

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE
MATERIAIS**

LUCAS MACEDO DIAS

**OTIMIZAÇÃO DE SENsoRES MAGNÉTICOS DE JUNÇÕES
DE TÚNEL BASEADAS EM Al_2O_3 E MgO**

SÃO PAULO

2022

LUCAS MACEDO DIAS

**OTIMIZAÇÃO DE SENSORES MAGNÉTICOS DE JUNÇÕES
DE TÚNEL BASEADAS EM Al_2O_3 E MgO**

Trabalho de Formatura para obtenção do título de graduação em Engenharia de Materiais apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Susana Isabel Pinheiro Cardoso de Freitas
Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Jose Gomes Landgraf

SÃO PAULO

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Declaro aprovada a versão final do Trabalho de Formatura de Lucas Macedo Dias
Fernando Landgraf

Catalogação-na-publicação

Dias, Lucas

Otimização de sensores magnéticos de junções de túnel baseadas em
 Al_2O_3 e MgO / L. Dias -- São Paulo, 2022.
69 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Magnetismo 2.Junções de túnel 3.Sensibilidade magnética
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais e meu irmão por sempre estarem me apoiando e por me moldarem como pessoa.

Agradeço à minha supervisora e orientadora Susana Freitas por proporcionar a um aluno intercambista como eu uma oportunidade de ouro no INESC-MN, me orientando e buscando o melhor que eu possa oferecer.

Agradeço também ao meu co-orientador Fernando Landgraf por aceitar esse desafio comigo e me auxiliar durante o desenvolvimento desse trabalho.

Dentro do INESC-MN, gostaria de agradecer a todos os colegas e colaboradores que não desistiram de mim e me ajudaram tanto durante quase seis meses em plena pandemia do Covid-19, seja nos processos, na teoria, no convívio, etc.

São eles os engenheiros de processos Fernando Silva, José Bernardo, Virginia Soares, Maria Carvalho, Beatriz Ferreira e Guilherme Brites. Os pesquisadores sênior Virginia Chu e Paulo Freitas e os pesquisadores Rita Macedo, Vania Silverio e Mustafa Erkovan. Também agradeço aos estudantes de Doutorado e Mestrado Sara Sequeira, Daniela Pereira, Marília Silva, Mariana Caseiro, Francisco Matos, Pedro Araújo, João Pereira, Sofia Abrunhosa e à equipe administrativa formada pela Natércia Correia e a Sandra Baptista.

RESUMO

As junções magnéticas de efeito de túnel (MTJ) atualmente despertam um grande interesse devido às suas características únicas que permitem o uso em inúmeras aplicações nos mais diversos campos. Esse tipo de junção magnética pode ser utilizada em ensaios não destrutivos, na validação de documentos, como scanner magnético, em exames de ressonância magnética e em discos rígidos para armazenamento de dados. O presente artigo tem seu foco na exploração do efeito túnel de magnetoresistência (TMR) de MTJs baseados em Al_2O_3 e MgO para aplicação como sensores magnéticos. O principal objetivo do estudo realizado foi otimizar esses dispositivos para obter uma análise linear, livre ou com pouca histerese e alta sensibilidade como resposta magnética. Para isso, foram microprocessadas diversas amostras divididas em quatro ensaios, iniciando-se pela deposição da stack e ao fim realizando-se medições do TMR em função do campo magnético aplicado. Baseando-se nos modelos de Stoner-Wohlfarth e Simmons, foram feitas simulações e comparações com os dados experimentais para analisar o comportamento magnético dos sensores microfabricados. A otimização dos MTJs foi verificada tanto para Al_2O_3 como MgO. No primeiro grupo, observou-se curvas de transferência de alta sensibilidade magnética (aproximadamente 4,5%/Oe) e significativo TMR (30%) nas amostras de maior espessura na camada amortecedora e na barreira de túnel. No segundo grupo, as amostras cujo processamento foi otimizado nas etapas de deposição e gravura apresentaram resultados significativamente melhores. O TMR e a sensibilidade magnética triplicaram, indo de 45% a pouco mais de 130% e de 0,75%/Oe a quase 2,5%/Oe, respectivamente, com aumento também na linearidade. A espessura escolhida para o CoFeB e NiFe não foi definitiva para os valores desses parâmetros. O trabalho experimental foi feito no INESC-MN, centro de pesquisas associado ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Enquanto que a parte escrita foi desenvolvida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Palavras-chave: otimização; junções de efeito túnel; sensibilidade magnética.

ABSTRACT

Magnetic Tunnel Effect Junctions (MTJ) currently arouse great interest due to their unique characteristics that allow their use in numerous applications in the most diverse fields. This type of magnetic junction can be used in non-destructive testing, in document validation, as a magnetic scanner, in magnetic resonance imaging exams and in hard disks for data storage. The present article focuses on the exploration of the magnetoresistance tunnel effect (TMR) of MTJs based on Al_2O_3 and MgO for application as magnetic sensors. The main objective of the study performed was to optimize this device to obtain a linear analysis, free or with little hysteresis and high sensitivity as a magnetic response. For that matter, several samples were microprocessed and divided into four tests, starting with the deposition of the stack and at the end carrying out measurements of the TMR as a function of the applied magnetic field. Based on Stoner-Wohlfarth and Simmons models, simulations and comparisons were made with experimental data to analyze the magnetic behavior of microfabricated sensors. The optimization of MTJs was verified for both Al_2O_3 and MgO . In the first group, transfer curves of high magnetic sensitivity (approximately 4.5%/Oe) and significant TMR (30%) were observed in the thickest samples in the buffer layer and in the tunnel barrier. In the second group, samples whose processing was optimized in the deposition and etching stages showed significantly better results. The TMR and magnetic sensitivity tripled, going from 45% to just over 130% and from 0.75%/Oe to almost 2.5%/Oe, respectively, with an increase in linearity as well. The thickness chosen for CoFeB and NiFe was not definitive for the values of these parameters. The experimental work was carried out at INESC-MN, a research center associated with Instituto Superior Técnico of the University of Lisbon. While the written part was developed at Escola Politécnica of the University of São Paulo.

Key-words: optimization; tunnel effect junctions; magnetic sensitivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema dos momentos angulares	11
Figura 2 - Esquema da estrutura básica de um MTJ	12
Figura 3 - Configurações paralela e antiparalela no MTJ	12
Figura 4 - Densidades efetivas de estados (DOS) sob efeito TMR em configurações paralela (a) e antiparalela (b) no MTJ.....	14
Figura 5 - Esquemas de MTJ referente (a) às configurações em relação à camada fixa (b) à presença ou não de SAF	16
Figura 6 - Esquemas de tunelamento de elétrons através de (a) uma barreira amorfa de Al ₂ O ₃ e (b) uma barreira cristalina de MgO (001)	18
Figura 7 - Barreira de potencial para tensão nula no sistema metal/isolante/metal...	19
Figura 8 - Barreira de potencial para tensão intermediária no sistema metal/isolante/metal	20
Figura 9 - Esquema de configuração do MTJ com corrente aplicada perpendicular ao plano	22
Figura 10 - Esquema de configuração da estrutura do MTJ com camadas de referência e sensora de magnetização paralela uniaxial induzida ao eixo fácil.....	22
Figura 11 - Esquema do acoplamento Néel em um sistema FM/I/FM.....	23
Figura 12 - Curva de transferência típica de aplicação de armazenamento de memória	25
Figura 13 - Curva de transferência típica de aplicação como sensor magnético	25
Figura 14 - Sala limpa principal do INESC-MN.....	28
Figura 15 - Vestimenta apropriada para sala limpa classe 100 e 10	29
Figura 16 - (a) Corte 1x1 polegada ² (vidro) e (b) Corte em barras (silício)	30
Figura 17 - (a) Wafers de vidro limpos e (b) Solução de Alconox utilizada na limpeza dos vidros	30
Figura 18 - (a) Amostra pré deposição e (b) pós deposição.....	31
Figura 19 - Alvos de deposição da Nordiko 3000	32
Figura 20 - (a) Esquema das partes típicas de um VSM (b) VSM na vida real.....	32
Figura 21 - Exemplo de curva VSM para eixo fácil.....	33
Figura 22 - Esquema das etapas típicas de uma fotolitografia	34
Figura 23 - Fotomáscara utilizada para a fotolitografia.....	35
Figura 24 - (a) Sistema de rastreamento SVG (b) Laser DWL de luz UV	36
Figura 25 - (a) Amostra pós 1 ^a fotolitografia (b) Estrutura formada pós 1 ^a fotolitografia sob aumento 10x.....	36
Figura 26 - (a) Máquina Nordiko 3600 (b) Amostras pós primeira gravura.....	37
Figura 27 - Profilômetro DekTak 3030 utilizado.....	38
Figura 28 - (a) Amostra sob banho ultrassônico a 65°C (b) Microstrip® 3001	39

Figura 29 - Esquema das etapas seguintes à fotolitografia	39
Figura 30 - Pilares formados pós 2 ^a fotolitografia sob aumento 10x.....	39
Figura 31 - (a) Equipamentos de controle de frequência e pressão da UHV2 (b) Câmara de vácuo de deposição	40
Figura 32 - Pedaços de silício revestidos por camada isolante de Al ₂ O ₃ de diferentes espessuras	41
Figura 33 - (a) Lift-off com remoção incompleta sob aumento 10x (b) Lift-off desejado com remoção completa sob aumento 10x.....	41
Figura 34 - Estrutura formada pós 3 ^a fotolitografia sob aumento 10x	42
Figura 35 - (a) Amostra pós metalização (b) Máquina Nordiko 7000.....	43
Figura 36 - Esquema das etapas de metalização e lift-off	43
Figura 37 - Estruturas pós lift-off da camada metálica sob aumento 10x	44
Figura 38 - Esquema das etapas de microfabricação de um MTJ.....	44
Figura 39 - MTJ após processamento em sala limpa	45
Figura 40 - Setup de recozimento utilizado após processamento completo	46
Figura 41 - Setup de recozimento utilizado pré VSM	46
Figura 42 - (a) Setup 140 Oe (b) Medição com 2 pontas do sensor	47
Figura 43 - (a) Cálculo da sensibilidade para curva linear (b) curva de histerese	51
Figura 44 - (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o primeiro ensaio	51
Figura 45 - (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o segundo ensaio	52
Figura 46 - (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o terceiro ensaio	52
Figura 47 - (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o quarto ensaio	53
Figura 48 - Cálculo dos parâmetros magnéticos pelas curvas de VSM.....	54
Figura 49 - Gráfico cos (Θ) x H com variação da largura	55
Figura 50 - Gráfico cos (Θ) x H com variação da espessura.....	56
Figura 51 - Curva I-V exponencial do sensor 1 x 10.....	57
Figura 52 - Curva I-V exponencial do sensor 2 x 2.....	57
Figura 53 - Curva I-V exponencial do sensor 5 x 5.....	57
Figura 54 - Curva J-V para os sensores da amostra TJ3884	58
Figura 55 - Curvas de VSM das amostras TJ2340 e TJ2341	60
Figura 56 - Curvas de VSM das amostras N88TJ500 e TJ3884.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades de Al ₂ O ₃ e MgO	17
Tabela 2 - Classificação ISO de salas limpas pela concentração de partículas	29
Tabela 3 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão	51
Tabela 4 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão	52
Tabela 5 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão	53
Tabela 6 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão	53
Tabela 7 - Parâmetros das amostras do quarto ensaio	54
Tabela 8 - Parâmetros t_{eff} e Φ_{eff} estimados para cada curva	58
Tabela 9 - Sensibilidades magnéticas por área do sensor da amostra TJ3884.....	62
Tabela 10 - Sensibilidades magnéticas das amostras TJ3886, TJ3887 e TJ3888	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 SPINTRÔNICA	10
1.2 EFEITO DE MAGNETORRESISTÊNCIA DE TUNELAMENTO (TMR)	11
1.3 MATERIAIS E CAMADAS DO MTJ.....	14
1.4 BARREIRA DE TÚNEL DE MgO E Al ₂ O ₃	16
1.5 MODELO DE SIMMONS	19
1.6 MODELO DE STONER-WOHLFARTH.....	21
1.7 HISTÓRICO RECENTE - TMR	26
2. TRABALHO EXPERIMENTAL.....	27
2.1 INTRODUÇÃO.....	27
2.2 METODOLOGIA	29
3. RESULTADOS.....	47
3.1 DESCRIÇÃO DAS STACKS DAS AMOSTRAS DE MTJ	47
3.2 CURVAS DE TRANSFERÊNCIA, R X A E SENSIBILIDADE MAGNÉTICA	50
3.3 SIMULAÇÃO DO MODELO DE STONER-WOHLFARTH	54
3.4 SIMULAÇÃO DO MODELO DE SIMMONS	56
4. DISCUSSÃO	58
4.1 CURVAS DE TRANSFERÊNCIA, R X A E SENSIBILIDADE MAGNÉTICA	58
4.2 SIMULAÇÃO DO MODELO DE STONER-WOHLFARTH	62
4.3 SIMULAÇÃO DO MODELO DE SIMMONS	63
5. CONCLUSÃO.....	63
6. REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

1.1. SPINTRÔNICA

Uma das áreas mais importantes da chamada física da matéria condensada (National Research Council, 1999) hoje é a spintrônica, um termo que une a eletrônica com o transporte de spin. O termo “spin” está relacionado às possibilidades de orientações que partículas subatômicas com carga, como por exemplo o próton e o elétron, podem apresentar quando estão imersas em um campo magnético.

O estudo do fenômeno de tunelamento e da junção de túnel magnética (MTJ) por Julliere (JULLIERE, 1975) em 1975 pode ser considerado um precursor nesse tema. Porém o surgimento da spintrônica como ramo da ciência só se deu na década de 1980. A respeito, podemos destacar a injeção de elétrons polarizados por spin por Johnson e Silsbee (JOHNSON e SILSBEY, 1985) e a descoberta da magnetoresistência gigante por Albert Fert (BAIBICH, 1988) e Peter Grunberg (BINASCH *et al*, 1989).

A spintrônica é um dos temas mais estudados atualmente em dispositivos micro e nanoeletrônicos. O principal objetivo envolvido nesse estudo gira em torno da própria otimização desses dispositivos seja pela redução de consumo energético, melhora da sensibilidade elétrica e/ou magnética, aumento de capacidade de memória ou de processamento. (HIROHATA *et al*, 2020)

Os dispositivos spintrônicos oferecem uma maior diversidade de funcionalidades, quanto comparado aos eletrônicos, visto que transportam a informação tanto no spin quanto na carga do elétron. O elétron, imerso em um campo magnético, tem um momento angular intrínseco, o próprio spin. Este por sua vez acarreta em um momento magnético associado, que é função da carga e massa do elétron e da constante de Planck ($6,62607015 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$). Além disso, há o momento angular orbital advindo do movimento desse elétron ao redor do núcleo atômico e esse é dependente da quantidade de movimento do elétron e da sua distância relativa ao núcleo. Este por sua vez também gera um momento magnético associado (VALENÇA, 2016). Pode-se ver na figura abaixo a diferenciação entre esse momentos.

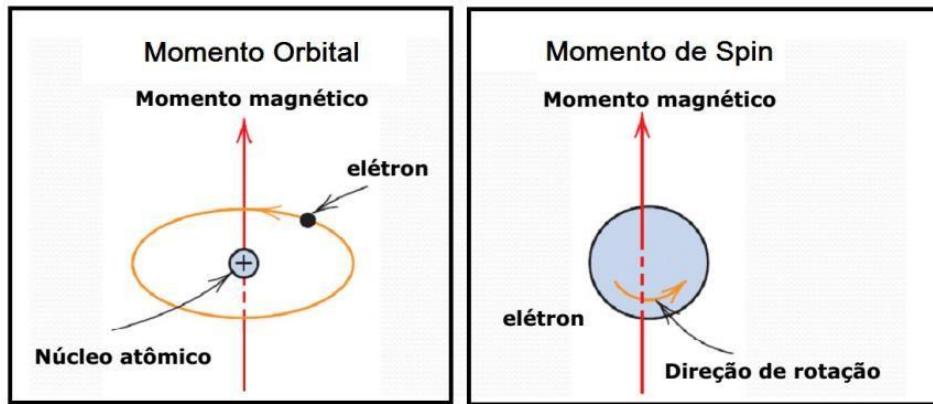


Figura 1 - Esquema dos momentos angulares (VALENÇA, 2016)

No caso dos elétrons, a interação dos momentos angulares supracitados origina as propriedades magnéticas da matéria. Os dispositivos spintrônicos utilizam o grau de liberdade de spin dos elétrons, a relação spin-orbital e a interação desses com seus momentos magnéticos associados.

A spintrônica engloba diversos fenômenos e aplicações como o efeito de magnetorresistência de tunelamento (TMR) (JULLIERE, 1975), o efeito gigante de magnetorresistência (GMR) (BARTHÉLÉMY *et al*, 1995), o efeito de torque de transferência de rotação (STT) (BARADUC *et al*, 2010), o efeito de torque de órbita giratória (SOT) (SONG *et al*, 2021), aplicações em sensores magnetorresistivos e em armazenamento de dados. Dessa forma, ela cada vez mais é alvo de estudos tanto para aplicações industriais em grande escala quanto para estudos de fundamentos de física e física da matéria condensada (LV, 2019).

1.2. EFEITO DE MAGNETORRESISTÊNCIA DE TUNELAMENTO (TMR)

Uma junção de túnel magnética (MTJ) é uma junção de pelo menos três camadas de materiais sendo duas delas compostas por materiais ferromagnéticos (FM) separados por um filme ultra-fino isolante, dado em nanômetros ou Ångström (nm ou Å). Uma dessas camadas FM é chamada de camada livre ou sensora e tem sua direção de magnetização dada como resposta a um campo magnético externo. Enquanto isso, a outra camada FM é magneticamente orientada em uma direção fixa e assim chamada de camada fixa ou referencial. A camada isolante fina entre os metais ferromagnéticos é denominada barreira de túnel (baseada em Al₂O₃ ou MgO) e é a base para que ocorra o efeito de magnetorresistência de tunelamento (TMR)

(ZHAO *et al*, 2009). Um esquema básico de um MTJ pode ser visto abaixo.

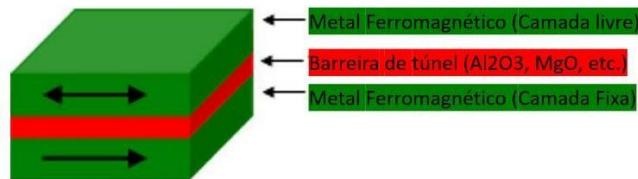


Figura 2 - Esquema da estrutura básica de um MTJ (ZHAO *et al*, 2009, adaptada)

O efeito magnetoresistivo de tunelamento (TMR) é um dos fenômenos mais importantes na área de spintrônica. Este pode ocorrer em um MTJ cuja camada isolante é muito fina na ordem de nanômetros. Nele há o cruzamento dos elétrons da corrente elétrica de um material ferromagnético para o outro por meio da camada isolante (JULLIERE, 1975).

O efeito magnetoresistivo de tunelamento, TMR, é calculado pela mudança de resistência relativa dos estados de configuração paralela para antiparalela, como mostra a equação abaixo:

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_p}{R_p} \quad (1)$$

em que R_{AP} e R_p são, respectivamente, a resistência elétrica quando a magnetização relativa das camadas livre e fixa é antiparalela e paralela.

A figura abaixo mostra melhor as configurações paralela e antiparalela conforme o estado de orientação relativa magnética das camadas FM.

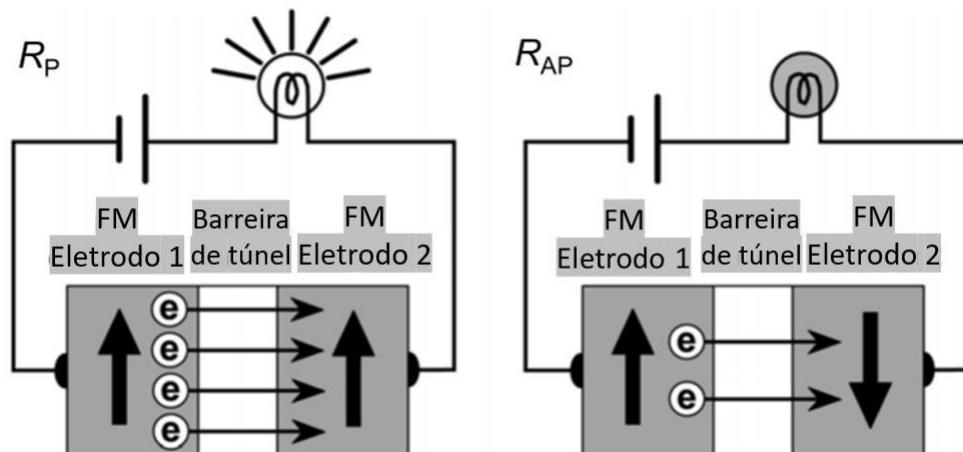


Figura 3 - Configurações paralela e antiparalela no MTJ (YUASA e DJAYAPRAWIRA, 2007)

No estado paralelo, pode-se notar que a resistência apresentada é significativamente mais baixa (resistência mínima) que no estado antiparalelo, no qual esta é máxima.

O efeito TMR foi originalmente descoberto por Michel Julliere na Universidade de Rennes, França. Por meio de uma junção de túnel Fe/Ge/Co do tipo FM/I/FM (ferromagnético/isolante/ferromagnético) sob baixa temperatura de 4,2 K os valores máximos de TMR obtidos foram próximos a 14% (JULLIERE, 1975).

Julliere propôs um modelo simples para explicar essa mudança de resistência elétrica observada nesse tipo de junção FM/I/FM e responsável pelo efeito em si, baseando-se nos dados experimentais obtidos por ele. O mesmo foi baseado em uma série de suposições descritas a seguir (LV, 2019).

Primeiramente, há a conservação do spin dos elétrons durante todo o tunelamento e os tunelamentos de elétrons spin-up (majoritários) e os elétrons spin-down (minoritários) são independentes, dessa forma, a condutância ocorre em dois canais de spin independentes. Para magnetização relativa paralela, os spins minoritários se encaminham para os estados minoritários e os spins majoritários para os estados majoritários. No entanto, no caso da configuração de magnetização relativa antiparalela, a identidade dos spins é invertida, então o contrário é observado, como é demonstrado na figura 4 abaixo.

Em segundo lugar, Julliere considerou que o tunelamento do elétron deveria ser proporcional ao produto da densidade efetiva de estado (DOS) dos dois eletrodos ferromagnéticos.

Dessa maneira, temos que a condutância nos casos de configuração paralela, G_p , e antiparalela, Gap , pode ser descrita como:

$$G_p \propto D1 \uparrow D2 \uparrow + D1 \downarrow D2 \downarrow \quad (2)$$

$$Gap \propto D1 \uparrow D2 \downarrow + D1 \downarrow D2 \uparrow \quad (3)$$

em que $D_i \uparrow$ e $D_i \downarrow$ representam a densidade efetiva de estado (DOS) dos eletrodos ferromagnéticos (com índice $i = 1, 2$) para os elétrons majoritários e minoritários, respectivamente.

A figura 4 abaixo busca explicar melhor esse fenômeno. EF é a energia de Fermi, que é a energia do nível ocupado mais energético em um sistema quântico à

temperatura de zero absoluto. Pode-se notar por (2) e (3) que a condutância observada será diferente nos dois casos.

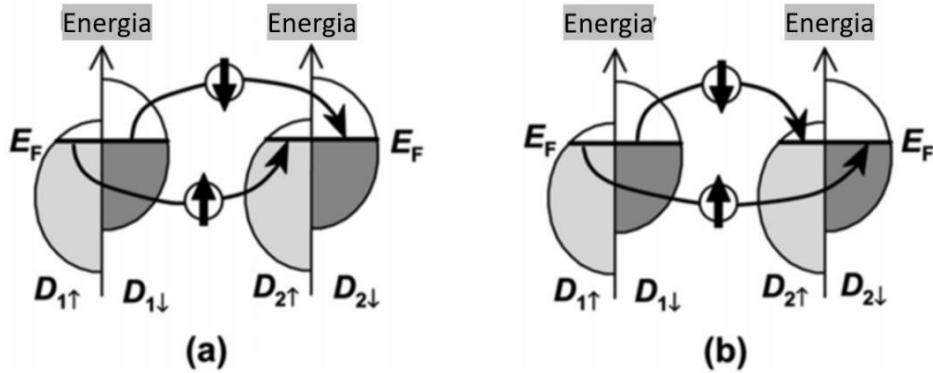


Figura 4 - Densidades efetivas de estados (DOS) sob efeito TMR em configurações paralela (a) e antiparalela (b) no MTJ (YUASA e DJAYAPRAWIRA, 2007)

Além disso, o efeito TMR pode ser calculado como função da condutância. Mais precisamente, pela diferença entre a condutância no estado paralelo e antiparalelo sobre a mesma na configuração antiparalela, como abaixo:

$$TMR = \frac{G_p - G_{ap}}{G_{ap}} \quad (4)$$

Uma corrente elétrica comum tem polarização nula com metade de elétrons spin-up e outra spin-down. Porém, nesse caso, considera-se o desequilíbrio no DOS de materiais FM na EF como polarização efetiva de spin que pode ser descrita por:

$$P_i = \frac{D_{it} - D_{i\downarrow}}{D_{it} + D_{i\downarrow}} \quad (5)$$

Assim, podemos reescrever TMR como uma função de P conforme (5):

$$TMR = \frac{2P_1P_2}{1-P_1P_2} \quad (6)$$

1.3. MATERIAIS E CAMADAS DO MTJ

Como já visto no item anterior, a estrutura básica do MTJ é composta de duas camadas ferromagnéticas separadas por filme ultrafino e isolante, normalmente Al_2O_3

ou MgO. A denominada camada fixa possui uma magnetização fixa que pode ser resultado de dois fenômenos.

O primeiro deles diz respeito a uma interação de polarização de troca com uma camada antiferromagnética (AFM) adjacente, geralmente MnPt ou MnIr (UMETSU *et al*, 2004). Nesse fenômeno o comportamento de magnetização da AFM provoca um deslocamento na curva de magnetização por campo aplicado no eixo fácil (a direção energeticamente favorável na qual, sob baixíssimo valor de campo magnético aplicado, a magnetização de saturação, o valor de magnetização no qual todos os momentos magnéticos do material estão alinhados ao campo externo, é atingida de forma espontânea) da camada FM. Dessa forma, os loops de histerese de tais estruturas FM|AFM são deslocados (polarizados) e centralizados em um campo magnético diferente de zero e um platô estável da magnetização é definido. Somente pela aplicação de um valor de campo externo suficiente para compensar o efeito desse campo de troca, que será possibilitada a rotação da camada fixa (STAMPS, 2000).

O segundo refere-se a inserção de uma sub-estrutura SAF (estrutura antiferromagnética sintética) no MTJ. Essa sub-estrutura é composta por dois FM (a camada de referência e a camada fixa) separados por um espaçador não magnético fino e de espessura própria para maximizar o acoplamento antiferromagnético entre essas duas camadas, denominado de interação RKKY. O comportamento antiferromagnético observado nesse caso é similar ao anterior, mas observa-se um acoplamento indireto de momentos magnéticos das camadas FM pela travessia indireta dos elétrons pelo espaçador fino (FÄHNLE, 1979).

Quando a camada fixa é encontrada no topo do MTJ, esse é denominado como MTJ fixado no topo. Quando esta localiza-se embaixo, classificamos a estrutura como MTJ fixado na base. Essas duas configurações podem ser vistas na figura 5 mais abaixo.

A camada livre, apesar de em termos de composição ser geralmente a mesma liga ou muito parecida à da camada fixa, por sua vez, tem sua magnetização definida pelo campo magnético externo e é a camada que fornecerá a resposta do sensor. A mudança de resistência que origina o efeito TMR é devido à rotação da magnetização dessa camada. Desse modo, fica nítido que as propriedades dos materiais da camada livre são essenciais para que possamos obter um MTJ linear e com alta sensibilidade magnética, ou seja, a razão da resistência elétrica relativa por campo magnético (dada em %TMR/Oe), os objetivos principais de um bom sensor magnético.

Propriedades como baixos valores de magnetização de saturação (M_s) e coercitividade (H_c), ou seja, o valor de campo necessário para reduzir do ponto de saturação a magnetização para zero (IGARASHI *et al*, 2017) são indicados no caso em que o foco é a detecção magnética como o do trabalho em questão. Além disso, a camada livre precisa ter alta polarização de spin, que como visto no item anterior, reflete em um alto efeito TMR. Um material já há décadas utilizado com ótimas propriedades nesse sentido na camada livre é o CoFeB ou a combinação bicamada CoFeB/NiFe com o CoFeB atuando na interface com a barreira de túnel nos dois casos (KUBOTA *et al*, 2007).

Na estrutura do MTJ também é encontrada uma camada amortecedora na parte inferior e uma camada de cobertura na parte superior, compostas por metais não magnéticos, principalmente rutênio (Ru) e tântalo (Ta), de boa condutividade elétrica e que fornecem integridade física (resistência mecânica) e química (anticorrosão), protegendo a estrutura como um todo.

Abaixo segue um esquema completo de um MTJ com suas possíveis configurações em relação à camada fixa (MTJ fixado no topo ou na base) e com os dois tipos de interações que resultam na magnetização da camada fixa (MTJ simples ou com SAF).

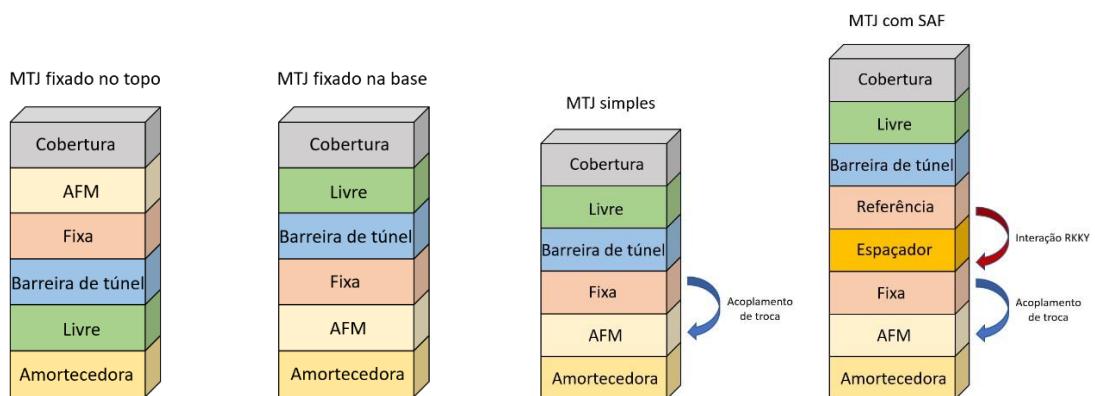


Figura 5 - Esquemas de MTJ referente (a) às configurações em relação à camada fixa (b) à presença ou não de SAF (Elaborado pelo autor)

1.4. BARREIRA DE TÚNEL DE MgO E Al₂O₃

O processo de tunelamento é fortemente afetado pela barreira e pelas propriedades do material utilizado para a mesma. O Al₂O₃ e o MgO são os materiais

mais usuais para a barreira de túnel. Inicialmente, a efeito de comparação, é interessante definir algumas propriedades e características de cada um deles.

O óxido de magnésio é comumente encontrado na forma de pó branco, leve e pouco solúvel em água. As nanopartículas de óxido de magnésio se caracterizam por serem inodoras, cristalinas e não tóxicas. Elas possuem alta dureza, alta pureza e um alto ponto de fusão e podem ser aplicadas em eletrônica, catálise, cerâmica, produtos petroquímicos, revestimentos e muitos outros campos (AzoNano, 2022).

A alumina é o óxido cerâmico (amorfo) mais conhecido encontrado em variedades grosseiras e de grãos finos. Dentre suas propriedades, destaca-se um excelente isolamento elétrico, boa resistência mecânica, alta resistência à compressão e à corrosão e alta dureza (CeramTec, 2022).

Suas aplicações em cerâmicas avançadas são diversas, como em ferramentas pesadas de conformação, substratos e núcleos de resistores na indústria eletrônica, tubos de proteção em processos térmicos e portadores de catalisadores para a indústria química (Institut Für Seltene, 2022).

Mas o fator mais importante para que eles possam ser frequentemente utilizados no MTJ como materiais da barreira ultrafina de túnel é que ambos agem como excelentes isolantes elétricos. O MgO é um ótimo material de isolamento elétrico devido a uma alta resistência à oxidação e à radiação ionizante, e é estável, em termos físicos e químicos, em altas temperaturas. O Al₂O₃ destaca-se principalmente por sua rigidez dielétrica muito alta (35 kV/mm) (Institut Für Seltene, 2022). Uma tabela com as principais propriedades dos dois materiais pode ser vista abaixo.

Propriedade	Al ₂ O ₃	MgO
Densidade (g/cm ³)	3,9	5,5
Temperatura de fusão (°C)	2015	980
Dureza HV (kgf/mm ²)	1500	1100
Condutividade térmica (W/mK)	40	2
Resistência à flexão (MPa)	380	620
Módulo de Young (GPa)	370	200

Tabela 1 – Principais propriedades de Al₂O₃ e MgO (KUMAR et al, 2012; SAJJAN, 2015, adaptada)

O principal diferencial entre os materiais é que Al₂O₃ é amorfo e MgO possui uma estrutura cristalina. Essencialmente, o que muda entre eles é o tipo do

tunelamento observado.

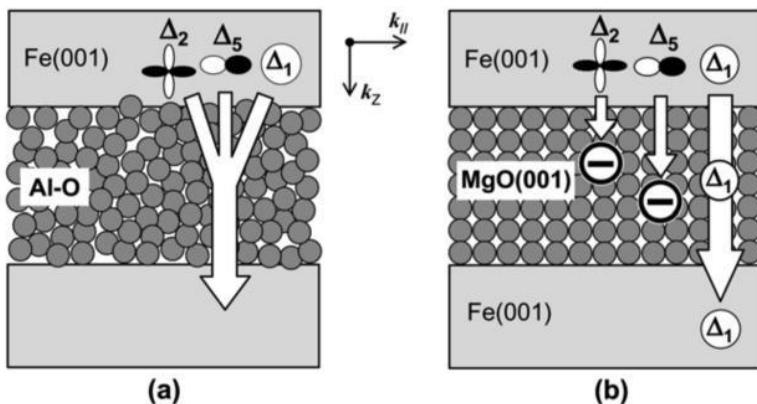


Figura 6 - Esquemas de tunelamento de elétrons através de (a) uma barreira amorfa de Al_2O_3 e (b) uma barreira cristalina de MgO (001) (YUASA e DJAYAPRAWIRA, 2007)

No esquema da figura acima pode-se observar à esquerda o tunelamento em um MTJ com uma barreira amorfa de Al-O (no caso Al_2O_3) e à direita em uma barreira cristalina de MgO (001), nas quais a camada do eletrodo superior é Fe (001) como um exemplo de um material ferromagnético de configuração eletrônica 3d.

Existem vários estados de Bloch (ou estados de túnel) com diferentes simetrias de funções de onda no eletrodo. Em metais e ligas ferromagnéticas 3d, os estados de Bloch com simetria 1 (estados hibridizados spd) geralmente têm uma grande polarização de spin positiva na energia de Fermi (EF), enquanto aqueles com simetria 2 (estados d) e 5 muitas vezes têm uma polarização de spin negativa na EF. O modelo de Julliere assumia que as probabilidades de tunelamento eram iguais para todos os estados de Bloch (JULLIERE, 1975).

Mas na verdade os estados de Bloch de simetria 1 de polarização positiva possuem maiores probabilidades de tunelamento do que os outros estados de Bloch presentes no eletrodo de Fe. Como os estados 2 e 5 decaem muito mais rápido em termos de densidade efetiva de estados orbitais (DOS) do que o 1, portanto, o processo de tunelamento é dominado pelo 1.

O estado de simetria 2, também comum, contribui negativamente sobre a polarização da corrente de tunelamento. Mas no geral, como a probabilidade no caso de simetria 1 é maior, a polarização efetiva líquida da corrente é positiva (YUASA e DJAYAPRAWIRA, 2007).

No primeiro caso (Al_2O_3) como a barreira de túnel é amorfa, não há simetria e organização cristalográfica. Por causa dessa estrutura não simétrica, mesmo ainda

com uma preferência de tunelamento dos estados de Bloch de simetria 1, as diferentes simetrias presentes nos eletrodos se acoplam com estados desemparelhados e desorganizados na barreira de alumina de maneira aleatória. Dessa forma, esse tipo de tunelamento é classificado como incoerente.

No caso em que a barreira de túnel é de MgO cristalizado, orientado em (001), assim como os eletrodos, o que ocorre é o chamado tunelamento coerente. Nessa situação, há uma possibilidade muito grande dos estados de simetria 1 e altamente polarizados se acoplarem coerentemente com os estados desemparelhados da barreira, também de simetria 1. Dessa forma, uma polarização de spin positiva muito alta de corrente de tunelamento é esperada, o que leva-se a esperar também uma relação TMR expressiva e muito maior que a observada para o caso anterior.

1.5. MODELO DE SIMMONS

Atualmente o modelo mais adotado para o fluxo de corrente entre eletrodos de metal separados por um filme isolante fino são as expressões desenvolvidas por John G. Simmons em 1963 (SIMMONS, 1963). Do ponto de vista energético, a película isolante forma uma barreira para o fluxo de corrente φ_1 e φ_2 em cada interface, como mostra o esquema da figura a seguir, com L a espessura da camada isolante.

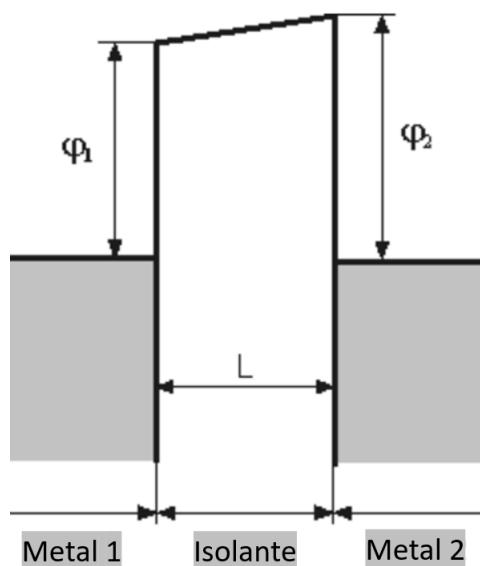


Figura 7 - Barreira de potencial para tensão nula no sistema metal/isolante/metal (SIMMONS, 1963, adaptada)

Para o caso em que uma tensão de polarização intermediária V é aplicada na

qual $eV \leq \varphi_1$ e $eV \leq \varphi_2$, temos do modelo de Simmons a seguinte relação:

$$J = \frac{J_0}{t^2} \left[\left(\phi_{eff} - e \frac{V}{2} \right) \exp \left(-At \sqrt{\phi_{eff} - e \frac{V}{2}} \right) - \left(\phi_{eff} + e \frac{V}{2} \right) \exp \left(-At \sqrt{\phi_{eff} + e \frac{V}{2}} \right) \right] \quad (7)$$

em que J é a densidade de corrente, V a voltagem aplicada da polarização, t a espessura da barreira de túnel, ϕ_{eff} a altura média efetiva da barreira de potencial, $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ e h a constante de Planck = $6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$. Os termos J_0 e A são constantes e são dados, respectivamente, por:

$$J_0 = \frac{e}{2\pi h} \quad (8)$$

$$A = \frac{4\pi\sqrt{2m_e}}{h} \quad (9)$$

Agora para o caso com a tensão V intermediária aplicada, temos a figura abaixo na qual se observa uma maior barreira entre os fluxos φ_1 e φ_2 .

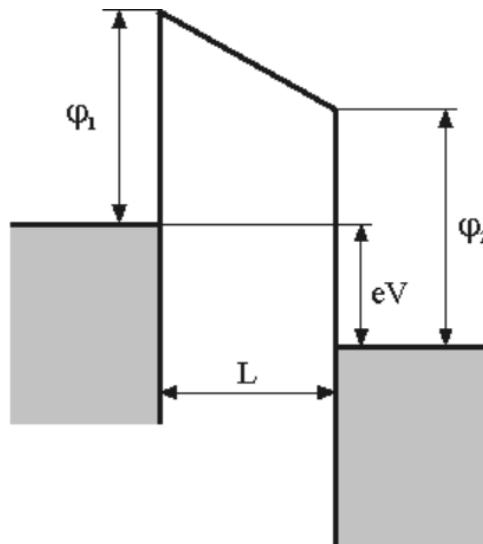


Figura 8 - Barreira de potencial para tensão intermediária no sistema metal/isolante/metal (SIMMONS, 1963, adaptada)

É interessante destacar que para o caso em que a tensão aplicada é baixa a ponto de que $eV \ll \varphi_1$ e $eV \ll \varphi_2$, a barreira de potencial é mínima e temos sensores com resposta aproximadamente ôhmica. Em relação à espessura da barreira de túnel,

para quando V é expressiva, R depende exponencialmente de t (SIMMONS, 1963).

1.6. MODELO DE STONER-WOHLFARTH

Para explicar melhor o funcionamento de sensores magnetorresistivos, o modelo macrospin de Stoner-Wohlfarth se mostra o mais adequado (TANNOUS e GIERALTOWSKI, 2008). Esse modelo descreve o comportamento da magnetização de um ferromagnético esferoide prolato (que tem o diâmetro equatorial menor do que a distância entre os polos) e de domínio magnético único, ou seja, todas as moléculas do material têm os seus momentos magnéticos alinhados em uma única direção (MATHEWS *et al*, 2020).

Porém, se mostra bem aproximado também para definição das condições necessárias para linearização de sensores MR de tamanho micro, quando algumas premissas são consideradas. Dessa maneira, ele pode ser aplicado também para o caso dos MTJs fabricados e utilizados no trabalho em questão, sendo um modelo relativamente simples para explicar a histerese observada nas curvas magnéticas de efeito TMR desses dispositivos.

Considera-se que as camadas do MTJ comportam-se como um único domínio magnético e os efeitos na borda do sensor são desprezíveis (ZHANG, 2018). Dessa forma, sob essas condições, o vetor magnetização (\vec{M}) é considerado um vetor coletivo único com magnetização de saturação (M_s) constante e seu divergente é 0, o que implica em interações de troca nulas, ou seja, não há sobreposição de funções de onda de elétrons desemparelhados (KATAYAMA *et al*, 2006). Além disso, o campo externo aplicado (\vec{H}_{ext}) deve ser suficientemente baixo para que a camada de referência tenha magnetização fixa.

Antes de explicar o modelo em si, é necessário explicitar alguns conceitos. Na física da matéria condensada, a anisotropia magnética descreve como as propriedades magnéticas de um objeto acabam sendo diferentes dependendo da direção. Os materiais ferromagnéticos anisotrópicos possuem o chamado eixo fácil e uma partícula magnética com anisotropia uniaxial tem apenas um eixo fácil, o caso do MTJ sob o modelo de Stoner-Wohlfarth (OH *et al*, 2008).

Os dois esquemas abaixo ajudam a entender melhor o modelo adotado.

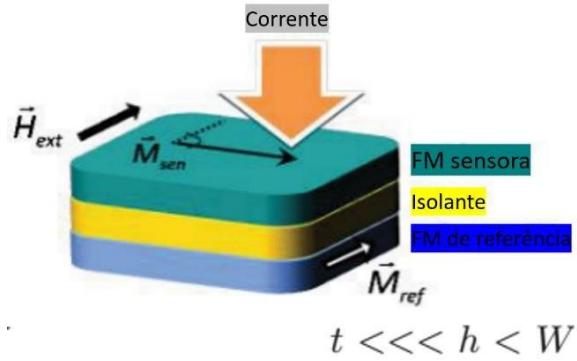


Figura 9 - Esquema de configuração do MTJ com corrente aplicada perpendicular ao plano (CARDOSO *et al*, 2015, adaptada)

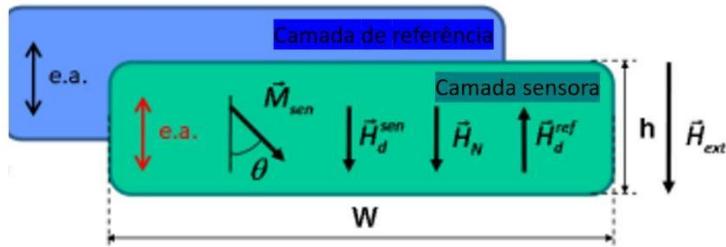


Figura 10 - Esquema de configuração da estrutura do MTJ com camadas de referência e sensora de magnetização paralela uniaxial induzida ao eixo fácil (CARDOSO *et al*, 2015, adaptada)

Neles, t é a espessura, h é a largura e W é o comprimento do sensor. Em um MTJ, a espessura da camada sensora é显著mente menor do que sua largura e seu comprimento, a primeira dimensão geralmente dada em nanômetros (10^{-9} m) e as outras duas descritas por micrômetros (10^{-6} m).

Os vetores M_{sen} , $H_{d\text{sen}}$, H_N e $H_{d\text{ref}}$ referem-se, respectivamente, à magnetização e ao campo desmagnetizante da camada sensora, ao campo de acoplamento Néel e ao campo desmagnetizante da camada referencial. Por fim, o ângulo θ é formado pelos vetores H_{ext} e M_{sen} e ele é fundamental para definir e adequar melhor a aplicação dada ao MTJ, como será visto mais adiante (KAMMERER *et al*, 2004).

O campo magnético desmagnetizante, ou campo interno, é definido pelo campo magnético gerado dentro de um ímã e oposto à magnetização, como por exemplo, os ferromagnéticos das camadas sensora e referencial do MTJ. Ele geralmente é determinado pela forma e tamanho do material em questão. O campo magnético total em um ímã é uma soma dos vetores campo de desmagnetização e do campo magnético externo gerado por corrente livre ou de deslocamento. Então basicamente o termo do campo de desmagnetização reflete a tendência deste campo em reduzir o

momento magnético total do sistema. Ele é muito relevante por se relacionar com a anisotropia de forma em ferromagnéticos de domínio magnético único, como o MTJ sob o modelo adotado (REY, 2015).

A anisotropia de forma, ou também chamada de anisotropia magnetoestática, por sua vez, se origina das interações dipolo-dipolo que ocorrem em ferromagnéticos e no caso de elipsoides magnéticos uniformemente magnetizados, esta pode ser quantificada pelo tensor de desmagnetização N que depende apenas da forma da amostra (OSBORN, 1945). Assim, mais pra frente aplicaremos matematicamente esse conceito no MTJ do modelo de Stoner Wohlfarth.

Por fim, o campo de acoplamento Néel refere-se ao efeito de "casca de laranja" causado pelas interações magnetostáticas entre os polos livres nas duas interfaces ferromagnéticas próximo à barreira isolante em um MTJ. Esse acoplamento está associado a uma rugosidade conforme das duas interfaces que causa um deslocamento na resposta do campo magnético da magnetização de camada livre e, portanto, a magnetorresistência em si (WANG, 2003). O esquema abaixo mostra esse efeito muito presente em MTJs.

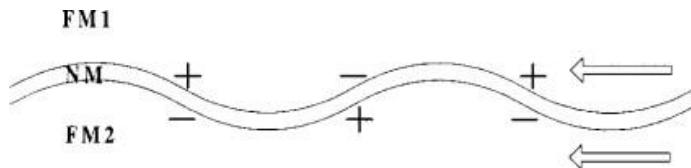


Figura 11 - Esquema do acoplamento Néel em um sistema FM/I/FM (WANG, 2003)

Esse modelo busca por desenvolver o balanço de energia presente na camada sensora da estrutura do MTJ. Para o caso de aplicação como sensor magnético, como o objetivo é obter uma resposta magnética linear e alta sensibilidade, é necessário minimizar essa energia associada. A energia por unidade de volume na camada sensora é descrita pela soma das contribuições energéticas externas e internas a ela dada pela equação abaixo (CARDOSO et al, 2015).

$$\frac{E^f}{V} = -\mu_0 \vec{H}_{ext} \cdot \vec{M}_s^f + \frac{E_K}{V} - \frac{1}{2} \mu_0 \vec{H}_d^f \cdot \vec{M}_s^f - \mu_0 \vec{H}_d^p \cdot \vec{M}_s^f - \mu_0 \vec{H}_N \cdot \vec{M}_s^f \quad (10)$$

em que \vec{H}_{ext} é o campo externo aplicado e \vec{M}_s^f a magnetização de saturação

da camada sensora no 1º termo da equação, o 2º termo (E_k) representa a energia de anisotropia cristalina, o 3º termo (\overrightarrow{Hfd}) é o campo desmagnetizante da camada sensora, o 4º termo (\overrightarrow{Hpd}) o campo desmagnetizante da camada referencial e o 5º termo (\overrightarrow{Hn}) o campo de acoplamento Néel.

Os termos 2 e 3 são oriundos de fontes internas de campo magnético, com o primeiro de natureza cristalina relacionado à anisotropia magnética uniaxial induzida na deposição dos materiais e o último associado à natureza magnetoestática de anisotropia de forma.

O termo 2 é de grande importância e para o caso de anisotropia em paralelo, como é o caso dos MTJs analisados nesse trabalho, ela pode ser descrita por:

$$\frac{E_K}{V} = \frac{1}{2} \mu_0 H_k M_s^f \sin^2(\theta) \quad (11)$$

em que H_k é o campo de anisotropia cristalina e θ o ângulo entre a magnetização sensora e o campo externo.

Em contrapartida, os termos 1, 4 e 5 da equação provêm de fontes externas de campo magnético. O 1º termo determinado pelo campo externo aplicado, o 4º termo pelo campo desmagnetizante da camada de referência e por fim, o 5º termo em função do campo de acoplamento Néel induzido pelas rugosidades das interfaces das camadas.

O campo desmagnetizante, como já visto anteriormente, é função do tensor de desmagnetização (N_{xx}), que por sua vez, depende puramente de fatores geométricos. E para a camada sensora, este pode ser descrito como abaixo:

$$Hfd = N_{xx} Mfs \cos \theta \quad (12)$$

O próximo passo é a minimização do balanço de energia envolvida na camada sensora do MTJ. A estratégia é primeiramente derivar duas vezes em Θ a expressão (10) com os termos simplificados em (11) e (12) e depois encontrar as soluções, sabendo que para que a minimização seja completa é necessário que a segunda derivada seja positiva. Com esse raciocínio, se chega às soluções abaixo:

$$\sin \theta = 0 \text{ para quando } Hk > Mfs Nxx \quad (13)$$

$$\cos \theta = \frac{H_{ext} - H_{pd} + H_n}{Mfs Nxx - H_k} \text{ para quando } Hk < Mfs Nxx \quad (14)$$

As soluções acima trazem gráficos bem diferentes que refletem também em aplicações diferentes.

Para o caso de (13), temos a curva de transferência mais abaixo. Nesse caso, a curva possui uma grande histerese que é refletida em um alto campo de coercitividade magnética. Essencialmente, ela mede a resistência de um ferromagnético à desmagnetização e é característica chave para a aplicação de um MTJ como armazenador de memória (LIU e DE BOECK, 2018).

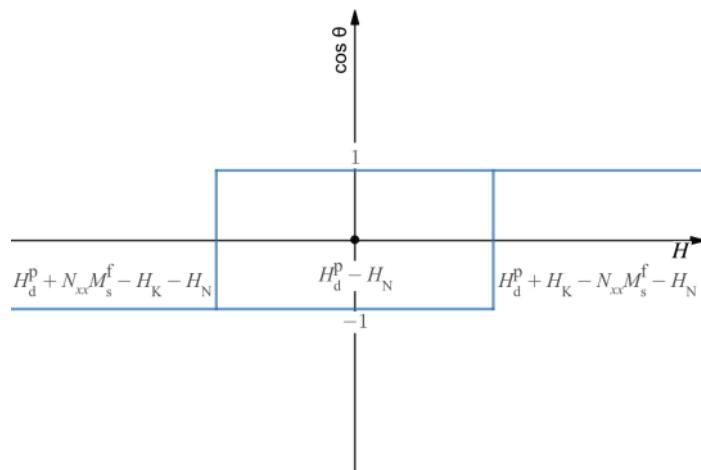


Figura 12 - Curva de transferência típica de aplicação de armazenamento de memória
(CARDOSO et al, 2015, adaptada)

Para o caso da solução (14), temos a curva de transferência abaixo.

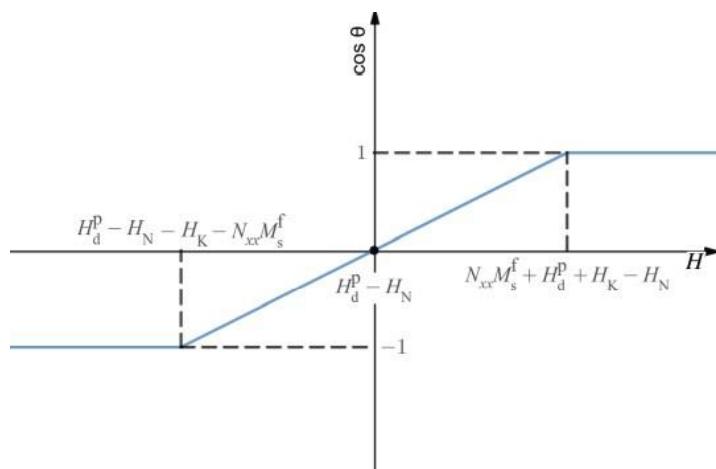


Figura 13 - Curva de transferência típica de aplicação como sensor magnético
(CARDOSO et al, 2015, adaptada)

Agora, podemos observar uma curva linear sem histerese, ideal para a aplicação do MTJ como sensor magnético. A sensibilidade magnética se relaciona de maneira proporcional ao coeficiente linear da reta encontrada no gráfico $\cos \theta \times H$ (curva de transferência) e pode ser descrita como uma função de termos já vistos anteriormente:

$$s \propto \frac{1}{M_{fs} N_{xx} - H_k} \quad (15)$$

Assim, uma ideia para se obter uma maior sensibilidade magnética é buscar maximizar o valor de H_k , enquanto se minimiza os valores de M_{fs} e N_{xx} . O tensor desmagnetizante depende basicamente da geometria do sensor, enquanto os termos de campo de anisotropia cristalina e a magnetização de saturação da camada sensora dependem fortemente do material utilizado.

1.7. HISTÓRICO RECENTE – TMR

Devido ao baixo valor de 14% sob temperatura muito baixa, muito próximo ao valor de zero absoluto em Kelvin, para o TMR demonstrado pela primeira vez por Julliere (JULLIERE, 1975), o fenômeno não foi estudado e discutido com a devida atenção durante a década de 1970. O TMR ressurgiu como tema de interesse apenas no final da década de 1980. Um histórico recente do estudo do efeito TMR é pontuado abaixo (LV, 2019):

- 1975, descoberta do efeito TMR por Julliere em 4,2 K e do modelo de Julliere com a dependência de polarização de spin (JULLIERE, 1975);
- 1991, Terunobu Miyazaki (Universidade de Tohoku, Japão) encontrou uma variação de resistência relativa (TMR) de 2,7% à temperatura ambiente (MIYAZAKI e TEZUKA, 1995);
- 1994, Miyazaki alcançou um valor de TMR de 18% em junções de ferro separadas por um isolante amorfo de óxido de alumínio (MIYAZAKI e TEZUKA, 1995);

- 1994, Jagadeesh Moodera (Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Estados Unidos) encontrou 11,8% em junções com eletrodos de CoFe e Co (MOODERA *et al*, 1995);
- 2000, início da fabricação de barreiras de túnel de óxido de magnésio cristalino (MgO);
- 2001, Butler e Mathon de maneira independente fizeram a previsão teórica de que usando ferro como material ferromagnético e MgO como isolante, o TMR pode atingir vários milhares por cento (BUTLER *et al*, 2001) (MATHON e UMERSKI, 2001);
- 2001, primeiro relato de TMR significativo em um MTJ baseado em MgO [Fe/MgO/FeCo(001)] por Bowen (BOWEN *et al*, 2001);
- 2004, Parkin e Yuasa foram capazes de fazer junções Fe/MgO/Fe que atingem mais de 200% de TMR à temperatura ambiente (YUASA *et al*, 2004) (PARKIN *et al*, 2004);
- 2008, efeitos TMR de até 604% à temperatura ambiente e mais de 1100% a 4,2 K foram observados em junções de CoFeB/MgO/CoFeB por S. Ikeda e equipe da Universidade de Tohoku no Japão (IKEDA *et al*, 2008).

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1. INTRODUÇÃO

Microfabricação é o termo utilizado para descrever processos de fabricação de estruturas muito pequenas, geralmente em escala micrométrica, mas que também pode ser relacionado a filmes em escala nanométrica. Essa técnica pode ser utilizada em diversos segmentos de fabricação, como bens de consumo, semicondutores, na medicina, sensores, na indústria pesada, na tecnologia da informação, etc. Visto que suas estruturas são pequenas, ferramentas e processos de alta tecnologia são necessários na execução do processamento das mesmas. (IKUMAPAYI *et al*, 2020).

Em uma microfabricação típica, várias técnicas podem ser utilizadas em sequência com o objetivo de produzir e definir a estrutura desejada. Na maior parte dos casos, o início se dá na superfície do substrato, mas podendo ocorrer também

dentro do material do substrato. Pode-se ter modificações aditivas ou subtrativas no substrato utilizado de forma a converter o mesmo em uma estrutura complexa de camadas de materiais por meio da interação físico-química de características microscópicas (ZAOUK *et al*, 2006).

A técnica de microfabricação ocorre sob condições cuidadosamente controladas, por isso há necessidade de controle crítico de partículas, temperatura, luz, umidade relativa, ventilação, ruído e vibração para evitar a contaminação das amostras. As imagens a seguir mostram a sala limpa, presente no subsolo do prédio do INESC-MN, na qual as amostras, que serão tratadas melhor abaixo, foram em sua maior parte processadas.



Figura 14 - Sala limpa principal do INESC-MN (Técnico Lisboa, 2022)

São 250 m² de sala limpa, composta por uma maior área classe 100 e outra menor de classe 10. Ao redor há também por volta de 250 m² de área cinzenta de classe 10.000 (ISO 14644-1, 2015). A tabela a seguir explicita as condições e as diferenças dessas classes de concentração de partículas.

Classe	Partículas máximas/m ³						FED STD 209 E equivalente
	≥0.1μm	≥0.2μm	≥0.3μm	≥0.5μm	≥1μm	≥5μm	
ISO 1	10	2					
ISO 2	100	24	10	4			
ISO 3	1,000	237	102	35	8		Classe 1
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	3	Classe 10
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29	Classe 100
ISO 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293	Classe 1000
ISO 7				352,000	83,200	2,930	Classe 10000
ISO 8				3,520,000	832,000	29,300	Classe 100000
ISO 9				35,200,000	8,320,000	293,000	Ar ambiente

Tabela 2 - Classificação ISO de salas limpas pela concentração de partículas (ISO 14644-1, 2015, adaptada)

Pode-se observar também a necessidade de uma vestimenta especial para que as condições citadas acima sejam controladas. Tal uniforme de proteção individual é visto na figura a seguir e é basicamente composto por três partes principais: as botas, o capuz e o macacão. Soma-se com eles as luvas descartáveis e a máscara de proteção individual, obrigatória durante a pandemia do Covid-19.



Figura 15 - Vestimenta apropriada para sala limpa classe 100 e 10 (Q Source Inc, 2022)

2.2. METODOLOGIA

Para processar os sensores MTJ nos baseamos nos passos de microfabricação típicos realizados no INESC-MN. Necessitamos de um wafer (substrato) de vidro ou silício (Si/SiO_2) 1x1 polegada² (2,54 cm x 2,54 cm) para ser a base do processamento dos MTJs. Para caracterização magnética é utilizada uma pequena barra vertical de vidro de dimensões significativamente menores.

Para isso ser possível, inicialmente as placas de vidro e silício (Si/SiO_2) são cortadas por meio de uma máquina de serra de alta precisão na qual há o corte nos dois tamanhos supracitados, como pode ser visto nas imagens abaixo.

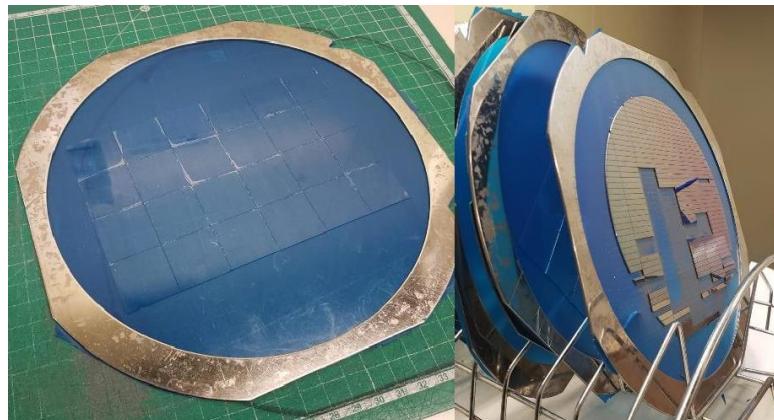


Figura 16 - (a) Corte 1x1 polegada² (vidro) e (b) Corte em barras (silício) (Foto do autor)

Antes de o wafer entrar no processo de fabricação, sua superfície deve ser higienizada para remover quaisquer partículas contaminantes e impurezas sem alterá-lo ou danificá-lo. Os métodos de limpeza podem ser categorizados como secos ou úmidos. A limpeza úmida envolve ácido (diversos tipos possíveis) e/ou solvente (álcool ou acetona) e água e é o método mais familiar e eficiente para limpar wafers, enquanto a limpeza a seco (sem uso de água) por outro lado usa lasers, aerossóis e são mais adequados para superfícies metalizadas (KERN, 1993).

No caso dos wafers de silício a limpeza se dá pelo isopropanol (IPA) e água, enquanto que os de vidro são inseridos em um banho da solução aniônica Alconox 1104-1 (Alconox, Inc, 2018) e água.



Figura 17 - (a) Wafers de vidro limpos e (b) Solução de Alconox utilizada na limpeza dos vidros (Foto do autor)

Assim como primeiro passo da microfabricação em si, toda stack (empilhado de camadas e materiais, de espessura total próxima a 100 nm) é depositada por meio da máquina Nordiko 3000. Essa máquina é multi-alvo (6 alvos no total para wafers suporte de 6 polegadas) e deposita metais e dielétricos pela técnica do raio iônico (INESC-MN, 2022).

A amostra composta por um wafer de vidro 1x1 polegada² e pelo menos duas barrinhas de vidro é inserida em um wafer suporte circular de 6 polegadas, que por sua vez, é colocado na câmara da máquina e preso por aplicação de vácuo. Pela aplicação de voltagem, íons de gás xenônio (Xe) são acelerados em direção ao alvo desejado (6 opções de materiais e compostos). Ao longo do caminho, por eventos de espalhamento, esses íons irão ionizar átomos neutros e todos os íons resultantes irão em direção ao alvo e ionizarão ainda mais átomos que irão eventualmente resultar na ignição do plasma. Nesta nuvem de plasma alguns íons com uma energia maior que a energia de ligação dos átomos do alvo podem colidir e resultar na emissão de vários átomos do alvo, neutros, e, portanto, livres para viajar através da câmara de vácuo para o substrato para formar o filme depositado (KAFLE, 2019).

Nas figuras abaixo pode-se ver a amostra antes de entrar na câmara de vácuo e após a deposição, além dos alvos da máquina Nordiko 3000 a serem depositados na amostra em questão.

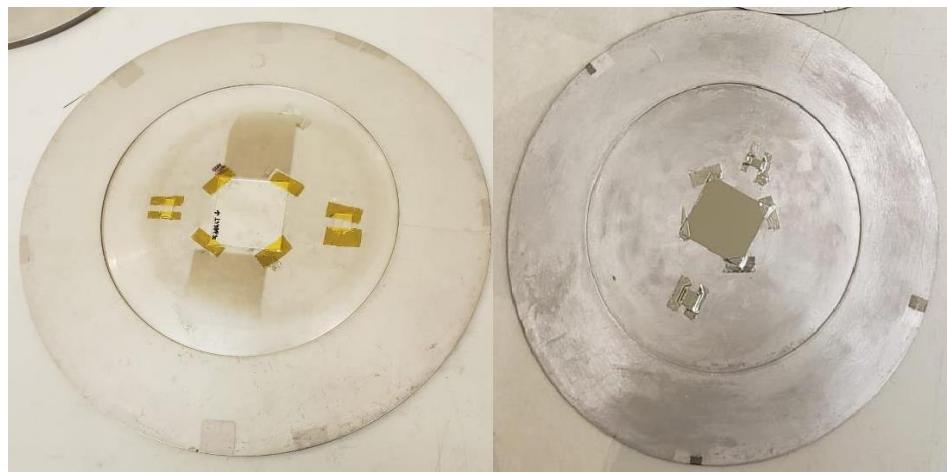


Figura 18 - (a) Amostra pré deposição e (b) pós deposição (Foto do autor)

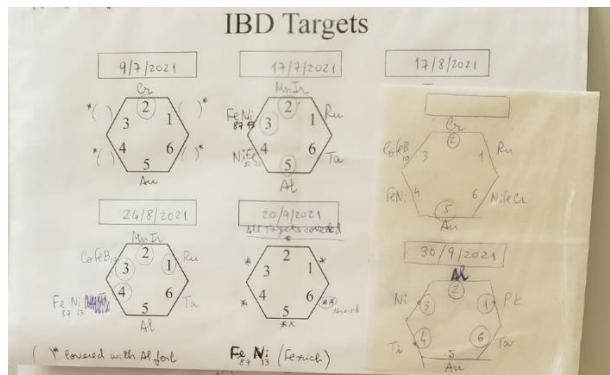


Figura 19 - Alvos de deposição da Nordiko 3000 (Foto do autor)

As pequenas barras de vidro antes de processadas e logo após a deposição, passam pelo VSM (magnetômetro de amostra vibrante). O VSM é um instrumento científico que avalia o comportamento magnético de filmes finos com base na Lei de Indução de Faraday (KINSLER, 2020).

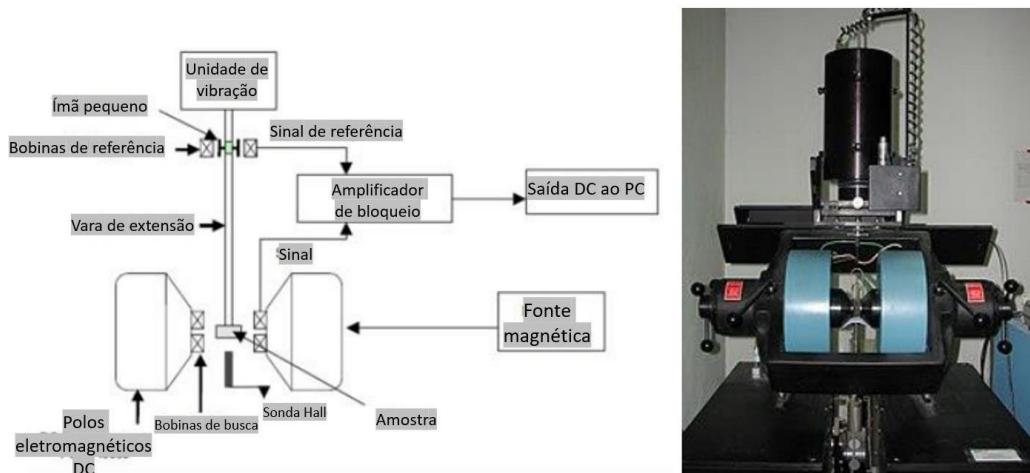


Figura 20 - (a) Esquema das partes típicas de um VSM (b) VSM na vida real (UKEssays, 2018, adaptada)

As partes de uma configuração VSM típica podem ser vistas no esquema acima. A amostra é colocada no suporte ligado ao excitador de vibração, que oscila a amostra durante a análise do equipamento. A amostra é colocada entre duas peças eletromagnéticas (eletroímãs) que são usadas como campo constante aplicado para este experimento. Se a amostra for magnética, ela alinhará sua magnetização com o campo externo e seu momento de dipolo magnético criará um campo magnético alternado conforme sua vibração.

Com a oscilação do campo há a indução de uma força eletromotriz, ou seja, uma tensão entre as bobinas de sensor que cria um sinal para determinar as propriedades magnéticas da amostra. Podem ser usadas bobinas de referência para

criar um sinal de referência de modo que o ruído gerado possa ser filtrado usando um amplificador. Geralmente o sistema é conectado com a interface de computador para facilitar a captação de dados. Podem ser medidas diversas propriedades no VSM, como a coercitividade, coercitividade intrínseca (campo necessário para a desmagnetização permanente de um ímã), momento magnético, etc (SHIN *et al*, 2004).

A principal vantagem é a precisão e exatidão das medições. Além disso, pode-se fazer medições em uma variedade de ângulos, geralmente medindo-se no eixo fácil primeiramente e virando a amostra 90° para o eixo difícil.

Uma curva de VSM do eixo fácil da amostra deve ser como o observado abaixo. Nela deve-se conter uma certa histerese mais próxima às extremidades que mostra a existência do comportamento de polarização de troca e na região central uma escalada abrupta de momento magnético que demonstra a liberdade da camada livre na direção de magnetização, orientada pelo campo aplicado.

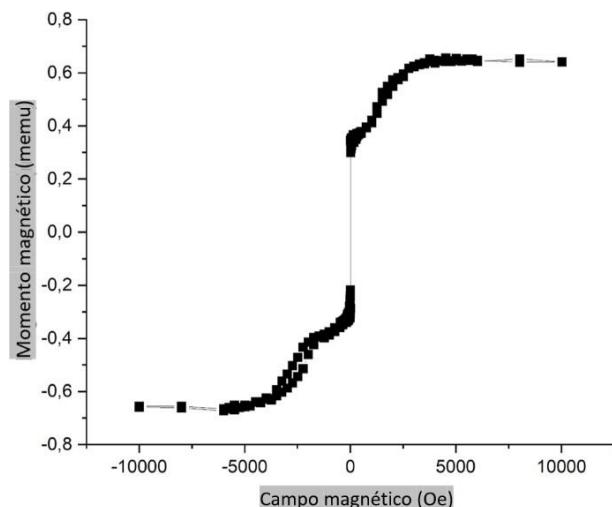


Figura 21 - Exemplo de curva VSM para eixo fácil (Elaborado pelo autor)

Voltando ao processamento da amostra em si, após a etapa de deposição, há a primeira fotolitografia com o objetivo de definir o eletrodo da base do MTJ. Essencialmente, a fotolitografia é um processo que usa laser de raios UV, uma fotomáscara e um material fotossensível (fotorresistente) para facilitar e definir a transferência de um padrão específico para outra camada no substrato (PAK *et al*, 2021).

Primeiramente, para promover a adesão do fotorresistente ao substrato é utilizada a técnica de vapor prime que remove a água que pode ainda estar aderida

na superfície por desidratação a altas temperaturas (Yield Engineering Systems Inc, 2022). Depois há a etapa de revestimento de rotação na qual o fotorresistente é espalhado uniformemente por toda a stack depositada.

O fotorresistente é um material orgânico sensível à luz, geralmente uma solução polimérica. O aparelho usado para esse processo é denominado revestidor giratório e essa solução é dispensada no centro de um wafer ou pastilha contendo a amostra que é então rotacionada em alta velocidade. Quando a espessura desejada é alcançada, a rotação é interrompida (WILLSON e STEWART, 2001). Depois a pastilha passa pelo método de softbaking, realizado em poucos segundos sob temperatura alta para diminuir o estresse mecânico. Após esse processo, o fotorresistente torna-se fotossensível.

Em seguida, a camada fotorresistente é exposta a um padrão de luz UV definido por uma fotomáscara. Esta pode ser tanto física (placa de vidro sob um padrão de metal que filtra a luz de exposição) como digital (feita por softwares como o AutoCAD e incorporada no sistema do laser UV). A vantagem dessa última está relacionada ao tipo de exposição por projeção observado que elimina o contato entre o wafer e a máscara, bem como o risco de danos em comparação com a exposição de contato no caso da fotomáscara física.

Por fim, há a etapa de revelação. A exposição à luz provoca uma alteração química no fotorresistente que permite a remoção dessa parte exposta por meio de uma solução especial, chamada revelador. Nessa etapa a solução é aplicada sob a amostra e o wafer rotaciona permitindo que ela aja em toda a sua superfície removendo o fotorresistente. Abaixo há um esquema que resume as principais etapas de uma fotolitografia típica: revestimento de rotação, exposição à luz e revelação.

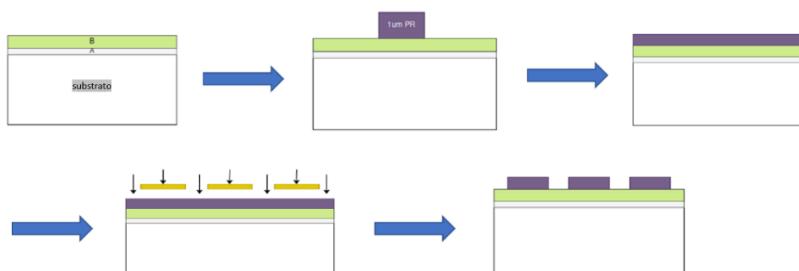


Figura 22 - Esquema das etapas típicas de uma fotolitografia (Elaborado pelo autor)

No caso do processo utilizado nesse estudo, inicialmente o wafer passa pelo vapor prime a 95°C por 30 minutos para ativar quimicamente a superfície da stack e promover adesão. Depois, no sistema de rastreamento SVG, segue para o revestimento de rotação no qual é adicionado HDMS (hexametildisilazano), um material polimérico fotorresistente com espessura desejada de 1,5 µm por rotação em alta velocidade por 30 segundos e que segue ao softbaking a 85°C por mais 30 segundos. Após essa etapa, a camada fotorresistente é exposta a um padrão de laser DWL de luz UV definido por uma fotomáscara digital feita previamente no AutoCAD.

Nela são dispostas dezenas de pequenas unidades (256 no total), os sensores magnéticos que posteriormente serão medidos para se analisar o efeito magnetoresistência de tunelamento, de áreas e dimensões diferentes. É importante que esses parâmetros sejam diferentes para indução de um campo desmagnetizante diferente e assim resultados e formatos diferentes de curvas de TMR (EPHRATH, 1979). O tamanho da máscara em si é de 18 x 18 mm², um pouco menor que a amostra a ser microfabricada de 25,4 x 25,4 mm² e ela inclui três camadas referentes às três fotolitografias do processamento: camada de eletrodo de base, camada de pilar e camada de eletrodo superior.

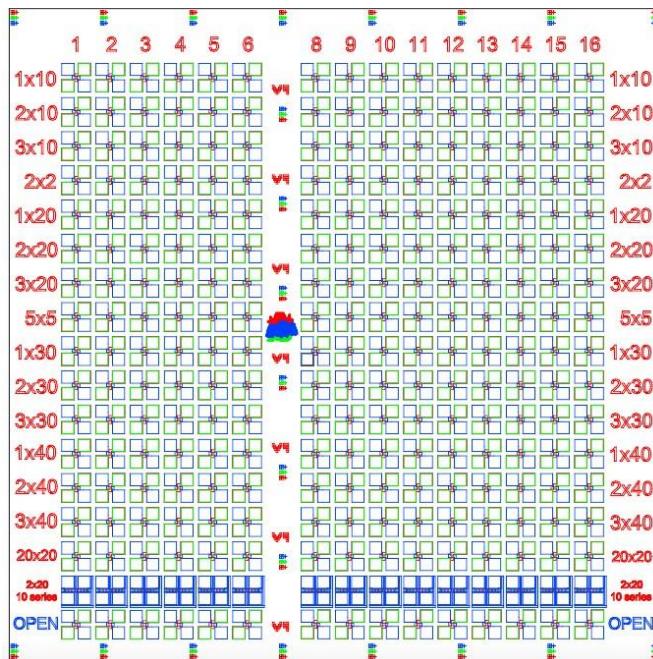


Figura 23 - Fotomáscara utilizada para a fotolitografia (INESC-MN)

Por fim, há a etapa de revelação na qual parte do fotorresistente é removido por uma solução especial de diacetona álcool. Nessa etapa há o aquecimento da amostra por um minuto a 110°C, seguido do resfriamento por 30 segundos e da pulverização do revelador com velocidade de rotação 0,5 krpm, seguido de dissolução por 60 segundos, depois 15 segundos com velocidade de rotação de 0,5 krpm e mais 30 segundos a 2 krpm.

O sistema SVG é mostrado na figura abaixo. Além dele, há o laser DWL (laser de escrita direta) utilizado, a amostra pós primeira fotolitografia e a estrutura formada vista sob microscópio eletrônico. A estrutura cinza é o fotorresistente em cima da stack depositada em verde claro. A diferença de cores se dá por causa da diferença de profundidade (aproximadamente 1,5 µm de fotorresistente).



Figura 24 – (a) Sistema de rastreamento SVG (b) Laser DWL de luz UV (Foto do autor)

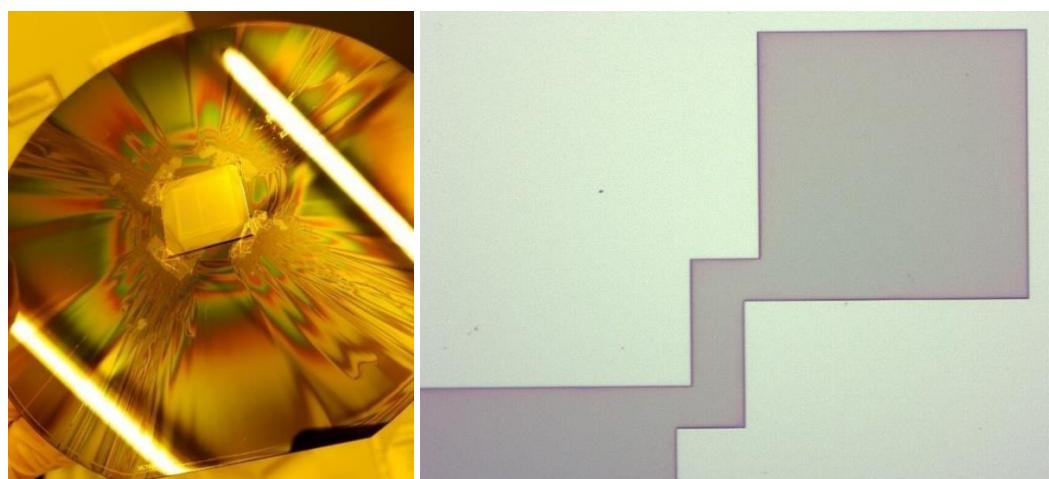


Figura 25 – (a) Amostra pós 1^a fotolitografia (b) Estrutura formada pós 1^a fotolitografia sob aumento 10x (Foto do autor)

O próximo passo consiste na primeira gravura também para definição do eletrodo da base do MTJ, basicamente a remoção de material depositado. Essa técnica pode ser feita de maneira úmida ou seca. O processo de gravação que envolve o uso de produtos químicos líquidos ou decapantes para remover o material do

substrato caracteriza a gravura úmida. A gravura a seco pode ser feita por reações químicas (usando plasma ou gases reativos), remoção física (geralmente por transferência de momento) e uma combinação de reações químicas e remoção física. Por outro lado, a gravura úmida é apenas um processo químico.

No processo de ataque a plasma, também conhecido como ataque a seco, plasmas ou gases de ataque são usados para remover o material do substrato. A gravura a seco gera produtos gasosos, e estes devem ser expelidos através do sistema de vácuo. Algumas de suas vantagens são sua capacidade de automação, consumo de material reduzido e maior estabilidade térmica. Esse processo também é realizado longe do operador na câmara de vácuo produzindo uma condição de boa higiene industrial. É importante mencionar que esta técnica é anisotrópica e assim ela age apenas na região onde não há o revestimento por fotorresistente (EPHRATH, 1979).

A gravura realizada na fabricação dos MTJs do estudo é do tipo a seco e é feita pela técnica física de moagem iônica na máquina Nordiko 3600. Nessa técnica, as áreas do material não protegidas pelo fotorresistente são removidas pelo feixe iônico. Seu princípio de funcionamento é que os íons de Argônio (Ar^+) são acelerados em direção à amostra em uma câmara de vácuo e o momento linear transferido nessas colisões remove o material da amostra. Os íons são gerados a partir do gás Ar inerte por meio de uma corrente de descarga (INESC-MN, 2022). A quantidade de material removido depende das condições da gravura, como o ângulo entre o feixe e a amostra, o tempo de gravura e a energia do feixe. As imagens a seguir mostram a máquina Nordiko 3600 e algumas amostras após a primeira etapa de gravura.

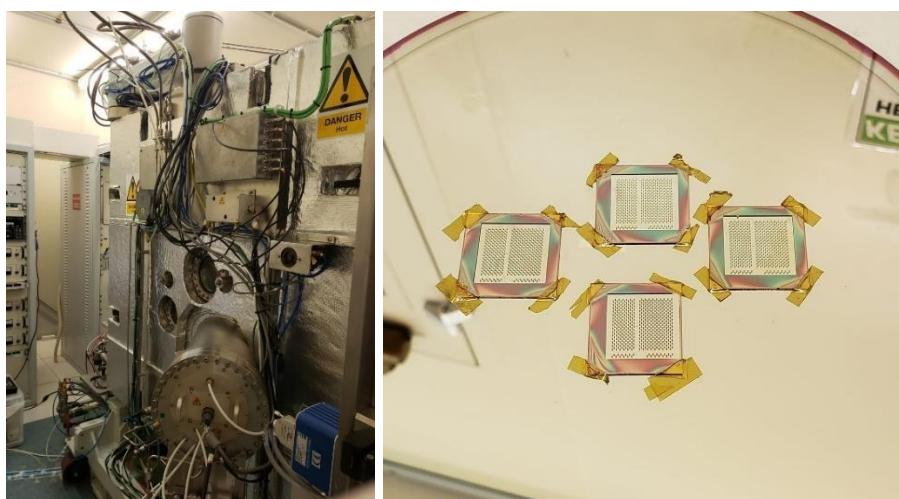


Figura 26 – (a) Máquina Nordiko 3600 (b) Amostras pós primeira gravura (Foto do autor)

Antes de continuar com o processamento, como a etapa de gravura é uma das mais críticas para o processo, dadas suas especificidades já supracitadas, faz-se uma análise de profilometria para caracterizar a rugosidade e medir a espessura de material que foi removido com essa etapa. A amostra é colocada na base do profilômetro, visto na figura abaixo, e uma caneta com ponta de diamante é passada por um pedaço da superfície da amostra como um padrão de onda que é usado pelo computador para modelar diretamente e a tempo real a superfície baseado no deslocamento da caneta, controlado pelos botões dispostos do lado da tela. Busca-se sempre que a caneta passe por uma região de estrutura intacta e outra em que houve parte removida pelo processo de gravura.



Figura 27 - Profilômetro DekTak 3030 utilizado (Foto do autor)

A seguir, é feita a etapa de remoção do fotorresistente remanescente com um banho ultrassônico com Microstrip® 3001 a 65°C. Por um lado, esse banho deve ser feito de forma rápida e sem resíduos ou impurezas, mas por outro é importante que nem o substrato nem os materiais já depositados sobre ele sejam atacados. O Microstrip® 3001 proporciona boa estabilidade ao banho com baixas taxas de evaporação e é compatível com limpeza de sistemas ultrassônicos, normalmente necessitando apenas de um enxágue com água desionizada (Fujifilm Electronic Materials, 2020).



Figura 28 - (a) Amostra sob banho ultrassônico a 65°C (b) Microstrip® 3001 (Foto do autor)

Um esquema das etapas de gravura e remoção do fotorresistente pode ser visto na figura abaixo.



Figura 29 - Esquema das etapas seguintes à fotolitografia (Elaborado pelo autor)

Logo, a segunda fotolitografia é realizada de maneira muito similar à primeira. Só que nesse caso o foco é a definição do pilar que será criado a fim de ser o caminho para que a corrente elétrica passe e permita que o efeito de magnetoresistência de tunelamento aconteça. Pode-se observar pelas imagens abaixo os diferentes tamanhos e formatos dos pilares criados nessa etapa, como apresentado anteriormente pela fotomáscara da figura 23.

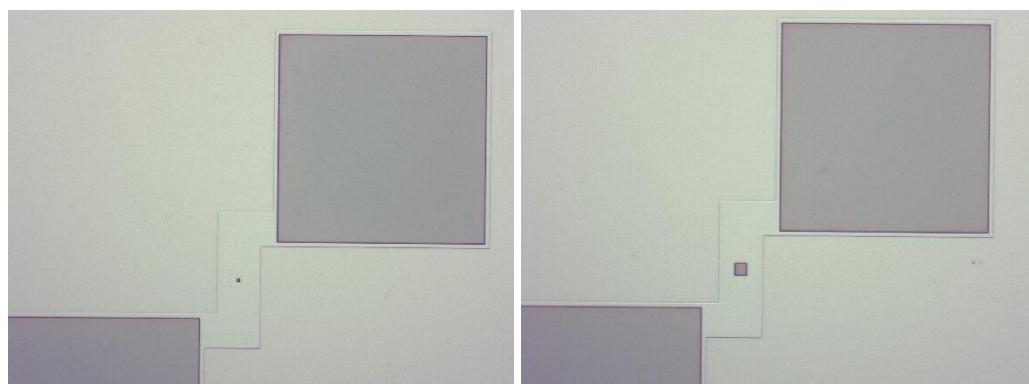


Figura 30 - Pilares formados pós 2^a fotolitografia sob aumento 10x (Foto do autor)

Essa etapa é seguida pela segunda gravura, também de forma semelhante à primeira mas para remover o material ao redor do pilar.

No sétimo passo do processamento, na máquina UHV2 (vista abaixo) fazemos a deposição de aproximadamente 1100 Å de camada passivadora de Al_2O_3 (espessura próxima à da stack) no fotorresistente remanescente da etapa anterior. Essa etapa é importante para isolar o eletrodo inferior do eletrodo superior de forma que a corrente será levada a passar através da barreira de túnel do MTJ em vez de diretamente de contato de baixo para cima. Primeiramente, abrimos a porta da máquina (e assim, retirando o vácuo) para inserir a amostra lá dentro e deixamos por horas para que se estabeleça o vácuo novamente. Em seguida, por controle de frequência e aplicação de pressão a deposição da camada é realizada sob taxa constante e um tempo de aproximadamente uma hora e meia. A amostra é retirada depois sob procedimento similar ao de sua inserção na máquina.

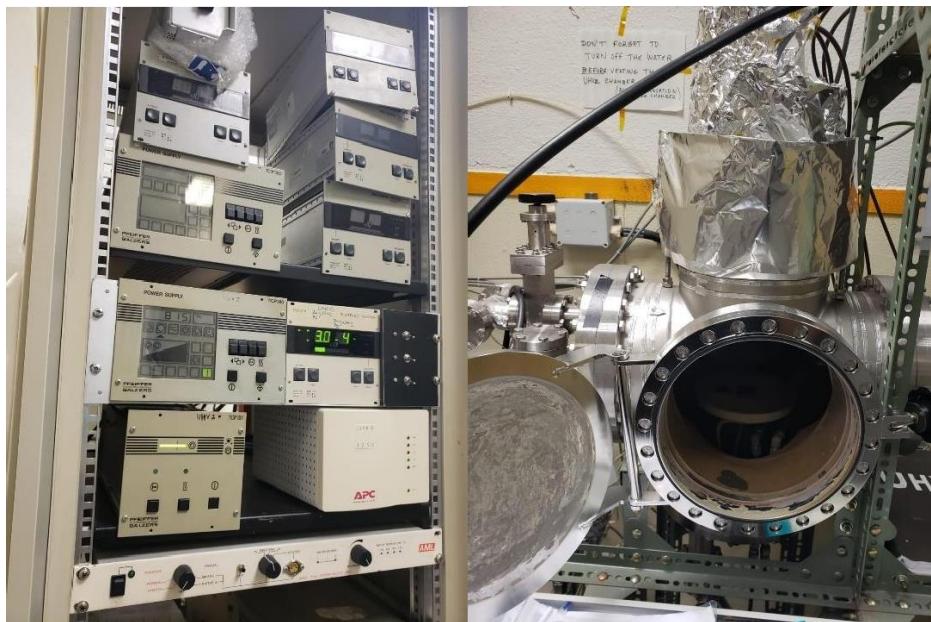


Figura 31 - (a) Equipamentos de controle de frequência e pressão da UHV2 (b) Câmara de vácuo de deposição (Foto do autor)

É importante destacar que, além da amostra, um pedaço de silício de calibração é inserido na máquina para também ter por cima a camada isolante depositada de modo que seja possível analisar a espessura da mesma por meio do profilômetro e assim ter a certeza de que se foi depositada corretamente. A figura abaixo mostra esses pedaços para diferentes espessuras depositadas e como a diferença fica nítida com diferentes cores (1100 Å à esquerda e 2000 Å à direita).

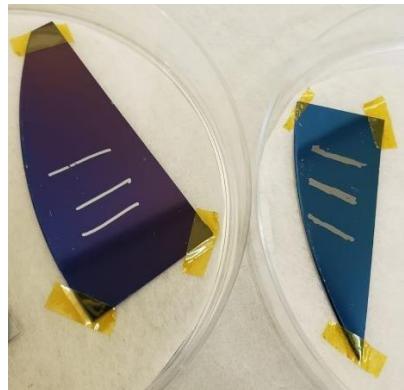


Figura 32 - Pedaços de silício revestidos por camada isolante de Al₂O₃ de diferentes espessuras (Foto do autor)

Depois da passivação, há a etapa de lift-off, a qual destina-se a remover o fotorresistente e o óxido que foi depositado no topo do pilar e das estruturas quadradas ao redor, denominado de etapa de abertura de via. É fundamental que o pilar seja aberto, ou seja, tenha seu fotorresistente e óxido removidos nessa etapa para que se possa ser medido posteriormente o efeito túnel e para isso é feita uma meticulosa análise em microscópio eletrônico. Basicamente, a remoção do fotorresistente e do óxido se dá pelo banho ultrassônico com Microstrip® 3001 a 65°C por algumas horas. Nas imagens abaixo, pode-se observar a diferença entre um lift-off incompleto na remoção do fotorresistente e do óxido depositado na etapa anterior e um completo e ideal para dar seguimento ao processamento.

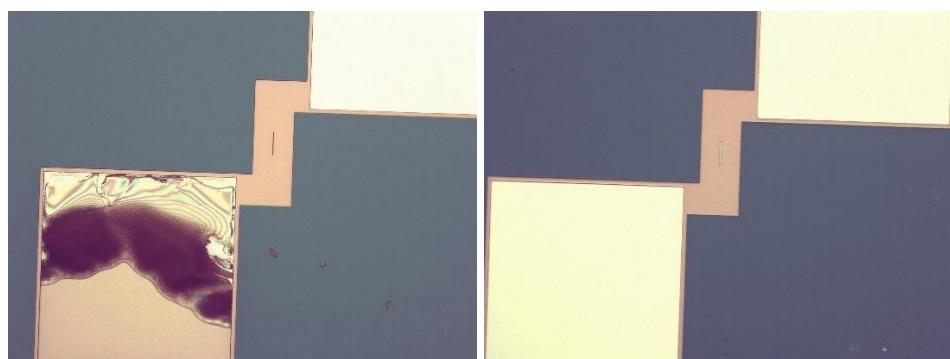


Figura 33 - (a) Lift-off com remoção incompleta sob aumento 10x (b) Lift-off desejado com remoção completa sob aumento 10x (Foto do autor)

Enquanto o processo de gravura é realizado por meio da remoção parcial de material não protegido pelo fotorresistente (fotorresistente ainda permanece intacto), na técnica de lift-off, a remoção somente ocorre nas regiões em que há, ao mesmo tempo, o fotorresistente e o óxido depositado, removendo ambos. (Basics of Microstructuring, MicroChemicals, 2022).

Dando continuidade ao processamento, é realizada uma terceira fotolitografia para definição das estruturas do eletrodo do topo. Essa etapa é realizada de maneira muito similar às fotolitografias anteriores apenas com um passo adicional de pré-revelação de 20 segundos com revelador antes da exposição sob o laser que, por sua vez, usa mais energia do que nas exposições anteriores. Faz-se isso para que a remoção do fotorresistente e da camada metálica a ser depositada na próxima etapa do processo seja mais fácil e o lift-off mais rápido.

A figura abaixo retirada do microscópio eletrônico mostra as estruturas após a terceira fotolitografia. Pode-se observar que é criada mais uma estrutura igual à já apresentada para ser o eletrodo do topo com a adição do fotorresistente no processo.

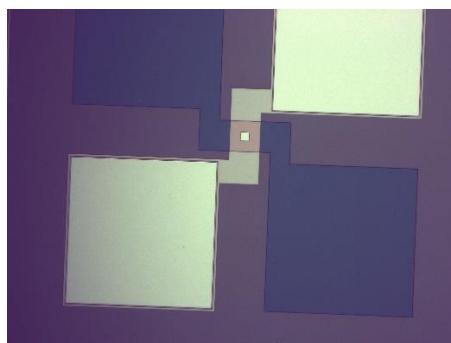


Figura 34 - Estrutura formada pós 3^a fotolitografia sob aumento 10x (Foto do autor)

Depois da última fotolitografia do processo, há a etapa de metalização. Nesta, é feita a deposição metálica do eletrodo do topo em que uma camada de 3000 Å de AlSiCu e 150 Å de TiW (N) são depositados sobre o óxido ou o fotorresistente. São executadas três etapas (módulos) na máquina Nordiko 7000, multimódulo e com sistema de pulverização de magnetron.

O primeiro módulo realizado por um minuto é uma gravura por pulverização suave de um minuto e essencial para remover o óxido nativo da amostra em cima do metal pré-existente, garantindo um bom contato elétrico antes da deposição dos metais nas próximas etapas. O próximo módulo consiste na deposição por pulverização DC de 3000 Å de AlSiCu por cerca de 75 segundos, camada de boa condutividade. Por fim, temos o último módulo utilizado para a deposição de 150 Å de TiW (N), por cerca de 30 segundos e também por pulverização DC, uma camada dura e densa para proteger tanto física quanto quimicamente a superfície da camada anterior (FERREIRA, 2008).

Nas imagens abaixo, pode-se ver uma amostra pós metalização e a máquina utilizada nessa etapa.



Figura 35 – (a) Amostra pós metalização (b) Máquina Nordiko 7000 (Foto do autor)

Por último, ainda é feito o lift-off que removerá todo o metal que foi depositado sobre o fotorresistente, só restando aquele depositado sobre o óxido. Essa etapa é feita da mesma maneira que o lift-off anterior e como visto anteriormente é acelerada pela pré-revelação da terceira fotolitografia do processo. Um esquema das últimas etapas de metalização e lift-off pode ser visto a seguir, além das estruturas encontradas após esses processos vistas sob microscópio eletrônico.

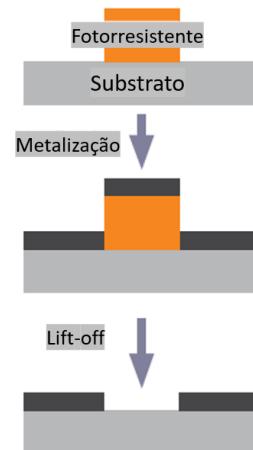


Figura 36 - Esquema das etapas de metalização e lift-off (Basics of Microstructuring, MicroChemicals, 2022, adaptada)

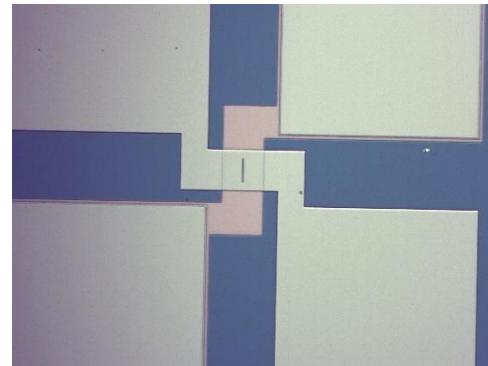


Figura 37 - Estruturas pós lift-off da camada metálica sob aumento 10x (Foto do autor)

Por sua vez, um esquema dos principais passos da microfabricação utilizada no processamento das amostras MTJ no INESC-MN, desde a deposição da stack até o lift-off da camada metálica, pode ser encontrado abaixo. Segue também como a amostra deve ficar após essas etapas.

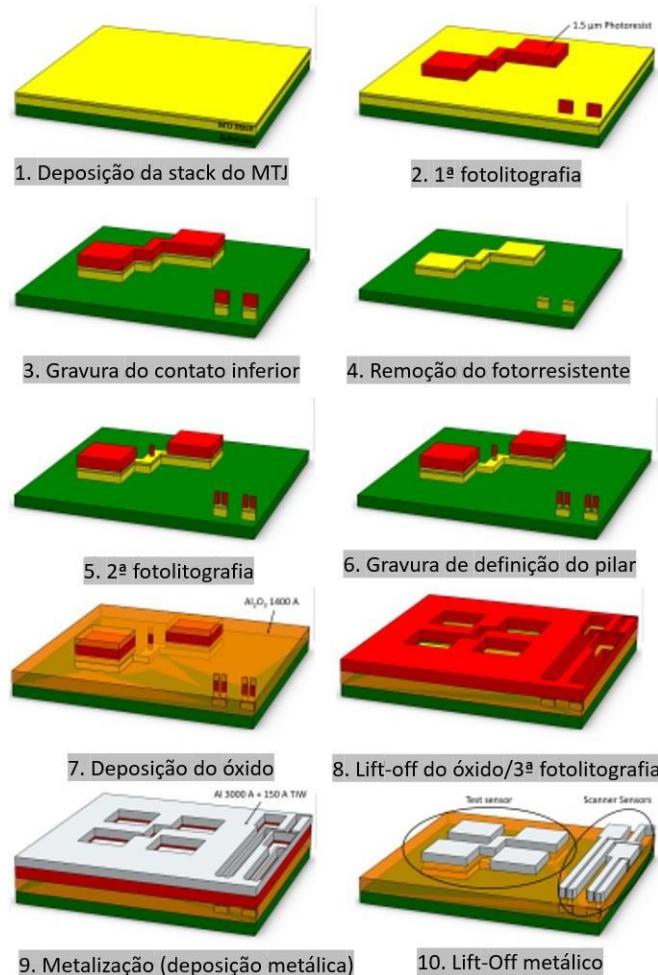


Figura 38 - Esquema das etapas de microfabricação de um MTJ (VENTOSA, 2017, adaptada)

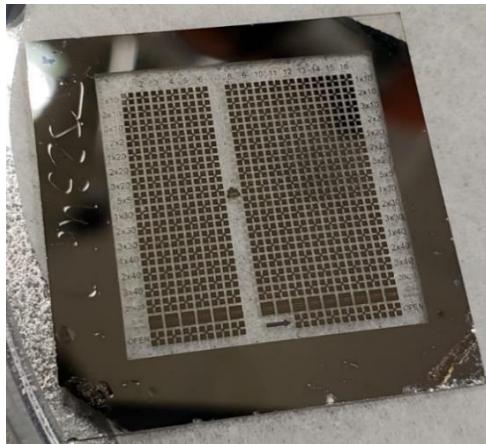


Figura 39 - MTJ após processamento em sala limpa (Foto do autor)

Antes de a amostra ser propriamente medida em termos de parâmetros elétricos e magnéticos, há a etapa de recozimento. O recozimento magnético é uma técnica utilizada para induzir a anisotropia magnética nas amostras para definir a direção de magnetização da camada fixa. Basicamente, a amostra é aquecida a uma temperatura alta o suficiente (geralmente entre 200 e 350°C), mantida nessa temperatura por um intervalo de tempo e, em seguida, resfriada na presença de um campo magnético.

Uma anisotropia induzida uniaxial é gerada ao longo da etapa de recozimento. Esta é atribuída inicialmente à formação de pares de átomos vizinhos semelhantes, devido à intensificação da difusão em altas temperaturas seguido pela fixação desse bloco de átomos na direção de magnetização aplicada enquanto a amostra é resfriada até a temperatura ambiente.

Esta etapa é realizada principalmente no processamento de MTJs baseados em MgO (MENG *et al*, 2011). Nesses dispositivos é muito importante definir a cristalização da barreira de túnel de MgO assim como as camadas livre e de referência a fim de se obter um tunelamento coerente, permitindo que o TMR encontrado seja mais elevado. No caso das amostras baseadas em Al₂O₃ o foco é na definição da direção de magnetização da camada fixa.

Abaixo pode ser visto o setup de recozimento utilizado nessa etapa. Primeiramente a amostra é encaminhada ao centro do forno (localizado no meio da máquina) a vácuo sob efeito de uma turbobomba e depois de acabado o aquecimento é manualmente inserida no compartimento inicial sob campo constante a resfriar. No trabalho em questão um campo de 1T é utilizado para todas as amostras. Para a etapa inicial de aquecimento, uma taxa constante de 6°C/min é usada a fim de elevar a

temperatura da ambiente (aproximadamente 25°C) para 220°C sob um tempo de permanência de 30 minutos no caso das amostras baseadas em Al₂O₃ e 330°C permanecendo nessa temperatura por 120 minutos no caso das baseadas em MgO.



Figura 40 - Setup de recozimento utilizado após processamento completo (Foto do autor)

É importante destacar que antes da etapa de VSM, a técnica do recozimento também é utilizada principalmente para analisar o efeito de polarização de troca e definir os eixos fácil e difícil de magnetização nas barrinhas de vidro pós deposição da stack. Esse procedimento nesse caso é feito em um outro setup de recozimento, como pode ser visto na figura mais abaixo.

As barrinhas de vidro são coladas em um suporte de cobre, que por sua vez, é grudado em um suporte maior atrelado a uma lâmpada de aquecimento e um cilindro de vidro. Todo esse sistema é inserido entre dois ímãs a vácuo sob efeito de uma turbobomba. O procedimento é similar, mas o aquecimento e o resfriamento são feitos seguidos um do outro sem a separação em diferentes compartimentos como no caso anterior de modo que o campo é aplicado durante todo o processo.

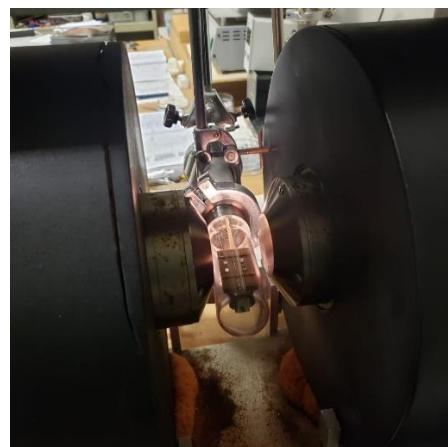


Figura 41 - Setup de recozimento utilizado pré VSM (Foto do autor)

Por fim, é realizada a caracterização magnética das amostras. O setup 140 Oe compõe os equipamentos e o sistema manual associados cujo objetivo principal é a medição das chamadas curvas de transferência magnética dos sensores recém microfabricados. Essa curva é dada pela resistência relativa dos sensores (efeito TMR) por campo magnético aplicado.

No setup há um voltímetro, uma fonte de corrente elétrica, um microscópio, duas bobinas de Helmholtz (idênticas, paralelas e separadas por uma distância igual ao raio delas), 4 pontas de agulhas de tungstênio e um computador para processamento dos dados. Aplicando a corrente, um campo magnético é criado entre as bobinas e variado entre -140 a 140 Oe. Por sua vez, ao posicionar 2 das pontas sob um sensor, a corrente é fornecida ao mesmo de modo que a tensão pode ser medida pelo voltímetro. Uma corrente constante é fornecida aos sensores e a tensão é medida. As medições são detectadas pelo software do setup 140 Oe no computador e são tratadas a fim de se obter a curva de transferência completa.

Nas imagens abaixo pode-se ver o setup 140 Oe e uma figura do microscópio do posicionamento de 2 pontas de medição em um determinado sensor.



Figura 42 - (a) Setup 140 Oe (b) Medição com 2 pontas do sensor (Foto do autor)

3. RESULTADOS

3.1. DESCRIÇÃO DAS STACKS DAS AMOSTRAS DE MTJ

Inicialmente, a ideia foi produzir MTJs baseados na barreira de túnel MgO para analisar a eficiência da stack em termos do efeito TMR, da sensibilidade

magnética e da linearidade das curvas obtidas, além do funcionamento das máquinas e das etapas envolvidas. Para isso numa primeira análise foram microfabricadas duas amostras com as stacks abaixo (os números se referem à espessura de cada material em Å e em parênteses temos a camada correspondente com amortecedora - A, camada fixa - CF, barreira de túnel - BT, camada livre – CL, cobertura – C e SAF caso esteja presente).

N88TJ500 (fixada à base com SAF): [Ta 50 / Ru 100] x3 / Ta 50 / Ru 50 (**A**) / MnIr 80 / CoFe 22 / Ru 7,5 / CoFeB 20 (**CF com SAF**) / MgO 15,5 (**BT**) / CoFeB 30 / Ru 2 / NiFe 40 (**CL**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

N88TJ502 (fixada à base com SAF): [Ta 50 / Ru 100] x2 / Ta 100 / Ru 100 (**A**) / MnPt 200 / CoFe 18 / Ru 8 / CoFeB 17 (**CF com SAF**) / MgO 18 (**BT**) / CoFeB 30 / Ru 2 / NiFe 40 / MnIr 80 / NiFe 50 (**CL**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

A ideia do segundo ensaio foi praticamente a mesma do anterior mas agora com 2 amostras de MTJ baseadas em Al₂O₃. O tempo de oxidação do óxido também é representado junto à espessura do Al.

TJ2340 (fixada no topo com SAF): Ta 50 / Ru 150 / Ta 30 (**A**) / NiFe 25 / CoFeB 25 (**CL**) / Al 8 + 15 sec Ox (**BT**) / CoFeB 26 / Ru 6 / NiFe 26 / MnIr 180 (**CF com SAF**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

TJ2341 (fixada na base com SAF): Ta 50 / Ru 150 / Ta 30 (**A**) / NiFe 25 / MnIr 180 / NiFe 25 / Ru 7 / CoFeB 25 (**CF com SAF**) / Al 8 + 15 sec Ox (**BT**) / CoFeB 25 / NiFe 25 (**CL**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

No terceiro ensaio, buscou-se otimizar a stack do MTJ baseado em Al₂O₃ com algumas mudanças, destacando o aumento da camada amortecedora (praticamente o triplo de espessura) e/ou aumento da espessura da barreira de túnel (Al de 8 para 13 Å).

TJ2343 (fixada no topo sem SAF): [Ta 50 / Ru 150] x3 **(A)** / NiFe 30 / CoFeB 30 **(CL)** / Al 7 + 15 sec Ox + Al 6 +15 sec Ox **(BT)** / CoFeB 26 / MnIr 180 **(CF)** / Ta 50 / Ru 50 **(C)**

TJ2346 (fixada no topo com SAF): [Ta 50 / Ru 150] x3 **(A)** / NiFe 30 / CoFeB 30 **(CL)** / Al 7 + 15 sec Ox + Al 6 +15 sec Ox **(BT)** / CoFeB 26 / Ru 8 / CoFeB 26 / MnIr 180 **(CF com SAF)** / Ta 50 / Ru 50 **(C)**

TJ2347 (fixada no topo com SAF): [Ta 50 / Ru 150] x3 **(A)** / NiFe 30 / CoFeB 30 **(CL)** / Al 7 + 15 sec Ox + 6 +15 sec Ox **(BT)** / CoFeB 26 / Ru 9 / CoFeB 26 / MnIr 180 **(CF com SAF)** / Ta 50 / Ru 50 **(C)**

TJ2350 (fixada na base sem SAF): [Ta 50 / Ru 150] x3 **(A)** / MnIr 180 / CoFeB 26 **(CF)** / Al 8 + 15 sec Ox **(BT)** / CoFeB 30 / NiFe 30 **(CL)** / Ta 50 / Ru 50 **(C)**

TJ2351 (fixada na base com SAF): [Ta 50 /Ru 150] x3 **(A)** / MnIr 180 / CofeB 26 / Ru 9 / CoFeB 26 **(CF com SAF)** / Al 8 + 15 sec Ox **(BT)** / CoFeB 30 / NiFe 30 **(CL)** / Ta 50 / Ru 50 **(C)**

No último ensaio feito, buscou-se otimizar a stack do MTJ do tipo fixada à base com SAF baseada em MgO alterando as espessuras da camada livre, tanto em CoFeB como NiFe, para analisar essa influência no efeito TMR, linearidade e sensibilidade magnética. Além disso, as amostras foram depositadas na máquina Nordiko 3600, ao contrário de todas as outras anteriores depositadas na Nordiko 3000.

TJ3884: [Ta 50 / Ru 100] x3 / Ta 50 / Ru 50 **(A)** / MnIr 80 / CoFe 22 / Ru 7,5 / CoFeB 20 **(CF com SAF)** / MgO 15 **(BT)** / CoFeB 30 / Ru 2 / NiFe 40 **(CL)** / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 **(C)**

TJ3885: [Ta 50 / Ru 100] x3 / Ta 50 / Ru 50 **(A)** / MnIr 80 / CoFe 22 / Ru 7,5 / CoFeB 20 **(CF com SAF)** / MgO 15 **(BT)** / CoFeB 22 / Ru 2 / NiFe 80 **(CL)** / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 **(C)**

TJ3886: [Ta 50 / Ru 100] x3 / Ta 50 / Ru 50 **(A)** / MnIr 80 / CoFe 22 / Ru 7,5 / CoFeB

20 (**CF com SAF**) / MgO 15 (**BT**) / CoFeB 25 / Ru 2 / NiFe 80 (**CL**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

TJ3887: [Ta 50 / Ru 100] x3 / Ta 50 / Ru 50 (**A**) / MnIr 80 / CoFe 22 / Ru 7,5 / CoFeB 20 (**CF com SAF**) / MgO 15 (**BT**) / CoFeB 25 / Ru 2 / NiFe 60 (**CL**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

TJ3888: [Ta 50 / Ru 100] x3 / Ta 50 / Ru 50 (**A**) / MnIr 80 / CoFe 22 / Ru 7,5 / CoFeB 20 (**CF com SAF**) / MgO 15 (**BT**) / CoFeB 25 / Ru 2 / NiFe 40 (**CL**) / Ru 50 / Ta 50 / Ru 100 (**C**)

3.2. CURVAS DE TRANSFERÊNCIA, R X A E SENSIBILIDADE MAGNÉTICA

As curvas de transferência, ou seja, as curvas medidas após todo o processo nas quais os eixos são representados pelo TMR em % (eixo Y) e o campo magnético aplicado H dado em Oe (eixo X), serão representadas abaixo por ensaio. Assim como a sensibilidade magnética (s), a resistência mínima (Rmin), a coercitividade (Hc) e o TMR referente à curva. Também foi feito um gráfico de dispersão com a relação R (resistência) X A (área do sensor) pelo valor de TMR em % para cada ensaio. O software Origin foi utilizado para criar os gráficos e determinar todos os parâmetros explicitados nesse item.

Abaixo mostra-se o método de cálculo da sensibilidade magnética por meio da curva de transferência. Para as curvas lineares basta aproximar a sensibilidade como o coeficiente angular da reta, enquanto que para as curvas com mais histerese (ou, seja, coercitividade significativa) faz-se duas retas que buscam linearizar os contornos do loop de histerese, seus coeficientes angulares são calculados e é feita a média desses valores, obtendo-se a sensibilidade magnética específica para aquela curva e nesse caso, representativa da amostra.

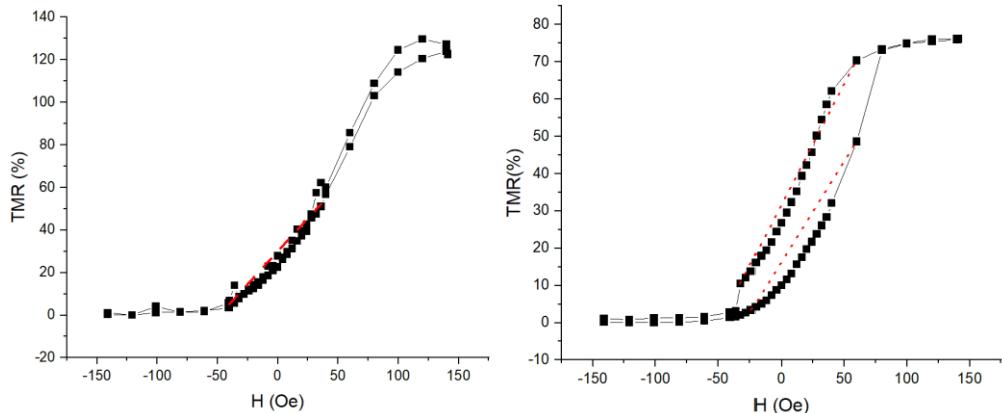


Figura 43 – (a) Cálculo da sensibilidade para curva linear (b) curva de histerese (Elaborado pelo autor)

Ensaio 1: amostras N88TJ500 e N88TJ502, ambas MTJs baseadas em MgO fixadas na base com a presença de SAF (sensor $1 \times 30 \mu\text{m}^2$ – curvas representativas)

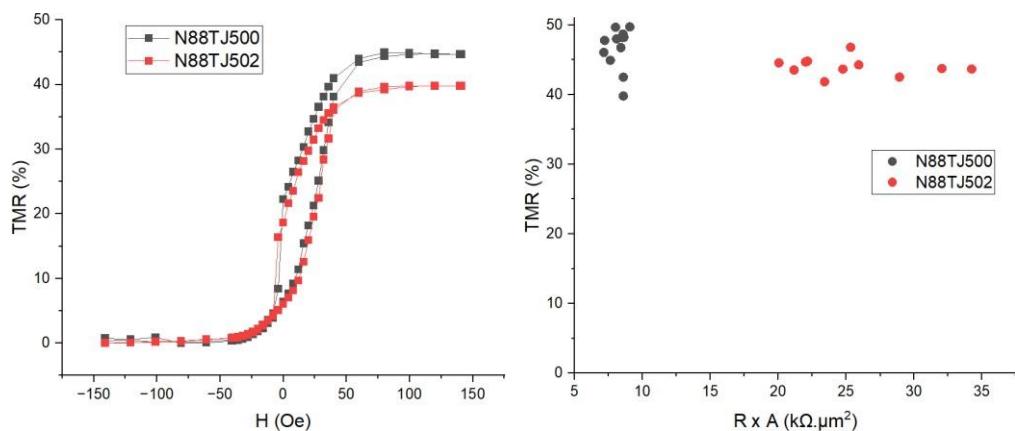


Figura 44 – (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o primeiro ensaio (Elaborado pelo autor)

Amostra	s (%/Oe)	Rmin (Ω)	TMR (%)	Hc (Oe)	R x A médio ($\text{k}\Omega\mu\text{m}^2$)	TMR médio (%)
N88TJ500	0,77	$6,4 \times 10^1$	44,9	12,4	$8,2 \pm 0,6$	$46,7 \pm 2,9$
N88TJ502	0,71	$1,9 \times 10^2$	39,6	11,4	$25,4 \pm 4,5$	$44,0 \pm 1,3$

Tabela 3 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão (Elaborado pelo autor)

Ensaio 2: amostras TJ2340 e TJ2341, ambas MTJs baseadas em Al_2O_3 com a presença de SAF, sendo a primeira fixada no topo e a segunda na base (sensor $1 \times 30 \mu\text{m}^2$ – curvas representativas)

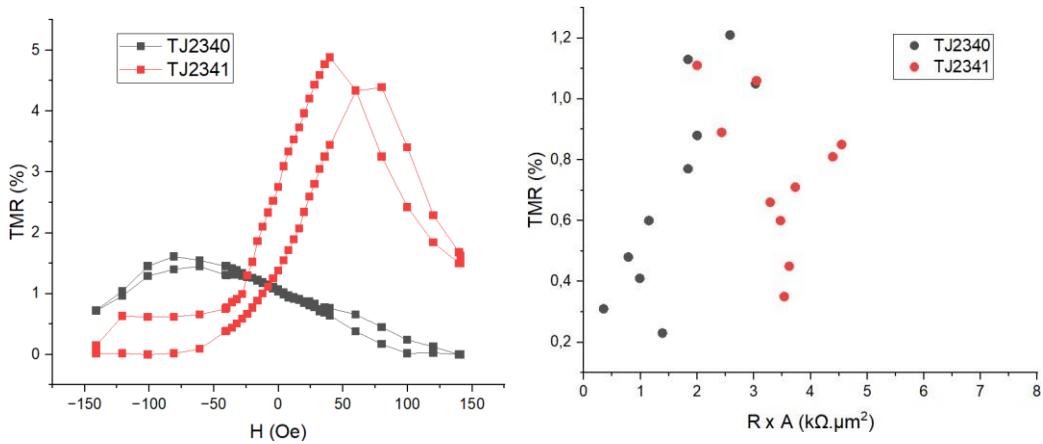


Figura 45 – (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o segundo ensaio (Elaborado pelo autor)

Amostra	s (%/Oe)	R_{min} (Ω)	TMR (%)	H_c (Oe)	$R \times A$ médio ($k\Omega \mu m^2$)	TMR médio (%)
TJ2340	0,01	$3,7 \times 10^1$	0,8	1,9	$1,6 \pm 0,8$	$0,7 \pm 0,3$
TJ2341	0,06	$1,8 \times 10^2$	1,1	16,9	$3,4 \pm 0,8$	$0,8 \pm 0,3$

Tabela 4 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e $R \times A$ com desvio padrão (Elaborado pelo autor)

Ensaio 3: amostras TJ2343, TJ2346, TJ2347, TJ2350 e TJ2351, todas MTJs baseadas em Al_2O_3 variando na presença ou não de SAF e na configuração em relação à localização da camada fixa (sensor $1 \times 30 \mu m^2$ – curvas representativas)

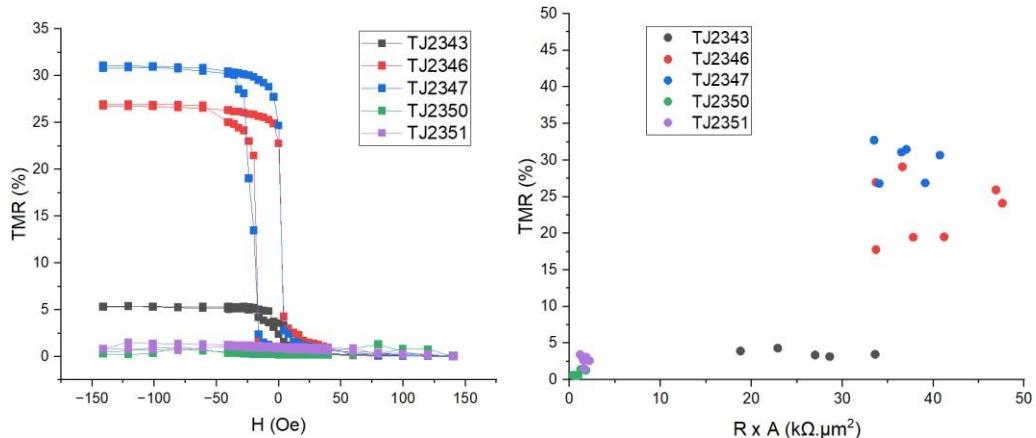


Figura 46 – (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o terceiro ensaio (Elaborado pelo autor)

Amostra	s (%/Oe)	R_{min} (Ω)	TMR (%)	H_c (Oe)	$R \times A$ médio ($k\Omega \mu m^2$)	TMR médio (%)
TJ2343	0,11	$7,9 \times 10^2$	5,4	5,9	$26,2 \pm 5,6$	$4,1 \pm 0,5$
TJ2346	4,42	$1,3 \times 10^3$	26,9	10,2	$39,6 \pm 5,8$	$23,3 \pm 4,4$

TJ2347	4,05	$1,4 \times 10^3$	31,1	11,6	$36,8 \pm 2,8$	$29,9 \pm 2,5$
TJ2350	0,01	$2,1 \times 10^1$	1,3	0,4	$0,9 \pm 0,5$	$0,8 \pm 0,4$
TJ2351	0,03	$5,4 \times 10^1$	1,5	0,5	$1,6 \pm 0,4$	$2,8 \pm 0,7$

Tabela 5 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão (Elaborado pelo autor)

Ensaio 4: amostras TJ3884, TJ3885, TJ3886, TJ3887 e TJ3888, todas MTJs baseadas em MgO fixadas na base com a presença de SAF (sensor $1 \times 30 \mu\text{m}^2$ – curvas representativas)

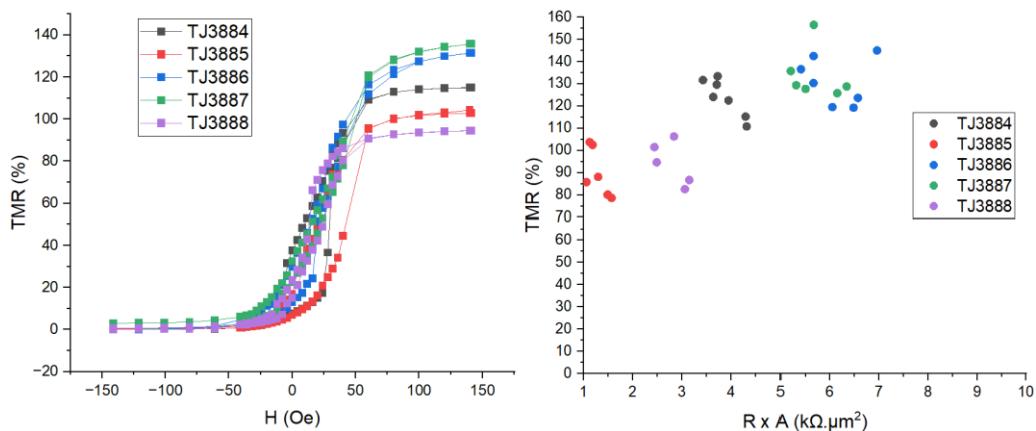


Figura 47 – (a) Curvas de transferência representativas (b) Curva de dispersão RA x TMR para o quarto ensaio (Elaborado pelo autor)

Amostra	s (%/Oe)	Rmin (Ω)	TMR (%)	Hc (Oe)	R x A médio (kΩ·μm²)	TMR médio (%)
TJ3884	2,42	$1,4 \times 10^2$	115,2	7,4	$3,9 \pm 0,3$	$123,9 \pm 8,5$
TJ3885	1,71	$7,7 \times 10^1$	104,3	6,7	$1,3 \pm 0,2$	$89,8 \pm 10,9$
TJ3886	1,97	$1,8 \times 10^2$	131,5	3,2	$6,1 \pm 0,6$	$131,0 \pm 10,7$
TJ3887	2,15	$1,7 \times 10^2$	135,7	2,5	$5,7 \pm 0,5$	$134,0 \pm 11,5$
TJ3888	1,79	$8,3 \times 10^1$	94,6	5,2	$3,1 \pm 0,8$	$94,6 \pm 8,9$

Tabela 6 - Parâmetros das curvas de transferência e resultados médios de TMR e R x A com desvio padrão (Elaborado pelo autor)

Para esse último ensaio também foram analisadas algumas propriedades das amostras como a coercitividade (Hc), o campo de anisotropia (Hk) e o campo de desvio (Hf). Abaixo pode-se ver essas medidas em tabela e como são obtidas por meio da junção das curvas de VSM dos eixos fácil e difícil das amostras.

O Hk é determinado pela média entre os valores de campo Hk- e Hk+ de cruzamento dos eixos, o Hc pela metade da largura de histerese da curva do eixo fácil

e o Hf pela distância entre o 0 e o centro desse campo de histerese.

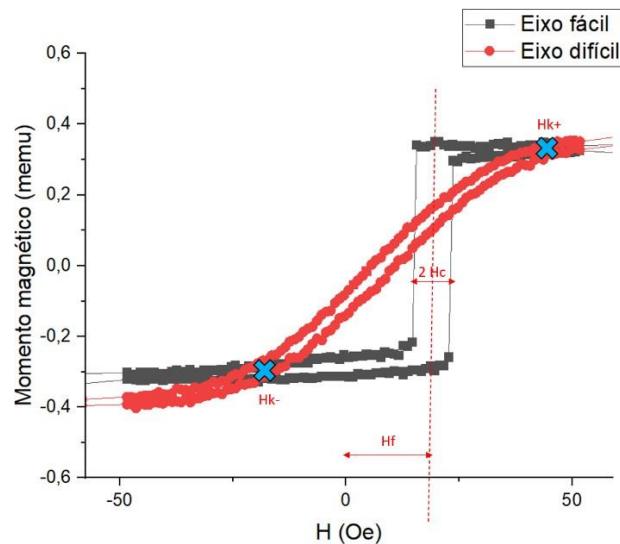


Figura 48 - Cálculo dos parâmetros magnéticos pelas curvas de VSM (Elaborado pelo autor)

Amostra	H _k (Oe)	H _c (Oe)	H _f (Oe)
TJ3884	39	3,1	1,5
TJ3885	29	4,1	19,6
TJ3886	38	3,1	1,7
TJ3887	33	3	13,6
TJ3888	26	4,6	1,4

Tabela 7 - Parâmetros das amostras do quarto ensaio (Elaborado pelo autor)

3.3. SIMULAÇÃO DO MODELO DE STONER-WOHLFARTH

Nesse item buscou-se realizar simulações do modelo de Stoner-Wohlfarth e suas respectivas equações para analisar os parâmetros geométricos do sensor em questão, alterando-os conforme os objetivos de cada uma. Baseado na equação (14) do item 1.6, relacionada à sensibilidade magnética no caso de anisotropia paralela (presente em todas as amostras processadas), plotamos gráficos $\cos \theta \times H$ que mostram visualmente a influência da largura e da espessura do sensor na sensibilidade do mesmo.

Além disso, para relacionar esses parâmetros com a equação (14), consideramos que o campo desmagnetizante N_{xx} pode ser dado por:

$$N_{xx}(t, h) = \frac{t \times \ln^{\frac{(h-\Delta)}{\Delta}}}{\pi \times h} \quad (16)$$

Com h e t , respectivamente, a largura e a espessura do sensor e Δ a incerteza da largura (CARDOSO et al, 2015).

1º objetivo: analisar a influência da largura do sensor na sensibilidade magnética

Para a primeira simulação, a equação pode ser dada como abaixo, como função da largura do sensor:

$$\cos \theta = \frac{H - H_{pd} + H_n}{M_s N_{xx}(h) - H_k}$$

Os outros termos foram estimados com $t = 6 \text{ nm}$; $\Delta = 0,05 \mu\text{m}$; $M_s = 8 \times 10^5 \text{ A/m}$; $H_k = 8 \times 10^2 \text{ A/m}$; $H_n = 4 \times 10^2 \text{ A/m}$ e $H_{pd} = 2,4 \times 10^2 \text{ A/m}$. A largura do sensor foi variada entre 1 a 5 μm , valores também observados nos sensores dos MTJs fabricados, e desse modo obtivemos o gráfico abaixo.

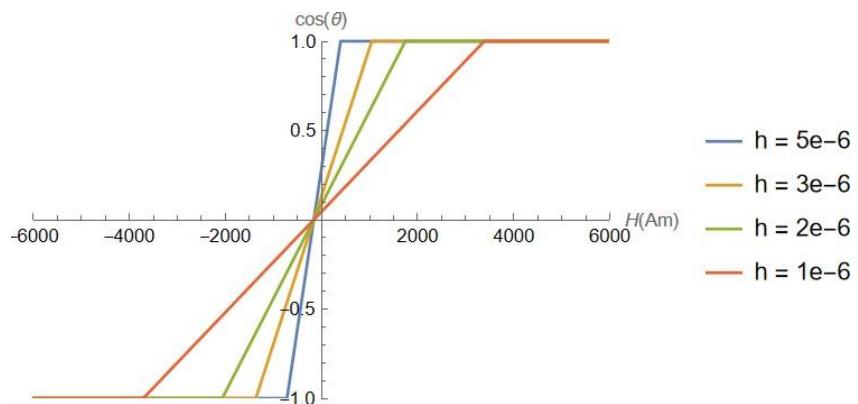


Figura 49 - Gráfico $\cos(\theta)$ x H com variação da largura (Elaborado pelo autor)

2º objetivo: analisar a influência da espessura do sensor na sensibilidade magnética

Para a segunda simulação, a equação pode ser dada como abaixo, como função da espessura do sensor:

$$\cos \theta = \frac{H - H_{pd} + H_n}{M_s N_{xx}(t) - H_k}$$

Os outros termos foram estimados com $h = 3 \mu\text{m}$; $\Delta = 0,05 \mu\text{m}$; $M_s = 8 \times 105 \text{ A/m}$; $H_k = 8 \times 102 \text{ A/m}$; $H_n = 4 \times 102 \text{ A/m}$ e $H_{pd} = 2,4 \times 102 \text{ A/m}$. A espessura do sensor foi variada entre 5 a 20 nm, valores também observados nos sensores dos MTJs fabricados (a maioria entre 5 a 10 nm), e desse modo obtivemos o gráfico abaixo.

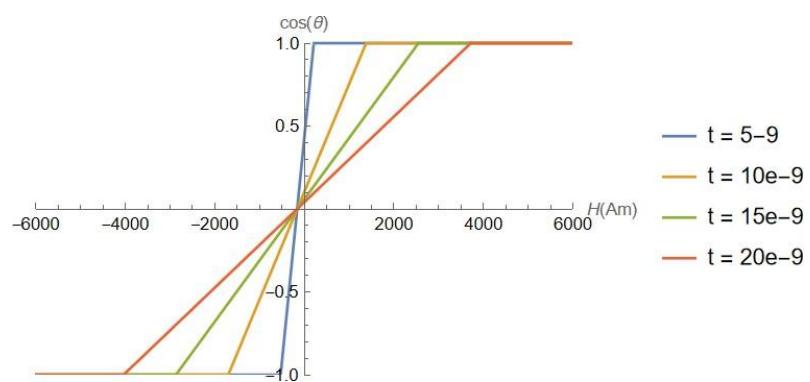


Figura 50 - Gráfico $\cos(\theta)$ x H com variação da espessura (Elaborado pelo autor)

3.4. SIMULAÇÃO DO MODELO DE SIMMONS

Nesse item, um estudo da curva I-V de alguns sensores da amostra TJ3884 foi realizado com base no modelo de Simmons. A tensão de 3 sensores de diferentes dimensões dadas em μm^2 (1×10 , 2×2 e 5×5) da amostra foi medida por meio de 2 pontas do setup 140 Oe enquanto a corrente elétrica fornecida era aumentada.

Substituindo os valores das constantes nas equações (7), (8) e (9) do item 1.5, ficamos com a seguinte equação que será utilizada para determinar os parâmetros da espessura efetiva da barreira de túnel t_{eff} e a altura efetiva da barreira de potencial Φ_{eff} , assim como para a construção da curva J-V:

$$J = 307.277 \frac{1}{t^2} \left[(2\phi_{eff} - V) \exp(-0.72363t\sqrt{\phi_{eff} - V}) - (2\phi_{eff} + V) \exp(-0.72363t\sqrt{2\phi_{eff} + V}) \right] \quad (17)$$

Utilizando os dados experimentais de tensão e corrente, obtivemos as curvas exponenciais aproximadas abaixo para cada sensor analisado.

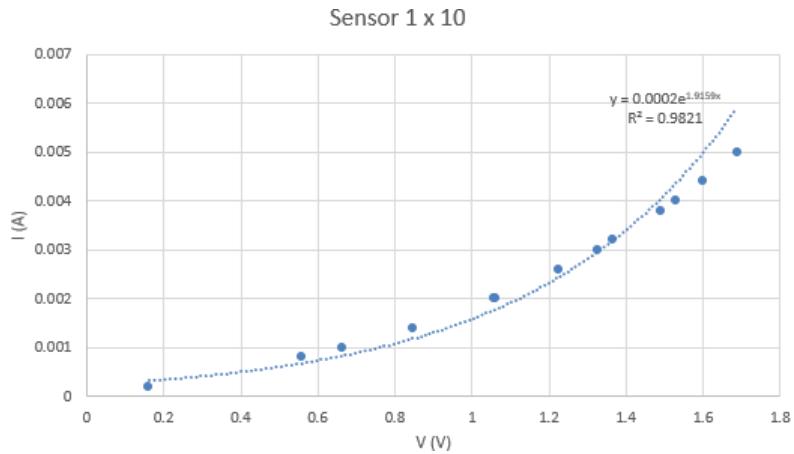


Figura 51 - Curva I-V exponencial do sensor 1 x 10 (Elaborado pelo autor)

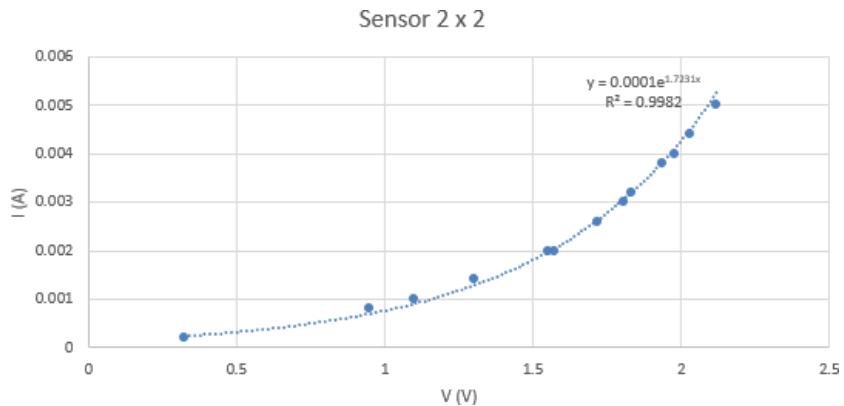


Figura 52 - Curva I-V exponencial do sensor 2 x 2 (Elaborado pelo autor)

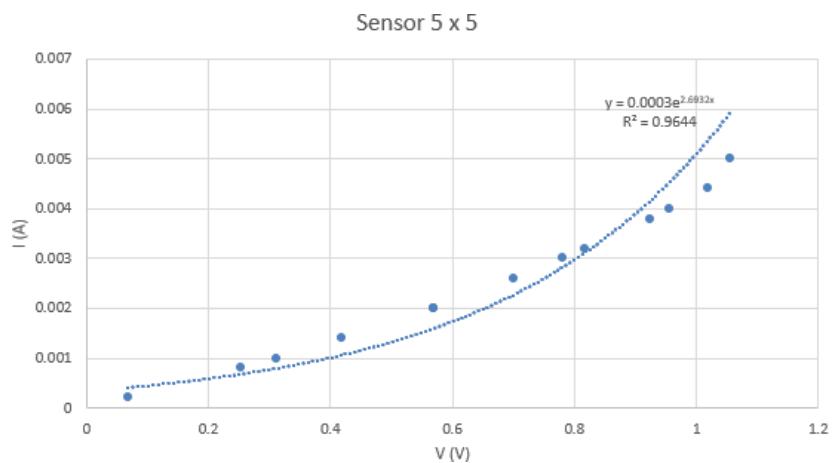


Figura 53 - Curva I-V exponencial do sensor 5 x 5 (Elaborado pelo autor)

A partir da função Solver e da escolha de um ponto pertencente à curva exponencial, pudemos estimar os melhores valores da espessura efetiva da barreira de túnel t_{eff} e a altura efetiva da barreira de potencial Φ_{eff} para cada curva e a média desses valores como se vê na tabela abaixo.

Dimensões (μm^2)	t_{eff} (Å)	Φ_{eff} (eV)
1 x 10	14,37	2,21
2 x 2	14,05	2,10
5 x 5	13,90	1,91
Valores médios	$14,11 \pm 0,24$	$2,07 \pm 0,15$

Tabela 8 - Parâmetros t_{eff} e Φ_{eff} estimados para cada curva (Elaborado pelo autor)

Utilizando os valores médios ajustados para esses parâmetros, traçamos uma curva densidade de corrente J (valores de corrente divididos pela área de cada sensor) por voltagem V , conforme a equação (17) e com os dados experimentais recolhidos, que pode ser vista abaixo, na qual a curva pontilhada verde refere-se à curva do modelo de Simmons e os pontos em vermelho aos valores experimentais.

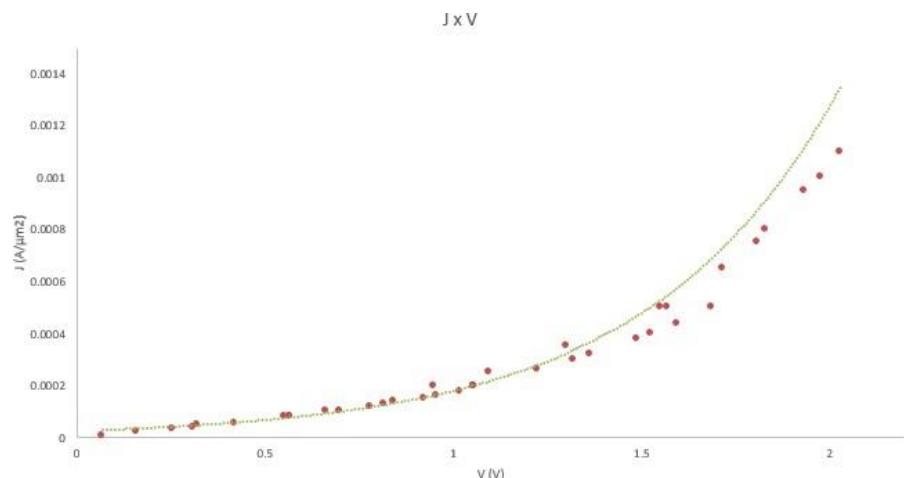


Figura 54 - Curva J-V para os sensores da amostra TJ3884 (Elaborado pelo autor)

4. DISCUSSÃO

4.1. CURVAS DE TRANSFERÊNCIA, R X A E SENSIBILIDADE MAGNÉTICA

Ensaio 1: amostras N88TJ500 e N88TJ502, ambas MTJs baseadas em MgO fixadas na base com a presença de SAF.

Ambas as amostras apresentaram resultados de TMR aquém do esperado e anteriormente obtido na literatura: 45% em média diante ao intervalo padrão de 150% a 200% observado na maioria dos MTJs baseados em MgO. Assim, mesmo com um

comportamento relativamente linear de coercitividade próxima a 10 Oe, a sensibilidade magnética calculada foi baixa, por volta dos 0,75%/Oe. O TMR e a relação RxA das amostras apresentou pequena dispersão, com RxA mais significativo na N88TJ502.

Algumas explicações para esses resultados giram em torno da etapa de deposição da stack e do processamento em si. O MgO, por ser cristalino, necessita de uma maior potência de deposição do que quando comparado ao Al₂O₃ amorf. Pode ter havido variações nas taxas de deposição na máquina Nordiko 3000, levando a espessuras das camadas da stack menores do que o planejado. Além de que outros fatores, como a qualidade do vácuo e do alvo de MgO, podem ter contribuído para os resultados obtidos.

Ademais, nas etapas de gravura, cruciais no processamento do MTJ, muito provavelmente ocorreram imprecisões na determinação do tempo de gravura necessário e dos ângulos entre o feixe e amostra utilizados que acarretaram numa remoção indevida de material. Os tempos e ângulos utilizados também podem não ter sido suficientes para remover toda a redeposição no pilar, resultando em valor mais baixo de TMR. A própria eficiência da máquina Nordiko 3600 no momento do processamento pode também ter afetado os resultados.

Por fim, é válido destacar que a última fotolitografia foi realizada com uma potência do laser igual a das anteriores (85 W) e que se mostrou insuficiente para a definição adequada das estruturas, contribuindo para resultados bem abaixo dos ideais. Esse ponto foi corrigido nos próximos ensaios a uma potência de 100 W.

Ensaio 2: amostras TJ2340 e TJ2341, ambas MTJs baseadas em Al₂O₃ com a presença de SAF, sendo a primeira fixada no topo e a segunda na base.

As amostras apresentaram resultados insatisfatórios em termos de TMR, linearidade e sensibilidade magnética. Não foi observado um comportamento característico de um sensor magnético.

Isso pode ser explicado já pela observação das curvas de VSM do eixo fácil das amostras: desprezível presença de polarização de troca e sem a característica subida abrupta de mudança de sentido da camada livre observada em um sensor magnético típico, como pode ser visto abaixo.

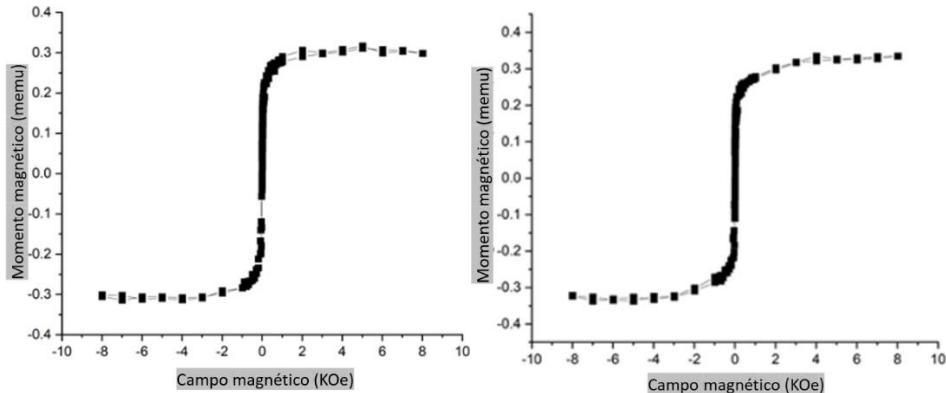


Figura 55 - Curvas de VSM das amostras TJ2340 e TJ2341 (Elaborado pelo autor)

Tais resultados muito provavelmente se deram por uma stack composta de uma camada amortecedora insuficiente (menos de 20 nm) e uma barreira de túnel de Al_2O_3 de baixa espessura.

Ensaio 3: amostras TJ2343, TJ2346, TJ2347, TJ2350 e TJ2351, todas MTJs baseadas em Al_2O_3 variando na presença ou não de SAF e na configuração em relação à localização da camada fixa.

Nesse ensaio, foi observada claramente a influência da espessura da barreira de túnel. As amostras em que se manteve os 8 Å de Al (TJ2350 e TJ2351) não apresentaram comportamento típico de sensor magnético com resultados próximos às amostras do ensaio anterior. As camadas ferromagnéticas muito próximas da barreira (baixa espessura) levam a um acoplamento das mesmas, de modo que a camada de referência tende a se comportar como a camada livre, paralelas entre si, não havendo variação significativa da resistência e assim impactando os valores de TMR observados.

Em relação às amostras cuja espessura da barreira era de 13 Å de Al, o comportamento magnético foi observado. A amostra TJ2343 sem SAF apresentou resultados muito abaixo quando comparada às amostras TJ2346 e TJ2347 com SAF. Enquanto que para a primeira o TMR foi próximo a 5%, nas outras esse chegou a quase 30%, valor mais próximo aos encontrados na literatura, geralmente de 40 a 50%. Outra grande diferença foi na sensibilidade magnética: a TJ2343 apresentou baixa sensibilidade de 0,11%/Oe, enquanto as TJ2346 e TJ2347 apresentaram valores altos e maiores que 4%/Oe com uma coercitividade aceitável próxima a 10 Oe. As diferenças entre TJ2346 e TJ2347 foram mais sutis, já que a única diferença entre elas era na espessura do espaçador Ru utilizado (respectivamente, 8 Å e 9 Å).

Ensaio 4: amostras TJ3884, TJ3885, TJ3886, TJ3887 e TJ3888, todas MTJs baseadas em MgO fixadas na base com a presença de SAF.

Nesse ensaio, a importância da qualidade do processamento foi explicitada. A amostra TJ3884, de igual stack à amostra N88TJ500 do primeiro ensaio, apresentou resultados significativamente melhores. Em termos de TMR, quase o triplo (45% a 125%), sensibilidade magnética mais que triplicou (0,77%/Oe a 2,42%/Oe), enquanto a coercitividade caiu para quase metade.

Depois de alguns ajustes e calibrações, as amostras desse ensaio foram depositadas na máquina Nordiko 3600. A curva de VSM da TJ3884, quando comparada à da N88TJ500 demonstra um melhor comportamento magnético logo na etapa de deposição. Pode-se perceber que a variação de momento magnético na região central mais que dobra (-0,1 a 0,1 memu x -0,3 a 0,3 memu), o que reflete nos melhores resultados descritos.

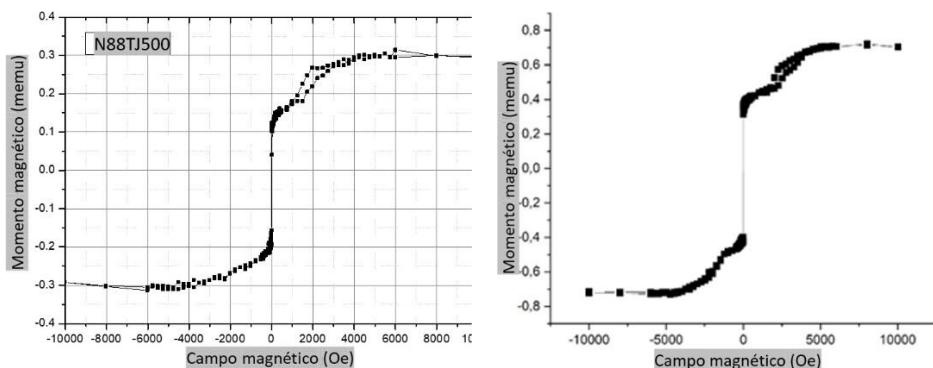


Figura 56 - Curvas de VSM das amostras N88TJ500 e TJ3884 (Elaborado pelo autor)

Pontuamos também, para melhores resultados encontrados, os ajustes nos cálculos do tempo e do total de material extraído nas etapas de gravura e o aumento da potência do laser utilizada na terceira fotolitografia do processamento.

Outro ponto que analisamos nesse ensaio foi a possível influência das variações de espessura dos materiais da camada sensora: CoFeB e NiFe. Numa visão geral, podemos inferir que todas as amostras apresentaram comportamentos magnéticos coerentes e apropriados a função de sensor magnético e RxA próximos e pouco dispersos.

Não foi observada uma relação clara e direta da influência da espessura dos materiais, mas alguns pontos puderam ser destacados. As amostras TJ3885 e

TJ3888 apresentaram TMR e sensibilidade magnética menores enquanto as amostras TJ3884, TJ3886 e TJ3887 tiveram TMR próximos a 130% e sensibilidade superiores a 2%/Oe. Além disso, essas três amostras também apresentaram H_k mais elevados e H_c menores, o que contribuem positivamente para uma maior sensibilidade e mais linearidade.

4.2. SIMULAÇÃO DO MODELO DE STONER-WOHLFARTH

Na primeira simulação, com base nas curvas obtidas para as diferentes larguras testadas, podemos inferir que a sensibilidade é maior para uma largura de sensor também maior. Com base na amostra TJ3884, determinamos as sensibilidades magnéticas para áreas de sensores cujo comprimento era o mesmo enquanto a largura variava, de modo que temos a tabela a seguir.

Dimensões (μm^2)	Sensibilidade (%/Oe)
1 x 10	0,96
2 x 10	1,68
3 x 10	2,42
1 x 20	0,97
2 x 20	1,84
3 x 20	2,18
1 x 30	1,01
2 x 30	1,19
3 x 30	1,48

Tabela 9 - Sensibilidades magnéticas por área do sensor da amostra TJ3884 (Elaborado pelo autor)

Podemos verificar que em todos os comprimentos (10, 20 e 30 μm) quanto maior a largura atrelada, a sensibilidade observada foi maior também.

Na segunda simulação, com base nas curvas obtidas para as diferentes espessuras testadas, foi observado que a sensibilidade é maior para uma espessura de sensor menor. Fizemos uma análise dessa relação considerando as sensibilidades representativas dos sensores de áreas 3 x 10 e 3 x 20 (em μm^2) das amostras TJ3886, TJ3887 e TJ3888 (cuja única diferença na composição da stack era na espessura de NiFe na camada sensora, respectivamente, 80, 60 e 40 Å), de modo que temos a

tabela a seguir.

Amostra	Sensibilidade 3 x 10 (%/Oe)	Sensibilidade 3 x 20 (%/Oe)
TJ3886	1,97	1,72
TJ3887	2,15	1,90
TJ3888	1,79	1,56

Tabela 10 - Sensibilidades magnéticas das amostras TJ3886, TJ3887 e TJ3888 (Elaborado pelo autor)

Podemos observar que nesse caso a relação inversamente proporcional da espessura da camada sensora com a sensibilidade da mesma não é inteiramente verificada, com TJ3888 apresentando uma sensibilidade mais baixa, apesar de ter uma menor espessura. Esse fato pode decorrer de imprecisões do próprio processamento da amostra que leva a um TMR mais baixo ou mesmo de que essa relação pode não ser tão presente para o NiFe como no CoFeB.

4.3. SIMULAÇÃO DO MODELO DE SIMMONS

Com base nas curvas traçadas, podemos inferir que os sensores analisados comportaram-se como o esperado: a relação I-V aproxima-se de uma função exponencial.

Outro ponto a ser mencionado é o valor estimado da espessura da barreira. Este foi um pouco mais baixo ($14,1 \text{ \AA}$) que o da barreira depositada (15 \AA). Esse fato pode ser decorrente à difusão de átomos na interface com as outras camadas e à presença de pequenos buracos na barreira de MgO.

Em relação à curva J-V traçada baseada na equação do modelo de Simmons e nos parâmetros estimados, houve uma correspondência significativa aos valores experimentais. Para os pontos nos quais a voltagem era menor a 1 V, o modelo mostrou-se muito preciso, no entanto, correspondendo menos para valores maiores.

5. CONCLUSÃO

No trabalho desenvolvido em questão, vários sensores MTJ baseados em Al_2O_3 e MgO foram microfabricados a fim de se estudar diversos parâmetros e

características do sensor, buscando sua otimização.

Por meio de ensaios, simulações e comparações, elementos da física quântica e ciência dos materiais, como o efeito TMR, a sensibilidade magnética, a linearidade das curvas de transferência e o próprio processo de micro e nanofabricação dos MTJs, puderam ser discutidos.

A otimização dos sensores foi observada tanto para os MTJs de Al_2O_3 quanto para os de MgO . No primeiro grupo essa foi obtida por meio de um aumento significativo nas espessuras da camada amortecedora (quase o triplo) e na barreira de túnel (quase o dobro), permitindo-se observar curvas de transferência de alta sensibilidade (próxima a 4,5%/Oe), valor de TMR significativo (em torno de 30%) mesmo com coercitividade significativa (na faixa dos 10 Oe).

No segundo grupo o processamento em si foi a principal influência nos resultados significativamente melhores, quando comparando as amostras do primeiro ensaio ao último. A deposição da stack realizada na máquina Nordiko 3600 e definição mais precisa das etapas de gravura, principalmente a segunda, trouxeram um aumento considerável em termos de TMR (passou de 45% a pouco mais de 130%), linearidade (H_c caiu pela metade) e sensibilidade magnética (triplicou a quase 2,5%/Oe). Não se observou uma influência significativa na espessura escolhida para o CoFeB e NiFe.

Em relação aos valores de $R \times A$, tanto para as amostras baseadas em Al_2O_3 quanto as em MgO , foi observada uma dispersão relativamente pequena, com as amostras variando de $0,5 \text{ k}\Omega\mu\text{m}^2$ a $50 \text{ k}\Omega\mu\text{m}^2$.

Por meio de algumas simulações no Wolfram Mathematica, o modelo de Stoner Wohlfarth pôde ser explicitado em termos dos parâmetros geométricos do sensor (largura e espessura) e sua relação com a sensibilidade, mostrando que em teoria uma maior largura e menor espessura da camada sensora levariam a um sensor mais efetivo.

Utilizando da equação de Simmons e da estimativa de parâmetros no Excel, obtivemos a espessura efetiva média e a altura efetiva média da barreira para o caso do MTJ baseado em MgO pela curva I-V de 3 sensores. A relação I-V nos sensores comportou-se de maneira exponencial conforme o esperado e o modelo de Simmons aproximou-se significativamente aos valores experimentais na curva J-V.

6. REFERÊNCIAS

Alconox, Inc. **ALCONOX Technical Bulletin ©2018.** Disponível em: https://www.alconox.com/wp-content/uploads/2020/06/Alconox_tech_bull.pdf. Acesso em: 18 jul. 2022.

AZoNano. **Magnesium Oxide (MgO) Nanoparticles - Properties, Applications,** 2013. Disponível em: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3353>. Acesso em: 20 abr. 2022.

BAIBICH, M. N.; **Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices.** Phys. Rev. Lett., v. 61, p. 2472–2475, 1988.

BARADUC, C. et al. **Introduction to spin transfer torque.** Nanomagnetism and Spintronics, p. 173-192, 2010.

BARTHÉLÉMY, A. et al. **Giant magnetoresistance in magnetic nanostructures.** Nanostructured Materials, v. 6, p. 217-226, 1995.

Basics of Microstructuring, MicroChemicals. **Lift-off Processes with Photoresist.** Disponível em: https://www.microchemicals.com/technical_information/lift_off_photoresist.pdf. Acesso em: 2 ago. 2022.

BINASCH, G. et al. **Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange.** Phys. Rev. B, v. 39, p. 4828-4830, 1989.

BOWEN, M. et al. **Large magnetoresistance in Fe/MgO/FeCo(001) epitaxial tunnel junctions on GaAs(001).** Applied Physics Letters, v. 79, n. 11, 2001.

BUTLER, W. H. et al. **Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches.** Physical Review, B: Condensed Matter, v. 63, 2001.

CARDOSO, S. et al. **Linearization strategies for high sensitivity magnetoresistive sensors.** Eur. Phys. J. Appl. Phys., v. 72, 2015.

CeramTec. **The Most Well-known Oxide Ceramic Material.** Disponível em: <https://www.ceramtec-industrial.com/en/materials/aluminum-oxide>. Acesso em: 25 abr. 2022.

EPHRATH, L. M. **Selective Etching of Silicon Dioxide Using Reactive Ion Etching with CF₄ - H₂.** Journal of The Electrochemical Society, v. 126, n. 8, 1979.
FÄHNLE, M. **Note on RKKY interactions in nearly-free electron systems.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 10, p. 9-13, 1979.

FERREIRA, R. A. **Ion Beam Deposited Magnetic Spin Tunnel Junctions targeting HDD Read Heads, Non-volatile Memories and Magnetic Field Sensor Applications.** 2008. 297 p. Dissertation (Doctor (PhD) of Science Degree in Engineering Physics) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa,

Portugal, 2008.

Fujifilm Electronic Materials. **Microstrip® 300: Technical Product Information.**

Disponível em: <https://asset.fujifilm.com/www/us/files/2020-03/20763dec74933b7cdbf2b50ed281ee80/MS-3001-rev2.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2022.

HIROHATA, A. et al. **Review on spintronics: Principles and device applications.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 509, 2020.

IGARASHI, J. et al. **Magnetic-field-angle dependence of coercivity in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis.** Applied Physics Letters, v. 111, 2017.

IKEDA, S. et al. **Tunnel magnetoresistance of 604% at 300K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature.** Applied Physics Letters, v. 93, 2008.

IKUMAPAYI, O. et al. **Microfabrication and nanotechnology in manufacturing system - An overview.** Materials Today: Proceedings, v. 44, 2020.

INESC-MN. **Single Level Processing.** Disponível em: <https://sites.google.com/site/inescmn/products-services/single-level-processing>. Acesso em: 20 jul. 2022.

Institut Für Seltene. **Aluminum oxides 99%.** Disponível em: <https://pt.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-sondermetalle/aluminium/aluminium-oxide-99/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

ISO 14644-1:2015. **Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration.** Disponível em: <https://www.iso.org/standard/53394.html>. Acesso em: 15 jul. 2022.

JOHNSON, M.; SILSBEE, R. H. **Interfacial charge-spin coupling: Injection and detection of spin magnetization in metals.** Phys. Rev. Lett., v. 55, p.1790-1793, 1985.

JULLIERE, M.; **Tunneling between ferromagnetic films.** Physics Letters A, v. 54, n. 3, p. 225-226, 1975.

KAFLE, B. P. **Chemical Analysis and Material Characterization by Spectrophotometry: Chapter 6 - Introduction to nanomaterials and application of UV-Visible spectroscopy for their characterization.** Elsevier, p.147-198, 2019.

KAMMERER, J. B. et al. **Tuning of a single-MTJ two-axis magnetometer: application of the Stoner-Wohlfarth model.** Sensors 2004 IEEE, v. 2, p. 1067-1070, 2004.

KATAYAMA, T. et al. **Interlayer Exchange Coupling in Fe/MgO/Fe Magnetic Tunnel Junctions.** Applied Physics Letters, v. 89, 2006.

KERN, W. **Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology**. Westwood, New Jersey: Noyes Publications, 1993.

KINSLER, P. **Faraday's Law and Magnetic Induction: Cause and Effect, Experiment and Theory**. Physics, v. 2, p. 148-161, 2020.

KUBOTA, T. et al. **Tunneling Spin Polarization and Magnetic Properties of Co-Fe-B Alloys and Their Dependence on Boron Content**. Jpn. J. Appl. Phys. 46, L250, 2007.

KUMAR, N. et al. **Performance and emission characteristics of a low heat rejection spark ignited engine fuelled with E20**. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012.

LIU, E.; DE BOECK, J. **Materials and designs of magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy for high-density memory applications**. 2018. 212 p. Dissertation (Doctor of Engineering Science (PhD): Electrical Engineering) – Faculty of Engineering Science, Arenberg Doctoral School, KU Leuven, Belgium, 2018. Disponível em: https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/search?query=any,contains,lirias2300209&tab=LIRIAS&search_scope=lirias_profile&vid=32KUL_KUL:Lirias&foolmefull=1. Acesso em: 5 jul. 2022.

LV, H. **Optimization of Perpendicular Anisotropy Materials for High Performance Spin Transfer Torque Devices**. 2019. 149 p. Dissertation (Doctor (PhD) of Science Degree in Physics) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2019. Disponível em: <https://bibliotecas.utl.pt/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=530377&shelfbrowse>. Acesso em: 10 abr. 2022.

MATHEWS, S. A. et al. **Hysteresis branch crossing and the Stoner-Wohlfarth model**. Sci Rep, v. 10, 2020.

MATHON, J.; UMERSKI, A. **Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe (001) junction**. Phys. Rev. B, v. 63, 2001.

MENG, H. et al. **Annealing effects on CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular anisotropy**. Journal of Applied Physics, v. 110, 2011.

MIYAZAKI, T.; TEZUKA, N. **Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 139, p. L231-L234, 1995.

MOODERA, J. S. et al. **Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions**. Phys. Rev, v. 74, p. 3273–6, 1995.

National Research Council. **Condensed-Matter and Materials Physics: Basic Research for Tomorrow's Technology**. Washington, DC: The National Academies Press, 1999. 324 p.

OH, K. W. et al. **2.02 - Magnetic Actuation in Comprehensive Microsystems.** Elsevier, p. 39-68, 2008.

OSBORN, J. A. **Demagnetizing factors of the general ellipsoid.** Phys. Rev. 67, v. 351, 1945.

PAK, M. et al. **Screening of 193i and EUV lithography process options for STT-MRAM orthogonal array MTJ pillars.** Micro and Nano Engineering, v. 10, 2021.

PARKIN, S. P. et al. **Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers.** Nature Materials, v. 3, p. 862–867, 2004.

Q Source Inc. **Clean Room Garments for All Clean Room Classes.** Disponível em: <https://www.qsource.com/catsearch/51/clean-room-garments>. Acesso em: 15 jul. 2022.

REY, C. **Superconductors in the Power Grid: 2 - Fundamentals of superconductivity.** Woodhead Publishing Series in Energy, p. 29-73, 2015.

SAJJAN, M. **An overview on zirconia: trends in prosthodontics and implantology.** V. 6, p. 32-39, 2015.

SHIN, K. H. et al. **Vibrating sample magnetometer using a multilayer piezoelectric actuator.** Physica Status Solidi, v. 241, p.1633-1636, 2004.

SIMMONS, J. **Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film.** Journal of Applied Physics, v. 34, n. 6, p. 1793–1803, 1963.

SONG, C. et al. **Spin-orbit torques: Materials, mechanisms, performances, and potential applications.** Progress in Materials Science, v. 118, 2021.

STAMPS, R. **Mechanisms for exchange bias.** Journal of Physics D: Applied Physics, v. 33, n. 23, R247, 2000.

TANNOUS, C.; GIERALTOWSKI, J. **The Stoner-Wohlfarth model of ferromagnetism.** European Journal of Physics, v. 29, n. 3, 2008.

Técnico Lisboa. **Candidaturas a Estágios de Verão do INESC MN – 2022.** Disponível em: <https://tecnico.ulisboa.pt/pt/noticias/candidaturas-a-estagios-de-verao-do-inesc-mn-2022/>. Acesso em: 15 jul. 2022.

UKEssays. **Vibrating Sample Magnetometer (VSM).** 2018. Disponível em: <https://www.ukessays.com/essays/physics/vibrating-sample-magnetometer-vsm-6963.php?vref=1>. Acesso em: 25 jul. 2022.

UMETSU, R. Y. et al. **Very high antiferromagnetic stability of L10-type MnIr alloys.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 272–276, part 2, p.790-791, 2004.

VALENÇA, A. L. Modelo molecular para o magnetismo em ferrita de cobalto. 2016. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/24423>. Acesso em: 8 out. 2022.

VENTOSA, T. L. High Performance Magnetic Tunnel Junctions for Magnetic Scanning. 2017. 65 p. Dissertation (Master of Science Degree in Engineering Physics) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2017. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970719973966481/Thesis.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2022.

WANG, D. Spin dependent tunneling junctions with reduced Neel coupling. Journal of Applied Physics, v. 93, 2003.

WILLSON, C. G.; STEWART, M. D. Photoresists. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, p. 6973-6977, 2001.

Yield Engineering Systems Inc. **YES HMDS Vapor prime process application note.** Disponível em: <https://scholvin.scripts.mit.edu/nano/Documents/HMDS%20Application%20Note.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2022.

YUASA, S. et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. Nature Materials, v. 3, p. 868-871, 2004.

YUASA, S.; DJAYAPRAWIRA D. D. Giant tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with a crystalline mgo001 barrier. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 40, n. 21, R337, 2007.

ZAOUK, R. et al. Introduction to Microfabrication Techniques. Methods in molecular biology (Clifton, N.J.), v. 321, p. 5-15, 2006.

ZHANG, Y.; Edge Effects on Magnetic Proprieties of CoFeB-MgO Based Nanodevice. Classical Physics Université Paris Saclay (COmUE), Fert Beijing Institute, 2018.

ZHAO, W. et al. High Speed, High Stability and Low Power Sensing Amplifier for MTJ/CMOS Hybrid Logic Circuits. IEEE Transactions on Magnetics, v. 45, n. 10, p. 3784-3787, 2009.