|   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| CRESCIMENTO (%)   | 1995           | 1996           | 1997           | 1998           | 1999           | 2000           | 2001           | 2002           | 2003           |
| <b>BRASIL</b>   | <b>7,8</b>     | <b>5,9</b>     | <b>6,2</b>     | <b>4,1</b>     | <b>2,7</b>     | <b>5,3</b>     | <b>-7,9</b>    | <b>3,5</b>     | <b>4,7</b>     |
| RESIDENCIAL   | 13,6           | 7,9            | 8,0            | 7,1            | 2,5            | 2,9            | -11,9          | -1,2           | 4,7            |
| INDUSTRIAL  | 4,0            | 4,9            | 3,9            | 0,2            | 1,6            | 6,0            | -6,7           | 6,8            | 4,0            |
| COMERCIAL   | 11,9           | 6,5            | 11,1           | 8,8            | 4,9            | 9,3            | -6,7           | 1,8            | 5,1            |
| OUTROS  | 6,7            | 4,6            | 5,5            | 6,1            | 4,2            | 3,7            | -5,2           | 4,0            | 6,1            |
|   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |

| <b>CONSUMO (GWh)</b>   | <b>2004</b>    | <b>2005</b>    | <b>2006</b>    | <b>2007</b>    | <b>2008</b>    | <b>2009</b>    | <b>2010</b>    | <b>2011</b>    | <b>2012</b>    |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>BRASIL</b>          | <b>329.707</b> | <b>344.284</b> | <b>356.129</b> | <b>377.030</b> | <b>388.472</b> | <b>384.306</b> | <b>415.683</b> | <b>433.034</b> | <b>448.126</b> |
| RESIDENCIAL            | 78.470         | 82.644         | 85.784         | 89.885         | 94.746         | 100.776        | 107.215        | 111.971        | 117.646        |
| INDUSTRIAL             | 154.163        | 158.610        | 163.180        | 174.369        | 175.834        | 161.799        | 179.478        | 183.576        | 183.425        |
| COMERCIAL              | 49.686         | 53.035         | 55.369         | 58.647         | 61.813         | 65.255         | 69.170         | 73.482         | 79.226         |
| OUTROS                 | 47.389         | 49.995         | 51.796         | 54.129         | 56.079         | 56.477         | 59.820         | 64.006         | 67.829         |
| <b>CRESCIMENTO (%)</b> | <b>2004</b>    | <b>2005</b>    | <b>2006</b>    | <b>2007</b>    | <b>2008</b>    | <b>2009</b>    | <b>2010</b>    | <b>2011</b>    | <b>2012</b>    |
| <b>BRASIL</b>          | <b>7,4</b>     | <b>4,4</b>     | <b>3,4</b>     | <b>5,9</b>     | <b>3,0</b>     | <b>-1,1</b>    | <b>8,2</b>     | <b>4,2</b>     | <b>3,5</b>     |
| RESIDENCIAL            | 3,0            | 5,3            | 3,8            | 4,8            | 5,4            | 6,4            | 6,4            | 4,4            | 5,1            |
| INDUSTRIAL             | 13,2           | 2,9            | 2,9            | 6,9            | 0,8            | -8,0           | 10,9           | 2,3            | -0,1           |
| COMERCIAL              | 4,5            | 6,7            | 4,4            | 5,9            | 5,4            | 5,6            | 6,0            | 6,2            | 7,8            |
| OUTROS                 | 0,7            | 5,5            | 3,6            | 4,5            | 3,6            | 0,7            | 5,9            | 7,0            | 6,0            |
| <b>CONSUMO (GWh)</b>   | <b>2013</b>    | <b>2014</b>    | <b>2015</b>    | <b>2016</b>    | <b>2017</b>    | <b>2018</b>    | <b>2019</b>    | <b>2020</b>    |                |
| <b>BRASIL</b>          | <b>463.143</b> | <b>474.823</b> | <b>465.708</b> | <b>461.780</b> | <b>467.161</b> | <b>474.820</b> | <b>482.226</b> | <b>475.648</b> |                |
| RESIDENCIAL            | 124.908        | 132.302        | 131.190        | 132.872        | 134.369        | 137.615        | 142.781        | 148.173        |                |
| INDUSTRIAL             | 184.685        | 179.106        | 169.298        | 165.314        | 167.398        | 169.625        | 167.684        | 166.335        |                |
| COMERCIAL              | 83.704         | 89.840         | 90.768         | 87.873         | 88.292         | 88.631         | 92.075         | 82.522         |                |
| OUTROS                 | 69.846         | 73.575         | 73.874         | 75.331         | 77.104         | 78.951         | 79.686         | 78.618         |                |
| <b>CRESCIMENTO (%)</b> | <b>2013</b>    | <b>2014</b>    | <b>2015</b>    | <b>2016</b>    | <b>2017</b>    | <b>2018</b>    | <b>2019</b>    | <b>2020</b>    |                |
| <b>BRASIL</b>          | <b>3,4</b>     | <b>2,5</b>     | <b>-2,1</b>    | <b>-0,9</b>    | <b>1,2</b>     | <b>1,6</b>     | <b>1,6</b>     | <b>-1,4</b>    |                |
| RESIDENCIAL            | 6,2            | 5,9            | -0,8           | 1,3            | 1,1            | 2,4            | 3,8            | 3,8            |                |
| INDUSTRIAL             | 0,7            | -3,0           | -5,7           | -2,5           | 1,3            | 1,3            | -1,1           | -0,8           |                |
| COMERCIAL              | 5,7            | 7,3            | 1,0            | -3,2           | 0,5            | 0,4            | 3,9            | -10,4          |                |
| OUTROS                 | 3,0            | 5,3            | 0,8            | 1,8            | 2,1            | 2,4            | 0,9            | -1,3           |                |

Obs: apuração até 2003 - Eletrobras; a partir de 2004 - EPE  
 Dados consolidados

Tabela A.2.1: Consumo Nacional de Energia Elétrica 1995 a 2020.