

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

Wagner Henrique Rabelo

**FONTE DE POTÊNCIA PARA SÍNTESE DE FILMES FINOS POR
PULVERIZAÇÃO CATÓDICA NA FAIXA DE kHz**

SOROCABA

2018

Wagner Henrique Rabelo

**FONTE DE POTÊNCIA PARA SÍNTESE DE FILMES FINOS POR
PULVERIZAÇÃO CATÓDICA NA FAIXA DE kHz**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração Materiais, sob orientação do Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto.

SOROCABA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca da F.C.L. – Assis – Unesp

R114f Rabelo, Wagner Henrique
Fonte de potência para síntese de filmes finos por pulveri-
zação catódica na faixa de khz / Wagner Henrique Rabelo.
Sorocaba, 2018.
137 f. : il.

Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba
Orientador: Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto

1. Óxidos. 2. Compostos de zinco. 3. Pulverizador de
plasma. I. Título.

CDD 546.6

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE WAGNER HENRIQUE RABELO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 28 dias do mês de maio do ano de 2018, às 14:00 horas, no(a) UNESP - Campus de Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO RIBEIRO BORTOLETO - Orientador(a) do(a) Curso de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP/Sorocaba, Prof. Dr. JOSE HUMBERTO DIAS DA SILVA do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências - UNESP/ Bauru, Prof. Dr. JOHNNY VILCARROMERO LOPEZ do(a) Departamento de Física, Química e Matemática / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar/Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de WAGNER HENRIQUE RABELO, intitulada **Fonte de Potência para Síntese de Filmes Finos por Pulverização Catódica na Faixa de kHz**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO RIBEIRO BORTOLETO


Prof. Dr. JOSE HUMBERTO DIAS DA SILVA


Prof. Dr. JOHNNY VILCARROMERO LOPEZ

**Dedico este trabalho à Maria da Penha, ao
Carlos Alberto Rabelo, ao Kelvin Henrique e a
Carolina Petrisin.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe por ter acreditado nos meus sonhos e por ela ter feito tudo que fosse possível e estivesse ao seu alcance para que eu realizasse este trabalho/projeto e, também, pelo seu apoio e carinho em todos os momentos, os difíceis e os felizes pelo qual passei nos anos que estive aqui e também pelas horas de conversas no telefone buscando sempre me fazer companhia.

Agradeço ao meu pai que sempre esteve me dando força e me divertindo com seu jeito engraçado e animado de ser.

Agradeço ao meu irmão pela sua vocação de ser irmão, sempre brigando comigo, mas no fundo torcendo e me dando força nas horas que eu precisava.

Agradeço à Carol, pela sua companhia e carinho, imprescindíveis nesses últimos nove anos ocupando um lugar muito especial na minha vida, sempre me apoiando e ajudando em todos os momentos.

Agradeço ao meu Orientador, Prof. Bortoleto, por ter acreditado na proposta deste trabalho.

Agradeço ao meu Co orientador, Prof. Everson, por todo o apoio e pelo auxílio de forma dedicada.

Agradeço ao meu amigo, Michel, por todo o auxílio na execução dos testes de laboratório.

Agradeço ao Sandro, técnico do laboratório da UNESP de Sorocaba, sempre muito atencioso e prestativo, aos meus pedidos.

Agradeço ao meu amigo Bruno que doou do seu tempo para me auxiliar.

Finalmente, agradeço a todos que fizeram parte de minha vida e tiveram sua contribuição no meu aprendizado e experiência de vida. Agradeço aos meus amigos que foram muito importantes e tornaram meus dias melhores.

RABELO, W.H. **Fonte de potência para síntese de filmes finos por pulverização catódica na faixa de kHz.** 2018. 123f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) - UNESP, Faculdade de Ciências, Bauru, 2018.

RESUMO

O avanço das técnicas de deposição de filmes finos sobre as superfícies dos materiais tem permitido agregar valor e dar novas funcionalidades aos produtos. Atualmente, os filmes finos de óxido de estanho dopado com índio (ITO) têm encontrado grande aplicação no mercado. Entretanto, devido à pouca disponibilidade do índio na natureza e aos altos custos envolvidos na sua aquisição, elementos alternativos estão sendo estudados para sua substituição. Nesse contexto, destaca-se o óxido de zinco dopado com alumínio (AZO) como um promissor substituto, devido às características de elevada transmissividade, baixa resistividade e *band gap* da ordem de 3,37 eV, que permitem sua aplicação na síntese de filmes finos semicondutores. Com base no exposto, neste trabalho, foi projetado e desenvolvido o protótipo de uma fonte amplificadora de potência (FAP) de corrente alternada (AC) em baixa frequência, operando entre 15 a 40 kHz, responsável por iniciar e sustentar o campo elétrico utilizado para a geração do plasma. Esta FAP foi utilizada para a deposição de filmes finos de (AZO) por meio da técnica de *magnetron sputtering*. A análise das características morfológicas, ópticas e elétricas dos filmes de AZO produzidos neste estudo resultaram em uma transmitância superior a 80%, energia de *band gap* de 3,82 eV, e resistividade de $1,46 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, permitindo concluir que o filme produzido se comporta como um TCO (óxido transparente condutivo). A comparação desses resultados com trabalhos disponíveis na literatura, permite concluir que a fonte amplificadora de potência desenvolvida nesta dissertação possibilita a obtenção de

filmes finos de AZO com condutividade e transparência superiores àqueles produzidos com fontes operando em radiofrequência, técnica atualmente disponível e amplamente utilizada no mercado.

Palavras-chave: pulverização catódica, fonte de potência de plasma, filmes finos de AZO, óxido de zinco dopado com alumínio.

RABELO, W.H. **Power source for thin film deposition by magnetron sputtering in kHz.** 2018. 123p. Monograph (Master in Science and Technology of Materials) - UNESP, College of Science, Bauru, 2018.

ABSTRACT

The development of thin films deposition techniques allows to increase value and give new features to the materials. Currently, indium doped zinc oxide (ITO) is widely used in the market. However, due to the low availability of the indium in the nature and the high costs involved on its acquisition, alternative elements are being studied for its replacement. Aluminum doped zinc oxide (AZO) stands out as a promising substitute, mainly because of its characteristics, such as high transmissivity, low resistivity and band gap value of 3.37 eV. That allow the application of AZO in the synthesis of thin films semiconductors. In this work, it was developed a prototype of a plasma power source amplifier (FAP) to operate in alternating current (AC) and low frequency (15 - 40 kHz), responsible for initiating and sustaining the electric field used for plasma generation. This FAP was used to deposit AZO thin films by the technique of magnetron sputtering. The analysis of the morphological, optical and electrical characteristics of the AZO films produced in this study resulted in more than 80% transmittance, band gap energy value of 3,82eV, and resistivity of $1,46 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. The thin films synthesized was classified as transparent conductive oxide (TCO). The comparison of these results with the characteristics of similar films available in the bibliography, allows to conclude that the power amplifier source developed in this dissertation makes it possible to obtain thin films of AZO with conductivity and

transparency superior to those produced with RF magnetron sputtering, technique currently available and widely used in the market.

Key words: magnetron sputtering, drive plasma "power amplifier", thin film of AZO, aluminum-doped zinc oxide films.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Conjunto para geração de plasma	18
Figura 2 - Esquema completo de funcionamento do plasma: (a) reator; (b) casador de impedância; (c) amplificador de potência; (d) fonte de corrente contínua (DC); (e) gerador de função.....	19
Figura 3 – Modelo simplificado de uma Fonte DC Analógica: (1) Ponte retificadora; (2) Resistor de pré-carga; (3) Resistor de descarga; (4) Banco de capacitor; (5) transformador.	20
Figura 4 – Balanço energético em um amplificador de potência.....	22
Figura 5 - Classes de operação de um amplificador de potência. I_D = corrente no dreno; V_{GS} = tensão entre a porta e a fonte do MOSFET; $V_{GS(threshold)}$ = tensão de threshold (ou tensão limiar); $V_{GS(pinch-off)}$ = tensão de pinçamento do transistor.	25
Figura 6 - Amplificador classe A, configuração seguidora de emissor, onde: v_{cc} = fonte de tensão em corrente contínua; v_i = tensão de entrada; Q_1 = transistor 1; V_L = tensão na carga; R_L = resistência de carga; I_{pol} = corrente de polarização.....	26
Figura 7 - Amplificador classe B, operando em <i>push-pull</i> , onde: v_{cc} = fonte de tensão em corrente contínua; v_i = tensão de entrada; Q_1 = transistor 1; Q_2 = transistor 2; R_L = resistência de carga.	27
Figura 8 - Amplificador classe AB, configuração <i>push-pull</i> , onde: v_{cc} = fonte de tensão em corrente contínua; v_i = tensão de entrada; Q_1 = transistor 1 npn; Q_2 = transistor 2 pnp; V_{pol1} = tensão de polarização 1; V_{pol2} = tensão de polarização 2; R_L = resistência de carga; V_{EE} = tensão entre o emissor e a base do transistor bipolar.....	29
Figura 9 - Fonte Amplificadora com TBJs, onde: $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ e Q_7 são transistores; $R_{1A}, R_{2A}, R_{3A}, R_{4A}, R_{5A}, R_{6A}, R_{7A}$, são resistores; e C_1 corresponde a um capacitor. BIAS (ou polarização, é o ponto de trabalho em que um estágio de amplificação opera quando em repouso).....	30
Figura 10 - Transistor Darlington, onde: I_B = corrente de base; Q_1 = transistor; V_{CE1} = tensão entre coletor e emissor de Q_1 ; Q_2 = transistor; V_{CE2} = tensão entre coletor e emissor de Q_2 ; V_{BE} = tensão de base e emissor ; I_{C1} e I_{C2} = corrente de coletor.	31

Figura 11 - Concepção esquemática do Mosfet de potência, onde: Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6 e Q7 são transístores; R1A, R2A, R3A, R4A, R5A, R6A, R7A, são C1 corresponde a um capacitor. BIAS (ou polarização, é o ponto de trabalho em que um estágio de amplificação opera quando em repouso).	32
Figura 12 - Micrografia da seção transversal de um filme depositado em um substrato (AGUZZOLI et al, 2009 apud QUEIROZ, 2015)	35
Figura 13 - Estrutura cristalina hexagonal do ZnO (wurtzita)	38
Figura 14 - Esquema de funcionamento do perfilômetro.....	40
Figura 15 – Reflexão, transmissão e absorção de um feixe de luz com intensidade I_0 incidindo em um filme de espessura d	41
Figura 16 - O espectro eletromagnético.	42
Figura 17 - Representação idealizada da configuração de bandas de condução, banda de valência e energia de <i>gap</i> : (a) material isolante, (b) semiconductor, (c) condutor. E_g e E_f significam energia do <i>gap</i> e energia de Fermi, respectivamente.	45
Figura 18 - Diagrama de bandas com o efeito Burstein-Moss representado. ..	49
Figura 19 - Esquema representativo da estrutura de banda de semicondutores: (a) não dopado; (b) dopado. As áreas cinzas denotam os estados ocupados.	50
Figura 20 - Arranjo para medidas de resistividade pelo método quatro pontas.	51
Figura 21 - Processo de deposição por pulverização catódica (<i>sputtering</i>)	55
Figura 22 - Cinética de partículas: (a) <i>sputtering</i> convencional; (b) <i>magnetron sputtering</i>	56
Figura 23 – Gerador de sinal.....	59
Figura 24 – Esquema em bloco do sistema completo do plasma composto por: FAP (Fonte Amplificadora de Potência); transformador e reator com plasma..	60
Figura 25 – Fonte Amplificadora de potência (FAP). (a) Fonte DC; (b) Amplificador de potência.	60
Figura 26 - Partes integrantes da topologia do Amplificador de Potência. Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5: transístores TBJ; Q6 e Q7: transístores mosfet; R1A, R2A, R3A, R4A, R5A, R6A, R7A: resistores.	63
Figura 27 - Simplificação do circuito de potência, parte destacado em verde..	64

Figura 28 - Circuito simplificado da parte de potência. V_{sig} = tensão de entrada; $V_{in} = V_{sig}$; V_{out} = tensão de saída do amplificador de potência. V_{be} = tensão entre base e emissor do transistor. R1, R2, R6 e R7 são resistores. Q1 e Q2 são transistores TBJs.	65
Figura 29 - Topologia 2 com transistores MOSFET.	68
Figura 30 - Circuito final com as capacitâncias.	74
Figura 31 - Sistema de controle de temperatura feito pelo controlador Arduino Uno.....	78
Figura 32 - Representação esquemática do sistema FAP magnetron sputtering.....	80
Figura 33 - Fotografia do reator de plasma no momento da aplicação do filme de AZO por FAP magnetron sputtering.	82
Figura 34 -Perfilômetro Dektak 150 da Veeco Instruments Inc.	83
Figura 35 - Espectrofotômetro Uv-Vis-NIR LambdaTM 750 da Perkin Elmer ..	84
Figura 36 - Fotografia do sistema de medição de resistividade pelo método quatro pontas desenvolvido no <i>LabVIEW</i>	85
Figura 37 - Polarização DC.	87
Figura 38 - Corrente DC.....	88
Figura 39 - Ganho de tensão do circuito simulado pelo <i>Pspice</i>	89
Figura 40 - Ganho de tensão do circuito (prático).	90
Figura 41 - Imagem do sinal de entrada, em azul, e do sinal de saída, em amarelo.	91
Figura 42 - Teste prático com carga resistiva 4kHz – 2 lâmpadas.....	92
Figura 43 - Teste prático com carga resistiva 40kHz – 4 lâmpadas.....	93
Figura 44 - Espectro óptico de transmitância (linha contínua) e refletância (linha tracejada) dos filmes de AZO em função do comprimento de onda.	96
Figura 45 - Espectro de transmitância óptica dos filmes de AZO em função do comprimento de onda.....	97
Figura 46 - Método de extrapolação para a obtenção dos valores de gap óptico.....	98
Figura 47 - Espectro de absorvância óptica dos filmes de AZO em função do comprimento de onda.....	101
Figura 48 – Comparação entre a pulverização catódica utilizando a FAP com a Radiofrequência (RF), do espectro óptico de transmitância (linha contínua)	

e refletância (linha tracejada) dos filmes de AZO em função do comprimento de onda. Dados de comparação coletados de Chaves (2014).....	102
Figura 49 - Comparação do espectro óptico de transmitância utilizando a FAP com 15 kHz e a Radiofrequência (RF), dos filmes de AZO em função do comprimento de onda. Dados de comparação coletados de Chaves (2014).	103
Figura 50 - Comparação entre a pulverização catódica utilizando a FAP com a Radiofrequência (RF), do espectro óptico de transmitância (linha contínua) e refletância (linha tracejada) dos filmes de ZnO intrínseco em função do comprimento de onda. Dados de comparação coletado de Chaves (2014)...	104

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros da Fonte.....	58
Tabela 2 - Potência dissipada nos resistores.....	75
Tabela 3 - Potência dissipada nos transistores do circuito final	76
Tabela 4 - Parâmetros de deposição dos filmes finos de AZO.....	81
Tabela 5 - Resultados práticos com carga resistiva	92
Tabela 6 - Resultados práticos com carga resistiva em 40kHz.....	93
Tabela 7 - Resultados de espessura dos filmes de AZO obtidos através do perfilômetro Veeco Dektak 150 em função da frequência do sinal tensão da FAP.....	95
Tabela 8 - <i>Band gap</i> das amostras depositadas com a FAP	99
Tabela 9 - Comparação entre os valores de <i>band gap</i> dos filmes de AZO produzidos pela técnica de pulverização catódica utilizando a FAP com a técnica de Radiofrequência (RF). Dados de comparação coletado de Chaves (2014).	99
Tabela 10 - Resultados das propriedades elétricas dos filmes de AZO obtidos através do método de quatro pontas em função da variação frequência da FAP.....	105

Apêndices

Apêndice A - Cálculo de dissipação térmica em Dissipadores.....	118
Apêndice B - Projeto de caracterização dos dissipadores utilizado na fonte .	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Plasma	15
2.1.1 Aplicações do plasma	16
2.1.2. Sistema completo para deposição de plasma por <i>magnetron sputtering</i>	17
2.2 Filmes Finos.....	34
2.2.2 Filmes Finos de AZO	37
2.2.3 Caracterização de Filmes Finos.....	40
2.3 Técnicas de deposição de filmes finos.....	53
2.3.1 <i>Sputtering</i>	54
2.3.2 <i>Magnetron sputtering</i>	56
3 METODOLOGIA.....	58
3.1 Desenvolvimento da fonte amplificadora de potência (FAP).....	58
3.1.1 Definição da topologia do circuito amplificador	61
3.1.2 Definição matemática do circuito amplificador	62
3.1.3 Caracterização dos componentes do amplificador de potência	68
3.1.4 Análise de pequenos sinais	72
3.1.5 Cálculo da potência dissipada	75
3.1.6 Potência dissipada nos componentes.....	75
3.1.7 Automação do Controle de Temperatura.....	77
3.2 Deposição de filmes fino de AZO utilizando a fonte amplificadora de potência	78

3.2.1 Substrato e Alvo.....	78
3.3 Caracterização dos filmes de AZO.....	82
3.3.1 Caracterização Morfológica	82
3.3.2 Caracterização óptica	83
3.3.3 Caracterização elétrica	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
4.1 Caracterização elétrica da fonte amplificadora	86
4.1.2 Resultado dos testes com carga resistiva.....	91
4.2 Resultado do filme de AZO utilizando a FAP	94
4.2.1 Caracterização Morfológica	94
4.2.2 Caracterização Óptica	95
4.2.3 Caracterização Elétrica.....	104
5 CONCLUSÃO.....	106
6 REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de filmes finos e transparentes em superfícies tem despertado interesse dos pesquisadores desde 1907 (VOSSEN, 1971). O avanço dessa tecnologia, e a possibilidade de sua aplicação na indústria, permitiu agregar valor aos materiais por meio das alterações das suas características físicas e químicas (BUZETO, 2007).

Dentre as técnicas disponíveis para modificação das superfícies dos materiais, destaca-se a deposição assistida por plasma por meio da técnica de pulverização catódica (do inglês, *magnetron sputtering*). Esta técnica consiste em um grande fluxo iônico com uma energia média por íon suficiente para causar pulverização catódica e defeitos na rede cristalina do material, permitindo variar as propriedades das superfícies através do controle dos parâmetros do plasma (densidade de elétrons, energia e sua função de distribuição) (SOUZA, 1993; MIOLA, 2000).

Uma ampla variedade de compostos que apresentam alta transmitância óptica na região do visível e baixa resistividade elétrica, denominados óxidos condutores transparentes – TCO (do inglês *Transparent Conducting Oxide*) podem ser utilizados para deposição de filmes finos, merecendo destaque a utilização de dióxido de estanho (SnO_2), óxido de índio (In_2O_3) e óxido de zinco (ZnO) (DAMIANI, 2010).

A aplicação de filmes desses compostos permite que as superfícies conduzam eletricidade, ao mesmo tempo garantindo transparência à luz visível. Tais características permitiram a utilização dos TCOs em dispositivos opto eletrônicos que requerem contatos transparentes, fazendo com que a busca pelos TCOs tenha aumentado significativamente nas últimas décadas (MINAMI, 2005; HIGOU et al, 2010 Apud SILVA, 2010; DIAS, PAES JR., 2006).

Dentre os TCOs, a utilização do óxido de zinco (ZnO) produzindo filmes finos tem chamado muita atenção, pois apresenta transmitância óptica na região do visível acima de 80% e baixa resistividade elétrica, sendo um semicondutor tipo N (DERSOLA; VALLAURI, 2010), com energia de *band gap* de cerca de 3,37 eV à temperatura ambiente (CRUZ et al., 2017), permitindo absorver a radiação ultravioleta devido a transições eletrônicas entre bandas em comprimentos de onda inferiores a 367,9 nm (SANSIVIERO, 2015).

Essas características somadas ao baixo custo e facilidade de trabalho, permitem dizer que as aplicações de ZnO em células solares, dispositivos optoeletrônicos, transdutores ultrassônicos, sensores de gás (DIAS, 2005), dispositivos atuadores (CHOI et al., 2009 & ZHANG et al., 2008 Apud SANSIVIERO, 2015) e como foto catalisadores, são promissoras (SILVA, 2010).

A melhora nas propriedades elétricas pode ser alcançada, ainda, por meio da utilização de íons dopantes na matriz de ZnO o que, apesar de não interferir na transmitância, faz com que sejam alteradas as características elétricas no sentido de diminuir a resistividade elétrica do material (SILVA, 2001). A dopagem de ZnO pode ser feita com elementos do grupo III-A, tais como Boro, Alumínio (Al), Gálio (Ga), Índio (In) (MARTÍNEZ; HERRERO; GUTIÉRREZ, 1997), e do grupo V-A, tais como Antimônio (Sb) e Bismuto (Bi). Ressalta-se que os íons Al^{3+} e Ga^{3+} são os melhores dopantes, por possuírem raios iônicos próximos do raio iônico do íon Zn^{2+} (CARDOSO, 2006; SILVA, 2012; SILVA, 2001).

A dopagem de filmes de óxido de zinco com alumínio (ZnO:Al, conhecido como AZO) não promovem grandes variações na transmitância óptica do filme fino na região do visível, entretanto exerce alterações significativa na sua resistividade. Quando comparado com os filmes de óxidos de índio dopados com estanho (ITO) produzidos

industrialmente, filmes de AZO representam uma alternativa de baixo custo na produção de materiais condutores, transparentes e quimicamente estáveis (HU e GORDON, 1992, apud VELASCO, 2010; TANG e CAMERON, 1994, apud VELASCO, 2010; AGARWAL e SPEYER, 1997, apud VELASCO, 2010).

Diversas técnicas de deposição têm sido utilizadas para síntese de filmes finos de óxido de zinco, tais como a evaporação térmica (SANCHES, 2013), ablação a laser (HENLEY et al., 2004), deposição química de organometálicos em fase vapor - MOCVD (GONÇALVES, 2010), deposição química em fase de vapor - CVD (CAMPOS, 2006), pulverização catódica - *sputtering* (DANG et al., 2007), spray pirólise (DIAS, 2005), deposição química na fase vapor assistido por plasma - PECVD (ROBBINS; FRY; WOLDEN, 2004), entre outras.

Na bibliografia encontramos diversos trabalhos de deposição de filmes fino de TCOs pela técnica de pulverização catódica reativo com radiofrequência (do inglês *RF magnetron sputtering*), que utiliza uma fonte de corrente alternada operando na faixa de MHz (FILHO, 1991). Entretanto, atualmente, tem sido observada a substituição da técnica de radiofrequência pela média frequência, permitindo operar na faixa de kHz. Dessa forma, é possível utilizar fontes menos sofisticadas e de custo mais acessível, permitindo a aplicação em grande escala (HUGHES, 2017).

Nessa perspectiva, este trabalho consiste no desenvolvimento de uma fonte amplificadora de potência (FAP) de corrente alternada (AC) na faixa de baixa frequência (1 a 40 kHz).

A FAP foi utilizada para a deposição de filmes de AZO em placas de vidro por meio de *magnetron sputtering*. As propriedades morfológicas, ópticas e elétricas dos filmes produzidos foram analisadas e os resultados obtidos foram comparados com

processos de deposição por *RF magnetron sputtering*, cuja utilização pelas indústrias e pesquisadores é mais comum.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desse capítulo é fazer um breve estudo sobre o plasma e sua aplicação na síntese de filmes finos, bem como apresentar as características técnicas da fonte amplificadora de potência (FAP) em baixa frequência, que corresponde ao objeto de estudo desse trabalho.

2.1 Plasma

As pesquisas envolvendo plasma tiveram início em 1830, quando o físico inglês Michael Faraday realizou estudos sobre descargas elétricas na atmosfera com o intuito de compreender as reações químicas induzidas por correntes elétrica e, durante o experimento, constatou a presença de estruturas luminosas identificadas como sendo um possível novo estado da matéria (HENRIQUE & UEDA, 2004).

Entretanto, somente em 1928, o termo plasma foi oficialmente utilizado para designar um gás ionizado, quando o físico e químico norte americano Irving Langmuir (1881-1957), publicou um artigo científico de sua autoria, intitulado "*Oscillations in Ionized Gases*". Nessa época, Langmuir estudava descargas elétricas em vapor de mercúrio, e notou que as características do gás ionizado produzido nessas descargas eram razoavelmente uniformes em todo o seu volume e que ele se moldava à forma do tubo onde era produzido (LANGMUIR, 1928). O termo plasma provém do grego e significa "modelar", sendo usado para designar materiais moldáveis, razão pela qual entende-se que ele Langmuir atribuiu este nome aos gases ionizados.

O plasma é considerado o quarto estado da matéria e pode ser definido como um gás ionizado, obtido a partir do fornecimento de calor ou outra forma de energia a

gases compostos por espécies neutras e carregadas. O plasma pode existir na forma natural, como por exemplo as estrelas, relâmpagos e aurora boreal, ou ser criado em condições específicas (BESSELER, 2008).

Segundo Barbosa (2007), num processo artificial, o plasma é formado quando um gás é submetido a uma diferença de potencial, ocasionando a liberação de elétrons. Esses elétrons passam a se mover pelo gás, colidindo com outras partículas, transferindo sua energia e provocando a liberação de mais elétrons. O processo de interação dos elétrons com outras partículas ocorre até que a energia liberada seja suficiente para produzir um campo elétrico e magnético internos que levem à interação autossustentável entre as partículas. Neste estado o gás é ionizado e passa a ser denominado de plasma.

2.1.1 Aplicações do plasma

A partir da década de 1960 intensificaram-se as pesquisas em torno da física do plasma, tendo sido desenvolvidas diversas aplicações tecnológicas que, gradualmente, foram incorporadas aos processos industriais, principalmente na indústria eletrônica.

É possível encontrar, na literatura, diversos estudos envolvendo a aplicação da tecnologia de plasma, podendo-se destacar os processos que incluem a limpeza de superfícies (NASCIMENTO, 2006); a modificação e o tratamento de superfícies por oxidação (CHEN *et al*, 2008), por nitretação (ROCHA *et al*, 2003), por texturização (CONRAD, 1987), e por implantação iônica (PILLACA *et al*, 2007); corte e solda de metais; fusão e refino de metais, ligas e cerâmicas (WILL, 2008); reciclagem de resíduos industriais, urbano, e hospitalares (BURKHARD *et al*, 1994; GOMES *et al*,

2009; NBR, 1993); usos na indústria metalúrgica (BRITO *et al*, 2007); na deposição de cerâmicas e metais – plasma spray (CHAKRABORTY, 2011); na decomposição térmica (LABANCA, 2007); na iluminação, através das lâmpadas de neon, de sódio e fluorescentes (MARQUES, 2005); na biotecnologia e medicina para esterilização e descontaminação biológica (YARDIMCI *et al*, 2010); na deposição de filmes finos com aplicação na fabricação de dispositivos eletrônicos, filmes transparentes apropriados para aplicações ópticas, camadas anti-refletivas, revestimentos de lentes e óculos esportivos, filmes biocompatíveis, materiais hidrofóbicos convenientes para aplicações em embalagens alimentícias e para a confecção de sensores (LAPTEC, 2018), dentre outros.

2.1.2. Sistema completo para deposição de plasma por *magnetron sputtering*

O sistema para geração do plasma é composto, basicamente, das seguintes estruturas: *i*) reator (câmara de vácuo); *ii*) fonte de alimentação; *iii*) sistema de controle de entrada de gases; *iv*) sistema para vácuo; *v*) sistema de controle. A figura 1 apresenta o conjunto necessário para geração de plasma.

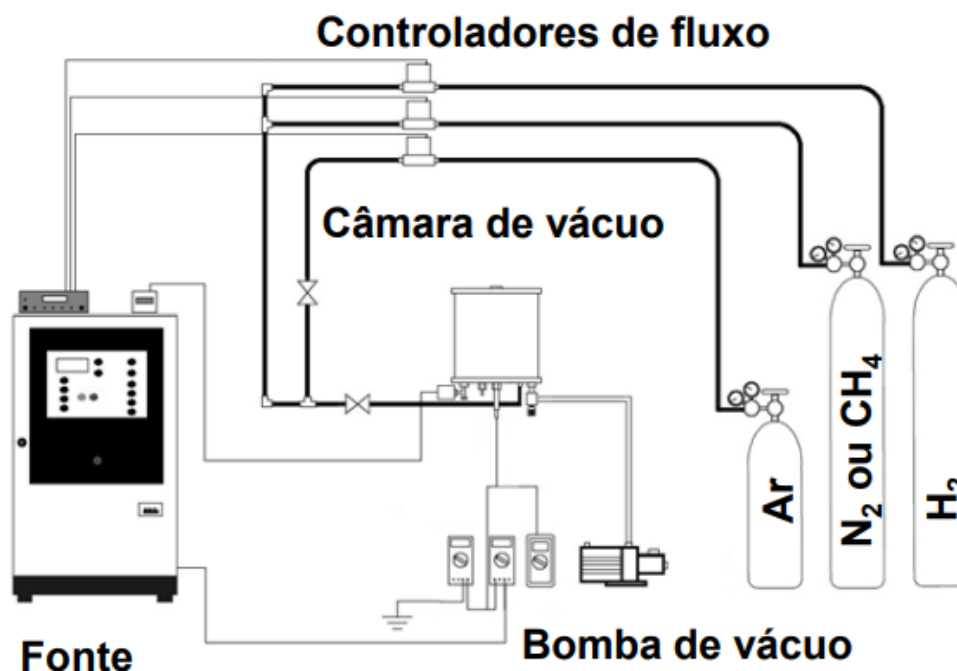


Figura 1 - Conjunto para geração de plasma (CARDOSO, 2016)

O reator corresponde a uma câmara para alto vácuo construída em aço inoxidável, constituído por sistemas de porta alvos refrigerados, carrossel e eixos para alojar os materiais a serem processados. O conjunto possui um sistema de refrigeração com circuito de água fechado, para resfriamento de câmaras e alvos. A base do reator possui conexões universais para permitir acoplar passantes elétricos e rotativos, medidores de pressão, sensores, válvulas de vácuo, entrada de gases, instrumentação e controle.

A primeira fase do processo de geração do plasma consiste na obtenção de ambiente de vácuo no interior do reator. O sistema de vácuo é constituído por bombas de vácuo, que permitem alcançar as baixas pressões necessárias, 2 a 3 mTorr, criando um ambiente adequado para a geração do plasma (CHOPRA & DAS, 1983).

A fonte de alimentação é responsável pela ionização dos átomos e, conseqüentemente, pela geração do plasma. A fonte pode operar em corrente

contínua (DC) ou alternada (AC). A escolha da fonte mais adequada dependerá do tipo de substrato, do alvo e das características desejadas para o filme.

O sistema de controle de entrada e distribuição dos gases permite distribuir, dosar e alimentar os gases puros (N_2 , H_2 e Ar) durante o processo.

O sistema de controle permite definir os parâmetros e supervisionar a operação do processo de formação do plasma.

A figura 2 apresenta o esquema completo para geração do plasma, incluindo detalhes com relação à fonte de alimentação AC, a ser utilizada nesta dissertação.

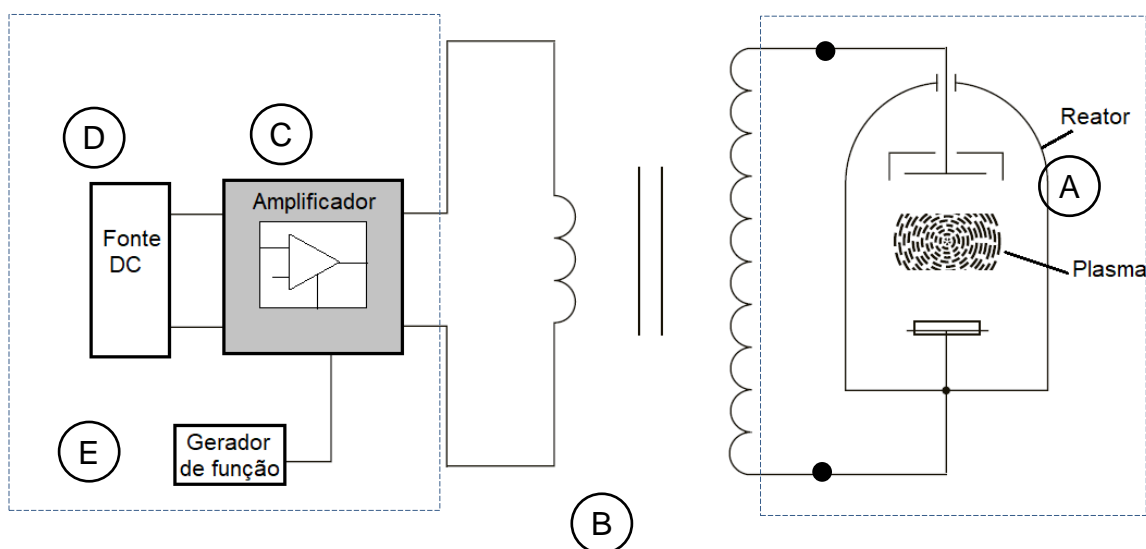


Figura 2 - Esquema completo de funcionamento do plasma: (a) reator; (b) casador de impedância; (c) amplificador de potência; (d) fonte de corrente contínua (DC); (e) gerador de função

2.1.2.1 Fonte de Tensão

A fonte de tensão são dispositivos dielétricos caracterizados por imporem uma determinada tensão, ou diferença de potencial (ddp) aos seus terminais. As fontes de tensão podem ser contínuas (DC, do inglês, *direct current*), quando a tensão gerada

é constante no tempo, ou alternadas (AC, do inglês, *alternate current*), quando a tensão é sinusoidalmente variável no tempo.

No esquema apresentado na figura 2, uma fonte DC é responsável por fornecer um sinal de tensão contínua. A corrente fornecida pode ser dividida em duas formas: i) lineares, que operam conforme a frequência da rede elétrica basicamente composta de um transformador, etapa retificadora e filtragem; ii) chaveada que apresenta uma eletrônica e uma complexidade maior em sua constituição que utilizam transformadores de alta frequência e transistores especiais (FETs) que diminuem as perdas e aumentam o rendimento total das fontes.

A fonte DC escolhida para esse projeto da FAP é linear, devido à baixa EMI (Interferência eletromagnética) e facilidade na montagem, composta por um transformador de alto rendimento com núcleo de ferrite, uma ponte retificadora de onda completo (ou ponte de diodo), banco de capacitor, resistor de pré-carga e um resistor de descarga, conforme a Figura 3.

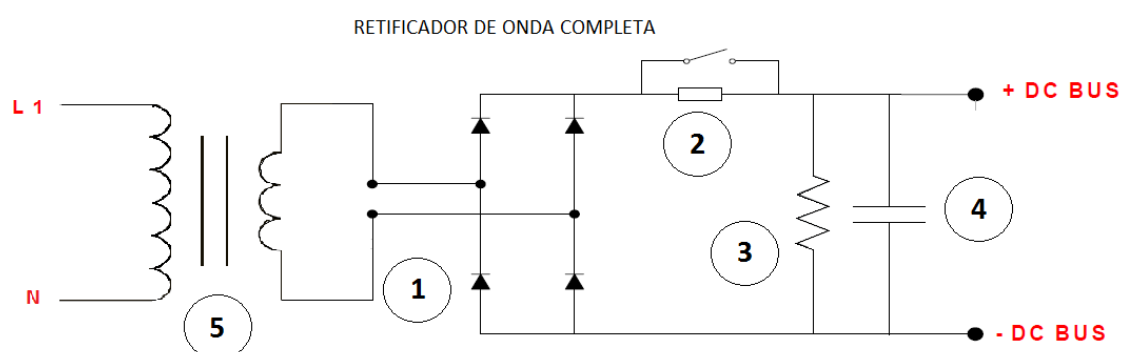


Figura 3 – Modelo simplificado de uma Fonte DC Analógica: (1) Ponte retificadora; (2) Resistor de pré-carga; (3) Resistor de descarga; (4) Banco de capacitor; (5) transformador.

A função da ponte retificadora, item “1” da Figura 3, é retificar o sinal da onda senoidal transformando a corrente alternada AC em corrente contínua DC; o resistor

de pré-carga, item “2”, faz a primeira carga dos capacitores evitando o uma corrente abrupta na energização capaz de danificar a ponte retificadora; já o resistor de descarga, item “3,” controla o tempo de descarga dos capacitores e garante o equilíbrio da tensão no banco de capacitores; o banco de capacitores, item “4”, tem a função de manter a tensão no barramento DC (BUS DC) estabilizado próximo da tensão de pico do sinal de entrada do retificador, principalmente, no semiciclo negativo, que é quando ele descarrega; e o transformador, “5”, transformar a tensão alternada da rede em uma tensão alternada no nível desejado.

Para ter uma fonte simétrica, utiliza-se dois circuitos da Figura 3, porém de forma paralela para obter -V e +V de forma simétrica, por exemplo (-130 V e +130 V).

2.1.2.2 Casador de impedância

Tipicamente, a impedância de saída de uma fonte de alimentação é de 50Ω . A impedância da carga aplicada no plasma obviamente não é a mesma, variando de acordo com muitos parâmetros, como por exemplo o tamanho e geometria do reator, o formato e tamanho dos eletrodos, condições do plasma (pressão, tipo de gás, potência aplicada). Para realizar o acoplamento entre a impedância de saída da fonte e a impedância do sistema todo, um circuito casador é inserido entre a fonte de alimentação e a carga, a fim de adaptar a impedância vista pelo gerador de função para um total de 50Ω (CHEN, 2008 apud RIBEIRO, 2017). Para isso, é possível utilizar dois métodos: *i*) transformadores; *ii*) malha de casamento (indutivo-capacitivo).

O uso dos transformadores é mais indicado para aplicações abaixo de 1MHz, ou seja, em baixas frequências, como é o caso desta dissertação. Além disso, é uma aplicação mais simples e barata (ADVANCED ENERGY INDUSTRIES INC., 2006).

2.1.2.3 Amplificador de Potência

Como o próprio nome sugere, um amplificador de potência deve amplificar um nível de sinal proveniente da fonte de alimentação em sua entrada a um determinado nível em sua saída, visando atingir a máxima potência de saída e eficiência, como mostra a figura 4.

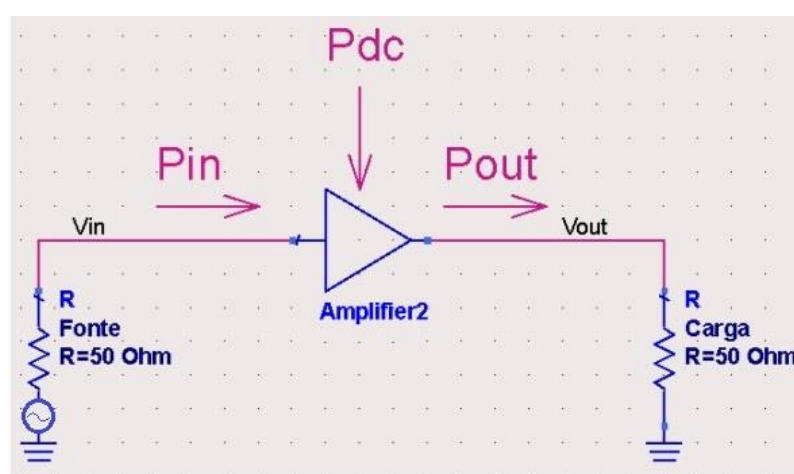


Figura 4 – Balanço energético em um amplificador de potência

(Fonte: FIGUEIREDO, 2012)

Por ser um dispositivo que converte a energia disponível numa fonte de potência (alimentação DC) em energia de sinal, o seu mérito deve ser medido em termos de potência de sinal adicionada, conforme equação 1 (SÁ, 2008).

$$P_a = P_{out} - P_{in} \quad \text{Equação 1}$$

(Fonte: SÁ, 2008)

onde:

P_a = potência de sinal adicionada [W];

P_{in} = potência de entrada [W]; e

P_{out} = potência de saída [W].

Pode-se distinguir dois tipos de potência, a potência disponível pela fonte (P_{av}) e a potência que é transferida para a carga (P). A primeira é a potência máxima que a fonte é capaz de fornecer e sua função é dada pela equação 2. Neste caso, a impedância de entrada do transistor é igual ao conjugado na impedância da fonte.

$$P_{av} = \frac{1}{8} \frac{[V_s(W)]^2}{RE[Z_s(W)]} \quad \text{Equação 2}$$

(Fonte: SÁ, 2008)

onde:

P_{av} = potência disponível;

$V_s(W)$ = tensão de pico na entrada; e

$RE[Z_s(W)]$ = parte real da impedância da fonte.

A potência transferida para a carga (P_L) é dada por:

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{[V_L(W)]^2}{RE[Z_L(W)]} \quad \text{Equação 3}$$

(Fonte: SÁ, 2008)

onde:

P_L = potência transferida para a carga;

$V_L(W)$ = tensão de pico na carga; e

$RE[Z_L(W)]$ = parte real da impedância da carga.

A eficiência do amplificador indica a porcentagem da potência de entrada convertida em potência na saída, e é expressa pela equação 4.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \quad \text{Equação 4}$$

(Fonte: SÁ, 2008)

onde:

η = eficiência de conversão;

P_{out} = potência de saída; e

P_{dc} = potência que é consumida.

No entanto, em frequências altas o ganho de potência é tão baixo que P_{in} representa uma parte substancial de P_{out} , a eficiência é substituída pela potência adicionada pelo amplificador (PAE, do inglês, *power added efficiency*), conforme equação 5.

$$PAE = \frac{P_L - P_{in}}{P_{dc}} \quad \text{Equação 5}$$

(Fonte: SÁ, 2008)

onde:

PAE = eficiência da potência adicionada;

P_{in} = potência de entrada;

P_L = potência de saída; e

P_{dc} = potência que é consumida.

2.1.2.3.1 Classes de operação

Os amplificadores de potência são usualmente distinguidos em diferentes classes que definem a forma de funcionamento e, por conseguinte, o desempenho do amplificador. Se é pretendido um amplificador com uma maior linearidade, então o ângulo de condução deve ser grande, ou seja, o transistor conduz durante a maior

parte ou totalidade do sinal aplicado à entrada. Contudo, se o amplificador é projetado para linearidade, perde-se eficiência, isto é, menos potência disponível pela fonte (P_{av}) é entregue à carga, sendo dissipada na forma de calor. Diminuindo o ângulo de condução, aumenta-se a eficiência, mas perde-se linearidade. O ideal seria desenhar o amplificador de modo que seja razoável a relação entre a eficiência e a linearidade. A escolha do amplificador depende do tipo de aplicação pretendida para o mesmo (SÁ, 2008).

A classe de operação do amplificador de potência depende, portanto, do ângulo de condução, podendo este ser alterado conforme a tensão de polarização da porta (do inglês, *gate*) e do dreno escolhidas. Outro fator importante é que a escolha do ponto de polarização é limitada pela região que garante que o transistor não é danificado pela dissipação de calor (SÁ, 2008).

A figura 5 ilustra as diferentes classes de operação do amplificador de potência.

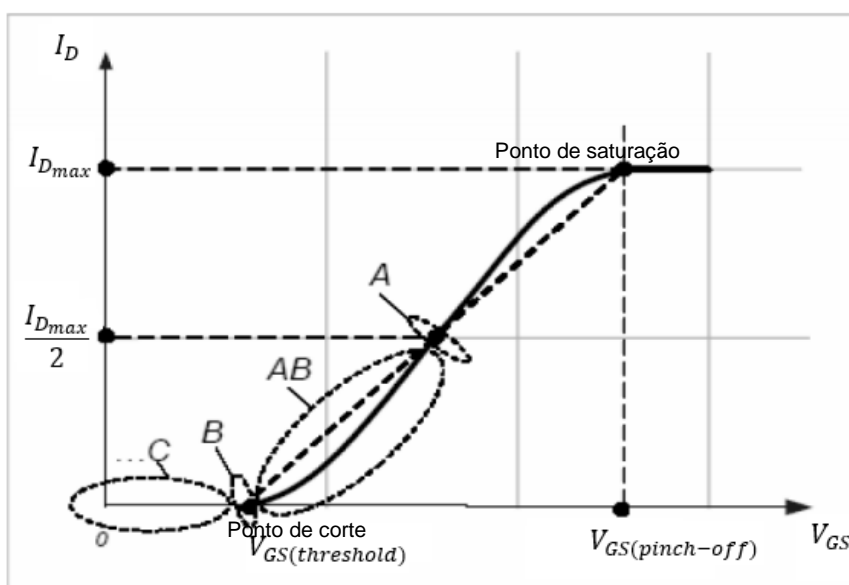


Figura 5 - Classes de operação de um amplificador de potência. I_D = corrente no dreno; V_{GS} = tensão entre a porta e a fonte do MOSFET; $V_{GS(threshold)}$ = tensão de threshold (ou tensão limiar);

$V_{GS(pinch-off)}$ = tensão de pinçamento do transistor.

(Fonte: CRIPS, 2008 apud SÁ, 2008)

- **Classe A**

Por definição, classe A significa que o dispositivo final de amplificação permanece sempre conduzindo. Usualmente, é definido como condução em 360° da onda senoidal de entrada (HEERDT, 1997). Em classe A, o dispositivo amplificador é polarizado de forma que seu ponto de operação fique localizado no centro da região linear, compreendida entre os pontos de corte e de saturação. Por essa razão a linearidade é boa e o amplificador gera menor distorção em comparação com os polarizados em outras classes de operação. (SOBRINHO, 2003). A grande desvantagem destes amplificadores está na alta dissipação de energia, fazendo com que sua eficiência seja de, no máximo 50% (SÁ, 2008), e exigindo o controle com circuitos adicionais de proteção térmica, conforme circuito apresentado na Figura 6.

Por este motivo, seu uso é recomendado para amplificadores de baixo nível de potência, que compõem os amplificadores sintonizados utilizados em receptores, nos primeiros estágios dos transmissores de rádio e em todas as aplicações onde o nível de potência não exceda alguns poucos miliwatts (SOBRINHO, 2003).

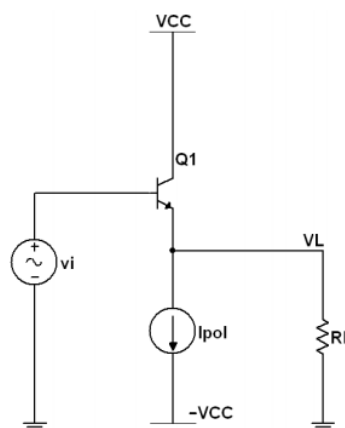


Figura 6 - Amplificador classe A, configuração seguidora de emissor, onde: vcc = fonte de tensão em corrente contínua; vi = tensão de entrada; Q₁= transístor 1; V_L = tensão na carga;

R_L= resistência de carga; I_{pol} = corrente de polarização.

(Fonte: PIRES, 2010)

- **Classe B**

Nos amplificadores que operam na classe B cada dispositivo presente no circuito de saída conduz apenas durante metade do ciclo de onda do sinal de entrada, durante 180° do sinal sinusoidal de entrada (PIRES, 2010). A operação típica de classe B é em amplificadores *push-pull*, onde dois dispositivos compartilham a amplificação total de carga, cada um contribuindo com meio período de onda, um conduz no ciclo negativo e outro no ciclo positiva, conforme mostrado na Figura 7 (HEERDT, 1997).

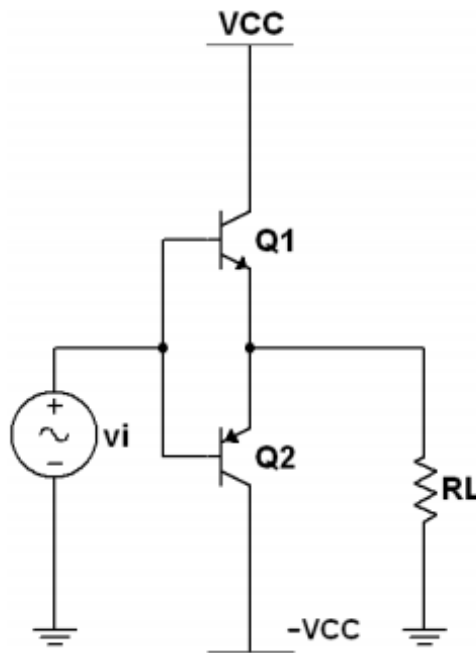


Figura 7 - Amplificador classe B, operando em *push-pull*, onde: v_{cc} = fonte de tensão em corrente contínua; v_i = tensão de entrada; Q_1 = transistor 1; Q_2 = transistor 2; R_L = resistência de carga.

(Fonte: PIRES, 2010)

A amplificação classe B alcança rendimento máximo teórico em torno de 75%, o que possibilita a aplicação em maiores potências e, em contrapartida apresenta o problema de distorção por transição (*crossover distortion*) que aparece quando da

passagem por zero do sinal, ou seja, quando um dos dispositivos deixará de conduzir para dar lugar ao outro, entre cada semi-ciclo (HEERDT, 1997).

- **Classe AB**

Com a intenção de eliminar os problemas de perdas energéticas sem diminuir a qualidade do sinal amplificado, chegou-se a uma configuração dos dispositivos amplificadores classe AB, para o qual se juntou as melhores características de cada uma das classes A e B, respectivamente. Dessa forma, juntando o princípio de funcionamento da classe A, que amplifica o sinal sem lhe introduzir não-linearidades, com o da classe B, que utiliza dois dispositivos para amplificar cada ciclo do sinal de entrada, viabilizando o ganho de qualidade do sinal amplificado (HEERDT, 1997; PIRES, 2010).

O circuito básico do amplificador classe AB é apresentado na Figura 8. A eficiência fica abaixo dos amplificadores classe B, porém superior ao classe A. Amplificadores polarizados em classe AB tem melhor desempenho em potências mais elevadas (acima de algumas centenas de miliwatts), não havendo, contudo, um limite superior (HEERDT, 1997; PIRES, 2010).

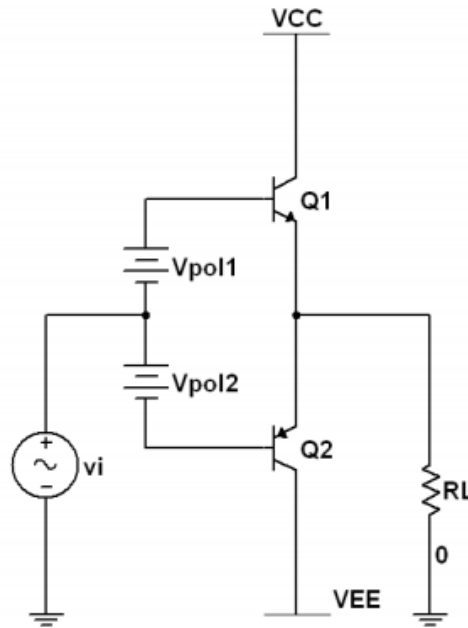


Figura 8 - Amplificador classe AB, configuração *push-pull*, onde: v_{cc} = fonte de tensão em corrente contínua; v_i = tensão de entrada; Q_1 = transístor 1; Q_2 = transístor 2; V_{pol1} = tensão de polarização 1; V_{pol2} = tensão de polarização 2; R_L = resistência de carga; v_{EE} = tensão entre o emissor e a base do transístor bipolar.

(Fonte: PIRES, 2010)

2.1.2.3.2 Topologias de amplificadores de potência

Este capítulo apresenta as topologias do circuito de potência utilizando amplificadores polarizados em classe AB, escolhido para uso nessa dissertação devido à sua linearidade e eficiência.

- **Topologia 1 (Transistor TBJ ou Darlington)**

A topologia 1 (figura 9), baseia-se em um circuito composto de transistores complementares do tipo TBJs, sendo formado pelos transistores Q1 e Q2 na configuração classe AB. O ganho de potência é dado pelos transistores Q6 e Q7.

Esta topologia apresenta o benefício da linearidade produzida pelos transistores operando em classe AB. Entretanto, tem-se a necessidade de usar transistores com elevada capacidade de potência em todo circuito, pois a corrente fornecida pelo TBJ é dependente da polarização da sua corrente de base (I_b), ou seja, quanto maior a corrente fornecida à carga, maior será a corrente de base, isto implica numa alta corrente no estágio anterior aos de potência.

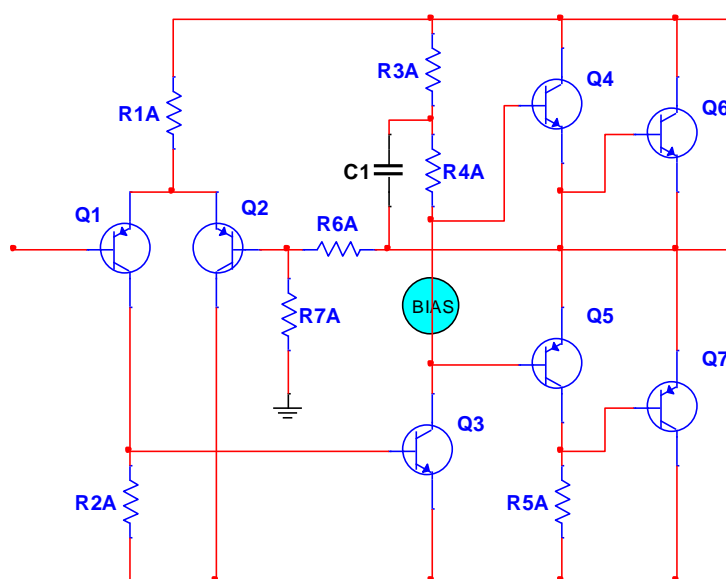


Figura 9 - Fonte Amplificadora com TBJs, onde: Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6 e Q7 são transístores; R1A, R2A, R3A, R4A, R5A, R6A, R7A, são resistores; e C1 corresponde a um capacitor. BIAS (ou polarização, é o ponto de trabalho em que um estágio de amplificação opera quando em repouso).

(Fonte: PASS *et al.*,1996)

Uma possível solução para o elevado consumo de corrente em todo circuito é a utilização do transistor Darlington (figura 10), que por apresentar um ganho elevado diminuir a corrente de polarização.

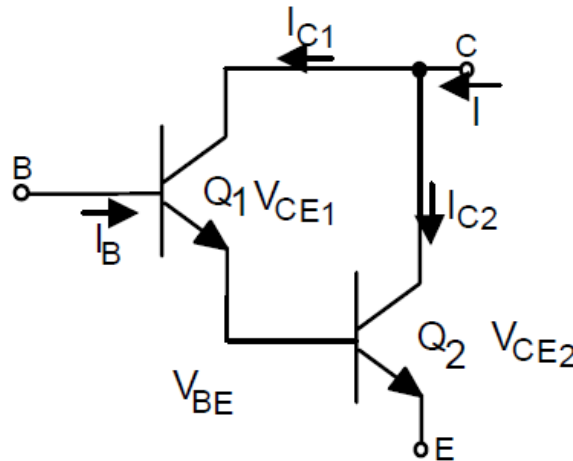


Figura 10 - Transistor Darlington, onde: I_B = corrente de base; Q_1 = transistor; V_{CE1} = tensão entre coletor e emissor de Q_1 ; Q_2 = transistor; V_{CE2} = tensão entre coletor e emissor de Q_2 ; V_{BE} = tensão de base e emissor ; I_{C1} e I_{C2} = corrente de coletor.

(Fonte: TECMOS, 2011)

O Darlington, entretanto, apresenta alguns inconvenientes: má estabilidade com a temperatura, correntes de fuga e queda de tensão coletor e emissor (V_{ce}) superior à de um TBJ.

- **Topologia 2 (Transistor Mosfet)**

A topologia 2 (figura 11) é mais eficiente que a topologia 1, pois utiliza um transistor de potência tipo Mosfet, que não depende de corrente para polarizar sua porta (do inglês, *gate*), pois sua polarização é devida a uma diferença de tensão entre porta e fonte (do inglês, *source*). Conclui-se que o circuito da topologia 2 é mais simples que o proposto pela topologia 1 e não exige TBJ de potência em nenhuma

parte do circuito, diminuindo conseqüentemente a potência dissipada pelo circuito amplificador.

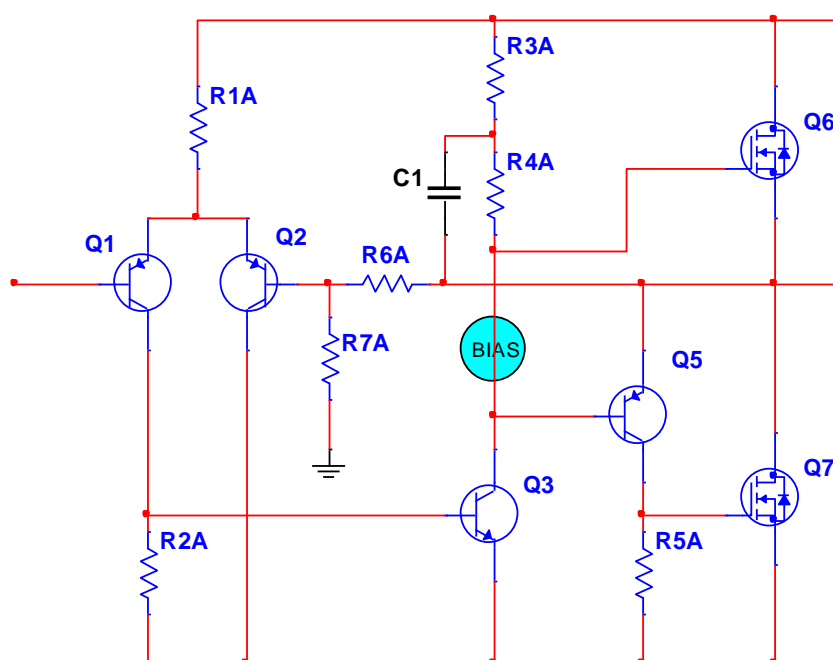


Figura 11 - Concepção esquemática do Mosfet de potência, onde: Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6 e Q7 são transístores; R1A, R2A, R3A, R4A, R5A, R6A, R7A, são C1 corresponde a um capacitor. BIAS (ou polarização, é o ponto de trabalho em que um estágio de amplificação opera quando em repouso).

(Fonte: PASS et al, 1996)

O transistor Mosfet faz parte de uma linha de transistores que combina uma capacidade de tensão particularmente elevada com rápidos tempos de comutação. Exceto pelo preço elevado, este tipo de dispositivo apresenta inúmeras vantagens em relação aos transistores bipolares regulares em uso de amplificador de potência.

Primeiramente porque seus circuitos de baixa corrente simples eliminam a necessidade de transistores de potência para o seu acionamento. Eles são imunes ao fenômeno *breakdown* (PASS et al, 1996), este efeito ocorre nas junções dos TBJs por meio de um incremento de uma corrente parasita (corrente de fuga) que aumenta a

temperatura na junção entrando num sistema cíclico onde ocorre realimentação autodestrutiva.

Assim sendo, conclui-se que o circuito com Mosfet é mais eficiente, porém inicialmente com o custo mais elevado. Neste projeto optou-se por utilizar essa topologia devido à eficiência.

2.1.2.3.3 Dissipação de calor em amplificadores de potência

No projeto de um amplificador de potência, temos uma acentuada perda de energia no circuito em forma de calor. O estudo detalhado desse tópico possibilita o funcionamento seguro e eficiente dos transistores, assim como a metodologia para determinar os dissipadores térmicos.

A topologia amplificadora é composta por transistores de potência que são responsáveis por conduzem correntes na faixa de amperes, dissipando potência por volta de Watts ou dezenas de Watts, nesse contexto o estudo da dissipação térmica nessa seção contempla aspectos importantes sobre o projeto de amplificador de potência e sobre o dimensionamento do dissipador de calor (SEDRA, 2007).

Os transistores podem estar trabalhando tanto em regime contínuo ou em regime chaveado e para esses dois tipos de funcionamento o Apêndice A mostra a forma de calcular a dissipação térmica e como dimensionar o dissipador. Em aplicações que o transistor esteja funcionando em regime contínuo o cálculo da potência média dissipada por ele é o produto da tensão pela corrente em valores RMS. Porém, quando funciona em regime chaveado, consideram-se as perdas em condução e as perdas de comutação.

Utilizando-se os dados de *datasheets* dos transistores e de simulações de softwares de modelagem de circuitos, realiza-se o cálculo da potência dissipada em cada componente do circuito amplificador. De forma geral, como o desempenho dos componentes são influenciados diretamente pelo acionamento da base ou *gate* e por outros componentes parasitas.

Para tal, os componentes (transistores) tem que estarem protegidos tanto no regime permanente como nos transitórios. Caso não atenda algum dos dois regimes o dissipador terá que ser redimensionado. Sendo assim, considera-se o funcionamento na situação crítica, ou seja, de alta potência fornecida para a carga, o que implica na máxima potência dissipada pelos componentes.

As tabelas de parâmetros e o conjunto de formulas utilizadas no projeto dos dissipadores desse trabalho se encontram no Apêndice A. Nesse apêndice está detalhado as considerações relevantes e conceitos importantes para o desenvolvimento do projeto.

2.2 Filmes Finos

Segundo Oliveira Neto (2012) filme fino é a denominação dada às películas delgadas com espessuras que podem variar desde alguns nanômetros (10^{-9}m), até alguns microns (10^{-6}m).

A produção dos filmes finos pode ser realizada por meio de diversas técnicas, tais como: evaporação térmica à vácuo, deposição química a vapor, deposição por pulverização catódica, dentre outras. Todas as técnicas consistem em extrair átomos ou moléculas de um determinado material e depositá-los sobre a superfície de um substrato, conforme ilustrado na Figura 12 (SILVEIRA, 2016).

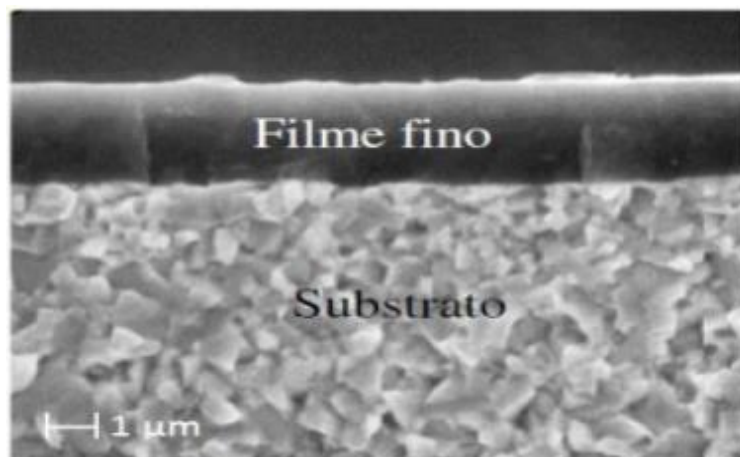


Figura 12 - Micrografia da seção transversal de um filme depositado em um substrato (Fonte: AGUZZOLI et al, 2009 apud QUEIROZ, 2015)

Diversos compostos têm sido usados na síntese de filmes finos, dentre os quais podemos citar: dióxido de titânio (TiO_2), dióxido de silício (SiO_2), óxido de zinco (ZnO), sulfeto de zinco (ZnS), dióxido de tálio (TaO_2) e fluoreto de magnésio (MgF_2). Quando dopados, estes óxidos apresentam melhoria da condutividade elétrica, sem degradar a sua transmissão óptica, razão pela qual passaram a ser cada vez mais aplicados na indústria. Dentre os óxidos mais utilizados no mercado para síntese de filmes finos, podemos destacar o óxido de zinco dopado com alumínio (AZO), óxido de estanho dopado com índio (ITO), óxido de estanho dopado com antimônio (ATO) ou flúor (FTO) (FORTUNATO *et al.*, 2007 apud QUEIROZ, 2015).

A aplicação de filmes desses compostos dopados sobre a superfície de diferentes tipos de materiais permite atribuir novas funcionalidades e agregar valor aos materiais, através da modificação de algumas propriedades, tais como: hidrofobicidade, resistência à corrosão, dureza, resistência ao desgaste, biocompatibilidade, condutividade, dentre outras (SOUZA JR., 2006).

Com o avanço da tecnologia, a deposição de filmes finos nas superfícies dos materiais tem proporcionado sua aplicação em diversas áreas da indústria, como na

microeletrônica, telecomunicação, em dispositivos e revestimentos ópticos e eletro-ópticos, dentre outros (WANG *et al.*, 2009 apud QUEIROZ, 2015; GANESH *et al.*, 2012 apud QUEIROZ, 2015). A este respeito, podemos citar como exemplo, a utilização de filmes finos de óxido de titânio dopados com estanho (ITO) na fabricação de células solares. Neste caso, o ITO quando aplicado sobre o silício atua como uma camada antirrefletora devido ao seu índice de refração e, também aprimora a coleta de corrente nestes dispositivos (DAMIANI, 2010).

Devido à vasta possibilidade de aplicação dos filmes finos para modificação da superfície dos materiais, existe uma expectativa do desenvolvimento de novos filmes, novas tecnologias ou mesmo o aperfeiçoamento das técnicas já existentes.

2.2.1 Filmes Finos de TCO

Os óxidos condutores transparentes, conhecidos como TCOs (do inglês, *Transparent Conducting Oxide*) são óxidos que quando depositados na forma de filmes finos apresentam transmitância óptica maior que 80% na região visível e baixa resistividade elétrica (entre 10^{-4} a $10^{-3} \Omega \text{ cm}$) (JIANG *et al.*, 2009 apud MELO, 2015). Os compostos ZnO, SnO₂, CdO e Ga₂O₃ são exemplos de materiais que apresentam características compatíveis com a sua utilização como TCOs (KING & VEAL, 2011 apud CATTO, 2012).

O primeiro documento sobre a obtenção de TCOs foi publicado em 1907, quando Badeker mostrou que um filme fino de metal de cádmio, depositado por *sputtering*, tornou-se transparente ao ser oxidado porém mantendo suas propriedades condutoras (AMORIM, 2014). Desde então, os avanços nas técnicas de deposição de

filmes desses compostos fizeram com que tivessem inúmeras aplicações na indústria. Atualmente, os TCOs são empregados em diodos orgânicos emissores de luz (OLEDs, do inglês *organic light-emitting diode*), células solares, janelas refletoras de calor, transistores de filmes finos (TFTs, do inglês *thin film transistor*), dentre outros (DAMIANI, 2010).

O óxido de índio dopado com estanho ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$), conhecido como ITO, é um dos TCOs mais utilizados na indústria de dispositivos optoeletrônicos. Entretanto, devido à pouca disponibilidade do elemento índio na natureza e ao custo elevado para sua obtenção, o uso do ITO está sendo repensado pelos pesquisadores que tem, cada vez mais, procurado óxidos alternativos que possam substituí-lo (BHOSLE *et al.*, 2007 apud CATTO, 2012).

2.2.2 Filmes Finos de AZO

O óxido de zinco (ZnO) é um material semicondutor, pertencente à família II-VI, não estequiométrico do tipo n, que tem sido estudado como um candidato promissor para substituir o ITO (SILVA, 2015). Seu baixo custo e abundância na natureza, aliados ao fato de possuir *band gap* direto de 3,37 eV em temperatura ambiente, ausência de toxicidade e elevada estabilidade química em atmosfera de hidrogênio, o que é particularmente importante durante a fabricação de dispositivos que utilizam plasma, tem atraído a atenção dos pesquisadores (GUIMARÃES, 2013; CRUZ *et al.*, 2017).

Na bibliografia encontramos diversas aplicações de filmes finos de ZnO , especialmente para seu uso em dispositivos óptico eletrônicos, materiais condutores transparentes e células solares (AHMAD & ZHU, 2010 apud CATTO, 2012).

O ZnO pode se cristalizar em três diferentes estruturas cristalinas: sal gema, esfarelita e wurtzita. A fase hexagonal do tipo wurtzita (figura 13) é a mais comumente encontrada devido a sua grande estabilidade à temperatura ambiente (CATTO, 2012). Nesta estrutura o oxigênio e o zinco exibem geometria tetraédrica de Zn_4O orientados em uma só direção, com camadas ocupadas por átomos de zinco que se alteram com camadas ocupadas por átomos de oxigênio. Os tetraedros de Zn_4O se arranjam na estrutura hexagonal, deixando aproximadamente 66% do volume do retículo cristalino vazio.

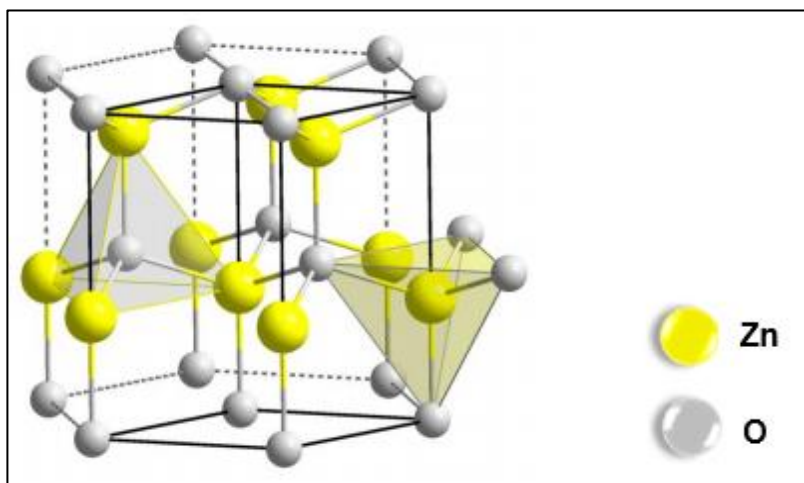


Figura 13 - Estrutura cristalina hexagonal do ZnO (wurtzita)

(Fonte: CORREIA, 2013)

Devido aos espaços existentes em sua estrutura, o ZnO apresenta facilidade em incorporar impurezas, contaminantes e elementos dopantes, ocasionando considerável incremento na geração de defeitos em seu reticulado cristalino. Estes defeitos podem ser causados pela difusão de espécies atômicas e iônicas pelos interstícios da rede cristalina e fazem com que o ZnO seja um semicondutor do tipo-n, permitindo a dopagem com elementos do grupo III-A, tais como o alumínio e gálio, e do grupo V-A, como por exemplo o antimônio e bismuto (MELO, 2015).

A dopagem ocorre através da substituição de átomos de Zn^{+2} por elementos dopantes do grupo III-A ou V-A, e proporciona uma melhora nas propriedades elétricas (redução da resistividade), além de uma maior estabilidade térmica do filme (DIAS, 2005). Entretanto, os melhores dopantes são os elementos que possuem raio iônico próximo ao do Zn^{2+} (0,74 Å), como íons de Al^{3+} (0,54 Å) e Ga^{3+} (0,62 Å) (FERREIRA, 2008; MELO, 2015).

A dopagem de ZnO com íons de Al^{3+} se dá pela substituição de um íon de zinco por um íon de alumínio em sua rede hexagonal ou pelo desmembramento para uma região não cristalina no contorno de grão, formando ligações Al-O. Desta maneira, grande parte dessas espécies é capaz de substituir o Zn^{2+} mantendo a estrutura da rede cristalina. Devido à necessidade de compensação de carga, origina-se um elétron livre na banda de condução do óxido para cada íon Al^{3+} presente no sistema. Como o raio iônico do alumínio é menor que do zinco, torna-se relativamente fácil inserir os íons de alumínio na rede wurtzita do ZnO, sendo possível obter o óxido de zinco dopado com alumínio.

Os filmes de óxido de zinco dopado com alumínio (AZO) também são semicondutores com *band gap* variando entre 3,3 a 3,9 eV, apresentam boa transmissão óptica na região do visível e do infravermelho próximo e baixa resistividade elétrica ($10^{-3} \Omega.cm$) Essas propriedades permitiram sua aplicação prática em células solares e eletrodos com monitor de tela plana, dentre outras (GUIMARÃES, 2013; LOPES *et al.*, 2016). Ressalta-se que, as propriedades dos filmes de AZO dependem do método e dos parâmetros de deposição, sendo o controle da síntese indispensável para explorar todo o seu potencial.

2.2.3 Caracterização de Filmes Finos

A caracterização de filmes finos pode ser realizada por diversas técnicas. Os filmes de AZO produzidos neste trabalho foram caracterizados quanto à sua espessura, por meio da técnica de perfilometria; resistividade, pelo método de quatro pontas; e quanto às suas propriedades ópticas (transmitância, absorbância e refletância), pelo método de espectrofotometria ultravioleta-visível e infravermelho próximo.

2.2.3.1 Perfilometria

A perfilometria permite medir a espessura do filme fino depositado sobre o substrato. Nesta técnica a leitura é realizada por uma ponta de diamante que percorre a superfície da amostra, realizando a leitura de sua topografia e identificando a existência de um degrau entre o substrato (placa de vidro) e o local onde foi efetuada a deposição do material. A partir dessa informação é possível definir a medida de espessura do filme. A Figura 14 mostra o esquema de funcionamento do perfilômetro.

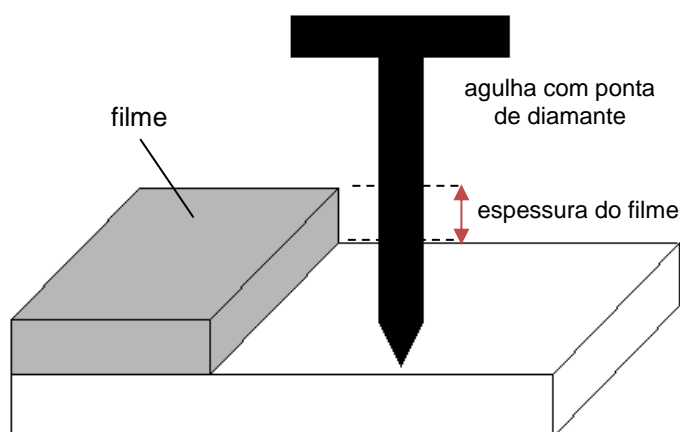


Figura 14 - Esquema de funcionamento do perfilômetro.

(Fonte: Adaptado de MASCAGNI, 2009)

2.2.3.2 Espectroscopia UV-VIS-NIR

A técnica de espectroscopia no ultravioleta-visível e infravermelho próximo (UV-VIS-NIR, do inglês *Ultraviolet Visible Near InfraRed*) consiste em uma técnica de caracterização óptica do material.

Segundo Araújo (2011), de maneira genérica, a espectroscopia consiste no estudo da radiação eletromagnética que é transmitida, absorvida ou refletida por um objeto material, conforme apresentado na Figura 15 (ARAUJO, 2011).

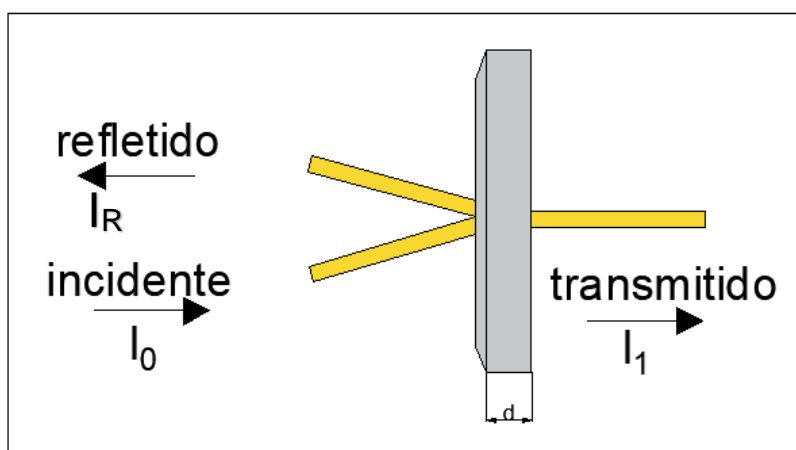


Figura 15 – Reflexão, transmissão e absorção de um feixe de luz com intensidade I_0 incidindo em um filme de espessura d .

(Fonte: SILVA, 2012)

A técnica de espectroscopia UV-VIS-NIR permite determinar a refletância, absorvância e transmitância de um material, no intervalo de comprimentos de onda dos espectros correspondentes ao ultravioleta, de 10 a 400nm (SOTELO, 2006);

visível, de 400 a 780 nm; o infravermelho próximo (NIR), de 780 a 2500nm (BALOGH, 2011), conforme mostrado na Figura 16.

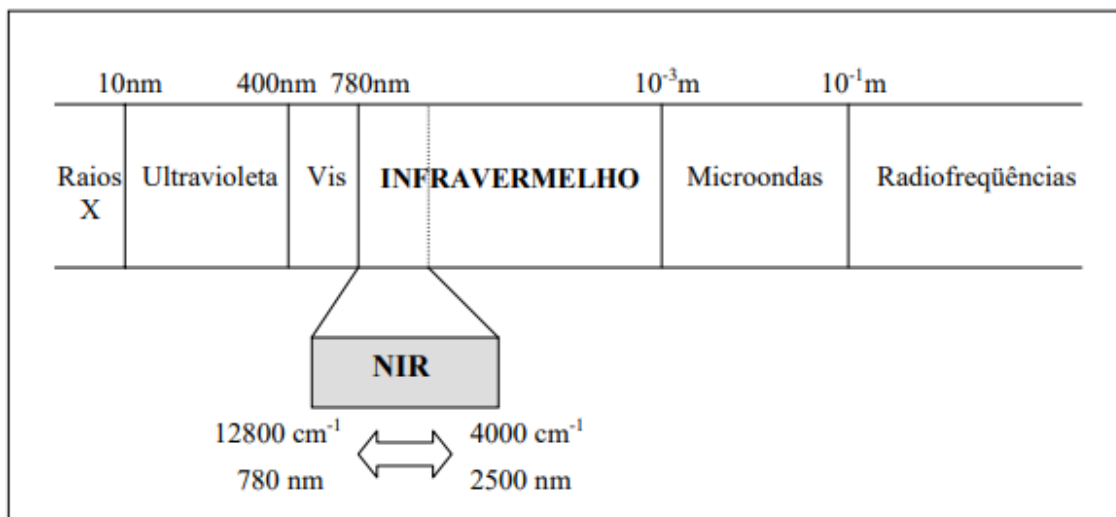


Figura 16 - O espectro eletromagnético.

(Fonte: SOTELO, 2006)

A refletância (R) é dada pela razão entre a intensidade de radiação refletida (I_R) e incidente (I_0), conforme equação 6.

$$R = \frac{I_R}{I_0}$$

Equação 6

(Fonte: CASTRO, 2003)

onde:

R = refletância;

I_0 = intensidade da luz incidente; e

I_R = intensidade da luz refletida.

Ao interagir com a matéria, a radiação pode perder parte de sua energia, sendo esta absorvida pelo objeto. Quanto mais espesso for o objeto, mais energia é absorvida, podendo a relação entre a intensidade incidente e a transmitida ser calculada pela equação de Lambert-Beer (equação 7).

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha d} \quad \text{Equação 7}$$

(Fonte: CASTRO, 2003)

onde:

I_0 = intensidade da radiação incidente;

I_1 = intensidade da radiação transmitida;

d = espessura do meio; e

α = coeficiente de absorção óptico, depende do material e do comprimento de onda da radiação incidente.

A razão entre a intensidade da radiação absorvida pelo material (I_A) e a incidente (I_0) é denominada de absorbância (A) e pode ser calculada pela equação 8:

$$A = \frac{I_A}{I_0} \quad \text{Equação 8}$$

(Fonte: SIEZKA, 2013)

onde:

A = absorbância;

I_0 = intensidade da luz incidente; e

I_A = intensidade da luz absorvida.

A transmitância (T) corresponde à relação entre a radiação transmitida (I_1) e a radiação incidente (I_0), conforme equação 9:

$$T = \frac{I_1}{I_0} \quad \text{Equação 9}$$

(Fonte: SIEZKA, 2013)

onde:

T = transmitância;

I_0 = intensidade da luz incidente; e

I_1 = intensidade da luz transmitida.

Com as medidas obtidas por meio da espectroscopia UV-VIS-NIR é possível calcular o coeficiente de absorção (α) e o *band gap*, importantes características ópticas a serem estudadas nesta dissertação.

O coeficiente de absorção determina a capacidade do material em absorver radiação eletromagnética e varia de acordo com o comprimento de onda da radiação eletromagnética, podendo ser calculado através da equação 10 (OLIVEIRA NETO, 2012).

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{d} \quad \text{Equação 10}$$

(Fonte: SCHEIDT, 2014)

onde:

α = coeficiente de absorção;

T = transmitância; e

d = espessura.

O *band gap* corresponde à quantidade energia necessária para tirar um elétron da banda de valência e “libertá-lo” na banda de condução, sendo o fator primordial para determinar se o sólido será: a) isolante, com um *band gap* alto (maior que 5 eV) (CALLISTER, 2008 apud RAMANERY, 2012); b) um semiconductor, com um valor de *band gap* entre 0 e 3 eV; c) um condutor, onde não há *band gap*, ou seja, a banda de valência e a banda de condução estão sobrepostas (SILVA, 2009; SHRIVER *et al.*, 1994 apud CARDOSO *et al.*, 2005). A figura 17 ilustra como a magnitude do *band gap* define os tipos de sólidos.

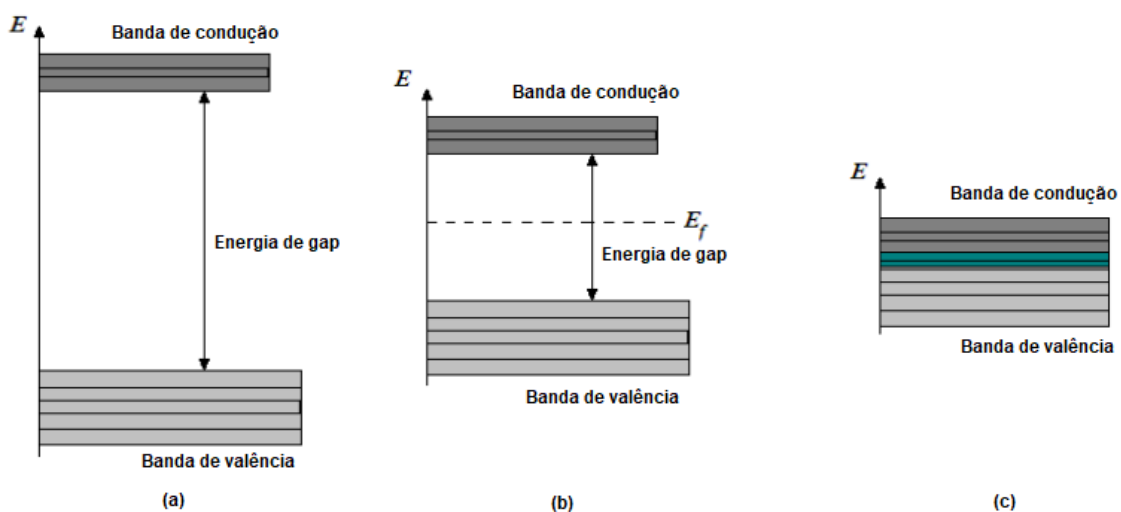


Figura 17 - Representação idealizada da configuração de bandas de condução, banda de valência e energia de *gap*: (a) material isolante, (b) semiconductor, (c) condutor. E_g e E_f significam energia do *gap* e energia de Fermi, respectivamente.

(Fonte: SANTOS *et al.*, 2009 apud RAMANERY, 2012)

O *band gap* pode ser calculado pelo método de Tauc a partir da equação 11 e extrapolando a parte linear da curva (borda de absorção próximo ao UV) do gráfico de $(\alpha h\nu)^2$ versus $(h\nu)$ até a absorção ser zero.

$$\alpha(\nu) = \frac{B(h\nu - E_g)^r}{h\nu} \quad \text{Equação 11}$$

(Fonte: SCHEIDT, 2014)

onde:

α = coeficiente de absorção;

ν = frequência;

h = constante de Planck;

B = constante

E_g = *band gap*

r = índice que pode ter diferentes valores: 2, 3, 1/2 e 1/3, correspondendo a transições indiretas permitidas, indiretas proibidas, diretas permitidas e diretas proibidas, respectivamente.

Para que os elétrons passem da banda de valência para as bandas de condução é necessário que a fonte de excitação forneça a mesma energia que o *band gap* e que essa energia seja maior que a energia de Fermi (LUNAS, 2009).

O nível de Fermi corresponde à energia do nível mais alto ocupado por um sistema quântico à temperatura zero (SILVA, 2010), e pode ser calculado pela equação 12.

$$E_f = \frac{h^2 k_F^2}{8 \pi^2 m} \quad \text{Equação 12}$$

(Fonte: GONÇALVES, 2011)

Onde:

E_f = energia de Fermi;

h = constante de Planck;

m = massa efetiva do elétron; e

k_F = vetor de onda de Fermi, calculado pela equação 13.

$$k_F = (3 \pi^2 N)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 13}$$

(Fonte: GONÇALVES, 2011)

Onde:

k_F = vetor de onda de Fermi; e

N = concentração de portadores.

Ressalta-se que a concentração de portadores (N) acaba por se refletir também em outras propriedades, notadamente no *band gap*. Com o aumento de N observa-se o deslocamento de E_f para o interior da banda de condução, pois os estados energéticos mais baixos encontram-se preenchidos. Desta forma, é necessário fornecer mais energia aos elétrons da banda de valência para que ocupem os estados livres no interior da banda de condução (GONÇALVES, 2011).

Este efeito de ampliação do hiato é frequentemente observado em TCOs, sendo designado por deslocamento de Burstein-Moss, o qual pode ser descrito pela equação 14.

$$\Delta E_{BM} = \frac{h^2 k_F^2}{2m_{cv}} \quad \text{Equação 14}$$

(Fonte: GONÇALVES, 2011)

Onde:

ΔE_{BM} = deslocamento de Burstein-Moss

h = constante de Planck;

k_F = vetor de onda de Fermi; e

m_{cv} = massa efetiva combinada reduzida do elétron, calculada pela equação 15.

$$\frac{1}{m_{cv}} = \frac{1}{m_c} + \frac{1}{m_v} \quad \text{Equação 15}$$

(Fonte: GONÇALVES, 2011)

Onde:

m_{cv} = massa efetiva combinada reduzida do elétron;

m_c = massa efetiva dos portadores na banda de condução; e

m_v = massa efetiva dos portadores na banda de valência.

Dessa forma, o *hiato óptico* (E_{op}) passa a ser definido como:

$$E_{op} = E_g + \Delta E_{BM} \quad \text{Equação 16}$$

(Fonte: GONÇALVES, 2011)

Onde:

ΔE_{BM} = deslocamento de Burstein-Moss

E_{op} = hiato óptico; e

E_g = energia de *band gap*.

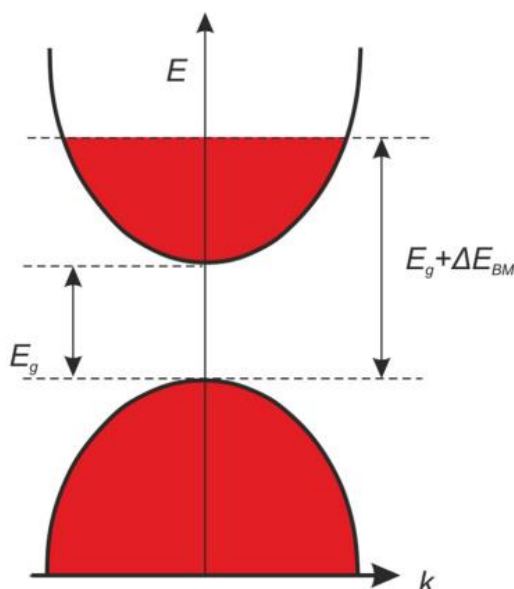


Figura 18 - Diagrama de bandas com o efeito Burstein-Moss representado.

(Fonte: GONÇALVEZ, 2011)

A dopagem é uma das formas conhecidas de modificar a concentração de portadores e, conseqüentemente, a posição do nível de Fermi.

Nota-se, na figura 18, que o nível de Fermi se localiza aproximadamente no centro da energia do *band gap*. Este comportamento é típico de cristais semicondutores intrínsecos, como é o caso do ZnO (LENGRUBER, 2014). O processo de dopagem com alumínio, por exemplo, faz com que ocorra a substituição dos átomos de Zn, tornando-o um semicondutor do tipo n extrínseco, o que confere valores de resistividade mais baixos (PEARTON *et al*, 2005 apud LOPES, 2016) e com concentração de portadores mais altos (GONÇALVES, 2011).

Nesses casos nota-se que, devido ao efeito de Burstein-Moss, os valores do *band gap* para semicondutores altamente dopados sofrem aumento, conforme representado na figura 19.

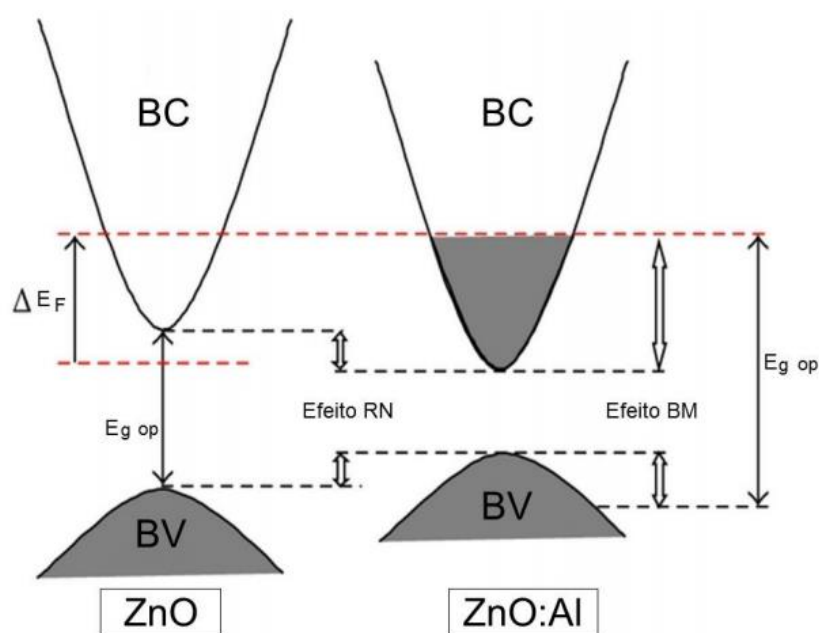


Figura 19 - Esquema representativo da estrutura de banda de semicondutores: (a) não dopado; (b) dopado. As áreas cinzas denotam os estados ocupados.

(Fonte: TRINDADE, 2015)

2.2.3.3 Método de Quatro Pontas

Os filmes finos de óxidos condutores vêm sendo utilizados nas mais diversas aplicações em que suas propriedades elétricas são exploradas, como seu uso em sensores, nanoatuadores acionados eletricamente e dispositivos microeletrônicos. Por essa razão, é extremamente importante conhecer sua resistividade elétrica (TEIXEIRA, 2007).

Existem diversos métodos descritos na literatura que podem ser usados para o cálculo e determinação da resistividade elétrica em sólidos.

As propriedades elétricas dos filmes finos de AZO produzidos nesta dissertação foram analisadas pelo método de quatro pontas. Este método foi originalmente proposto por Wenner, em 1915, para medir a resistividade elétrica do globo terrestre e é conhecida dentre os Geofísicos como método de Wenner. Entretanto, L. B. Valdes, em 1954, adotou a técnica para realizar medidas de resistividade elétrica em wafers de materiais semicondutores. Desde então essa técnica é utilizada como método analítico para medidas de resistividade elétrica em sólidos (GIROTTTO, 2002).

Por sua simplicidade, o método quatro pontas é o mais amplamente utilizado para a determinação da resistividade elétrica de condutores metálicos e semicondutores. Este método é indicado para medidas de rotina que requerem rapidez e precisão nos resultados (GIROTTTO, 2002).

Neste método quatro eletrodos são dispostos linearmente, sendo que os dois eletrodos externos geralmente são usados para a injeção de corrente, e os dois eletrodos internos para medir a queda de tensão, conforme mostrado na Figura 20.

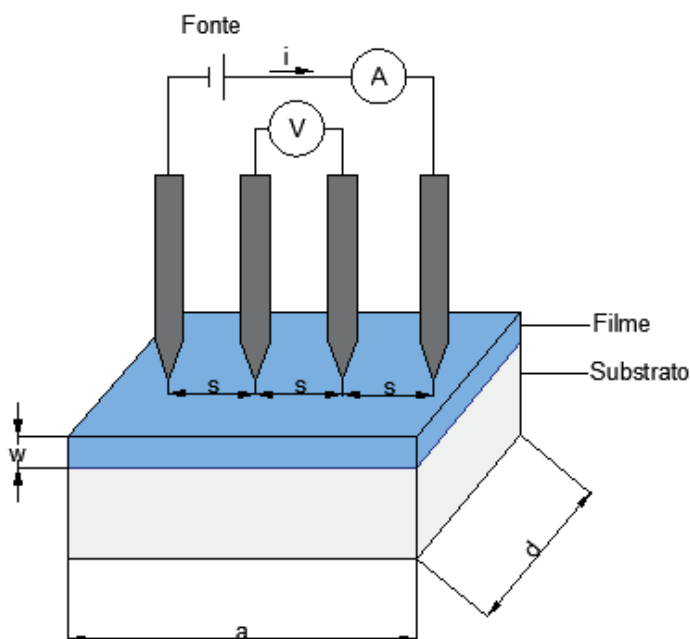


Figura 20 - Arranjo para medidas de resistividade pelo método quatro pontas.

(Fonte: GIROTTTO, 2002 - Adaptado)

Considerando-se que as pontas estão igualmente espaçadas, que as amostras são retangulares e possuem comprimento e largura finitos, para determinação da resistividade aplica-se a equação 17, a seguir:

$$\rho = \frac{V}{i} 2\pi s F_1 F_3 \quad \text{Equação 17}$$

(Fonte: GIROTTO, 2002)

onde:

ρ = resistividade;

V = tensão;

i = corrente;

s = distância entre as pontas;

F_1 = fator de correção 1; e

F_3 = fator de correção 2.

Sendo que F_1 e F_3 podem ser calculados através das equações 18 e 19, respectivamente.

$$F_1 = 1 + 4 \frac{s}{w} \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{s}{w} + (2n)^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(2 \frac{s}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right) \right] \quad \text{Equação 18}$$

(Fonte: GIROTTO, 2002)

$$F_3 = \frac{\pi}{\left\{ \left(\pi \frac{s}{d} \right) + \ln \left(1 - e^{-\frac{2\pi s}{d}} \right) + \left[e^{-2\pi \left(\frac{a}{s} - 2 \right) \frac{s}{d}} \left(\frac{\left(1 - e^{-\frac{6\pi s}{d}} \right) \left(1 - e^{-\frac{2\pi s}{d}} \right)}{1 + e^{-\frac{2\pi a}{d}}} \right) \right] \right\}} \quad \text{Equação 19}$$

(Fonte: GIROTTI, 2002)

onde:

w = espessura;

a = comprimento; e

d = largura.

2.3 Técnicas de deposição de filmes finos

Conforme já discutido nesta dissertação, a deposição de filmes finos sobre a superfície de materiais permite alterar suas propriedades, agregando valor e possibilitando novas aplicações aos materiais.

As técnicas de deposição de filmes finos podem ser divididas em três grupos principais: *i*) deposição química por vapor (CVD, do inglês *chemical vapor deposition*); *ii*) deposição física por vapor (PVD, do inglês *physical vapor deposition*); e *iii*) crescimento de filme em fase líquida (RONCONI, 2002).

Os processos físicos envolvem a geração e deposição de espécies metálicas a partir de um alvo sólido. Neste processo as espécies do filme são arrancadas fisicamente de uma fonte, por temperatura (evaporação) ou por impacto de íons (pulverização, do inglês, *sputtering*), e como vapor se deslocam até o substrato onde se condensam na forma de um filme. O ambiente do processo é mantido em baixa pressão (TASCH, 2006; MARINHO, 2009).

No processo químico os filmes são formados pela reação química de espécies convenientes na superfície do substrato. No processo de deposição a partir de líquidos, a espécie (em forma líquida) é gotejada e centrifugada sobre o substrato (TASCH, 2006; MARINHO, 2009).

A seleção da técnica de deposição a ser utilizada é baseada no material a ser depositado, na espessura desejada, nas características do substrato e nas propriedades elétricas e mecânicas requeridas para o material (FELIX, 2009).

2.3.1 Sputtering

Sputtering, ou pulverização catódica, é um processo de deposição física em fase vapor (PVD). Nesta técnica tem-se a retirada de átomos de um alvo através do bombardeamento com partículas de dimensões atômicas. Todo o processo ocorre em câmaras de vácuo com gases em baixa pressão. O alvo e a fonte ficam justapostos na câmara com gás inerte, geralmente Argônio (Ar). Uma tensão é aplicada formando assim uma diferença de potencial entre o alvo e o substrato, até a formação de um plasma de descarga luminosa. Neste momento as partículas de alta energia (íons do gás inerte com energia entre 1 e 100eV) são acelerados e bombardeiam o alvo fazendo com que os átomos sejam ejetados e sigam em direções aleatórias, parte deles atinge a superfície do substrato, formando o filme (SCHEIDT, 2014; CARVALHO, 2016). A figura 21 apresenta um esquema do processo de deposição por *sputtering*.

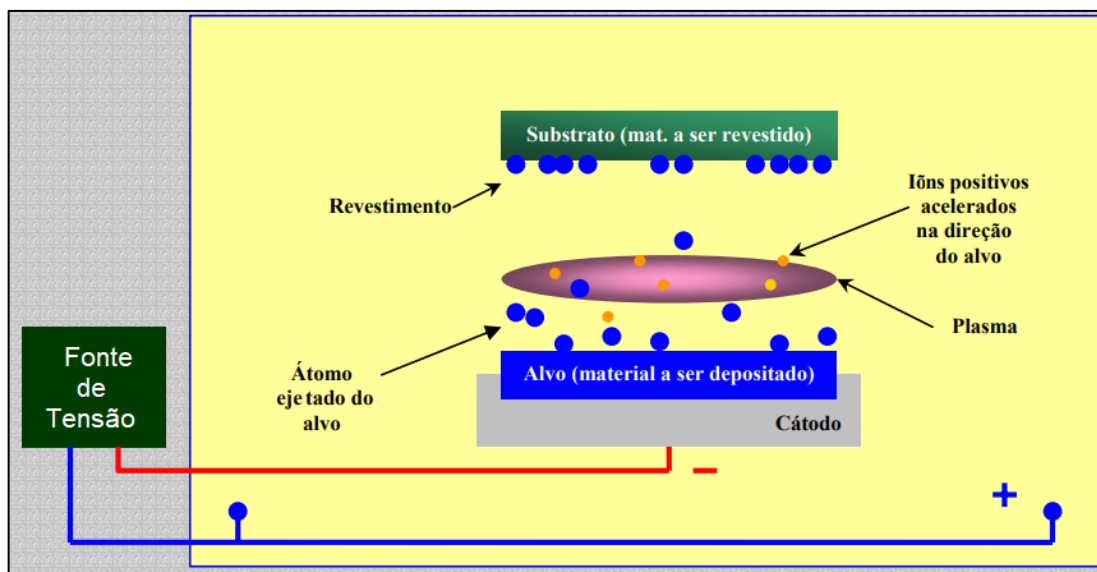


Figura 21 - Processo de deposição por pulverização catódica (*sputtering*)

(Fonte: MONTEIRO, 2004 - Adaptado)

A técnica de deposição de filmes por *sputtering* apresenta as seguintes vantagens: permite uma deposição uniforme sobre grandes áreas pela utilização de alvos de diâmetro grande; possibilita a deposição de filmes compostos por meio da utilização de alvos múltiplos; é aplicável a diversos tipos de materiais, inclusive os isolantes e refratários; proporciona boa aderência dos filmes depositados e controle preciso da espessura; permite o controle dos parâmetros de crescimento do filme, entre outras (FONTANA, 1997; SCHEIDT, 2014).

Existem vários tipos de *sputtering*, entre eles destacamos o *magnetron sputtering*, técnica utilizada nessa dissertação e que será apresentada a seguir.

2.3.2 Magnetron sputtering

No *sputtering* convencional nem todos os elétrons vão contribuir para a ionização do gás de trabalho, alguns deles serão acelerados em direção à parede da câmara, podendo produzir radiação e aquecimento. Para otimizar o processo de deposição a técnica de *magnetron sputtering* foi desenvolvida.

A deposição por *magnetron sputtering* diferencia-se do *sputtering* convencional pela adição estratégica de ímãs no verso do alvo, o que permite gerar campos magnéticos que aprisionam elétrons secundários, confinando o plasma, aumentando a taxa de ionização e tornando o *sputtering* mais direcional (FONTANA, 1997; CARVALHO, 2016).

A figura 22 apresenta o efeito do confinamento dos elétrons decorrente da aplicação da técnica de *magnetron sputtering*.

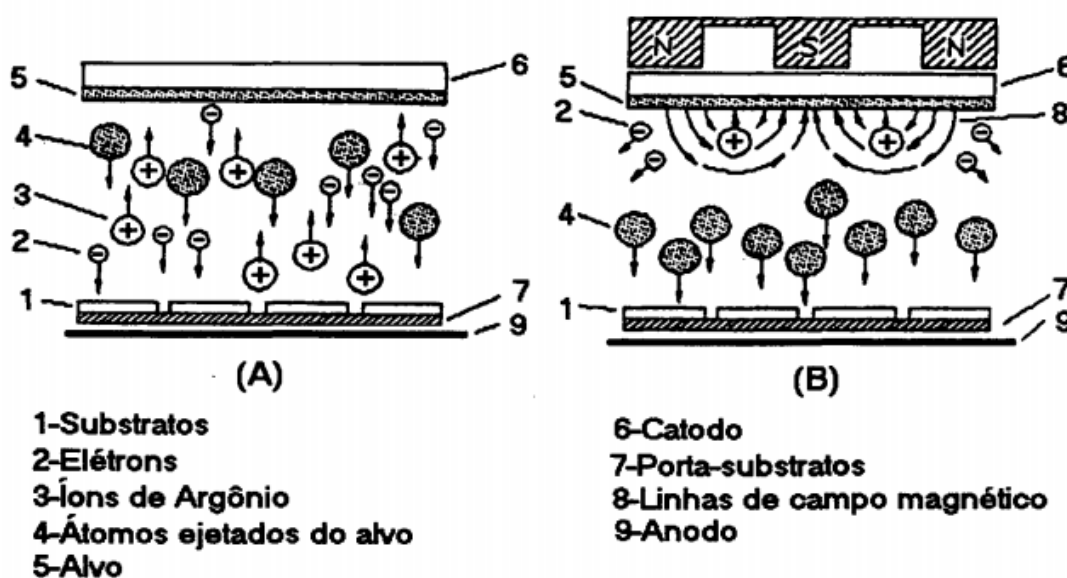


Figura 22 - Cinética de partículas: (a) *sputtering* convencional; (b) *magnetron sputtering*.

(Fonte: FONTANA, 1997)

Os plasmas utilizados em modificação de superfície são iniciados e sustentados por um campo elétrico, o qual é produzido tanto por fontes de tensão que operam em corrente alternada (AC) ou em corrente contínua (DC) (POLAK, 2010). Existem vários tipos diferentes de fontes de energia usadas para bombardear o material alvo, incluindo fontes de corrente contínua (CC), radiofrequência, corrente contínua pulsada (CC pulsada), média frequência (MF), corrente alternada (AC) e as novas técnicas de pulverização HIPIMS (do inglês, *high power impulse magnetron sputtering*) (HUGHES, 2014). Para alvos de boa condutividade elétrica, o campo elétrico aplicado entre os eletrodos pode ser de corrente contínua (DC) ou radiofrequência (RF), no entanto, para materiais isolantes e de baixa condutividade, o campo elétrico entre os eletrodos deve ser de corrente alternada de RF ou de uma fonte DC pulsada com frequência da ordem dos MHz (LIU, 2012). As frequências de excitação AC tipicamente utilizadas são de 100 kHz no fim de seu espectro, 13,56 MHz na faixa de radiofrequência e de 2,45 GHz na região de microondas (POLAK, 2010).

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento da fonte amplificadora de potência (FAP)

De acordo com Viana (2017) na deposição de filmes de AZO por *magnetron sputtering* é comum a utilização de fontes de corrente contínua pulsada (DC pulsada) e radiofrequência (RF). O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma fonte amplificadora de potência (FAP) operando em baixa frequência (BF), confiável e flexível, capaz de aplicar ondas elétricas em baixas frequências visando a ionização do gás de síntese.

Primeiramente, realizou-se o estudo bibliográfico dos filmes finos de AZO em baixa pressão atmosférica, visando caracterizar eletricamente o plasma para uma aplicação por pulverização catódica em baixa pressão com sinal elétrico em baixa frequência.

Após a compreensão das principais características elétricas e do funcionamento da pulverização catódica em baixa frequência, definiu-se as características elétricas necessárias para que a fonte amplificadora de potência fosse capaz de gerar plasma e tratar superfícies com filme fino de AZO de modo experimental, em laboratório, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da Fonte

Parâmetros	Min.	Max.	Unidade
Frequência	3	40	kHz
Tensão de saída	10	± 500	V
Potência de saída	10	100	W

Para facilitar o entendimento, a FAP foi dividida em três blocos, conforme apresentado na Figura 23. O primeiro bloco é composto pelo gerador de sinal Jupiter 2010, da marca TENMA, equipamento do laboratório de Física da UNESP de Sorocaba, que gera sinais de frequências de até 2 MHz, com uma amplitude de pico podendo chegar até ± 10 Volts, sendo esse a única parte que não será desenvolvida nesse estudo.

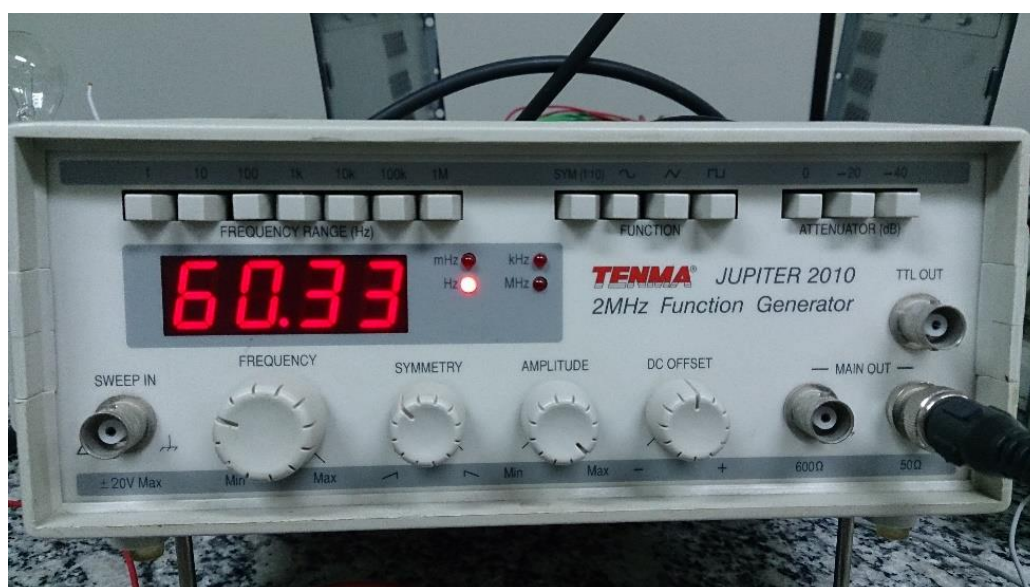


Figura 23 – Gerador de sinal

O segundo bloco é composto pelo amplificador de potência, que tem a função de gerar o ganho de potência ao sinal de entrada que vem do gerador de sinal.

O terceiro bloco é composto por uma fonte de tensão contínua de ± 130 VDC, que fornece tensão simétrica para que o amplificador de potência possa amplificar o sinal elétrico do gerador de sinais.

Estes três blocos compõem a FAP, conforme apresentado na Figura 24.

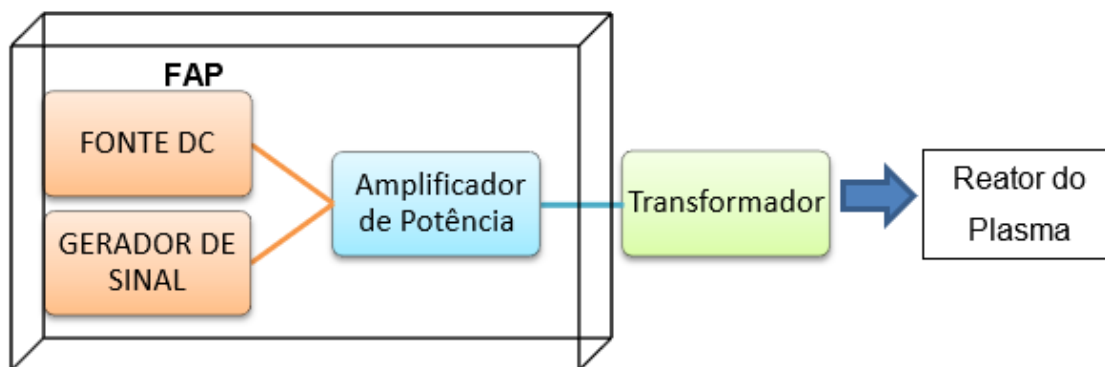


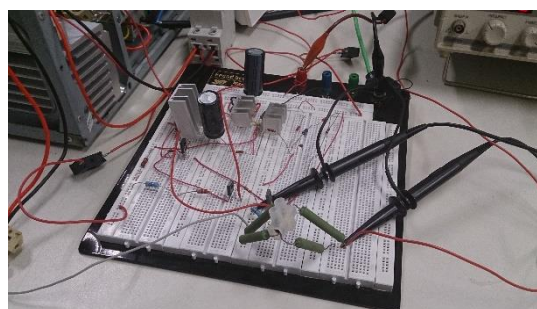
Figura 24 – Esquema em bloco do sistema completo do plasma composto por: FAP (Fonte Amplificadora de Potência); transformador e reator com plasma.

Ressalta-se que, para o projeto do circuito amplificador (figura 25–B), estipulou-se uma tensão de saída de até ± 110 Volts de pico. Este valor foi determinado em função da tensão desejada no plasma. Considerando que o gerador de sinais gera ± 10 Volts, o circuito amplificador foi dimensionado para proporcionar um ganho de tensão de até 11 vezes.

Além disso, a fonte DC (figura 25–A) responsável por fornecer potência à carga, foi projetada para ter uma tensão de ± 130 Volts, ou seja, superior ao amplificador de potência, de forma a evitar situações onde o amplificador de potência trabalhe no limite da tensão disponível, o que poderia ocasionar uma queda de rendimento.



(a)



(b)

Figura 25 – Fonte Amplificadora de potência (FAP). (a) Fonte DC; (b) Amplificador de potência.

O transformador utilizado é de 1kVA, frequência de trabalho entre 3 a 40 kHz com uma relação de transformação de 1:4, sendo a função básica elevar a tensão para ser aplicada no plasma mantendo a frequência entregue pelo amplificador de potência.

3.1.1 Definição da topologia do circuito amplificador

Por se tratar de um projeto de alta complexidade, dividiu-se o desenvolvimento do circuito amplificador em duas fases para melhor definição da topologia a ser utilizada. Na primeira fase trabalhou-se com o desenvolvimento do circuito amplificador variando a tensão e mantendo a frequência fixa de 60 Hz. Na segunda fase especificou-se um transformador especial para trabalhar com a frequência variando entre 3 kHz até 40 kHz.

A partir do levantamento das topologias de circuitos amplificadores da revisão bibliográfica, iniciou-se os testes com a Topologia1 e com baixa potência de saída.

Na topologia 1 a estrutura utiliza TBJs na parte de potência (Q6 e Q7). Então, realizou-se uma vasta pesquisa pela internet e catálogos de componentes em busca de componentes TBJs de potência. Na pesquisa constatou-se que na maioria dos casos os transistores TBJs não atendiam as duas principais premissas de suas funções, ou seja, resposta em frequência e o fornecimento de potência. Normalmente os transistores que atendem as especificações são importados, o que dificulta sua aquisição, e custam 5 vezes mais do que os transistores mosfets (NEWARK, 2018).

Nesse contexto, foi proposto a utilização de mosfet, que evitaria essa preocupação com relação ao nível de potência no resto do circuito, principalmente do

par complementar, pois na polarização do mosfet não é exigida uma corrente e sim uma diferença de tensão entre a porta e fonte para sua polarização. Sendo assim, adotou-se a topologia 2 como base para o projeto.

Para ajuste e simulação da Topologia 2 do circuito amplificador utilizou-se o *Pspice*, um software dedicado para desenvolvimento de circuitos eletrônicos. Primeiramente realizou-se um estudo matemático do circuito eletrônico, o qual foi simulado via software até obter o melhor ajuste. Em seguida, prosseguiu-se com a montagem do projeto piloto em protoboard, testou-se com carga resistiva, para verificar a capacidade da fonte em fornecer potência. Por fim, realizou-se a deposição de filme fino por plasma.

3.1.2 Definição matemática do circuito amplificador

Para o estudo matemático, dividiu-se a Topologia 2 em: par diferencial, par complementar e par de potência, conforme mostrado na figura 26, de forma a possibilitar o dimensionamento dos componentes.

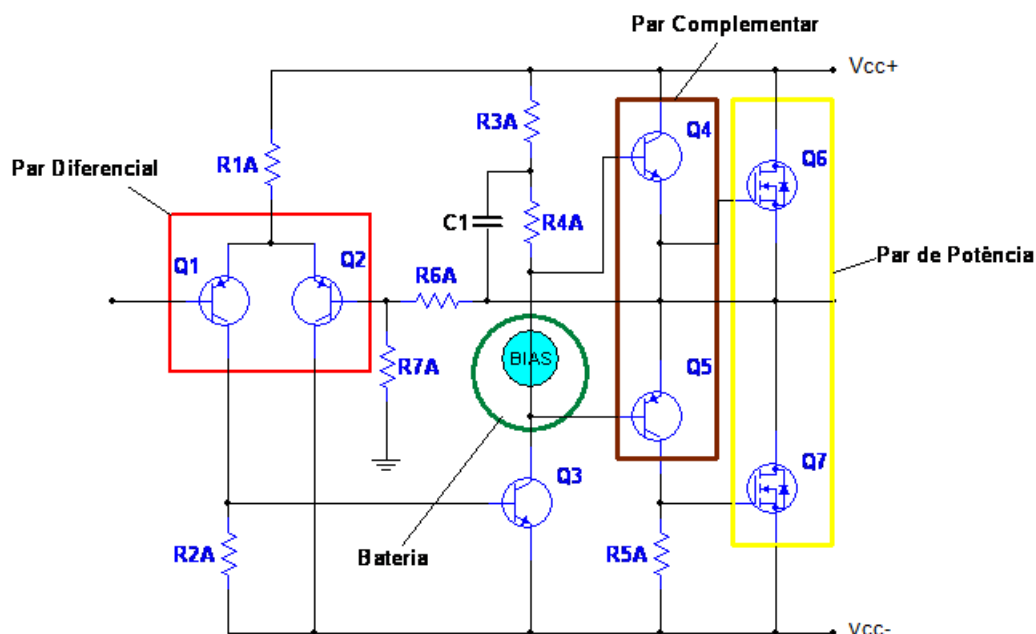


Figura 26 - Partes integrantes da topologia do Amplificador de Potência. Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5: transistores TBJ; Q6 e Q7: transistores mosfet; R1A, R2A, R3A, R4A, R5A, R6A, R7A: resistores.

Na topologia 2 proposta, o primeiro fato a ser notado é a alimentação V_{cc+} e V_{cc-} que permite que, no chaveamento, os transistores tenham sobre eles uma tensão resultante de 260 Volts, essencial na caracterização de tensão reversa dos componentes, evitando a queima precoce dos mesmos.

Os elementos Q1 e Q2 são transistores de junção bipolar (TBJ) do tipo P e nesse caso a tensão entre emissor e base do transistor (V_{be}) faz que o emissor tipo P esteja num potencial mais alto que a base tipo N, polarizando diretamente a junção emissora e base. Esses dois transistores fazem parte de um par diferencial e devem ter, aproximadamente, a mesma corrente passando pelos emissores para ser ter um circuito balanceado. Esta corrente é determinada pela queda de tensão em R1A, e o balanço entre as correntes dos transistores é determinado pelo ajuste dos resistores de polarização das bases no ponto quiescente, calculado conforme a Equação 20.

$$I_{c1} = I_{c2} = \frac{V_{cc+} - V_{be \text{ de Q1 ou Q2}}}{2 \cdot R_{1A}} \quad \text{Equação 20}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

I_{c1} = corrente de coletor de Q1;

I_{c2} = corrente de coletor de Q2;

V_{cc} = tensão de corrente contínua;

V_{be} = tensão entre base e emissor do transistor TBJ; e

R_{1A} = resistor.

Para simplificar a análise de Q1 e Q2 foi proposto um circuito equivalente para a parte do circuito destacado em verde na figura 27.

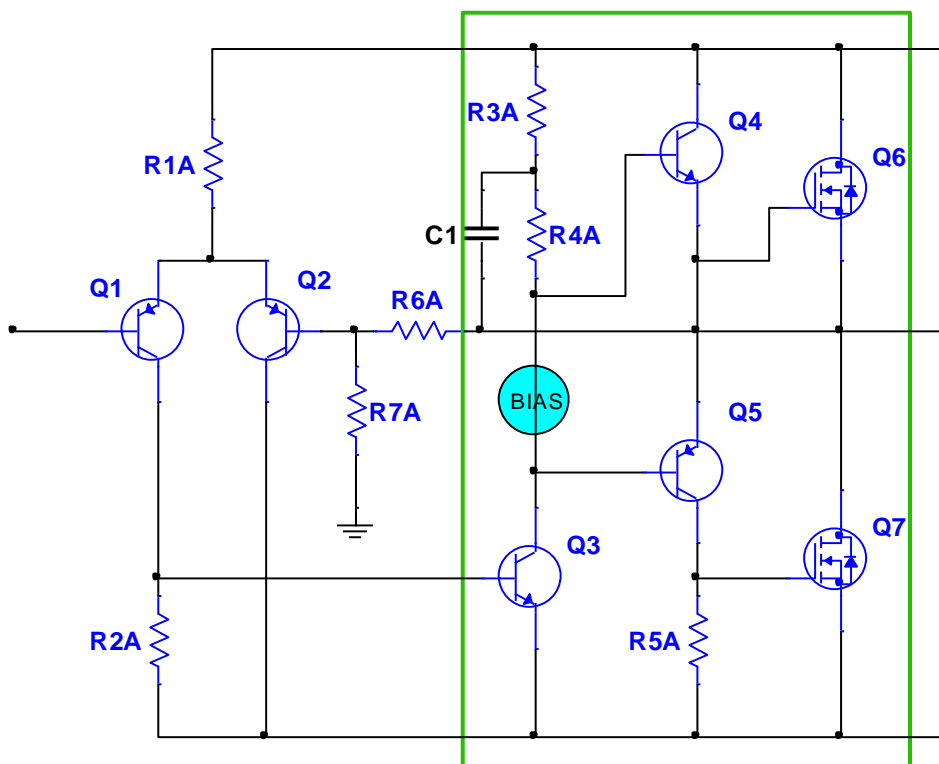


Figura 27 - Simplificação do circuito de potência, parte destacado em verde.

A parte de potência destacada pode ser considerada como um amplificador de ganho unitário. Separando Q1 e Q2 do resto do circuito, e levando em consideração o ganho da malha de potência, redesenhou-se o circuito conforme a figura 28.

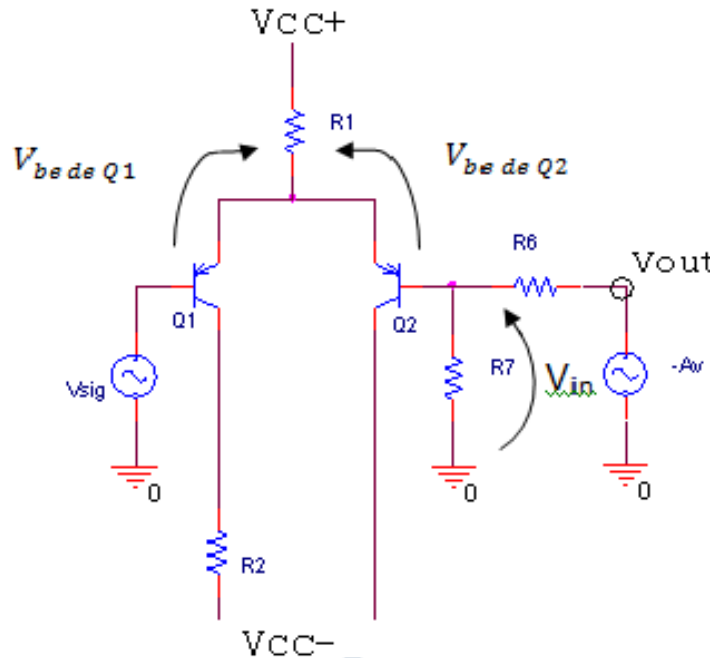


Figura 28 - Circuito simplificado da parte de potência. V_{sig} = tensão de entrada; $V_{in} = V_{sig}$; V_{out} = tensão de saída do amplificador de potência. V_{be} = tensão entre base e emissor do transistor. R1, R2, R6 e R7 são resistores. Q1 e Q2 são transistores TBJs.

Para determinar a relação entre a tensão de entrada e de saída do circuito da figura 28, utilizou-se a equação 21.

$$V_{sig} + V_{be\ de\ Q1} = V_{in} + V_{be\ de\ Q2} \quad \text{Equação 21}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

V_{sig} = tensão da fonte;

$V_{be\ de\ Q1}$ = tensão entre base e coletor de Q1;

V_{in} = tensão de entrada do amplificador; e

V_{be} de Q2 = tensão entre base e emissor.

Trabalhando os termos da equação 6, obtém-se que a tensão de saída do amplificador de potência pode ser calculada pela equação 22.

$$V_{in} = \frac{V_{out} \cdot R_7}{R_6 + R_7} \quad \text{Equação 22}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

V_{out} = tensão de saída do amplificador (tensão na carga).

Logo, o ganho de tensão que é a tensão de entrada pela tensão de saída, substituindo o valor de V_{in} é dado pela equação 23:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{sig}} = \frac{(R_6 + R_7)}{R_7} \quad \text{Equação 23}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

A_v = ganho de tensão.

A resistência R_2 está ligada ao transistor Q3 de formar a amarrar o valor da tensão entre emissor e base (V_{be}) do transistor Q3 e fixar a corrente que deverá ser fornecida pelo Q1, ou seja, o R_2 tem que produzir uma corrente sobre a tensão de V_{be} do transistor Q3 igual à corrente de coletor (I_c) de Q1.

Os transistores Q4 e Q5 são um par complementar, NPN e PNP respectivamente, e estão funcionando como um amplificador classe AB polarizando os transistores de potência (Q6 e Q7).

O Bias é uma bateria responsável por colocar os transistores Q4 e Q5 no limiar de operação (Classe AB) e assegurar uma polarização adequada para os transistores de potência Q6 e Q7.

Os resistores R3A e R4A (figura 26) são responsáveis pelo fornecimento de corrente para polarização de Q4. Os valores dessas resistências são dimensionados considerando a condição da Equação 24 e a corrente de coletor de Q3.

$$\frac{V_{cc} - (V_{AC\ max} + V_{be\ de\ Q4} + V_{gs})}{R_3 + R_4} > I_{Base4} \quad \text{Equação 24}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

V_{cc} = tensão de alimentação de corrente contínua;

$V_{AC\ max}$ = tensão de alimentação de corrente alternada;

$V_{be\ de\ Q4}$ = tensão entre base e emissor de Q4; e

V_{gs} = tensão entre porta e fonte do transistor de potência.

A componente AC do sinal de entrada sobre o resistor R2 modula a corrente de coletor de Q3, que ao passar pela alta resistência de R3 e R4 resulta em um alto ganho de tensão no coletor de Q3. Esta tensão no coletor de Q3 é seguida por Q6 no ciclo positivo, e no ciclo negativo pelo Q7. Os responsáveis pela polarização hora na metade positiva, hora na metade negativa, são respectivamente Q4 (NPN) e Q5 (PNP) que trabalham em modo puxa-empurra (do inglês *push-pull*). Por fim, a resistência R5 é responsável por ajustar a tensão de gate do transistor Q7.

3.1.3 Caracterização dos componentes do amplificador de potência

Com base na análise anterior, os transistores devem atender as especificações como: tensão de operação de maior que 130 Volts, tensão reversa superior à 260 Volts, potência de operação igual ou superior à 100 Watts e frequência de operação entre 3 e 40kHz.

Especificou-se o mosfet modelo IRPF para a Topologia 2 conforme a figura 29.

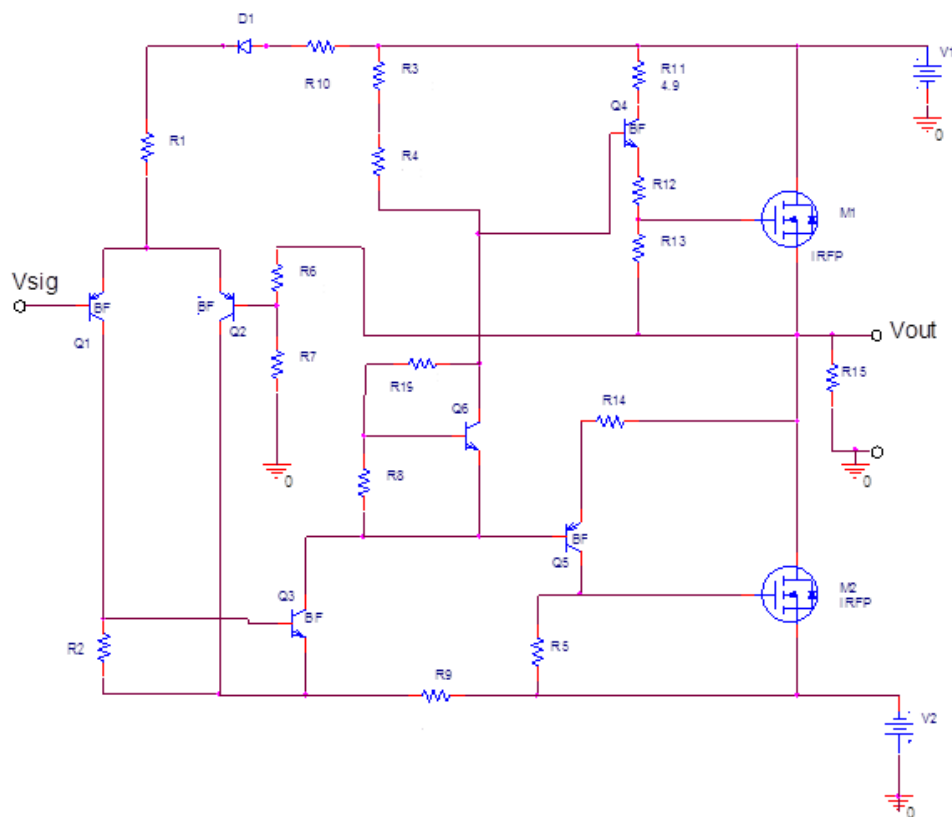


Figura 29 - Topologia 2 com transistores MOSFET.

A utilização dos resistores R13 e R5 fixam a polarização da porta (do inglês *gate*) dos transistores mosfet e evita deixar-os em aberto, o que poderia levar à queima dos mesmos.

Adotou-se um valor da corrente de coletor (I_c) do transistor Q1 e Q2, sendo que uma parte de I_c passa pela resistência R2 e a outra parte polariza a base de Q3, como a parcela da tensão que passa sobre a resistência é muito maior que corrente que vai

para a base de Q3, pode aproximar e dizer que I_c é igual à corrente que passa pela resistência R2 (I_{r2}), levando-se em consideração que o valor da tensão sobre R2 esta fixa pelo valor de tensão entre base e emissor (V_{be}) do Q3, então:

$$I_{r2} = \frac{V_{be \text{ de } Q3}}{R_2} \quad \text{Equação 25}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

I_{r2} = corrente que passa pela resistência R2.

Sabendo-se que queda de tensão no emissor de Q1 e Q2 por volta de 0,7 Volts, devido à configuração do par diferencial e por estarem diretamente polarizados, e sabendo que o valor da tensão continua (V_{cc+}) é igual a 130 Volts, pode-se chegar ao cálculo da resistência R1.

$$I_{R1} = I_{c \text{ de } Q1} + I_{c \text{ de } Q2} \quad \text{Equação 26}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

I_{r1} = corrente que passa pela resistência R1;

$I_{c \text{ de } Q1}$ = corrente de coletor de Q1; e

$I_{c \text{ de } Q2}$ = corrente de coletor de Q2.

Como a corrente de coletor $I_{c \text{ de } Q1}$ é igual a $I_{c \text{ de } Q2}$, podemos dizer que I_{R1} é duas vezes a corrente I_c .

Logo,

$$R_1 = \frac{V_{cc+} - 0,7}{I_{r1}} \quad \text{Equação 27}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

V_{cc} = tensão de alimentação em corrente contínua; e

I_{r1} = corrente que passa pelo resistor R_1 .

Para calcular os valores de R_6 e R_7 , partiu-se da Equação 27 e adotou-se um ganho de tensão que forneça um valor tensão de pico na saída de até 110 Volts.

$$11 = \frac{V_{out}}{V_{sig}} = \frac{(R_6 + R_7)}{R_7} \quad \text{Equação 28}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

$$11 \cdot R_7 = R_6 + R_7 \quad \text{Equação 29}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

$$10 \cdot R_7 = R_6 \quad \text{Equação 30}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Ao final, chega-se que o valor de R_6 deve ser 10 (dez) vezes maior que o de R_7 .

A caracterização dos resistores polarizadores dos transistores mosfet, e o ponto de polarização do circuito foram ajustadas via simulação, sendo que a simulação ocorreu com a carga máxima que o circuito deve suportar. Foi simulado em uma frequência baixa (60Hz), evitando interferência das ressonâncias e oscilações

produzidas pelo chaveamento dos transistores, o que elimina a necessidade de capacitores para compensação.

Os valores de tensão entre porta e fonte do transistor mosfet (V_{gs}) foram fixados para o funcionamento na região de linear (ou região tríodo), conforme a Equação 15.

$$V_{gs} > V_{th} \quad \text{Equação 31}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

$$V_{ds} < V_{gs} - V_{th} \quad \text{Equação 32}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

V_{th} = tensão *threshold* (tensão limiar de condução do dispositivo), entre 2 e 4 volts;

V_{gs} = tensão entre gate e fonte do transistor mosfet; e

V_{ds} = tensão entre dreno e fonte do transistor mosfet.

Dessa forma, o mosfet opera como um resistor controlado pela tensão. A corrente no dreno é obtida pela equação 33 abaixo:

$$I_D = \frac{\mu_n \cdot C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (2(V_{gs} - V_{th})V_{ds} - V_{ds}^2) \quad \text{Equação 33}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

I_D = Corrente de dreno do transistor mosfet;

μ_n = Mobilidade do portador tipo n;

C_{ox} = Capacidade do óxido de porta por unidade de área;

W = Largura do canal; e

L = Comprimento do canal.

3.1.4 Análise de pequenos sinais

Através da análise de pequenos sinais consegue-se definir matematicamente a função transferência do circuito amplificador e ajustar a resposta em frequência do circuito para que ele opere entre 3 e 40 kHz.

Considerando que o circuito como um todo apresenta capacitâncias parasitas e de compensação, elementos que produzem zeros e pólos naturais, responsáveis por determinar a operação em frequência e o ganho de malha fechada, adicionou-se pólos dominantes, neste caso os capacitores, para uma operação funcional entre 3 e 40 kHz.

Utilizando-se a função frequência de corte (equação 34) e frequência do polo (equação 35) dimensionou-se os capacitores a serem introduzidos no circuito, reduzindo-se a interferência dos polos naturais.

Desta forma, ajustou-se a operação do circuito para a faixa de frequência desejada, podendo assim estipular a frequência de corte, ou seja, corresponde a uma atenuação -3db (uma redução a 70,7% do valor da faixa de passagem) e deduzir a frequência de ganho unitário do amplificador.

$$\omega_3 = \frac{1}{R_7 \cdot C_{compensação}}$$

Equação 34

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

onde:

ω_3 = frequência de corte (local da frequência do pólo);

$C_{compensação}$ = capacitor em paralelo com o R_7 calculado para ser um pólo dominante da função transferência.

A frequência do pólo é dada por:

$$f_H = \frac{\omega_H}{2 \cdot \pi} \quad \text{Equação 35}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Onde:

f_H = frequência de corte correspondente à 200 kHz.

ω_H = frequência natural.

$$200000 = \frac{\omega_H}{2 \cdot \pi} \quad \text{Equação 36}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

$$\omega_H = 1413716,69 \quad \text{Equação 37}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Substituindo ω_H na equação de frequência de corte (local da frequência do pólo):

$$\omega_3 = \frac{1}{R_6 \cdot C_{compensação}} \quad \text{Equação 38}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

$$1413716,69 = \frac{1}{R_6 \cdot C_{compensação}} \quad \text{Equação 39}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

$$1413716,69 = \frac{1}{4700 \cdot C_{\text{compensação}}} \quad \text{Equação 40}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

Chega-se no valor de $C_{\text{compensação}}$, de:

$$C_{\text{compensação}} \cong 150 \text{ pf} \quad \text{Equação 41}$$

(Fonte: SEDRA & SMITH, 2007)

É apresentado na figura 30 o circuito amplificador final.

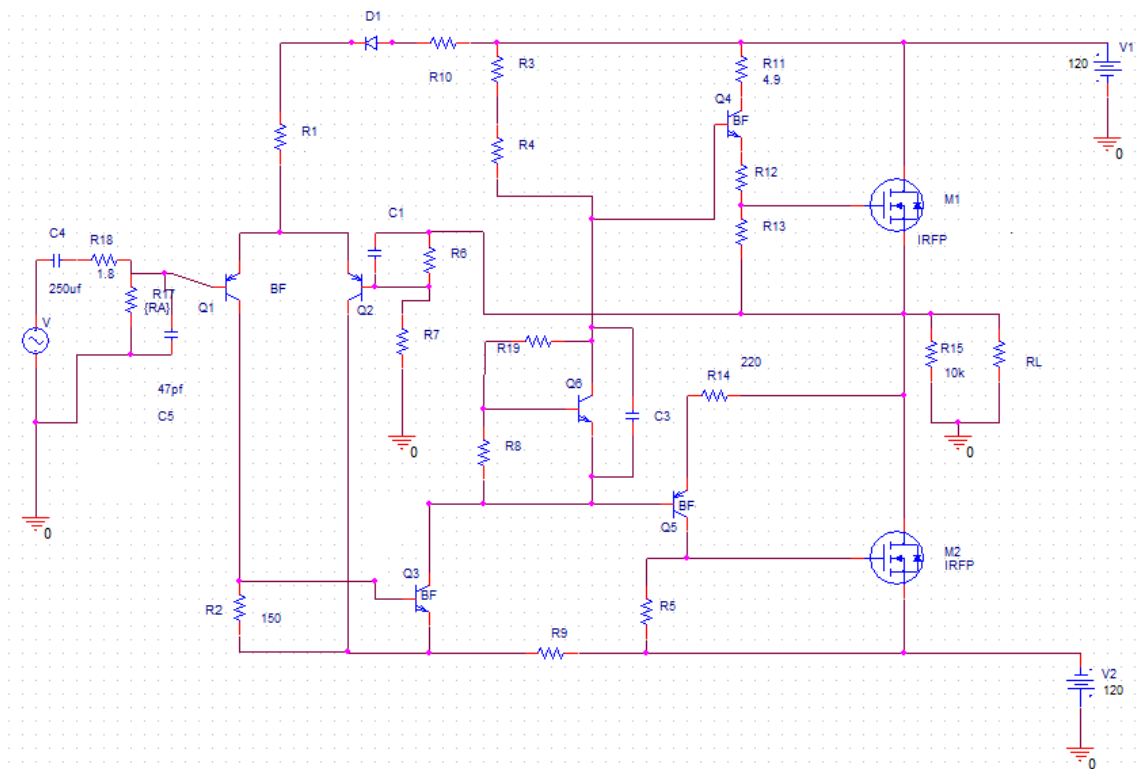


Figura 30 - Circuito final com as capacitâncias.

3.1.5 Cálculo da potência dissipada

Neste capítulo apresenta-se as potências dissipadas pelos componentes da FAP e o dimensionamento dos seus respectivos dissipadores.

3.1.6 Potência dissipada nos componentes

Definiu-se a potência dissipada dos componentes da FAP via simulação. Utilizou-se o software *Pspice* e parametrizou-se a simulação considerando o funcionamento da FAP em carga máxima. Os parâmetros utilizados foram: 300 W de potência na carga, frequência do sinal de saída de 40 kHz, e tensão de pico do sinal de ± 110 V.

A simulação forneceu a potência média dissipada e a potência de picos sobre os resistores. Para maior segurança adotou-se os valores de pico potência para dimensionamento dos resistores conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Potência dissipada nos resistores

Componentes	Resistividade	Potência de Pico	Potência média
	(Ω)	(W)	(W)
R1	13700	1,16	1
R2	156	3,5	3
R3	10700	0,9	0,6
R4	12000	1,1	0,65
R5	1000	0,034	0,020
R6	4700	1,7	1
R7	470	0,2	0,17

Componentes	Resistividade	Potência de Pico	Potência média
	(Ω)	(W)	(W)
R8	1000	0,00053	0,00048
R9	10	0,004	0,0025
R10	180	0,016	0,013
R11	4,9	0,000081	0,000081
R12	200	0,28	0,00008
R13	900	0,036	0,018
R14	200	1,6	0,02
R15	10000	0,9	0,6
R17	497	0,16	0,08
R18	1,8	0,0006	0,00003

A potência média e a potência de pico de todos os transistores foram simuladas nas mesmas condições descritas acima. Os resultados são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Potência dissipada nos transistores do circuito final

Componentes	Descrição do componente	Potência de Pico (W)	Tempo de Ciclo(μs)	Potência média (W)
M1	IRFP	230,00	12,22	112,40
M2	IRFP	230,00	12,39	114,00
Q1	BF	1,10	13,50	0,99
Q2	BF	1,10	14,00	1,00
Q3	BF	2,50	0,50	0,80
Q4	BF	4,00	0,30	0,90
Q5	BF	8,25	0,60	0,52
Q6	BF	0,06	24,80	0,06

Considerando que os componentes capacitivos não têm dissipação térmica, pois não há circulação de corrente e o diodo do circuito tem uma corrente ínfima

passando por ele devido à sua baixa resistência (da ordem de $0,03 \Omega$), desprezou-se a dissipação de potência.

Baseado no trabalho de Polimio (2009) e, em posse dos dados de potência dos transistores, dimensionou-se os dissipadores a serem utilizados. As temperaturas das junções dos transistores devem ser de 10% a 20 % menor que o valor máximo sugerido pelo datasheet do componente, permitindo dimensionar o dissipador para a proteção plena do transistor. Estes cálculos podem ser vistos no Apêndice B, que contém o passo a passo e todas as considerações utilizadas nesse dimensionamento.

3.1.7 Automação do Controle de Temperatura

Utilizou-se Arduino uno para controlar a temperatura dos componentes de potência, de modo a evitar danos causados por excesso de temperatura na junção dos transistores.

O Arduino mede em tempo real a temperatura externa dos componentes de potência. Com o valor de temperatura externa do componente e, considerando as constantes de transferência de calor entre as junções e capas e a troca de calor com o meio ambiente, é possível calcular a temperatura interna do componente, que normalmente resiste a cerca de 165°C , a fim de manter a integridade do mesmo.

Desta forma, o Arduino uno (figura 31) foi configurado para cortar o funcionamento caso a temperatura do sistema ultrapasse o valor calculado no projeto, que é de 90°C .

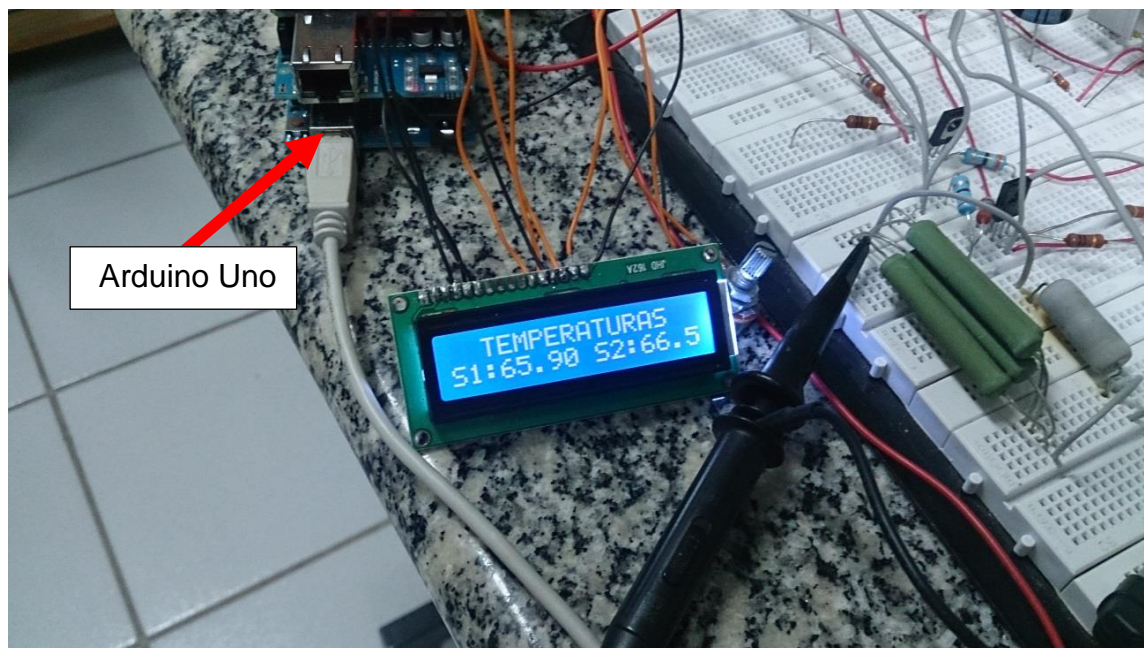


Figura 31 - Sistema de controle de temperatura feito pelo controlador Arduino Uno

3.2 Deposição de filmes fino de AZO utilizando a fonte amplificadora de potência

3.2.1 Substrato e Alvo

Para a deposição dos filmes de AZO utilizou-se como substrato lâminas de vidro de microscopia da marca *Precision*, com medidas de 26x76x1mm. Realizou-se o processo de limpeza do substrato por meio de lavagem com água corrente e detergente neutro líquido, seguido de banho ultrassônico com a imersão das lâminas em água deionizada por um período de 7 (sete) minutos. Em seguida, colocou-se as lâminas de vidro em um béquer contendo acetona por 1 (um) minuto. Decorrido este período, retornou-se as lâminas para o banho ultrassônico com imersão em álcool isopropílico (*Ecibra*) por mais 7 (sete) minutos. Por fim, realizou-se o processo de secagem do substrato em um soprador térmico (HL 1500 Steinel).

O alvo utilizado no trabalho consiste de um disco cerâmico composto por Óxido de Zinco e Alumínio (AZO). Para limpeza do alvo procedeu-se com a lavagem do mesmo, utilizando-se água corrente e detergente neutro líquido.

3.2.2 Sistema de Deposição

Realizou-se as deposições dos filmes finos de AZO em um sistema de *magnetron sputtering* com a Fonte Amplificadora de Potência – FAP desenvolvida neste trabalho, acoplada a um transformador, ao qual denominaremos **FAP magnetron sputtering**.

A síntese dos filmes ocorreu no Laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) da UNESP/Sorocaba, utilizando-se um reator composto por uma câmara cilíndrica de aço inox. No interior da câmara encontram-se dois eletrodos responsáveis por excitar o plasma. Para aumentar a eficiência do bombardeamento e o confinamento do plasma conectou-se à FAP um conjunto de ímãs de Samário-Cobalto (SmCo) acoplado ao eletrodo superior e ao alvo. Além disso, para evitar a desmagnetização do ímã utilizou-se um sistema de refrigeração de água corrente. A Figura 32 ilustra este sistema.

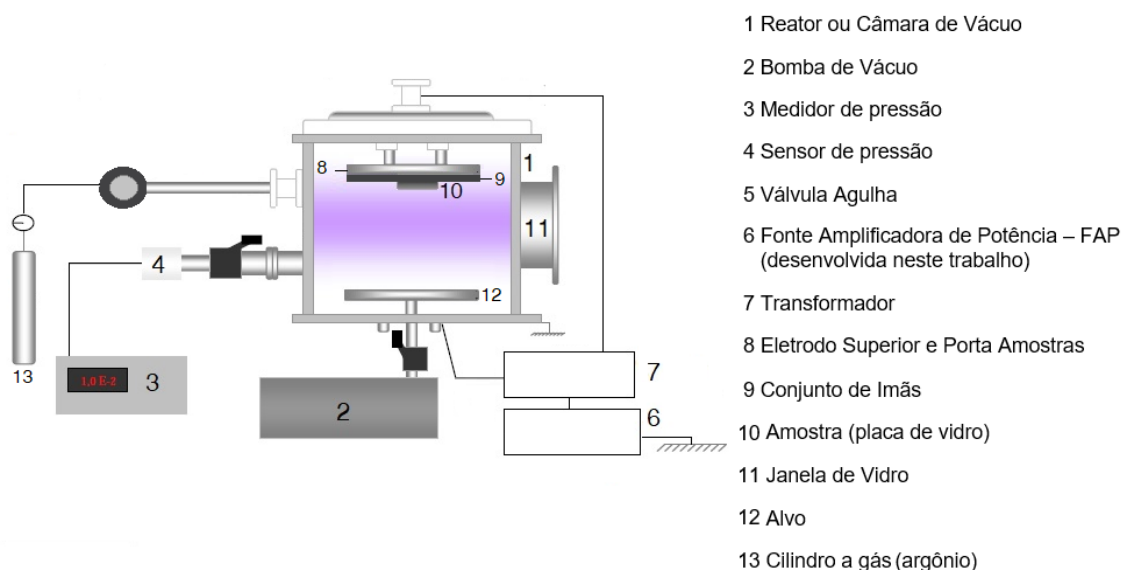


Figura 32 - Representação esquemática do sistema FAP magnetron sputtering

(Fonte: Adaptado de MASCAGNI, 2009)

Realizou-se vácuo no sistema utilizando uma bomba mecânica de palhetas rotativas, com monitoramento da pressão por um medidor Pirani (modelo RS 232, Edwards). Para controle do gás argônio utilizou-se válvulas agulhas (modelo LV-10K, Edwards).

Para deposição do filme de AZO alimentou-se o eletrodo superior e o eletrodo inferior através da FAP. Sustentou-se o plasma por meio da FAP acoplada a um transformador, totalizando um período de 25 (vinte e cinco minutos).

Realizou-se o processo de deposição por 4 (quatro) vezes, sendo que em cada uma das vezes, alterou-se a frequência do pulso da FAP conforme segue: 15kHz, 20 kHz, 30kHz e 40kHz.

Conforme mencionado no item anterior utilizou-se um alvo metálico de ZnO:Al composto por Óxido de Zinco (98%) e Alumínio (2%). Em todas as deposições realizadas utilizou-se argônio como gás de processo.

A tabela 4 apresenta os parâmetros de deposição dos filmes de AZO em cada um dos experimentos realizados. Neste caso, o único parâmetro variável foi a frequência do pulso aplicada pela FAP.

Tabela 4 - Parâmetros de deposição dos filmes finos de AZO

Frequência do Pulso (kHz)	Potência da FAP (W)	Tempo de Deposição (min)	Pressão Base do Sistema (mTorr)	Pressão de Argônio (mTorr)
15	60	25	0,2	3
20	60	25	0,2	3
30	60	25	0,2	3
40	60	25	0,2	3

Ressalta-se que os filmes foram depositados sobre lâminas de vidro contendo uma máscara com fita de Kapton (5413, 3M) sobre a metade de sua superfície. Essa técnica permite identificar as variações ocorridas na superfície do substrato para posterior determinação da espessura do filme.

A figura 33 apresenta a fotografia do reator no momento em que estava sendo realizada a deposição do filme de AZO.



Figura 33 - Fotografia do reator de plasma no momento da aplicação do filme de AZO por FAP magnetron sputtering.

3.3 Caracterização dos filmes de AZO

3.3.1 Caracterização Morfológica

Após a deposição do filme de AZO sobre o substrato retirou-se a fita de Kapton, permitindo identificar um degrau entre a região protegida e a exposta ao plasma. Para caracterização morfológica do filme depositado utilizou-se a técnica de perfilometria que permite determinar a espessura dos filmes de AZO sintetizados sobre as placas de vidro.

O equipamento utilizado foi o perfilômetro Dektak 150 da *Veeco Instruments Inc.*, do laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) da UNESP/ Sorocaba (figura 34), com capacidade para medir espessuras a partir de 100Å.

Para cada amostra foram realizadas três medidas de espessura em diferentes regiões do degrau, sendo o resultado apresentado como a média aritmética destes valores.



Figura 34 -Perfilômetro Dektak 150 da Veeco Instruments Inc.

3.3.2 Caracterização óptica

Realizou-se a caracterização óptica dos filmes depositados sobre as lâminas de vidro por meio do espectrofotômetro UV-VIS-NIR Lambda™ 750 da Perkin Elmer, pertencente ao LMCMat da UNESP/Sorocaba (figura 35).



Figura 35 - Espectrofotômetro Uv-Vis-NIR LambdaTM 750 da Perkin Elmer

Este equipamento opera com comprimento de onda variando de 190nm a 3300nm, e permite analisar as propriedades de transmitância, refletância e absorbância da amostra.

A partir dos dados de transmitância e espessura do material determinou-se o coeficiente de absorção, conforme equação 10 apresentada no capítulo 2.2.3 deste trabalho.

O *band gap* foi determinado através do método desenvolvido por Tauc. Para isso, primeiramente, desenhou-se o gráfico de $(ah\nu)^{1/2}$ versus $h\nu$ (energia do fóton). Notou-se que o gráfico exibiu uma região linear. Extrapolou-se a parte linear da curva achando um ponto de intersecção com o eixo das abcissas (de energia do fóton). O valor de energia deste ponto é definido como sendo o *band gap* pelo método de Tauc (E_g). Ressalta-se que este método é aplicável, somente, para os materiais que apresentam uma região linear no gráfico.

3.3.3 Caracterização elétrica

A caracterização elétrica dos filmes de AZO foi feita por meio do método de Quatro Pontas, utilizando-se um sistema automatizado desenvolvido no software *LabVIEW*, conforme mostrado na Figura 36.



Figura 36 - Fotografia do sistema de medição de resistividade pelo método quatro pontas desenvolvido no *LabVIEW*.

Este sistema permite obter, automaticamente, os valores de resistência elétrica superficial (R) do filme de AZO. Para cada amostra foram realizadas três medidas de resistência superficial e calculada a média desses valores. Então, com os dados de resistência média e aplicando-se a Lei de Ohm (equação 42), foi possível calcular a resistividade do material.

$$\rho = R_s \times t \quad \text{Equação 42}$$

(Fonte: COSTA, 2007)

onde:

ρ = resistividade;

R_s = resistência elétrica superficial;

t = espessura;

.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização elétrica da fonte amplificadora

Como citado anteriormente, o projeto FAP antes da montagem física (protótipo) foi simulado através do software *Pspice*. Os dados de tensão e corrente de polarização da FAP, via simulação, foram utilizados para a regulagem da polarização DC e resposta em frequência do protótipo.

Na polarização DC da FAP, verificou-se a tensão sobre todos resistores, garantindo uma polarização adequada dos transistores para melhor funcionamento do amplificador. Após a montagem do primeiro protótipo, comparou-se os valores obtidos matematicamente, via simulação, com os valores do circuito montado. O objetivo é permitir o ajuste fino do circuito, ajustando os valores de resistências, de forma a estabelecer o bom funcionamento dos transistores e entrega de potência máxima pela FAP.

Na figura 37, encontram-se os valores de tensão da polarização DC simulado no software.

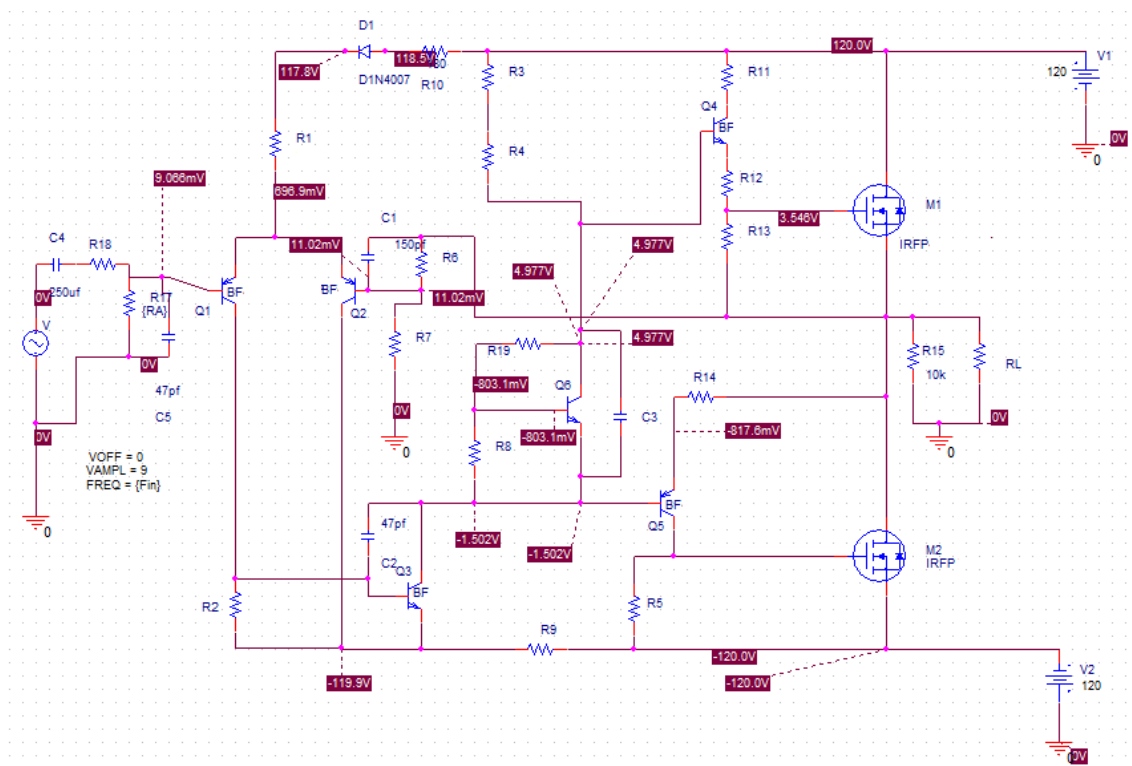


Figura 37 - Polarização DC.

Na figura 38, encontram-se os valores de corrente DC simulado pelo mesmo software.

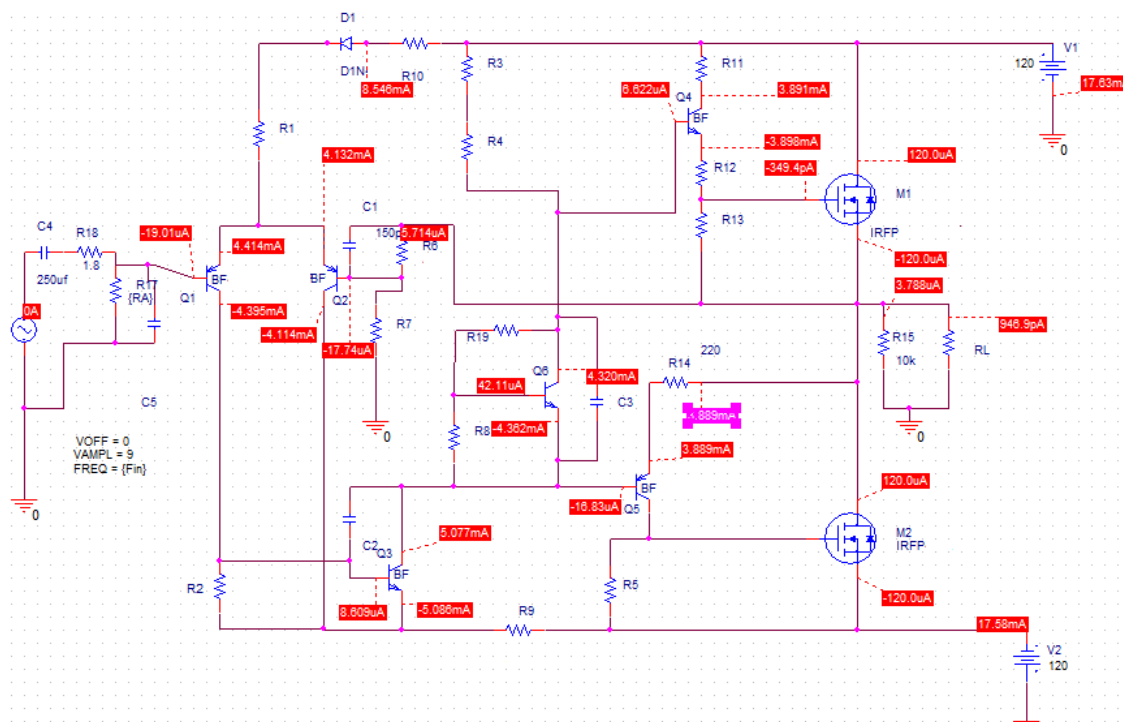


Figura 38 - Corrente DC.

Os valores de tensão DC foram importantes para conferir se o circuito estava corretamente montado e idealmente polarizado.

Os primeiros testes consistiram na verificação da polarização DC do circuito em vazio utilizando um multímetro da *Minipa*. Observou-se que os resultados se aproximaram da simulação tendo um erro de, no máximo, 4,4 % situado no coletor de Q6. Além disso, a aproximação dos resistores utilizados produziu um *offset* na saída do circuito de, 1,8 V. Melhorou-se *offset*, para 0,2 V, fazendo-se um ajuste fino no resistor R17. Então, com os transistores do par complementar e de potência operando na região de triodo, conseguiu-se ter a resposta em frequência calculada. Esses ajustes permitiu a entrega de potência necessária para gerar a deposição por plasma.

Para teste de polarização DC utilizou-se a própria fonte DC da FAP, figura 25-A, capaz de fornecer 6 amperes com um nível de tensão de ± 130 V.

Então, após análise DC do circuito da FAP, realizou-se a análise AC em vazio para verificar a resposta em frequência. Na figura 39 encontra-se a resposta em frequência do circuito via simulador *Pspice*, note-se que a função matemática para estipular o polo dominante está correta. Observa-se uma queda de -3dB em 225 kHz, conforme calculado.

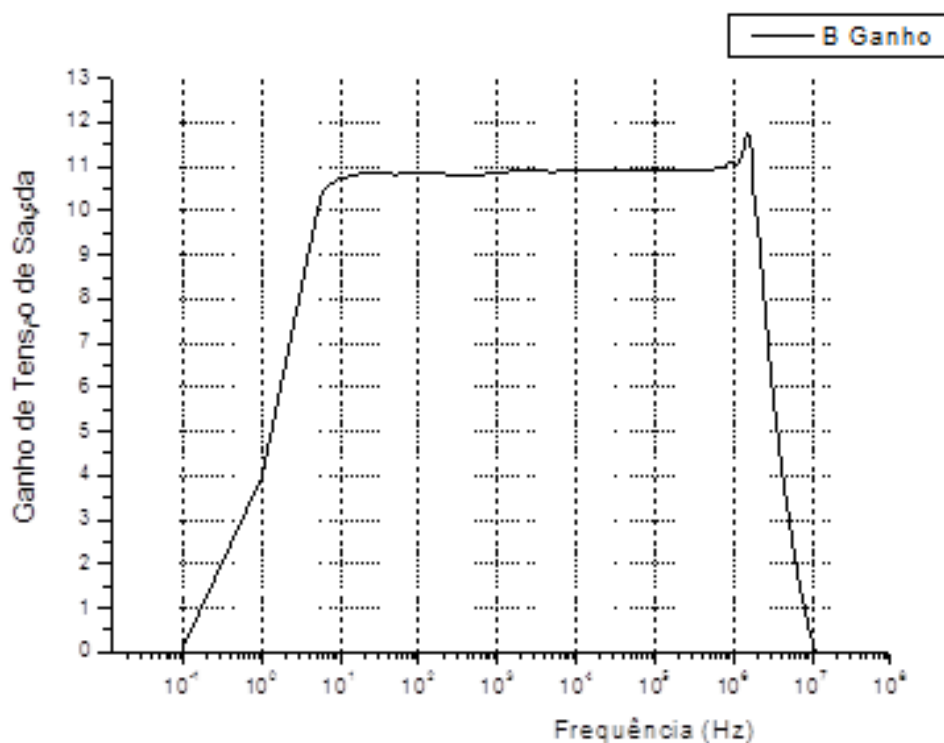


Figura 39 - Ganho de tensão do circuito simulado pelo *Pspice*.

No teste com protótipo montado, figura 25-B, sem carga, encontrou-se a resposta em frequência do circuito conforme a figura 40.

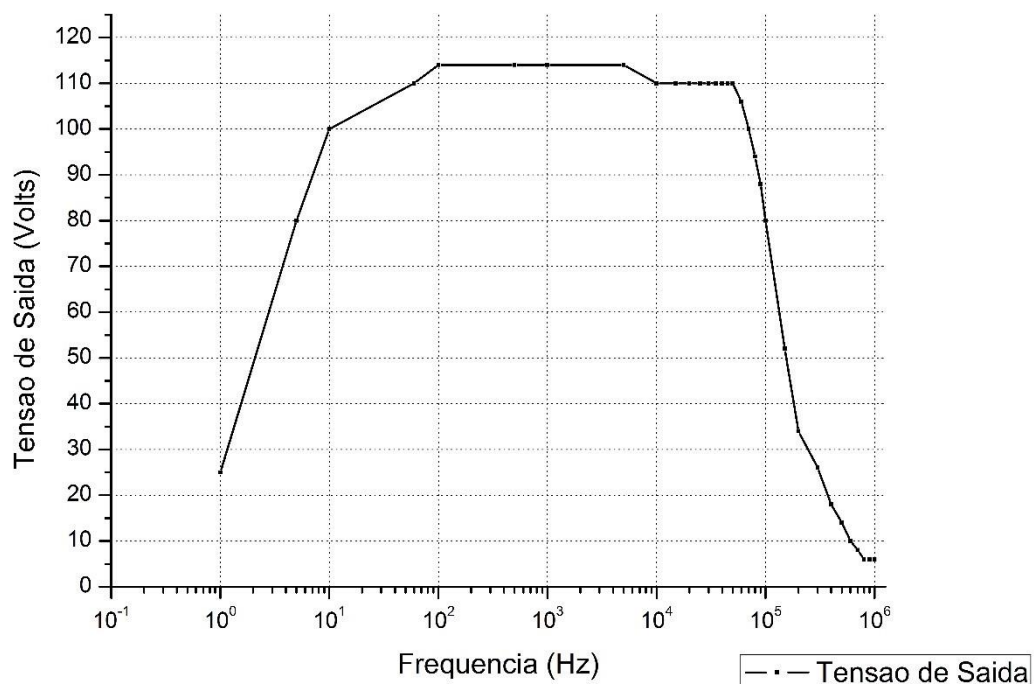


Figura 40 - Ganho de tensão do circuito (prático).

O sinal de saída da FAP, figura 41, foi monitorado via osciloscópio, onde é possível verificar o ganho de tensão de aproximadamente 10 vezes entre a tensão do sinal de entrada (20,2 V) em relação a tensão do sinal de saída (220 V).

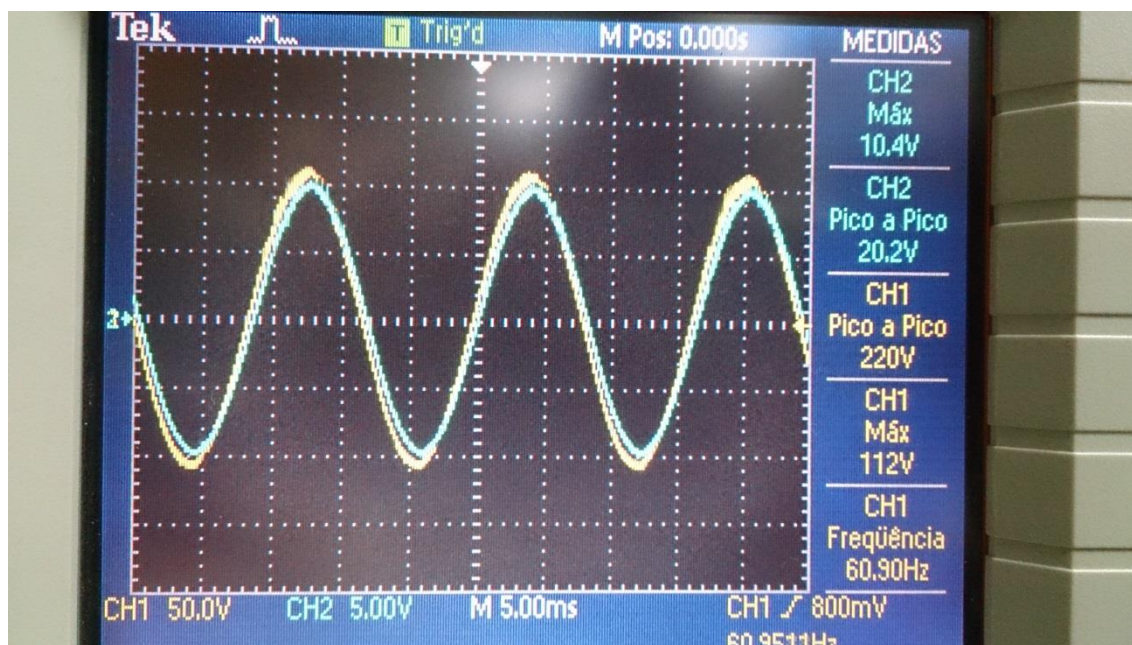
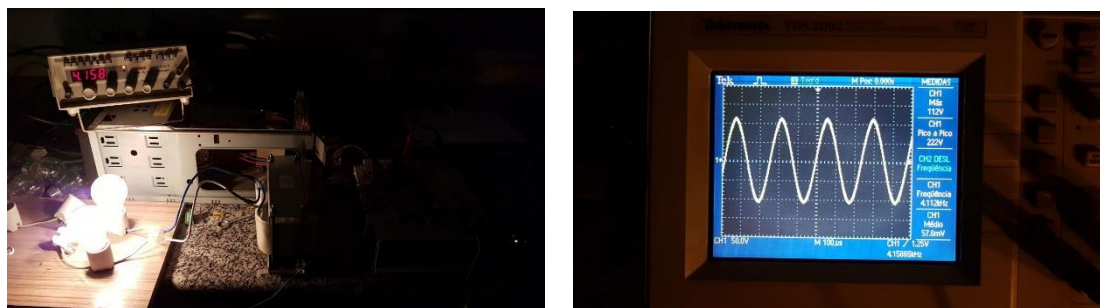


Figura 41 - Imagem do sinal de entrada, em azul, e do sinal de saída, em amarelo.

Os testes iniciais da análise AC definem, para o protótipo da FAP, a banda de frequência onde o ganho é próximo de 10, valor determinado em projeto, e compara com os resultados simulados, verificando principalmente a frequência de corte de -3db.

4.1.2 Resultado dos testes com carga resistiva

Com o circuito montado e ajustado, utilizou-se inicialmente uma carga resistiva (lâmpadas incandescentes). A carga resistiva, por ser uma carga linear, é possível de conferir o sinal de saída da FAP com os resultados da simulação linear. Neste caso, toda a potência é absorvida pela carga devido à existência de uma malha de casamento entre a FAP e a carga resistiva, o transformador, que garante a máxima transferência de potência, figura 42.



(a)

(b)

Figura 42 - Teste prático com carga resistiva 4kHz – 2 lâmpadas

Realizou-se o teste por 20 minutos contínuos, onde se manteve estável a potência fornecida pela FAP. A tabela 5 apresenta a potência obtida na saída da FAP em função da tensão e frequência aplicadas na carga.

Tabela 5 - Resultados práticos com carga resistiva

Carga	Tensão de pico de entrada (V)	Tensão de pico de saída (V)	Tensão de pico na carga (V)	Frequência (kHz)	Potência na saída (W)
2 x Lâmpada incandescente.	11	110	440	4	50

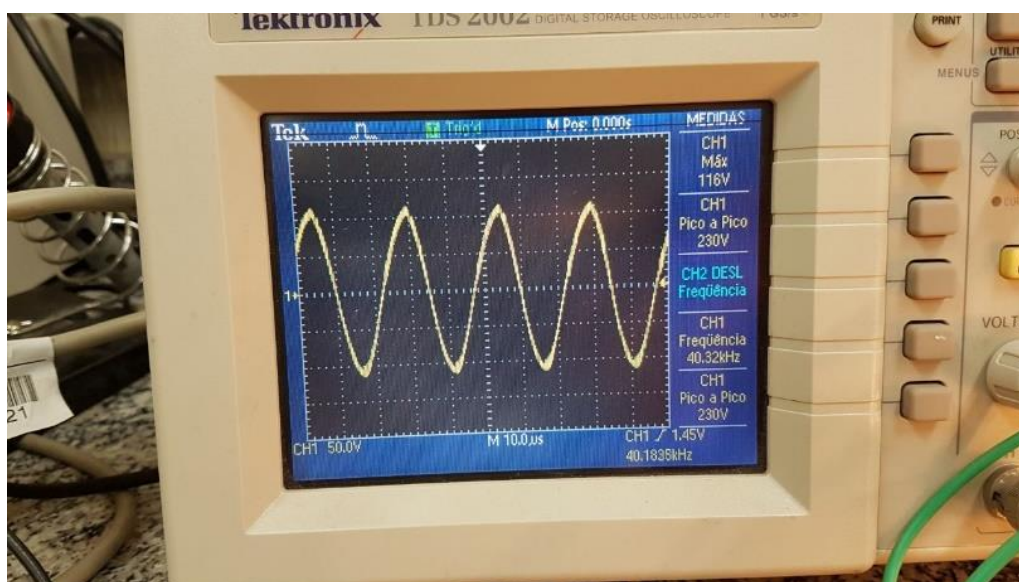
Repetiu-se então o teste do circuito variando a frequência com carga até o máximo suportado pelo circuito sem haver distorções. Observou-se que o *slew rate* (velocidade de resposta do amplificador) aproximou-se de um integrador na frequência de 40,20 kHz, conforme mostrado na figura 43, o que atende a necessidade do projeto (de 40 kHz). A tabela 6 apresenta a potência obtida na saída da FAP em função da tensão e frequência aplicadas na carga.



(a)



(b)



(c)

Figura 43 - Teste prático com carga resistiva 40kHz – 4 lâmpadas

Tabela 6 - Resultados práticos com carga resistiva em 40kHz

Carga	Tensão de pico de entrada (V)	Tensão de pico de saída (V)	Tensão de pico na carga (V)	Frequência (kHz)	Potência na saída (W)
4 x Lâmpada incandescente	11	110	440	40	100

Nota-se que o protótipo da FAP apresentou o ganho de tensão e potência necessários para a deposição do plasma, conforme estabelecido neste projeto. Em simulação, via *Pspice*, obteve-se resultados maiores de ganho de potência (300W). Neste caso, o ajuste fino considerando as capacitâncias parasitas da montagem e a regulação da polarização do circuito DC podem melhorar o funcionamento e rendimento para o ganho de potência da FAP.

4.2 Resultado do filme de AZO utilizando a FAP

Neste tópico, são apresentados os resultados da caracterização morfológica, óptica e elétrica dos filmes de AZO depositados pela técnica de *magnetron sputtering*, utilizando a FAP desenvolvida nesta dissertação, em temperatura ambiente.

Os filmes foram depositados sobre lâminas de vidro, variando a frequência do sinal de tensão da FAP a fim de se realizar um estudo sistemático da correlação entre resistividade e propriedades ópticas dos filmes, e para otimizar o processo de crescimento. Os alvos utilizados foram de AZO (98% ZnO e 2% Al, % em massa), os mesmos utilizados no trabalho desenvolvido por Chaves (2014), para fins de comparação entre as técnicas de deposição utilizando radiofrequência e baixa frequência.

4.2.1 Caracterização Morfológica

Os dados de taxa de crescimento e espessura do filme de AZO são apresentados na Tabela 7. A espessura dos filmes sintetizados apresentou um valor mínimo de 110nm e máximo de 340 nm. Os valores exibidos na Tabela 7 revelam uma

redução da taxa de crescimento dos filmes de AZO com o aumento da frequência do sinal de tensão da FAP. Isso pode ser causado pela redução da taxa de *sputtering* devido à menor energia dos íons de argônio presentes no plasma, reduzindo o número de átomos que chegam à superfície do substrato.

Tabela 7 - Resultados de espessura dos filmes de AZO obtidos através do perfilômetro Veeco Dektak 150 em função da frequência do sinal tensão da FAP.

FAP - Frequência (kHz)	Tempo (min.)	Espessura (nm)	Taxa de crescimento (nm/min.)
15	25	340,00	13,60
20	25	245,93	9,84
30	25	196,82	7,87
40	25	110,15	4,41

4.2.2 Caracterização Óptica

Através da radiação eletromagnética, pode-se caracterizar as propriedades ópticas dos filmes finos de AZO. Esta caracterização relaciona a interação da luz com os elétrons livres, e com a estrutura cristalina do filme.

A Figura 44 apresenta os espectros de transmitância e refletância em função do comprimento de onda dos filmes de AZO para diferentes frequências do sinal de tensão da FAP.

Observa-se uma transmitância acima de 80% na região do espectro visível (comprimentos de onda na faixa entre 400nm e 780 nm) para todos os filmes obtidos.

Isso significa que, a variação da frequência da FAP não afetou a transparência na faixa do visível. Utilizando-se uma fonte radiofrequência e mesma metodologia de deposição (técnica de pulverização catódica e magneto), resultados similares foram encontrados por Chaves (2014).

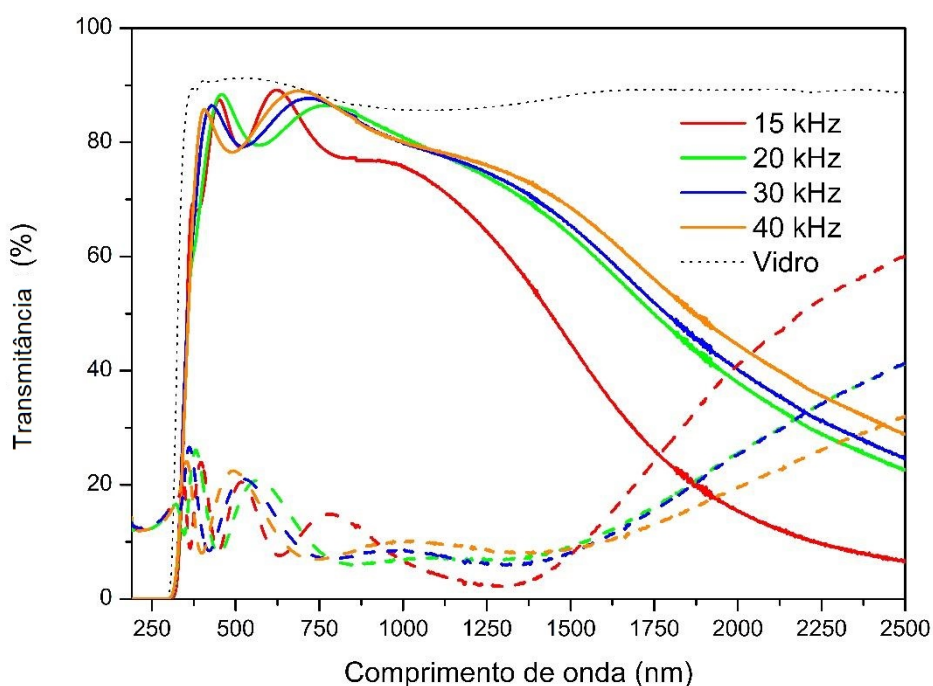


Figura 44 - Espectro óptico de transmitância (linha contínua) e refletância (linha tracejada) dos filmes de AZO em função do comprimento de onda.

Em relação a figura 44, observa-se uma redução gradual da transmitância ótica dos filmes de AZO depositados com a FAP nos comprimentos de onda acima de 1000 nm, sendo este o comportamento típico de filmes óxidos transparentes condutivos (TCOs). Entretanto, na região visível do espectro existe uma alta transmitância devido ao *band gap* acima de 3 eV. Próximo da região do infravermelho ocorre a redução da

transmitância devido à presença de elétrons livres na banda de condução (CRUZ, 2017).

Analisando o espectro óptico de transmitância (figura 45), nota-se que houve um deslocamento da absorção dos filmes de AZO para maiores comprimentos de onda com a diminuição da frequência da FAP. Na figura 45 percebe-se que a energia de *gap* óptico apresentou uma redução em função do aumento da frequência.

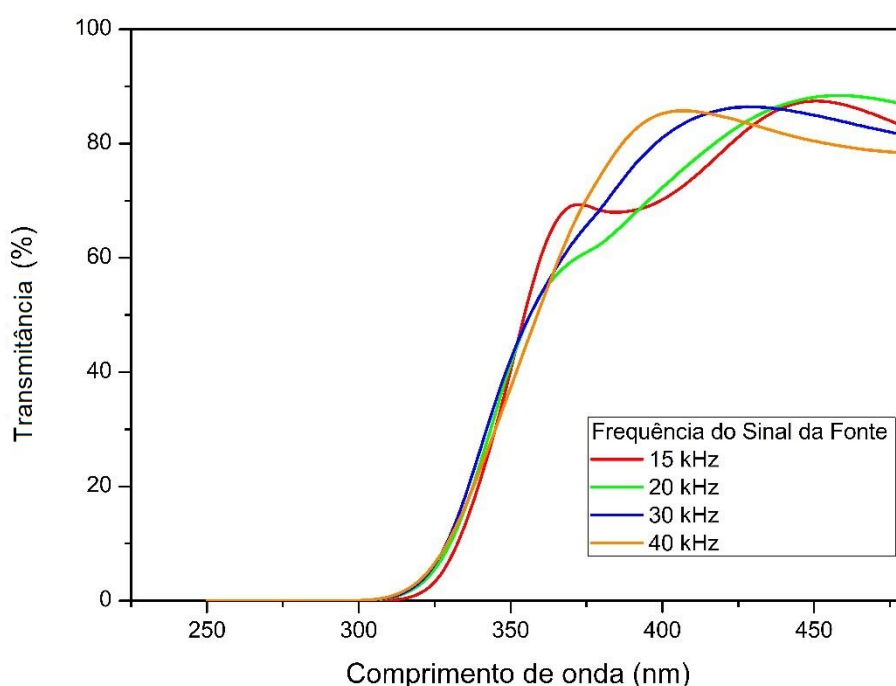


Figura 45 - Espectro de transmitância óptica dos filmes de AZO em função do comprimento de onda.

A partir da transmitância foi possível determinar os valores do *gap* óptico plotando o gráfico de $(\alpha(h\nu))^2$ por $(h\nu)$. O *band gap* foi obtido a partir da figura 46 através do método de Tauc, descrito na revisão bibliográfica.

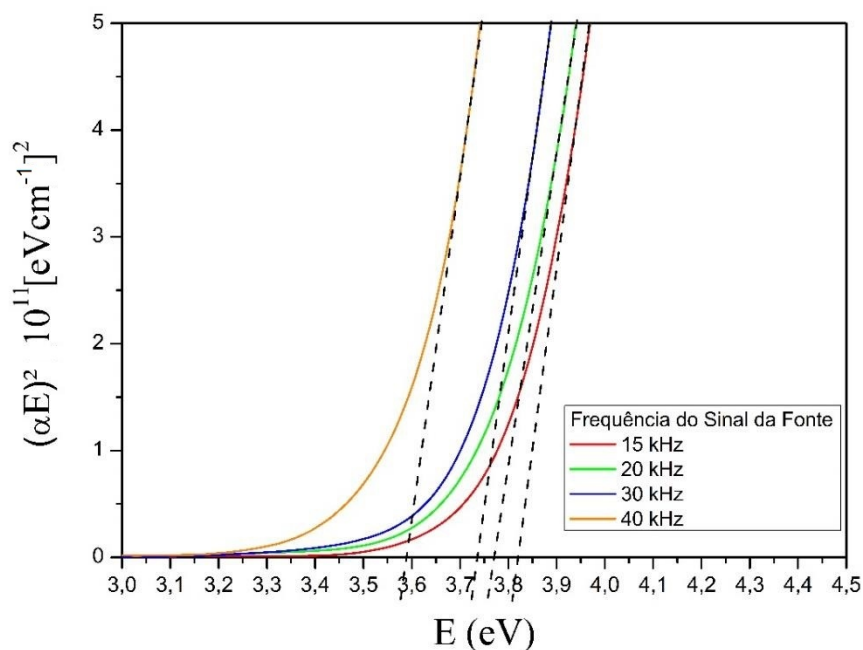


Figura 46 - Método de extrapolação para a obtenção dos valores de *gap* óptico.

O cálculo utiliza-se da extrapolação de uma reta, tangente à curva, até interceptar o eixo de energia. O ponto onde a reta intercepta o eixo resulta no valor de *band gap*. Foi possível determinar os valores de *gap* óptico para todos os filmes de 15 a 40 kHz. O *band gap* obtido apresentou valores entre 3,59 a 3,82 eV, ficando acima de 3,28 eV do ZnO intrínseco. Este deslocamento da energia do *band gap* para maiores valores do ZnO intrínseco está relacionado com o efeito de *Burstein-Moss*. Este efeito explica que a energia de Fermi ocasiona um deslocamento da banda de condução quando há um aumento da concentração de portadores. Para estes, os níveis de energia mais baixos da banda de condução tornam-se ocupados. Deste modo, para que ocorra a transição de um elétron da banda de valência para a banda de condução em um estado livre, este elétron deve ter uma energia maior (CHAVES, 2014).

A Tabela 8 mostra os valores de energia do *gap* óptico em função da frequência do sinal de tensão.

Tabela 8 - *Band gap* das amostras depositadas com a FAP

FAP - Frequência (kHz)	Tempo (min.)	Espessura (nm)	Band Gap (eV)
15	25	340,00	3,82
20	25	245,93	3,77
30	25	196,82	3,74
40	25	110,15	3,59

Na Tabela 8 observa-se que com a diminuição da frequência ocorre um aumento nos valores de *gap* óptico. Conforme explicado anteriormente, este comportamento se deve ao aumento da densidade de portadores no filme.

A Tabela 9 compara os dados de *band gap* obtidos para o filme depositado pela técnica de pulverização catódica em 20 kHz com a FAP e dados da literatura obtidos por meio da utilização da técnica de pulverização catódica em radiofrequência (RF), apresentados no estudo de Chaves (2014). Para fins de comparação usou-se filmes com espessuras aproximadas. No caso de Chaves (2014) verifica-se um *band gap* na ordem de 3,68 eV para o filme de espessura de 260 nm. Para o filme sintetizado neste trabalho, que tem a espessura próxima do filme comparado de Chaves (2014), observa-se um aumento do *band gap*. Conclui-se que para os filmes de AZO sintetizados com a FAP obteve-se uma eficiência de ionização maior se comparados pela técnica *RF magnetron sputtering*.

Tabela 9 - Comparação entre os valores de *band gap* dos filmes de AZO produzidos pela técnica de pulverização catódica utilizando a FAP com a

**técnica de Radiofrequência (RF). Dados de comparação coletado de Chaves
(2014).**

Fonte	Alvo	Frequência do sinal de tensão	Espessura (nm)	Band Gap (eV)
FAP	AZO	20 kHz	245,93	3,77
RF	AZO	13,56 MHz	260,00	3,68

A estrutura cristalina dos filmes influencia na interferência óptica e no espalhamento da luz. Nota-se, na figura 44, que na região acima de 1500nm há um aumento gradativo da refletância para comprimentos de onda mais longos, devido à presença de elétrons livres na banda de condução. Nessa região os filmes TCOs apresentam um comportamento característico dos materiais metálicos (SATO et al., 1994). No entanto, na mesma figura, pode ser notado que, para comprimentos de onda acima de 1500 nm, houve uma refletância maior para os filmes de AZO com a diminuição da frequência do sinal da FAP. O maior índice de refletância está relacionado, diretamente, com concentração maior de elétrons livres na banda de condução. A maior concentração de elétrons livres na banda de condução é uma característica desejada para um TCO.

A Figura 47 mostra um gráfico de absorbância do filme de AZO. Nota-se que a região menor de 500 nm apresenta uma alta capacidade de absorção devido às transições eletrônicas da banda de valência para banda de condução.

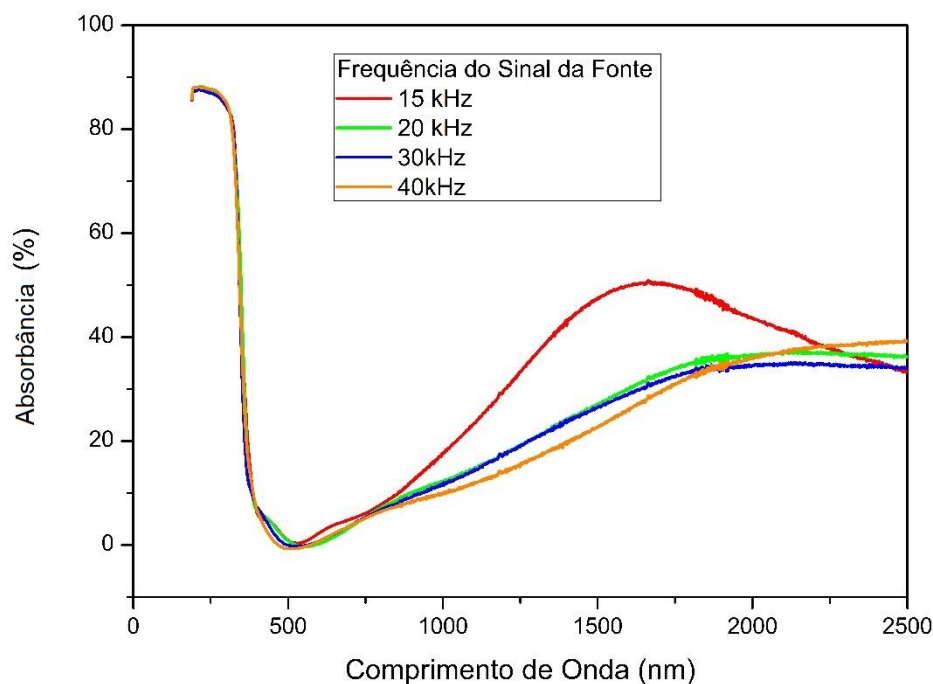


Figura 47 - Espectro de absorvância óptica dos filmes de AZO em função do comprimento de onda.

A Figura 48 compara os dados de transmitância do filme depositado pela técnica de pulverização catódica em 15 kHz com a fonte FAP, e com o filme depositado pela técnica de pulverização catódica com RF, com 10 mTorr de Argônio, na região do visível obtidos por Chaves (2014). No caso de Chaves (2014) pode-se verificar uma redução da transmitância para comprimento de ondas abaixo de 500 nm. Para os filmes sintetizados neste trabalho, é possível afirmar que para frequência de sinal de tensão de 15 kHz, houve um aumento da transmitância para comprimento de ondas abaixo de 500 nm. Pela média aritmética dos resultados apresentados na Figura 48 conclui-se que o filme deste trabalho apresenta 31% a mais de transmitância para comprimentos de onda abaixo de 500 nm.

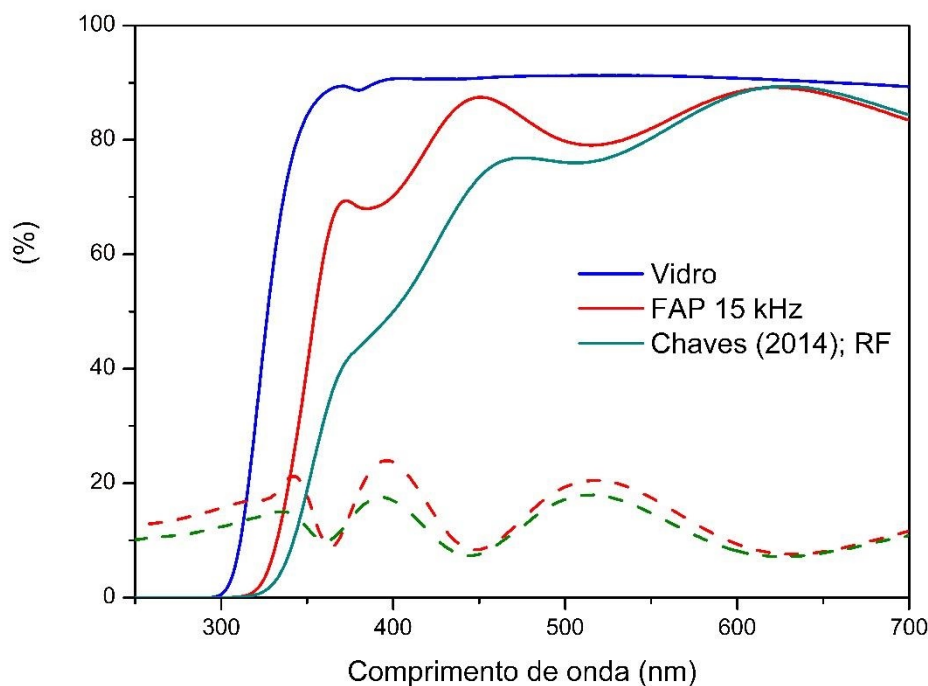


Figura 48 – Comparação entre a pulverização catódica utilizando a FAP com a Radiofrequência (RF), do espectro óptico de transmitância (linha contínua) e refletância (linha tracejada) dos filmes de AZO em função do comprimento de onda. Dados de comparação coletados de Chaves (2014).

A Figura 49 compara os dados do espectro óptico completo de transmitância do filme depositado pela técnica de pulverização catódica com a fonte FAP em 15 kHz, e do filme depositado pela técnica de pulverização catódica com RF, com 10 mTorr de Argônio, obtidos por Chaves (2014). Analisando-se o gráfico é possível notar que, para o comprimento de onda acima de 1000nm, a transmitância dos filmes de AZO obtida com a FAP apresentou uma queda mais acentuada em comparação com a técnica de RF obtida no estudo de Chaves (2014). Esta situação permite concluir que a FAP foi mais eficiente, pois conferiu maior densidade de portadores, confirmado pelo valor de band gap, sendo a FAP 3,82eV e RF 3,68eV.

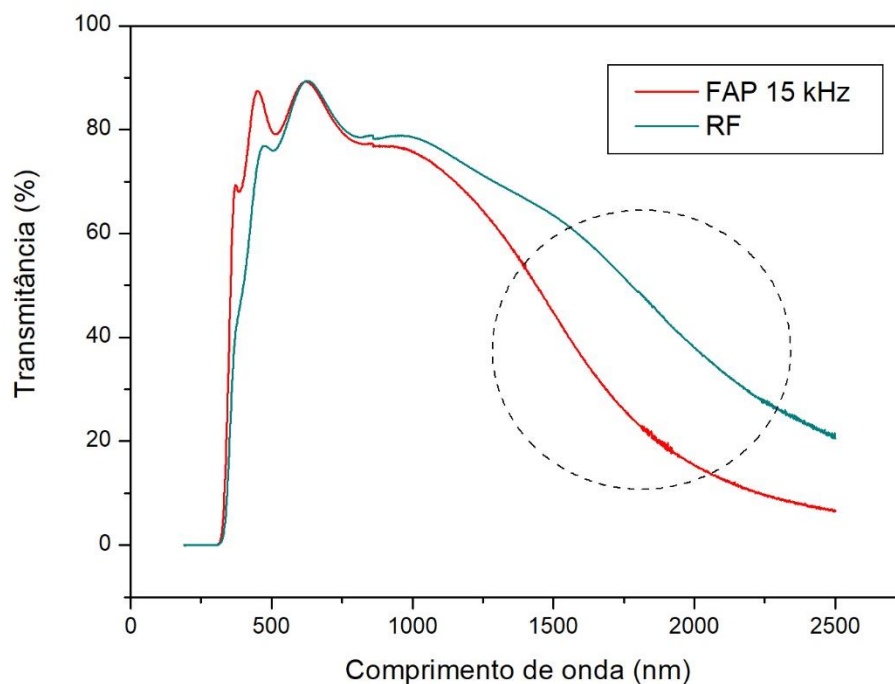


Figura 49 - Comparação do espectro óptico de transmitância utilizando a FAP com 15 kHz e a Radiofrequência (RF), dos filmes de AZO em função do comprimento de onda. Dados de comparação coletados de Chaves (2014).

A Figura 50 compara os dados de transmitância do filme de ZnO intrínseco depositado pela técnica de pulverização catódica, com a fonte FAP com frequência de sinal de tensão em 15 kHz com *RF* obtidos por Chaves (2014). Nota-se que não houve diferença significativa, com relação à transmitância dos filmes de ZnO, depositados pelas duas técnicas.

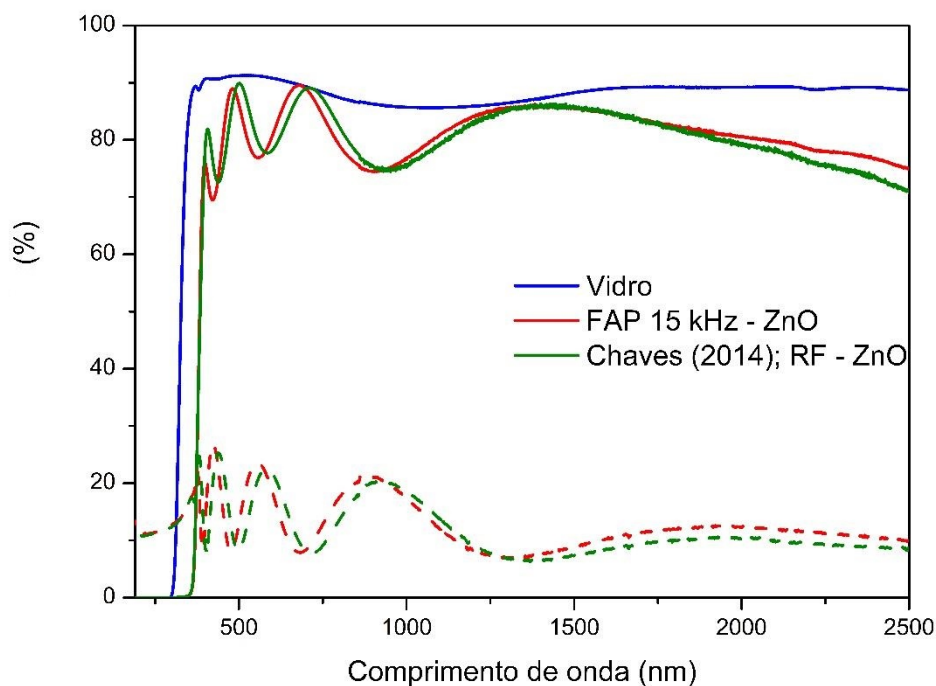


Figura 50 - Comparação entre a pulverização catódica utilizando a FAP com a Radiofrequência (RF), do espectro óptico de transmitância (linha contínua) e refletância (linha tracejada) dos filmes de ZnO intrínseco em função do comprimento de onda. Dados de comparação coletados de Chaves (2014).

4.2.3 Caracterização Elétrica

Os resultados obtidos para resistividade dos filmes de AZO depositados com a FAP em frequências de 15 a 40 kHz, por 25 minutos, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados das propriedades elétricas dos filmes de AZO obtidos através do método de quatro pontas em função da variação frequência da FAP.

Frequência do sinal (kHz)	Espessura (nm)	Taxa de crescimento (nm/min.)	Resistência Superficial (Ω)	Resistividade (Ω.cm)	Transmitância média (%)
15	340,00	13,60	42,86	1,46E-03	84,29
20	245,93	9,84	114,28	2,81E-03	82,83
30	196,82	7,87	111,93	2,20E-03	83,58
40	110,15	4,41	236,32	2,60E-03	83,95

Os dados mostraram que os filmes depositados em 15kHz apresentaram o menor valor de resistividade sendo, portanto, os mais indicados para serem utilizados como TCO. Os valores de resistividade e transmitância obtidos nestas condições, $1,46 \times 10^{-3}$.cm e 84,29%, são comparáveis aos reportados por outros autores.

5 CONCLUSÃO

A fonte amplificadora de potência (FAP) desenvolvida nesta dissertação permitiu gerar e manter a tensão necessária para formação do plasma pela técnica de *magnetron sputtering*, permitindo a deposição dos filmes finos de AZO sobre o substrato de vidro.

A análise das características ópticas dos filmes produzidos por meio da técnica de FAP *magnetron sputtering*, mostrou que os filmes apresentaram transmitância superior a 80% para todas as frequências aplicadas, sendo que para a frequência de 15 kHz obteve-se a maior transparência, com transmitância de 84,29%.

A frequência fornecida pela FAP apresentou correlação direta com os resultados obtidos na caracterização morfológica dos filmes de AZO, sendo que a espessura variou entre 110,15nm a 340,00nm, para as frequências de 40kHz e 15 kHz, respectivamente.

Com relação às características elétricas, nota-se que a energia de *band gap* dos filmes de AZO variou entre 3,59 eV e 3,82 eV, para as frequências de 40kHz e 15 kHz, respectivamente. Em comparação com o valor de energia de *band gap* dos filmes de ZnO intrínsecos, da ordem de 3,37 eV (CRUZ et al, 2017), conclui-se que o aumento está relacionado ao efeito de Burstein Moss e indica um aumento na densidade de portadores.

A resistividade obtida para os filmes de AZO variou entre $1,46 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$, para a frequência de 15 kHz, e $2,60 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ para a frequência de 40 kHz. Nota-se que em ambos os casos o filme pode ser classificado como um semicondutor.

Com base nesses resultados obtidos, conclui-se que os filmes de AZO gerados com a FAP são óxidos transparentes condutivos (TCOs).

A comparação das características dos filmes de AZO obtidos com a FAP em relação aos filmes obtidos por meio da técnica de radiofrequência (RF), permite concluir que os filmes produzidos nesta dissertação apresentam melhores características ópticas, elétricas e morfológicas.

Por todo exposto, conclui-se que a fonte amplificadora de potência (FAP) desenvolvida neste estudo se mostrou uma técnica promissora para aplicação de plasma pela técnica de *magnetron sputtering*, sendo uma tecnologia menos sofisticada e mais barata se comparada com ao RF *magnetron sputtering*, o que a torna aplicável em projetos de grande escala.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12.808:1993 - Resíduos de serviço de saúde.
- ADVANCED ENERGY INDUSTRIES INC. Impedance Matching. 2006.
- AMORIM, C.A. Propriedades de transporte em óxidos condutores transparentes (TCOs): In₂O₃, SnO₂ e SnO₂:F. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2014.
- ARAUJO, E.M.P. Técnicas Espectroscópicas e quimiométricas como ferramentas na confirmação da estrutura de substâncias isoladas de produtos naturais ou obtidas por síntese. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2011.
- BALOGH, Tatiana Santana *et al.* Proteção à radiação ultravioleta: recursos disponíveis na atualidade em fotoproteção. *An. Bras. Dermatol.*, Rio de Janeiro, v. 86, n. 4, p. 732-742, Agosto. 2011.
- BARBOSA, J.C.P. Análise por meio de espectroscopia de emissão óptica das espécies ativas em nitretação iônica e gaiola catódica. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 2007.
- BESSELER, E. Construção e caracterização de um reator indutivo - ICO para corrosão de materiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- BURKHARD, R. *et al.* Recycling of metals from waste with thermal plasma. *Resources, Conservation and Recycling*, v.10, n.1-2, 1994. p. 11-16.
- BUZETO, F.A. Modificação de superfície da borracha natural por descarga corona. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.
- CARDOSO, L.P. Estudo da aplicação de hidróxidos duplos lamelares na remoção e liberação lenta de pesticidas. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 2006.
- CARDOSO, R. P. Tratamento de superfícies por plasma: uma introdução. 2016. (Apresentação de trabalho/seminário)

CARDOSO, W. S. *et al.* Preparação de eletrodos opticamente transparentes. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 345-349. 2005.

CARVALHO, R.G. Deposição e caracterização de filmes finos de NbAlN por magnetron sputtering reativo. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2016.

CASTRO, M.S.B. Produção de filmes finos de dióxido de vanádio por pulverização catódica. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2003.

CATTO, A.C. Filmes finos de ZnO como óxidos condutores transparentes aplicados à células solares. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru. 2012.

CHAKRABORTY, S.P. Studies on the development of TZM alloy by aluminothermic coreduction process and formation of protective coating over the alloy by plasma spray technique. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, v.29, v.5, p. 623-630.2011.

CHAVES, M. – Efeito da pressão em filmes finos de ZnO:Al por RF magnetron sputtering reativo. 2014. 92f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais). Universidade Estadual Paulista - UNESP, Sorocaba, 2014.

CHEN, D. *et al.* Oxidation behavior of niobized TiAl by plasma surface alloying. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, v.15, n.5, 2008. p.590-593.

CHOPRA, K. L.; DAS, S. R. Thin film solar cells. New York: Plenum press, 1983.

CONRAD, J.R. Plasma Source Ion Implantation Technique for Surface Modification of Materials. *J. Appl. Phys.*, v.62, p. 4591-4596. 1987.

CORREIA, N.V. Deposição de ZnO e sua aplicação em células solares para geração de energia fotovoltaica. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, Lorena. 2013.

COSTA, R.F. A matemática e os circuitos elétricos de corrente contínua: uma abordagem analítica, prático-experimental e computacional. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.

- CRUZ, L. R., *et al.* Propriedades de filmes finos de ZnO:Al depositados sobre substratos de poliimida à temperatura ambiente para aplicações em dispositivos optoeletrônicos flexíveis. *Cerâmica*, 63(366), 162-168. 2017.
- DAMIANI, L.R. Filmes de óxido de índio dopado com estanho depositados por magnetron sputtering. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
- DANG, W.L. *et al.* Deposition and characterization of sputtered ZnO films. *Superlattices and Microstructures*, v.42, p. 89-93, 2007.
- DERSOLA, F.A.; VALLAURI, D. Synthesis of ZnO nanoparticles through the impregnated layer combustion synthesis process. *J. Mater Sci*, v. 46, p. 781-786, n.3, agosto, 2010.
- DIAS, C.A.C.M. Produção e caracterização de filmes finos de óxido de zinco intrínsecos e dopados com alumínio e boro. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes. 2005.
- DIAS, C.A.C.M.; PAES JUNIOR, H.R. Produção e caracterização de filmes finos de óxido de zinco intrínsecos e dopados com alumínio e boro. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, setembro. 2006. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762006000300015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 23/Fev/2015.
- FERREIRA, N. S. Deposição e caracterização de filmes de óxido de zinco dopado com alumínio. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- FELIX, J.F. Síntese e caracterização de filmes finos de óxido de zinco e polianilina para aplicações em heterojunções semicondutoras. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2009.
- FIGUEIREDO, T.N. Amplificador de potência de RF banda larga para aplicação em transceptores multibanda. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012.
- FILHO, S. E. Magnetron sputtering planar construção e aplicação. 1991. 131 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

FONTANA, L.C. Estudo d deposição de filmes de Ti e TiN e desenvolvimento do sistema modificado triodo-magnetron-sputtering. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997.

GIROTTTO, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 639-647, julho, 2002.

GOMES, E. et al. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, v.161, n. 2-3, p. 614-626. 2009.

GONÇALVES A. Obtenção e caracterização de revestimentos compostos de multicamadas TiO₂/TiN. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2010.

GONÇALVES, G.P. Filmes finos de óxido de índio e zinco e sua aplicação em díodos orgânicos emissores de luz. Tese (Doutorado em Nanotecnologias e Nanociências) – Universidade de Nova Lisboa, Lisboa. 2011.

GUIMARÃES, G.R. Preparo e caracterização de óxido de zinco dopado com alumínio e hidrogênio para aplicações em células solares fotovoltaicas". Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2013.

HEERDT, F.W. Amplificadores chaveados para aplicações em áudio. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1997.

HENLEY, et al. Controlling the size and alignment of ZnO microrods using ZnO thin film templates deposited by pulsed laser ablation. *Applied Physics A.*, v. 79, p. 1169-1173, 2004.

HENRIQUE, T.S. UEDA, M. Projeto de uma fonte DC para produção de plasma aplicado em tratamento de materiais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos. 2004.

HUGHES, M. *What is sputtering? Magnetron sputtering?* 2014. Disponível em: <<http://www.semicore.com/what-is-sputtering>> Acesso em: 29.Mar.2018.

HUGHES, M. *What is MF or Mid-Frequency AC Sputtering?* 2017. Disponível em: <<http://www.semicore.com/news/97-what-is-mf-ac-sputtering>> Acesso em: 15. jul.2018.

LABANCA, A.R.C. Desenvolvimento de reator de pirólise a plasma para a decomposição do metano em hidrogênio e carbono sólido. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

LANFREDI, S. et al. Estudo da influência da dopagem na energia de gap direto e indireto de nanopós de $\text{KSr}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$. International Atomic Energy Agency,

LANGMUIR, I. Oscillations in Ionized Gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. v. 14, n. 8, 1928, p. 627-637.

LAPTEC - Laboratório de Plasmas Tecnológicos. Deposição de Filmes Finos por PECVD. Sorocaba, 2018. Disponível em: <
<http://www2.sorocaba.unesp.br/gpm/pecvd.htm> >. Acesso em: 15. Mar.2018.

LIU, L. Rugosidade da interface e efeito de tratamento térmico nas propriedades supercondutoras de multicamadas Nb/Co. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

LOPES, B.F.M. Caracterização de bicamadas transparentes e condutoras de ZnO/ZnOAl depositadas sobre poliimida para aplicação em células fotovoltaicas flexíveis. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v.7, n.1, p.91-97, 2016.

LUNAS, F. R. Caracterização de filmes finos de ZnO dopados com Al e Mn depositados em substrato vítreo pelo método spray pirólise. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2009.

MARINHO, Mary Roberta Meira et al. Deposition of thin film of titanium on ceramic substrate using the discharge for hollow cathode for $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ indirect brazing. *Mat. Res.*, São Carlos, v. 12, n. 4, p. 419-422, 2009.

MARQUES, L.S. Modelização e caracterização de descargas radiofrequência em hidrogênio produzido num reator de acoplamento capacitivo. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Técnica de Lisboa, 2005.

MELO, E.B. Síntese e caracterização de alvo de óxido de zinco dopado com alumínio. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba. 2015.

MINAMI, T. Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes. *Semicond. Sci. and Technol.*, v. 20, n.4, p. 35-44, março, 2005.

MIOLA, E. J. Espectroscopia e difração de Raios X aplicadas ao estudo de ferro e aço nitretados por plasma. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

MONTEIRO, A. J. S. C. Revestimentos multicamada PVD com comportamento electrocrômico. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Portugal. 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/3280>>. Acesso em: 02.Mar.2018.

NASCIMENTO NETO, E.R. Utilização de plasma na remoção de óleo da superfície de alumínio. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006.

NEWARK. Disponível em: <<http://www.newark.com/pt-BR/on-semiconductor/2n6284g/bipolar-transistor-npn-100v-to/dp/26K5315>> Acesso em 14.Jul.2018.

OLIVEIRA NETO, A.M. Caracterização química, propriedades ópticas e modelagem de filmes de carbono amorfo hidrogenado halogenado e similares produzidos por deposição à plasma. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba. 2012.

PASS, N. *et al.* Audi Amateur Power Amp Projects. Copyright: 1996. 205p.

PEREIRA, M.F. Óxido de zinco dopado para produção de biodiesel. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2016.

PIRES, F.J.A. Amplificador de áudio classe D. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2010.

POLAK, P.L. Processamento por plasma de polímeros para aplicações eletroquímicas. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

POMILIO, J.A. Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas. 2009. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>> Acesso em: 15.abr.2017.

QUEIROZ, J.C.A. Produção e análise do desempenho óptico e elétrico de filmes finos de SnO₂:F (FTO) para aplicações fotovoltaicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2015.

RAMANERY, F.P. Síntese e caracterização de nanopartículas semicondutoras com estrutura tipo "núcleo/casca" CdSe/CdS obtidas por rota coloidal aquosa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

RIBEIRO, R.P. Efeito do tratamento de oxidação a plasma na produção de uma bicamada SiOx/SiOxCyHz. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Unoversidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba. 2017.

ROCHA, A.S., *et al.* Effect of different surface states before plasma nitriding on properties and machining behavior of M2 high-speed steel. *Surface and Coatings Technology*, v. 165, n.2, p. 176-185.2003.

RONCONI, L.A. et al. Decomposição de precursores metalorgânicos: uma técnica química de obtenção de filmes finos. *Quim. Nova*, N. 25, n. 1, 69-77, 2002.

ROBBINS, J.J.; FRY,C.; WOLDEN, C.A. An interrogation of the zinc oxide-gallium oxide phase space by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, v. 263, p. 283-290, 2004.

SÁ, P.M.O. Construção de um amplificador de potência usando transistores GaN. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações) - Universidade de Aveiro. 2008.

SANCHES, F.A.L. Síntese de nanoestruturas de ZnO por evaporação térmica modificada e sua caracterização microestrutural e das propriedades fotofísicas. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

SANSIVIERO, M.T., FARIA, D.L.A. Influência do tratamento térmico no nano compósito foto catalisador ZnO/TiO₂. *Quim. Nova*, v.38, n.1, p. 55-59, 2015.

SCHEIDT, G. Caracterização óptica de filmes finos de NbOx obtidos por sputtering reativo. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

SEDRA, A. S.; SMITH, K.C. Microeletrônica. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

SIEZKA JR., E.L. Estudo da alteração na absorção da luz monocromática (transmitância) como parâmetro de contaminação do mar por hidrocarbonetos. Dissertação (Mestrado em Ciências Biomédicas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

SILVA, E.P. Síntese e caracterização de filmes finos de óxido de zinco. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba. 2012.

SILVA, F.W.N. Aspectos gerais da física dos semicondutores. Monografia (Graduação em Física) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza. 2010.

SILVA, G. D., et al. Estudo da influência da dopagem na energia de *gap* direto e indireto de nanopós de K₂Sr₂Nb₅O₁₅. In: 53 Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, 2009.

SILVA, L.J.V. Produção e caracterização de filmes finos de ZnO. 2010. 56 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2010.

SILVA, M.N. Formação e crescimento de óxido de zinco e óxido de zinco dopado com cobre. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2015.

SILVA, R.F. Filmes de óxido de zinco dopado com alumínio ou európio: preparação e caracterização. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 2001.

SILVA, S.F.C. Caracterização ótica de filmes finos de CdMnTe crescidos pela técnica de epitaxia por feixe molecular. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

SILVA, S.S.; MAGALHAES, F.; SANSIVIERO, M.T.C. Nano compósitos semicondutores ZnO/TiO₂: testes fotocatalíticos. *Quím. Nova*, São Paulo, v. 33, n.1, 2010. Disponível em

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000100016&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 23.Fev.2015.

SILVEIRA, I.M.O. Estudo dos parâmetros de processo para a produção de filmes finos à base de sílica e titânia processados por sol-gel. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.

SOBRINHO, A.J.R. Uso da técnica de load-pull em amplificadores de potência em micro-ondas. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2003.

SOTELO, F.F. Espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização de petróleo: simulação de uma unidade de destilação atmosférica. Tese (Doutorado em Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

SOUZA, A.R. Estudos de descargas em gases: aplicação ao tratamento de superfícies. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, Florianópolis, v.10, n.1, p.71-87, Abril, 1993.

SOUZA JR., L.R. Obtenção de filmes finos por descarga luminescente de gases rarefeitos e vapor de isopropóxido de titânio sobre aço AISI M2. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

TATSCH, P.J. Deposição de Filmes Finos. Universidade Estadual de Campinas. 2006.

TECMOS. Disponível em:
<<http://www.tecmos.com.br/pdf/REANSISTORES%20DE%20POTENCIA.pdf>>.
Acesso em: 19.Ago.2011.

TEIXEIRA, F.S. Anisotropia de resistividade elétrica em filmes finos nanoestruturados. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

TRINDADE, N.M. Investigação das propriedades ópticas de ZnO e ZnO:Al. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Bauru. 2015.

VELASCO, D.S. Caracterização de materiais luminescentes: estudo de blendas poliméricas PC/PMMA dopadas com complexos de terras-raras e compósitos de copolímeros acrílicos PEGDA/TEGDMA com nanopartículas de ZnO. Tese (Doutorado em Física). Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2010.

VERGÖHL, N. et al. Stabilization of high-deposition-rate reactive magnetron sputtering of oxides by in situ spectroscopic ellipsometry and plasma diagnostics. *J. Vac. Sci. Technol. A* 18, 1709-1712, 2000.

VIANA, W.E.S.S. et al. Filmes finos de óxido de zinco depositados por RF-magnetron sputtering na presença de oxigênio. *Rev. Bras. Apl. Vac.*, v.36, n.3, p. 114-117, Campinas, 2017.

VOSSSEN, J. L. RF sputtered transparent conductors the system $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$. *RCA Review*. 32. p. 289-296. 1971.

WILL, C.R. Ligas inoxidáveis resistentes à cavitação depositadas por plasma - PTA - ARAME. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

WILLIAMS, B.W. Power Electronics; devices, drivers, applications and passive components. 2006.

YARDIMCI, O. SETLOW, P. Plasma sterilization: opportunities and microbial assessment strategies in medical device manufacturing. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v.38, n.4. p. 973-981. 2010.

Apêndice A - Cálculo de dissipação térmica em dissipadores

Em um dissipador encontra-se a dissipação por convecção, que é pela movimentação do ar no dissipador, e por radiação, onde a energia é transportada por ondas eletromagnéticas. Veremos a seguir como é calculada a taxa de calor em cada uma e o que fazer para melhorar a eficiência (SEDRA, 2007):

A.1 Convecção

A Taxa de Calor [J/s] dissipado é obtida calculada conforme Equação A.1:

$$Q=h A (T_s -T_f) \quad (\text{Equação A.1})$$

onde:

h = coeficiente individual de transporte de calor; A = área do dissipador; T_s = temperatura de superfície; e T_f = temperatura do ar circunstante.

A melhora da dissipação pode ser feita aumentando a área do dissipador ou no aumento do coeficiente individual de transporte de calor, que implica na alteração da geometria do dissipador de modo a facilitar o fluxo de ar, ou forçando a passagem de ar pelo dissipador na chamada ventilação forçada, usando, por exemplo, um cooler.

A.2 Radiação

Na radiação, a Taxa de Calor dissipado é obtida através da Equação A.2:

$$Q = \varepsilon\sigma A (T_s^4 - T_f^4) \quad (\text{Equação A.2})$$

Onde: σ = constante de Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$); ε = emissividade; T_s = temperatura de superfície; e T_f = temperatura do fluido (ar)

Na radiação o aumento da eficiência pode ser obtido mudando o acabamento da superfície que irradia o calor. Nesse contexto, levantaremos o estudo da anodização do alumínio, material utilizado na maioria dos dissipadores, o que melhora a Taxa de emissividade em cerca de 20 vezes, conforme podemos verificar na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Absortividade e emissividade de radiação do alumínio em função do acabamento

	Absortividade	Emissividade	α/ε
Anodização Preto	0.86	0.86	1.00
Anodização azul	0.67	0.87	0.77
Anodização Bronze	0.73	0.86	0.85
Anodização Verde	0.66	0.88	0.75
Anodização Vermelho	0.57	0.88	0.65
Anodização amarelo	0.47	0.87	0.54
Anodização Natural	0.35	0.84	0.42
Sem adonisar	0.26	0.04	6.50

Considerando que o calor absorvido pelo dissipador é por condução térmica, o valor da absortividade é desconsiderado na escolha do dissipador, sendo considerado somente o fato de ele ser adonisado ou não.

A.3 Resistência térmica

Resistência térmica é definida como a dificuldade da troca de calor entre dois meios, e é calculada através da Equação A.3:

$$R_t = \frac{\Delta T}{P} = \frac{1}{(h \cdot A)} \quad (\text{Equação A.3})$$

Onde: ΔT = diferença de temperatura entre regiões de transferência de calor; P = potência média dissipada; h = coeficiente individual de transporte de calor; A = área do dissipador

Para a resistência térmica entre o dissipador e o ambiente, R_{tda} é dada pela Equação A.4:

$$R_{tda} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda W}} \cdot C_f^{0,25} + 650 \cdot \frac{C_f}{A} \quad (\text{Equação A.4})$$

Onde: λ : condutância térmica (à 77°C) (W/°C.cm); W : espessura do dissipador (mm); A : área do dissipador (cm²); C_f : fator de correção devido à posição e tipo de superfície.

Na Tabela A.2, segue os valores da condutância térmica dos materiais mais utilizados nos dissipadores.

Tabela A.11 - Condutância térmica λ

Material	(W/°C.cm)
Diamante	2
Alumínio	2.08
Cobre	3.85
Bronze	1.1
Aço	0.46
Mica	0.006
Berílio	2.10
Óxido de cerâmica	1.4
Al ₂ O ₃	0.27
Graxa de silicone	0.44
Silicon grease	0.01
Ar parado	0.0004

(Fonte: WILLIANS, 2006)

O valor C_f é dado na Tabela A.3, ele varia conforme a posição do dissipador e o valor da Tabela 1, que tem como principal fator a emissividade.

Tabela A.12 – Valores de C_f

	Corpo adonisado	Corpo brilhante
Montagem vertical	0,43	0,85
Montagem horizontal	0,5	1,00

Outro ponto a ser destacado é a redução da resistência térmica do dissipador usando a circulação forçada de ar. Na Figura A.1 mostra o índice multiplicador da

resistência térmica em função da velocidade do ar forçado (por exemplo: um ventilador) no dissipador.

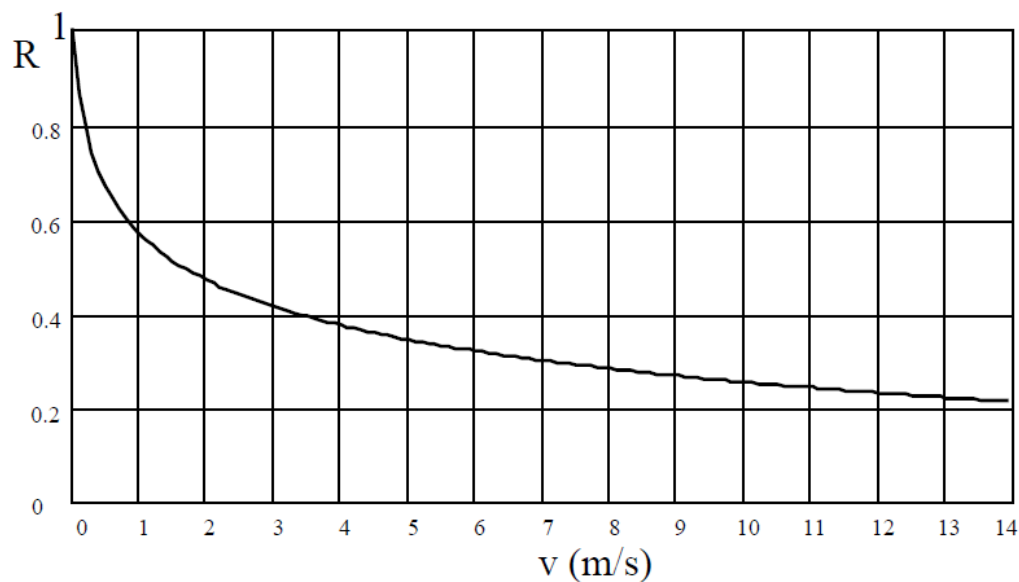


Figura A.1 - Índice de resistência térmica em função da velocidade do ar (Fonte: POMILIO, 2009).

A.4 Regime Permanente

A resistência térmica é comparada analogicamente a um circuito eletrônico, mostrado na Figura A.2 onde as temperaturas são análogas às tensões nos respectivos nós e as resistências térmicas são as próprias resistências do modelo.

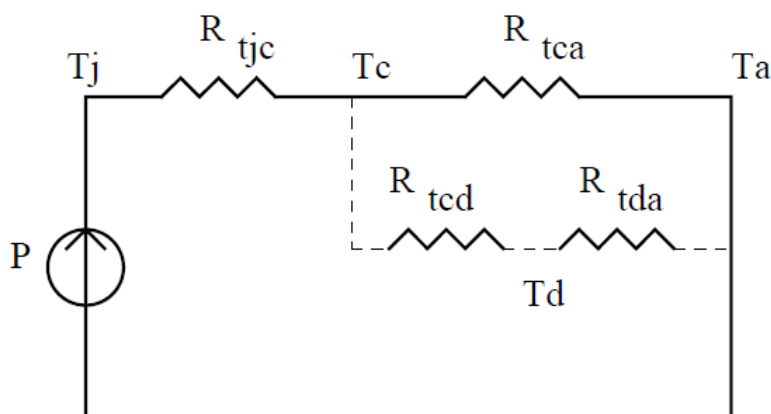


Figura A.2 - Circuito representativo das resistências térmicas análogas ao circuito eletrônico

(Fonte: POMILIO, 2009).

A temperatura máxima da junção dos transistores ($T_{j\text{máx}}$) é especificada pelo fabricante e considerando um valor médio de potência dissipada temos as Equações A.5 e A.6 intermediárias e a Equação A.7, típica do modelo.

$$T_c = T_a + P \cdot R_{tca} \quad (\text{Equação A.5})$$

$$T_j = T_c + P \cdot R_{tjc} \quad (\text{Equação A.6})$$

$$T_j = T_a + P \cdot (R_{tjc} + R_{tca}) \quad (\text{Equação A.7})$$

Onde: T_j = temperatura da junção semicondutora; T_a = temperatura ambiente; P = potência média dissipada; R_{tjc} = resistência térmica entre junção e cápsula; R_{tca} = resistência térmica entre cápsula e ambiente.

Na Equação A.7, T_a (temperatura ambiente) é considerada constante, sendo o objetivo de dimensionar o dissipador é evitar que a temperatura da junção

semicondutora (T_j) não ultrapasse o valor máximo. As resistências térmicas entre junção e cápsula (R_{tjc}) e entre cápsula e ambiente (R_{tca}) são dados de fabricante, encontrados nos manuais dos componentes. Entretanto, o valor de (R_{tca}) pode ser omitido caso for um valor elevado, sendo impreterivelmente obrigatório o uso do dissipador (POMILIO, 2009).

A.5 Cálculo dos dissipadores de Potência

Para cálculo do dissipador, tem que ser considerado a resistência térmica entre o dissipador e o ambiente (R_{tda}). Então, usando a Equação A.8 é possível saber qual é o valor máximo que a resistência térmica do dissipador deve ter para atender as necessidades de dissipação do circuito em regime extremo de trabalho.

$$T_{jmax} = T_a + P \cdot (R_{tcj} + R_{teq}) \quad (\text{Equação A.8})$$

Onde: T_{jmax} = temperatura máxima da junção; T_a = temperatura ambiente; P = potência média dissipada; R_{tjc} = resistência térmica entre junção e cápsula.

O valor da temperatura máxima de junção, é dado do componente e R_{teq} é a resistência térmica equivalente considerando o valor de (R_{tda}) onde temos a Equação A.9 baseado no modelo do circuito eletrônico da Figura 11.

$$R_{teq} = \frac{(R_{tca} \cdot R_{tda})}{(R_{tca} + R_{tda})} \quad (\text{Equação A.9})$$

Porém na formula acima foi desconsiderado o valor da resistência térmica entre cápsula e o dissipador (R_{tcd}), que é determinado pelo ar contido entre os corpos, devido às rugosidades e não alinhamento das superfícies onde pode ser melhorado com o uso de pastas térmicas ou qualquer ou tipo de condutor térmico e isolante elétrico, caso necessário isolar eletricamente evitando curto-circuito. Assim, é utilizada a Equação A.10 para ter um dimensionamento completo com todas as resistências térmicas presentes (POMILIO, 2009).

$$R_{teq} = \frac{(R_{tca} \cdot (R_{tcd} + R_{tda}))}{(R_{tca} + R_{tda} + R_{tcd})} \quad (\text{Equação A.10})$$

O valor de R_{tda} do dissipador deverá sempre ser menor que o valor máximo R_{tda} obtido, sendo que o valor de R_{tda} do pode ser melhorado, como falado anteriormente, utilizando a ventilação forçada onde o R_{tda} é multiplicado pelo valor de R do Figura A.1, baseado na velocidade do ar que passa pelo dissipador podendo diminuir a resistência próxima de 5 vezes. Na Equação A.11 está o cálculo do R_{tda} ventilado.

$$R_{tda_forçado} = R_{tda} \cdot R \quad (\text{Equação A.11})$$

O valor de R_{tcd} é obtido na Tabela A.4.

Tabela A.13 – Valor de R_{tcd}

Tipo de cápsula	Tipo de isolador	R_{tcd} (°C/W)
-----------------	------------------	------------------

		c/ pasta	s/ pasta
TO - 3	s/ isolador	0,1	0,3
	Teflon	0,7 a 0,8	1,25 a 1,45
	Mica	0,5 a 0,7	1,2 a 1,5
TO - 66	s/ isolador	0,15 a 0,2	0,4 a 0,5
	Teflon	0,6 a 0,8	1,5 a 2,0
	Mica	0,6 a 0,8	1,2 a 1,4
TO - 220AB	s/ isolador	0,3 a 0,5	1,5 a 2,0
	Mica	2,0 a 2,5	4,0 a 6,0
TO - 247	s/ isolador	0,1 a 0,2	0,4 a 1,0
	Mica	0,5 a 0,7	1,2 a 1,5

(Fonte: WILLIANS, 2006)

A.6 Regime transitório

No estudo da proteção dos componentes eletrônicos contra dissipação térmica, quando os componentes apresentam pulsos de potência é relevante verificar a proteção não apenas nos valores médios, mas também nos valores de picos. Para esses cálculos é utilizada a equação 19, onde Z_{tjc} é dado do componente presente nos manuais, e as variáveis para definir o valor de Z_{tjc} são obtidos a partir de

aproximações e de curvas normalizadas conforme a Figura A.3 e as equações A.12 e A.13.

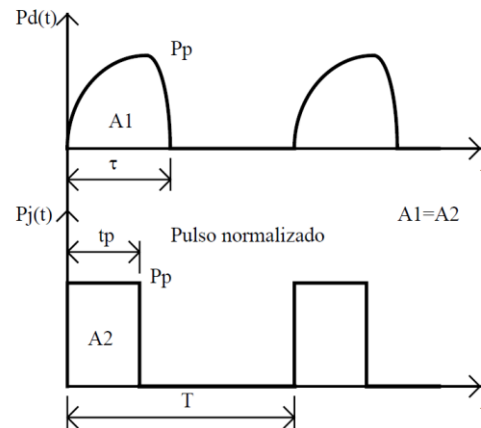


Figura A.3 - Curva normalizada da Potência (Fonte: POMILIO, 2009).

$$t_p = \frac{1}{P_p} \cdot \int_0^{\tau} P_d(t) dt \quad (\text{Equação A.12})$$

$$\delta = \frac{t_p}{T} \quad (\text{Equação A.13})$$

Com os valores dos parâmetros das Equações A.12 e A.13 é possível determinar o valor de Z_{tjc} graficamente, gráfico esse presente no manual do fornecedor do componente, e então calcular a temperatura da junção no pico de potência, dado pela Equação A.14.

$$T_{j_p} = T_c + P \cdot Z_{tjc} \quad (\text{Equação A.14})$$

Apêndice B - Projeto de caracterização dos dissipadores utilizados na FAP

B.1 Dimensionamento das resistências térmicas dissipadores

Com os dados de potência dos transistores é possível fazer os cálculos e dimensionamento dos dissipadores que serão utilizados.

Baseado no trabalho de POMILIO (2009), o cálculo da temperatura de trabalho da junção deve estar entre 10% a 20 % menor que o valor máximo, para permitir a proteção do componente sem sobre dimensionar o dissipador.

Tabela B.1 - Dados da resistência térmica entre junção e cápsula e cápsula e ambiente.

Componentes	T _{jmax} (°C)	R _{tjc} (°C/W)	R _{tca} (°C/W)	R _{tcd} (°C/W) -
				MICA
IRFP	150	0,65	0,24	0,5
BF	150	20	-	2
BF	159	20	-	2

Considerando neste trabalho os transistores trabalhando com 12 % menor, então se multiplica T_{jmax} pelo fator de trabalho de 0,88 (88%) para se obter T_{jmax} de trabalho.

$$\mathbf{T_{jmax\ de\ trabalho} = T_{jmax} \cdot 0,88} \quad (\text{Equação B.1})$$

A temperatura máxima de trabalho da junção dos transistores é:

$$\mathbf{T_{jmax\ de\ trabalho} = 150 \cdot 0,85} \quad (\text{Equação B.2})$$

Tem se então:

$$T_{jmax} \text{ de trabalho} = 132 \text{ } ^\circ\text{C}$$

B.2 Dimensionamento do dissipador para o Transistor M1

Análise de dissipação em potência média, adaptando a Equação B.3:

$$T_{jmax} \text{ de trabalho} = T_a + P_{\text{média}} \cdot (R_{tjc} + R_{teq}) \quad (\text{Equação B.3})$$

Adotando uma temperatura ambiente de 35°C e usando os dados da Tabela 10 e 11.

$$132 = 35 + 112,4 \cdot (0,65 + R_{teq}) \quad (\text{Equação B.4})$$

$$R_{teq} = 0,213$$

Considerando o uso da mica como isolante elétrico e da pasta térmica, esta última para aumenta a taxa de condução térmica entre o componente e o dissipador aumentando consecutivamente dissipação térmica, então usando a Equação 15:

$$R_{teq} = \frac{(R_{tca} \cdot (R_{tcd} + R_{tda}))}{(R_{tca} + R_{tda} + R_{tcd})} \quad (\text{Equação B.5})$$

$$0,213 = \frac{(0,24 \cdot (0,5 + R_{tda}))}{(0,24 + R_{tda} + 0,5)} \quad (\text{Equação B.6})$$

$$R_{tda} = 1,39$$

O R_{tda} é o valor máximo de resistência térmica que um dissipador deve ter para pode dissipar a calor produzido pelo transistor, no caso o transistor M1, em função da potência média dissipada, porém é preciso verificar se o R_{tda} satisfaz a condição de dissipação considerando a potência de pico, para isso, conforme a equação matemática na revisão bibliográfica e lembrada abaixo se verifica se o mesmo R_{tda} atende esse requisito:

$$\mathbf{Tj}_{pico} = \mathbf{Tc} + \mathbf{P} \cdot \mathbf{Z}_{tjc} \quad (\text{Equação B.7})$$

Para determinar o valor de Z_{tjc} depende de δ e t_p (tempo de pico), onde:

$$\delta = \frac{t_p}{T} \quad (\text{Equação B.8})$$

$$\delta = \frac{12,22}{25}$$

$$\delta \cong 0,5$$

Pelo manual do fabricante, temos que $Z_{tjc} = 0,3$, logo:

Sendo que T_c :

$$T_c = T_a + P_{m\u00e9dia} \cdot R_{teq} \quad (\text{Equa\u00e7\u00e3o B.9})$$

$$T_c = 35 + 112,4 \cdot 0,213 \quad (\text{Equa\u00e7\u00e3o B.10})$$

$$T_c = 58,94$$

Substituindo o valor na Equa\u00e7\u00e3o 43, tem-se:

$$T_{j_{pico}} = 58,94 + 230 \cdot 0,3 \quad (\text{Equa\u00e7\u00e3o B.11})$$

$$T_{j_{pico}} = 127,94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como $T_{j_{pico}} < T_{j_{max \text{ de trabalho}}}$, ent\u00e3o pode garantir que a resist\u00eancia t\u00e9rmica do dissipador dimensionado para a pot\u00eancia m\u00e9dia tamb\u00e9m atende quando considerado somente a pot\u00eancia de pico. Ent\u00e3o para o transistor M1 a resist\u00eancia t\u00e9rmica m\u00e1xima do dissipado \u00e9 de 1,39 $^\circ\text{C}/\text{W}$.

B.3 Dimensionamento para o Transistor M2

An\u00e1lise de dissipac\u00e3o em pot\u00eancia m\u00e9dia, usando $T_{j_{max \text{ de trabalho}}} = 132 \text{ } ^\circ\text{C}$ e a Equa\u00e7\u00e3o B.3:

$$132 = 35 + 114 \cdot (0,65 + R_{teq}) \quad (\text{Equa\u00e7\u00e3o B.12})$$

$$R_{teq} = 0,2008$$

O isolante el\u00e9trico usado \u00e9 a mica com a pasta t\u00e9rmica, ent\u00e3o:

$$0,2008 = \frac{(0,24 \cdot (0,5 + R_{tda}))}{(0,24 + R_{tda} + 0,5)} \quad (\text{Equação B.13})$$

$$R_{tda} = 0,73$$

Determinado R_{tda} para a potência média específica o valor de Z_{tjc} para verificar se o R_{tda} atende necessidade de dissipação considerando a potência de pico, sendo que:

$$\delta = \frac{t_p}{T} \quad (\text{Equação B.14})$$

$$\delta = \frac{12,39}{25} \quad (\text{Equação B.15})$$

$$\delta \cong 0,5$$

Onde pelo manual do fabricante, tem que $Z_{tjc} = 0,3$, calculando T_c :

$$T_c = T_a + P_{média} \cdot R_{teq} \quad (\text{Equação B.16})$$

$$T_c = 35 + 114 \cdot 0,2008 \quad (\text{Equação B.17})$$

$$T_c = 57,89$$

Substituindo o valor na Equação 80, tem-se:

$$T_{j_{pico}} = 57,89 + 230 \cdot 0,3 \quad (\text{Equação B.18})$$

$$T_{j_{pico}} = 126,89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como $T_{j_{pico}} < T_{j_{max \text{ de trabalho}}}$, então pode garantir que a resistência térmica do dissipador dimensionado para a potência média também atende quando considerado somente a potência de pico. Então para o transistor M1 a resistência térmica máxima do dissipado é de $0,73 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

B.4 Dimensionamento do dissipador para os transistores Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 e Q6.

Para esse grupo de transistores, usa-se o mesmo dissipador para todos, sendo que o dimensionado é feito considerando a maior potência média entre eles e o maior valor de pico entre eles. Adoção de método é para minimizar os cálculos a serem feitos desconsiderando o transistor Q6 não utilizará dissipador por ter uma dissipação muito baixa.

Análise de dissipação em potência média, usando $T_{j_{max \text{ de trabalho}}} = 132 \text{ } ^\circ\text{C}$ e a potência média de 1 W , conforme a Equação B.16:

$$132 = 35 + 1 \cdot (20 + R_{teq}) \quad (\text{Equação B.19})$$

$$R_{teq} = 77^\circ\text{C/W}$$

Para este transistor, no manual do fabricante não é mencionado o valor de R_{tca} , pois conforme citado na revisão bibliográfica, é devido ao fato do transistor apresentar

um valor de R_{tca} muito alto que exige um dissipador para altas potências. Sendo o isolante elétrico a mica com a pasta térmica, então:

$$R_{teq} = R_{tcd} + R_{tda} \quad (\text{Equação B.20})$$

$$77 = 0,5 + R_{tda} \quad (\text{Equação B.21})$$

$$R_{tda} = 76,50$$

O valor de Z_{tjc} para verificar se o R_{tda} atende necessidade de dissipação considerando a potência de pico, considerando os dados do transistor Q5, pois tem o maior pico de potência:

$$\delta = \frac{t_p}{T} \quad (\text{Equação B.22})$$

$$\delta = \frac{0,6}{25}$$

$$\delta \cong 0,024$$

De acordo com o manual do fabricante, tem que $Z_{tjc} = 0,02$, calculando T_c :

$$T_c = T_a + P_{média} \cdot R_{teq} \quad (\text{Equação B.23})$$

$$T_c = 35 + 1 \cdot 77$$

$$T_c = 112 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Substituindo o valor na Equação B.23, tem-se:

$$T_{j_{pico}} = 112 + 8,25 \cdot 0,02 \quad (\text{Equação B.24})$$

$$T_{j_{pico}} = 112,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como $T_{j_{pico}} < T_{j_{max \text{ de trabalho}}}$, então pode garantir que a resistência térmica do dissipador dimensionado para a potência média também atende quando considerado somente a potência de pico. Então para os transistores Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5 a resistência térmica máxima do dissipado é de 77°C/W .

B.5 Caracterização dos Dissipadores

Com os valores das resistências térmicas determinados na seção anterior, escolheu então os modelos que melhor atendesse.

Porém, com a dificuldade de achar dissipadores com os valores determinados para os transistores M1 e M2, utilizou-se ventilação forçada para conseguir atender à necessidade, evitando assim dissipador muito grande e muito caro.

Para os transistores M1 e M2 utilizará o mesmo dissipador (Anodizado preto) conforme as características presentes na Figura B.1 e um Cooler 80X80X25, 12 V.

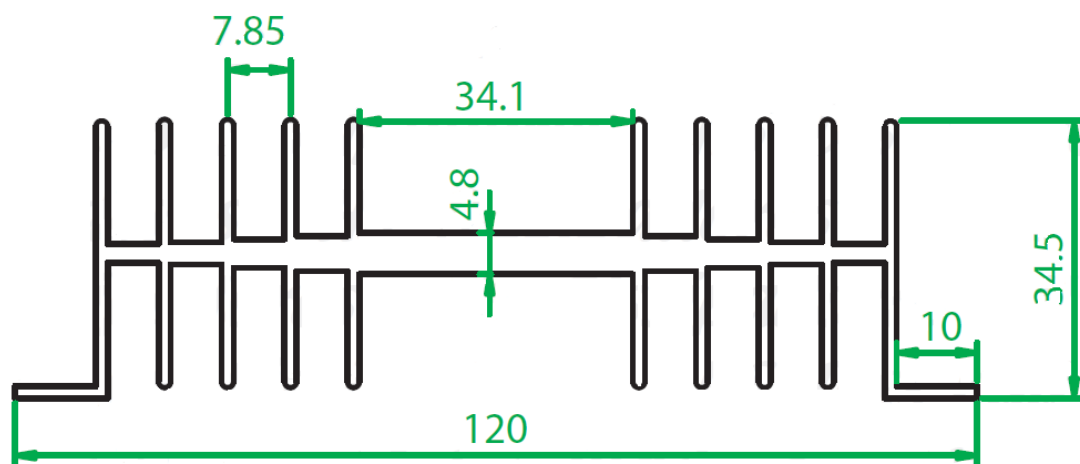


Figura B.1 – Dissipador de calor (Fonte: HSDISSIPADORES, 2011)

A figura B.2 apresenta o valor da resistência térmica quando está utilizando a ventilação forçada. Para esse projeto utilizará um cooler que consegue ventilar o ar com uma velocidade de 4 m/s, assim produzindo uma resistência térmica de $0,4^{\circ}\text{C}/\text{W}$, atendendo os dois transistores.

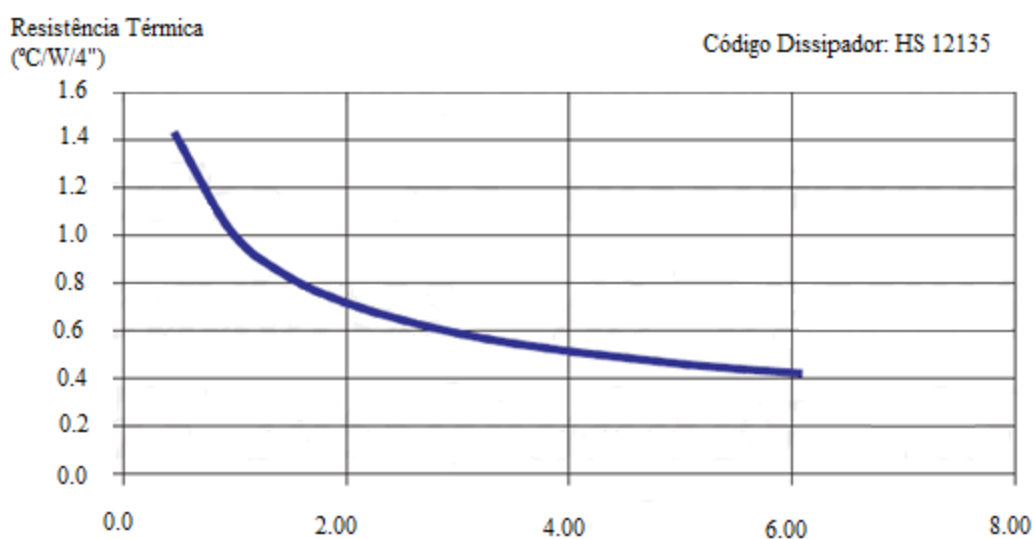


Figura B.2 - Aumento da resistência térmica com a diminuição de temperatura (HS, 2009).

Para os transistores Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5 o modelo do dissipador utilizado é apresentado na Figura B.3:

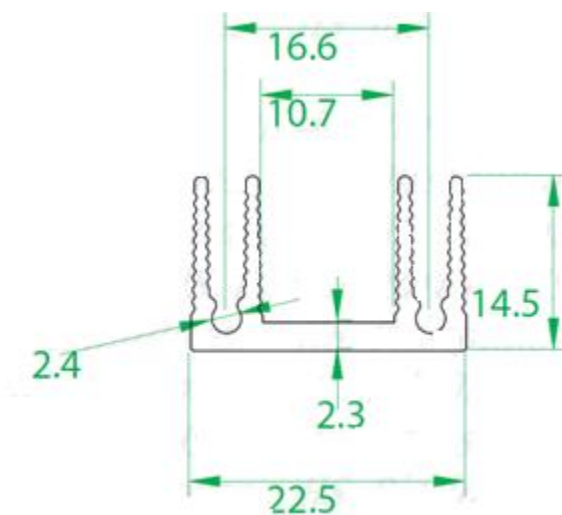


Figura B.3 – Dissipador (Fonte: HS, 2009).

Este dissipador de alumínio brilhante tem resistência térmica de $51 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ e atende a o valor calculado sem a utilização da ventilação forçada.