



## **Academia Militar**

### **Estudo comparativo de diversas nanoantenas óticas e sua integração em biossensores**

Ricardo Manuel Gonçalves Moura

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

### **Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Orientadora: Professora Doutora Maria João Marques Martins

### **Júri**

Presidente: Major de Transmissões Luís Filipe Xavier de Mendonça Dias

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Vogal: Professor Doutor António Luís Campos da Silva Topa

**Lisboa, dezembro de 2022**





## **Academia Militar**

### **Estudo comparativo de diversas nanoantenas óticas e sua integração em biossensores**

Ricardo Manuel Gonçalves Moura

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

### **Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Orientadora: Professora Doutora Maria João Marques Martins

### **Júri**

Presidente: Major de Transmissões Luís Filipe Xavier de Mendonça Dias

Orientador: Professor Doutor João Paulo Neto Torres

Vogal: Professor Doutor António Luís Campos da Silva Topa

**Lisboa, dezembro de 2022**



## Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes contributos, que levaram a que todo o esforço, determinação e perseverança imposta na realização do trabalho, possam ter sido superados com distinção e o cumprimento dos objetivos.

Aos orientadores, Professor Doutor João Torres e Professora Doutora Maria João Martins, docentes e especialistas com larga experiência na atividade, possuidores de um excelente currículo científico e académico e com reconhecido mérito, agradeço o apoio, a paciência, a partilha de conhecimentos e as contribuições importantes para a realização desta dissertação.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, à minha prima Ana e à minha tia Custódia, agradeço também pela exemplar forma de encorajamento e o nunca desistir nem baixar os braços em alturas menos boas. Um obrigado muito especial pela vossa ajuda e compreensão durante todo este processo, um obrigado por tudo o que me proporcionaram e ensinaram ao longo da vida.

À minha namorada, Ana, um agradecimento especial por todo o amor e apoio dado ao longo da realização desta dissertação de mestrado.

Aos meus amigos de infância, pela amizade e incentivo, agradeço todo o apoio que me deram ao longo de todos estes anos que estamos juntos e, em especial, durante a realização da dissertação de mestrado.

Aos meus camaradas da Academia Militar, mais concretamente à turma Foxtrot, um agradecimento por todo o apoio dado durante estes seis árduos anos de formação na Academia Militar, incluindo os dois anos de formação no Instituto Superior Técnico e ao longo de toda a dissertação de mestrado. Sem vocês seria impossível completar este percurso e definitivamente não seria o mesmo.

À Academia Militar, nomeadamente os professores, instrutores, comandantes e todas as pessoas responsáveis, agradeço a todos o esforço e dedicação que implementaram para a formação e transmissão de conhecimentos aos alunos.

Agradeço ainda ao meu tio Justino, que embora não possa estar na conclusão deste mesmo trabalho, sempre me apoiou e incentivou nos momentos mais difíceis e sempre acreditou nas minhas capacidades e onde elas me podiam levar.

Por fim, um agradecimento a todos aqueles que não estando presentes neste momento, tiveram um contributo igual nas minhas conquistas.

A todos, dedico a minha dissertação de trabalho.



## Resumo

A área da nanotecnologia tem uma vasta amplitude e aplicação. Esta tem como base sistemas nanométricos com propriedades muito características, podendo ser estas aplicadas, por exemplo, à segurança, saúde, desenvolvimento de armamento e comunicações.

O objetivo principal deste trabalho consiste num estudo comparativo de uma nanoantena de tipologia Bowtie para operar com um biossensor e compará-la com outras tipologias já estudadas através da simulação, projeto e modelação deste mesmo biossensor baseado na tipologia referida.

Neste trabalho foi realizado um estado da arte acerca de biossensores, nanoantenas óticas, propriedades óticas, agregados de duas antenas e transmissão ótica extraordinária, estudo teórico sobre comportamento dos metais em frequências óticas com respetiva explicação dos modelos de Drude-Lorentz, Brendel-Bormann e Rakic e a propagação de plasmões superficiais numa interface dielétrico-metal. De seguida comparam-se as teorias de difração clássicas de fendas maiores que o comprimento de onda (Fraunhofer, Fresnel e Kirchhoff) e as teorias de fendas menores que o comprimento de onda (Bethe e Bouwkamp). Foi definida a metodologia a seguir para a realização do trabalho, onde se define as diferentes camadas da pele e alguns parâmetros a analisar quando do dimensionamento do biossensor. Foi dimensionada uma nanoantena ótica Bowtie de forma a analisar o seu comportamento em regimes óticos e compará-los com a teoria já existente. Este dimensionamento também serviu para verificar a importância da componente real e imaginária da permitividade elétrica.

Em relação aos resultados obtidos, conseguiu-se obter transmissão ótica extraordinária na maioria das estruturas, destacando-se as seguintes: estrutura composta por dielétrico-nanoestrutura-substrato, onde a subestrutura da nanoantena é composta por metal (alumínio) e envolvente de dióxido de silício; estrutura composta por dielétrico-nanoantena-substrato, da qual a subestrutura da nanoantena é composta por dióxido de silício e uma placa de metal por baixo das nanoantenas Bowtie; estrutura com características iguais à primeira mas com o acréscimo de mais dois andares de nanoantenas fazendo um agregado 3x3x3.

**Palavras-chave:** Biossensores, Nanoantenas Óticas, Transmissão Ótica Extraordinária Difração, Interação da luz com os metais.



## Abstract

Nanotechnology has a wide range of applications. It is based on nanometric systems with very characteristic properties, which can be applied, for example, to security, health, weapons development and communications.

The main objective of this work is a comparative study of a Bowtie nanoantenna to operate as a biosensor and compare it with other types already studied through the simulation, design and modelling of this same biosensor based on the mentioned typology.

In this work a state of the art of biosensors, optical nanoantennas, optical properties, two-antenna arrays and extraordinary optical transmission was carried out, as well as a theoretical study on the behavior of metals at optical frequencies with respective explanation of the Drude-Lorentz, Brendel-Bormann and Rakic models and the propagation of surface plasmons at a dielectric-metal interface. Then, the classical diffraction theories of larger-than-wavelength gaps (Fraunhofer, Fresnel and Kirchhoff) and smaller-than-wavelength gaps (Bethe and Bouwkamp) were fitted. The methodology to be followed to carry out the work was defined, where the different layers of the skin and some parameters to be analyzed when dimensioning the biosensor were defined. A Bowtie optical nanoantenna was dimensioned to analyze its behavior in optical regimes and compare them with the theory. This sizing also served to verify the importance of the real and imaginary component of the electrical permittivity.

Regarding the results obtained, extraordinary optical transmission was achieved in most of the structures, highlighting the following ones: structure composed by dielectric-nanostructure-substrate, where the substructure of the nanoantenna is composed by metal (aluminium) and silicon dioxide envelope; structure composed by dielectric-nanoantenna-substrate, of which the substructure of the nanoantenna is composed by silicon dioxide and a metal plate underneath the Bowtie nanoantennas; structure with the same characteristics as the first one but with the addition of two more floors of nanoantennas making a 3x3x3 aggregate.

**Keywords:** Biosensors, Diffraction, Extraordinary Optical Transmission, Interaction of light with metals, Optical Nanoantennas.



# Índice geral

RESUMO .....	VII
ABSTRACT .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIX
LISTA DE ACRÓNIMOS E SIGLAS .....	XXI
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XXIII
INTRODUÇÃO.....	1
<b>1. ENQUADRAMENTO DO TEMA NO ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
1.1 BIOSSENSORES .....	5
1.2 PARÂMETROS VITAIS .....	6
1.3 PROPRIEDADES DA PELE .....	7
1.4 NANOANTENAS E APLICAÇÕES .....	11
1.5 TIPOLOGIA DE DUAS ANTENAS .....	14
1.5.1 <i>Campo próximo e campo distante</i> .....	14
1.5.2 <i>Antena Bowtie</i> .....	14
1.5.3 <i>Antena de Fendas</i> .....	16
1.6 TRANSMISSÃO ÓTICA EXTRAORDINÁRIA .....	17
<b>2. INTERAÇÃO DA LUZ COM OS METAIS .....</b>	<b>19</b>
2.1 MODELO DE DRUDE-LORENTZ.....	19
2.2 MODELO DE BRENDEL-BORMANN.....	22
2.3 MODELO DE RAKIC.....	23
2.4 PLASMÕES POLARITÕES SUPERFICIAIS.....	24
2.5 TEORIAS DE DIFRAÇÃO .....	28
2.5.1 <i>Difração Fraunhofer</i> .....	28
2.5.2 <i>Difração de Fresnel</i> .....	29
2.5.3 <i>Difração de Kirchhoff</i> .....	30
2.5.4 <i>Difração Bethe</i> .....	31
2.5.5 <i>Difração de Bouwkamp</i> .....	32
2.5.6 <i>Comparação entre teorias de difração</i> .....	33
<b>3. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS ESTRUTURAS COM NANOANTENAS BOWTIE .....</b>	<b>35</b>
3.1 ESTUDO DA ESTRUTURA COMPOSTA POR AR-NANOANTENA-SUBSTRATO .....	37
3.1.1 <i>Variação do comprimento, da largura e da abertura das nanoantenas</i> .....	37
3.1.2 <i>Variação da altura das nanoantenas</i> .....	40
3.1.3 <i>Variação das distâncias das nanoantenas</i> .....	42
3.1.4 <i>Estrutura ar-nanoantena-substrato otimizada</i> .....	43

3.2	ESTUDO DA ESTRUTURA COMPOSTA POR DIELÉTRICO-NANOANTENA-SUBSTRATO .....	45
3.2.1	<i>Variação do comprimento, largura e abertura das nanoantenas .....</i>	<i>45</i>
3.2.2	<i>Variação da altura das nanoantenas .....</i>	<i>48</i>
3.2.3	<i>Variação das distâncias das nanoantenas .....</i>	<i>50</i>
3.2.1	<i>Estrutura dielétrico-nanoantena-substrato otimizada.....</i>	<i>51</i>
3.3	ESTUDO DA ESTRUTURA COMPOSTA POR NANOANTENAS DE SiO <sub>2</sub> COM UMA PLACA DE METAL .	53
3.3.1	<i>Variação do comprimento, largura, abertura e altura das nanoantenas .....</i>	<i>53</i>
3.3.2	<i>Variação da espessura da placa de metal.....</i>	<i>58</i>
3.3.1	<i>Estrutura ar-nanoantena-placa metálica-substrato otimizada.....</i>	<i>60</i>
3.3.2	<i>Análise detalhada da estrutura composta pela placa de ouro.....</i>	<i>62</i>
3.3.3	<i>Análise detalhada da estrutura composta pela placa de alumínio.....</i>	<i>63</i>
3.4	ESTUDO DO AGREGADO DE 3 ESTRUTURAS CADA UMA COM 9 NANOANTENAS CADA .....	64
3.5	CONCLUSÕES DA ANÁLISE DAS ESTRUTURAS ESTUDADAS .....	65
<b>4.</b>	<b>DIFRAÇÃO ATRAVÉS DE UMA NANOANTENA DE FENDAS .....</b>	<b>67</b>
4.1	ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DE NANOANTENAS DE FENDAS E SUBSTRATO DE DIÓXIDO DE SILÍCIO .....	67
4.1.1	<i>Estudo da variação do raio da abertura as nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício .....</i>	<i>67</i>
4.1.2	<i>Estudo da variação da altura da abertura das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício .....</i>	<i>68</i>
4.1.3	<i>Estudo da variação das distâncias entre as aberturas das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício .....</i>	<i>68</i>
4.2	ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA COM NANOANTENAS DE ABERTURAS DE ALUMÍNIO E SUBSTRATO AR.....	69
4.2.1	<i>Estudo da variação do raio da abertura das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de ar.....</i>	<i>69</i>
4.2.2	<i>Estudo da variação da altura das aberturas das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício .....</i>	<i>70</i>
4.2.3	<i>Estudo da variação da distância entre as aberturas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício .....</i>	<i>71</i>
<b>5.</b>	<b>DIFRAÇÃO POR UMA NANOANTENA BOWTIE COM A PRIMEIRA CAMADA DE PELE</b>	<b>73</b>
5.1	ESTUDO DA ESTRUTURA DE NANOANTENAS DE ALUMÍNIO E ENVOLVENTE DE DIÓXIDO DE SILÍCIO AO LONGO DA PRIMEIRA CAMADA DA PELE.....	73
5.2	ESTUDO DA ESTRUTURA DE NANOANTENAS DE DIÓXIDO DE SILÍCIO E PLACA DE OURO AO LONGO DA PRIMEIRA CAMADA DA PELE .....	74
5.3	ESTUDO DA ESTRUTURA AGREGADO DE 3 ESTRUTURAS CADA UMA COM 9 NANOANTENAS CADA AO LONGO DA PRIMEIRA CAMADA DA PELE.....	79
5.4	CONCLUSÕES DA ANÁLISE DAS ESTRUTURAS EXPOSTAS À PRIMEIRA CAMADA DA PELE .....	80
<b>6.</b>	<b>INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE DO SANGUE NA ESTRUTURA CONSTITUÍDA POR NANOANTENAS DE ALUMÍNIO E DIÓXIDO DE SILÍCIO .....</b>	<b>81</b>
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>85</b>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 87



## Índice de figuras

Figura 2.1 - Configuração de um biossensor [7].	5
Figura 2.2- Biossensor através de SPR [8], [9].	6
Figura 2.3 – Diversas disposições de biossensores no corpo humano [12].	7
Figura 6.1 – representação esquemática das Camadas da pele [11].	7
Figura 6.2 - Configuração das camadas da pele segundo a espessura das camadas e a quantidade de vasos sanguíneos nelas contidos [11].	8
Figura 6.3 - Esquema dos quatro fenómenos que acontecem no tecido humano [67].	9
Figura 6.4 – Variação do coeficiente de extinção molar para a hemoglobina oxigenada (HbO <sub>2</sub> ) e desoxigenada (Hb) [11], [69].	10
Figura 6.5 – Coeficiente de absorção da água [11], [69].	11
Figura 2.4- Tipologia de TOE num sensor [23].	13
Figura 2.5 - Diferentes difrações a variar com a proximidade à fenda [34].	14
Figura 2.6 - Geometria de uma antena Bowtie triangular [66].	15
Figura 2.7 - Esquema de uma antena Yagi-Uda [23].	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Figura 2.8- Excitação de um substrato composto por Sílica e Ouro com uma fenda a) excitação e respetiva emissão de fluorescência b) dimensões de cada substrato [41].	16
Figura 2.9 – Nanoantena de fendas com camada de corrugação [41].	17
Figura 2.10 – Agregado de nanoantenas óticas de fendas [43].	17
Figura 3.1 - Evolução da permitividade elétrica do ouro e do níquel com o modelo de Drude. a) Evolução da componente real (n). b) evolução da componente imaginária (k) [48].	21
Figura 3.2 - Evolução da permitividade elétrica do ouro e do níquel com o modelo de Drude-Lorentz. a) Evolução da componente real (n). b) evolução da componente imaginária (k) [48].	21
Figura 3.3 - Evolução da permitividade elétrica do ouro e do níquel com o modelo de Drude-Lorentz. a) Evolução da componente real (n). b) evolução da componente imaginária (k) [48].	22
Figura 3.4 - Evolução da permitividade elétrica do ouro com o modelo de Brendel-Bormann. [49].	23
Figura 3.5 - Representação da propagação do campo eletromagnético ao longo de uma superfície plasmónica polarizada [54].	24
Figura 3.6- PPSs a propagar-se numa superfície na direção de x [54].	25
Figura 3.7 - Relação de dispersão de PPSs não reativos (linha a cheio, curva), reativos (linha a tracejado) e a dispersão da luz no metal (linha a pontado) [54].	26
Figura 3.8 - Reflexão da luz no metal [54].	27
Figura 3.9 - Definição do acoplamento ATR para a luz no vácuo, luz no meio e o ponto onde começa a ter excitação através do método [54].	28
Figura 3.10 - Difração de Fraunhofer [60].	29
Figura 3.11 - Variação de intensidade característica de uma difração de Fresnel [61].	29
Figura 4.1- Exemplo da estrutura construída em simulação do agregado de nanoantenas Bowtie de metal.	35
Figura 4.2 – Exemplo da estrutura construída em simulação do agregado de nanoantenas Bowtie de SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	35

Figura 4.3 – Exemplo da excitação através do campo elétrico incidente e dos plasmões polaritões aglomerados.	36
Figura 4.4 – Exemplo explicativo de uma TOE graficamente. Os pontos a vermelho simbolizam a largura de banda que existe o fenómeno.	36
Figura 4.5 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	38
Figura 4.6 – Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	38
Figura 4.7 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato (continuação).	39
Figura 4.8 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) de Pt para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	39
Figura 4.9 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) de Pt para a estrutura ar-nanoantena-substrato (continuação).	40
Figura 4.10 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	40
Figura 4.11 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	41
Figura 4.12 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Pt com uma abertura de $\lambda/15$ para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	41
Figura 4.13 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Pt com uma abertura de $\lambda/50$ para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	42
Figura 4.14 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas de Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	42
Figura 4.15 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas de Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	43
Figura 4.16 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas de Pt para uma abertura de $\lambda/15$ para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	43
Figura 4.17 - Estudo otimizado de nanoantenas de Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	44
Figura 4.18 - Estudo otimizado de nanoantenas de Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	44
Figura 4.19 - Estudo otimizado de nanoantenas de Pt com uma abertura de $\lambda/15$ para a estrutura ar-nanoantena-substrato.	45
Figura 4.20 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	46
Figura 4.21 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	46
Figura 4.22 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato (continuação).	47
Figura 4.23 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	47
Figura 4.24 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato (continuação).	48
Figura 4.25 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	48

Figura 4.26 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	49
Figura 4.27 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	49
Figura 4.28 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas compostas por Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	50
Figura 4.29 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	51
Figura 4.30 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	51
Figura 4.31 - Estudo otimizado de nanoantenas de Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	52
Figura 4.32 - Estudo otimizado de nanoantenas de Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	52
Figura 4.33 - Estudo otimizado de nanoantenas de Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.	53
Figura 4.34 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/3$ .	54
Figura 4.35 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/5$ .	54
Figura 4.36 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/10$ .	55
Figura 4.37 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/3$ .	55
Figura 4.38 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/5$ .	56
Figura 4.39 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/10$ .	56
Figura 4.40 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/3$ .	57
Figura 4.41 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/5$ .	57
Figura 4.42 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em $\lambda/10$ .	58
Figura 4.43 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas da espessura da placa de metal de Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	59
Figura 4.44 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas da espessura da placa de metal de Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	59
Figura 4.45 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas da espessura da placa de metal de Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	60

Figura 4.46 - Estudo otimizado de nanoantenas de Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	60
Figura 4.47 - Estudo otimizado de nanoantenas de Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	61
Figura 4.48 - Estudo otimizado de nanoantenas de Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	61
Figura 4.49 - Estudo da variação detalhado da estrutura com espessura da placa de metal de 25 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	62
Figura 4.50 - Estudo da variação detalhado da estrutura com espessura da placa de metal de 15 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	63
Figura 4.51 - Estudo da variação detalhado da estrutura com espessura da placa de metal de 10 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	64
Figura 4.52 - Estudo da variação detalhado da estrutura com espessura da placa de metal de 25 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO <sub>2</sub> e placa de metal.	64
Figura 4.53 – Estrutura com agregado composto por 3x3x3 nanoantenas de Al utilizado para a simulação e estudo e distribuição dos polaritões para a estrutura composta por nanoantenas de Al quando excitado na parte superior da estrutura.	65
Figura 4.54 - Variação da distância entre agregados de nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de Al.	65
Figura 5.1 - Variação do raio da abertura com envolvente de alumínio e aberturas de SiO <sub>2</sub> .	68
Figura 5.2 - Variação da altura da abertura com envolvente de alumínio e aberturas de SiO <sub>2</sub> .	68
Figura 5.3 - Variação das distâncias entre aberturas com envolvente de alumínio e aberturas de SiO <sub>2</sub> .	69
Figura 5.5 - Variação do raio da abertura com envolvente de alumínio com envolvente de alumínio e aberturas de ar.	70
Figura 5.6 - Variação da altura das aberturas com envolvente de alumínio e aberturas de ar.	70
Figura 5.7 - Variação das distâncias entre aberturas com envolvente de alumínio com envolvente de alumínio e aberturas de ar.	71
Figura 7.1 - Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de alumínio-estrato córneo.	73
Figura 7.2 - Detalhe entre a profundidade 15 a 50 nm para variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de alumínio-estrato córneo.	74
Figura 7.3 - Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	75
Figura 7.4 - Distribuição do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	75
Figura 7.5 – Detalhe entre a profundidade 30 e 80 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	76
Figura 7.6 - Detalhe entre a profundidade 890 e 920 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	76
Figura 7.7 - Detalhe entre a profundidade 1850 e 1880 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	77

Figura 7.8 - Detalhe entre a profundidade 2825 e 2855 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	77
Figura 7.9 - Detalhe entre a profundidade 6680 e 6710 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	78
Figura 7.10 - Detalhe entre a profundidade 8615 e 8645 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	78
Figura 7.11 - Detalhe entre a profundidade 16340 e 16370 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	79
Figura 7.12 - Detalhe entre a profundidade 19235 e 19265 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.	79
Figura 7.13 – Estudo da variação do campo incidente com o campo medido ao longo da camada de pele (Estrato Córneo) para a estrutura 3x3x3 com nanoantenas de alumínio.	80
Figura 8.1 – Gráfico que relaciona temperatura com o coeficiente de absorção [71].	81
Figura 8.2 – Influência da temperatura da estrutura composta por dielétrico-nanoantenas de alumínio-estrato córneo.	82
Figura 8.3 - Distribuição dos polaritões quando se aplica na pele 25°C da estrutura composta por dielétrico-nanoantenas de alumínio-estrato córneo.	82
Figura 8.4 - Estudo segmentado da pressão medida em cada uma das caixas de forma a fazer uma análise da pressão e associação com o respetivo índice de refração.	83
Figura 8.5 – Variação da pressão aos longo das camadas em Pa.	83
Figura 8.6 – Variação do índice de refração dependendo da variação da pressão[77].	84

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Definição de parâmetros referentes às diferentes camadas da pele .....	8
Tabela 2 - variação da temperatura, coeficiente de absorção, componente real e imaginária do índice de refração.....	81



## Lista de Acrónimos e Siglas

ATR	Reflexão Interna Total Atenuada
DNA	Deoxyribonucleic Acid
EP	Exército Português
FA	Forças Armadas
IBM	International Business Machines Corporation
IV	Infravermelho
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MATLAB	MATrix LABoratory
PPS	Plasmões Polaritões Superficiais
QP	Quadros Permanentes
RF	Rádio Frequência
SPR	Ressonância Plasmónica superficial
SPR	Surface Plasmon Resonance
TOE	Transmissão Ótica Extraordinária
UAV	Veículo Aéreo não Tripulado
UV	Ultravioleta



## Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
$\alpha$	Raio da fenda circular	m
b	Comprimento da fenda	$m^2$
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo	$m\ s^{-1}$
D	Diretividade	-
e	Carga do elétron	C
E	Campo elétrico	$V\ m^{-1}$
f	Frequência	Hz
F	Vetor magnético	$C\ m^{-1}$
H	Campo magnético	$A\ m^{-1}$
I	Irradiância	$W\ m^{-2}$
k	Constante de propagação	$rad\ m^{-1}$
$\zeta$	Livre percurso médio	m
n	Índice de refração	-
P	Potência	w
Q	Carga elétrica	C
$\gamma$	Coefficiente de amortecimento	$s^{-1}$
$\epsilon$	Permitividade elétrica	$F\ m^{-1}$
$\lambda$	Comprimento de onda	m
$\omega$	Frequência angular	$rad\ s^{-1}$
$\bar{\epsilon}$	Permitividade dielétrica	$F\ m^{-1}$
$\eta$	Densidade superficial de carga magnética	$Wb\ m^{-2}$
$\theta$	Ângulo	rad ou $^\circ$



## Introdução

Todos os dias usamos antenas nos nossos dispositivos sem que se note. Estas são muito diversificadas e têm diversas aplicações sendo uma delas, os sistemas de comunicação. Estes apresentam uma antena emissora e uma recetora e podem trabalhar em diversas frequências. Sem as antenas é impossível haver comunicações, uma vez que, estas têm com função a transmissão de radiação eletromagnética. A evolução dos sistemas de comunicação passa pela implementação de comunicações óticas. A migração para as comunicações óticas dá-se devido à sua grande largura de banda e à saturação das bandas de rádio frequência (RF). A mudança de antenas de RF já está a ser efetuada para antenas óticas, mas a sua aplicação e desenvolvimento é de muito difícil modelação pois trabalha em escalas muito pequenas onde a precisão é um fator preponderante.

A nanotecnologia resulta da evolução da engenharia em conjunto com o desejo da evolução nos processos de escala nanométrica. Para tal é necessário investir estudo e desenvolver produtos que façam crescer esta área da engenharia. Esta tecnologia é deveras interessante porque possibilita obter altos valores de intensidade e diretividade de campos eletromagnéticos em dimensões espaciais extremamente pequenas da ordem de grandeza do nanómetro.

Este tipo de dispositivo tem diversas aplicações na medicina, na informática e nas telecomunicações. No ramo da medicina e mais especificamente na ciência biomédica tem sido alvo de diversos estudos como os biossensores, deteção de células cancerígenas e desobstrução de artérias.

Esta dissertação revela-se por isso, de extrema utilidade não só para o setor civil, mas também para o setor militar. Estes biossensores podem ser incluídos no fardamento, equipamento de combate e na própria pessoa. Aplicações como deteção de ameaças, segurança de proteção do soldado, monitorização do estado de saúde do soldado, e ainda desenvolvimento de armamento são algumas dos desenvolvimentos que podem ser realizados com o estudo desta temática. Existem já aplicações desta tecnologia segurança [1], [2] em pessoas [3] e também em boinas [4], UAV [3].

O setor militar tem de evoluir também neste ramo da engenharia pois é uma mais-valia com enorme impacto a curto, médio e longo prazo. É de extrema importância para o Exército Português (EP) assim como é para as Forças Armadas (FA) de outros países. As prioridades de investigação para o EP passam pelo estudo e implementação de comunicações óticas. Estas têm como vantagens: capacidade muito elevada nas ligações entre os satélites e as plataformas de receção no espaço; nas redes de aeronaves; no aumento do débito de dados entre as ligações ar-terra [5]. Outra prioridade de investigação passa pelo estudo de biossensores de forma a se ter uma monitorização de diversos parâmetros biológicos [6]. Assim é de extrema importância o seu estudo e aprofundamento, que é o que se propôs realizar neste trabalho.

Esta dissertação de mestrado, constitui tanto um desafio pessoal como profissional e será realizada no âmbito militar considerando que será certamente uma mais-valia para o EP. A possibilidade de poder integrar e promover algum tipo de avanço científico e tecnológico para o EP foi sem dúvida uma das minhas principais fontes de motivação. Apesar deste trabalho não constituir uma mudança e/ou aquisição imediata para o EP, sei que poderá ser utilizado como um precursor para trabalhos futuros que, em conjunto, se reflitam em alterações palpáveis e úteis para esta instituição que pertença. A inovação tecnológica no EP é necessária e inevitável e pode

ser realizada internamente, visto dispor dos meios e as pessoas qualificadas para que isto aconteça. É estimulante e satisfatório ter a oportunidade de desenvolver temas que podem contribuir para a melhoria do desempenho do EP, através do estudo e aplicação da nanotecnologia, seja na segurança, saúde, comunicações ou outra área de aplicação. O desafio a que me proponho transparece totalmente a forma de estar de um futuro oficial dos QP do EP, que é a procura constante pela inovação e pela melhoria da instituição.

O objetivo principal deste trabalho consiste num estudo comparativo de uma estrutura do tipo Bowtie para operar com um biossensor e compará-la com outras tipologias já estudadas através da simulação, projeto e modelação deste mesmo biossensor baseado na tipologia referida, verificação dos parâmetros da modelação, efeito da velocidade do sangue e temperatura no biossensor usando o software COMSOL Multiphysics®.

O presente capítulo serve para fazer uma descrição da organização da dissertação.

**Introdução.** Neste capítulo será abordado um enquadramento das nanotecnologias no contexto militar, assim como, as antenas óticas. Também serão abordados a motivação e objetivos do trabalho a realizar.

**Capítulo 1, Estado da Arte:** neste capítulo o objetivo é abordar todo o estado da arte relevante acerca de biossensores, antenas e mais especificamente nanoantenas. Também se introduz o conceito de transmissão ótica extraordinária (TOE).

**Capítulo 2, Interação da luz com os metais:** neste capítulo o objetivo é abordar toda a teoria acerca da interação da luz com os metais. Inicialmente irá abordar-se o Modelo de Drude-Lorentz, o modelo de Brendel-Bormann e modelo de Rakic. É usado o software MATLAB como auxiliar, de forma a produzir gráficos dos diferentes modelos em relação à evolução da permitividade elétrica e a influência das transições interbandas. Estes modelos são os usados para teorias onde é necessários comprimentos de onda menores que a abertura. De seguida será abordado todas as teorias da difração. Desde a teoria de Fraunhofer à teoria de Bouwkamp, passando pela teoria de Kirchhoff, Fresnel e pela teoria de Bethe.

**Capítulo 3, Avaliação dos parâmetros das estruturas com nanoantenas Bowtie:** neste capítulo será estudado a difração por estruturas compostas por Bowtie. Serão estabelecidas comparações entre os resultados teóricos e os resultados obtidos através de simulação. Será usado o software COMSOL Multiphysics®. Também se realizará a avaliação de parâmetros dos mesmos.

**Capítulo 4, Difração através de uma nanoantena de fendas:** neste capítulo será comparado os resultados obtidos na simulação do capítulo 4 com os dados já estudados de nanoantenas de fendas.

**Capítulo 5, Difração por uma nanoantena Bowtie com a camada da pele:** neste capítulo será estudado a difração por uma nanoantena Bowtie quando existe a definição de um substrato biológico. Será usado o software COMSOL Multiphysics®.

**Capítulo 6, Influência da temperatura e da velocidade do sangue na estrutura composta por nanoantenas de alumínio e envolvente de dióxido de silício:** neste capítulo será estudado a influência da temperatura e da velocidade do sangue por uma estrutura composta por dielétrico-nanoantena-estrato córneo. Será usado o software COMSOL Multiphysics®.

**Conclusões:** neste capítulo o objetivo é realizar as conclusões do trabalho realizado e propostas de trabalhos futuros.



# 1. Enquadramento do Tema no Estado da arte

## 1.1 Biossensores

Um biossensor tem como definição: dispositivo biológico que tem como objetivo produzir um sinal proporcional à concentração desse mesmo material. Este é composto por três componentes: o detetor que contém a camada sensível ao material biológico que se apresenta na amostra, um transdutor que irá detetar o sinal que é enviado pela reação da camada biológica em contacto com a amostra e o sistema de amplificação e tratamento de sinal (figura 2.1) [7], [8].

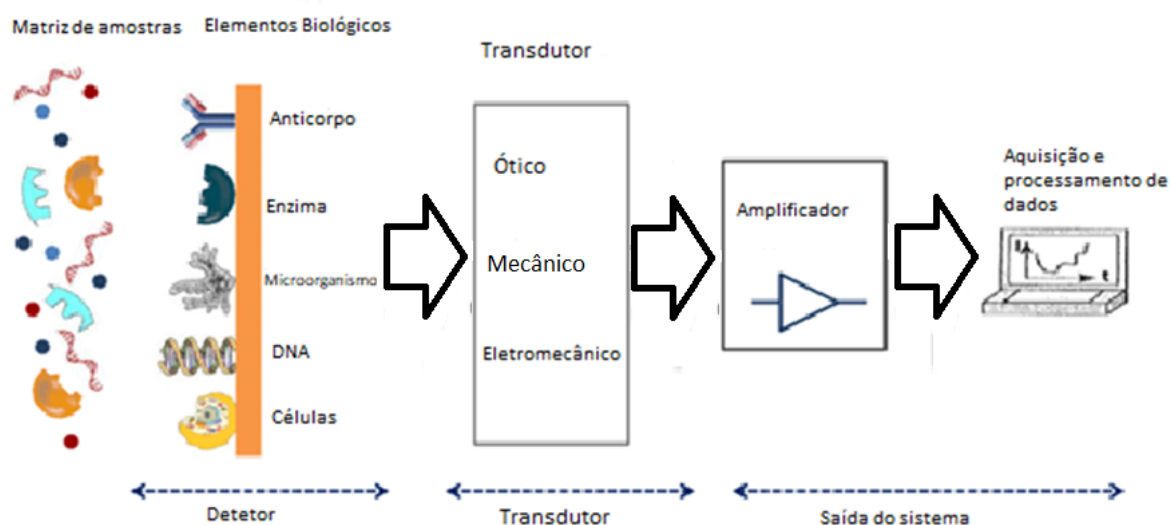


Figura 1.1 - Configuração de um biossensor [7].

Existem diferentes tipos de biossensores que podem ser aplicados em diversas situações. A classificação dos mesmos pode ser feita a partir da diferenciação do detetor ou do transdutor.

Nos últimos cinquenta anos os biossensores têm vindo a ser catalogados em três gerações. A primeira caracterizada pela deteção direta, onde apenas se aumenta o produto enzimático ou se diminui o substrato; a segunda caracterizada pela introdução de um mediador redox (tem como objetivo conseguir um balanceamento entre o metal e o substrato biológico); na última existe uma inclusão de uma abordagem diferente da arquitetura, sendo preponderante o redox na superfície do metal [7].

Os biossensores óticos baseados na ressonância de plasmões são a tecnologia que irá ser aplicada no trabalho. Estes destacam-se pela alta seletividade e pela facilidade que existe em conseguir detetar a amostra em pouco tempo. O aumento da sensibilidade do mesmo é um dos objetivos que é possível com o dimensionamento de uma estrutura que o possibilite [7].

Um biossensor de SPR usa um detetor ótico e componentes óticos de forma a conseguir a excitação do substrato biológico. O fenómeno de SPR é caracterizado pela incidência de um feixe luminoso no substrato ótico. O objetivo é que exista uma reflexão interna total (é possível se o ângulo  $\theta$  for maior que o ângulo crítico), algo que na prática não acontece devido à absorção de energia no dielétrico. Quando existe absorção da energia o

campo evanescente surge e interage com as ondas de superfície. Neste momento existe o fenômeno de ressonância que nos permite fazer a detecção da amostra biológica (figura 2.2) [8], [9].

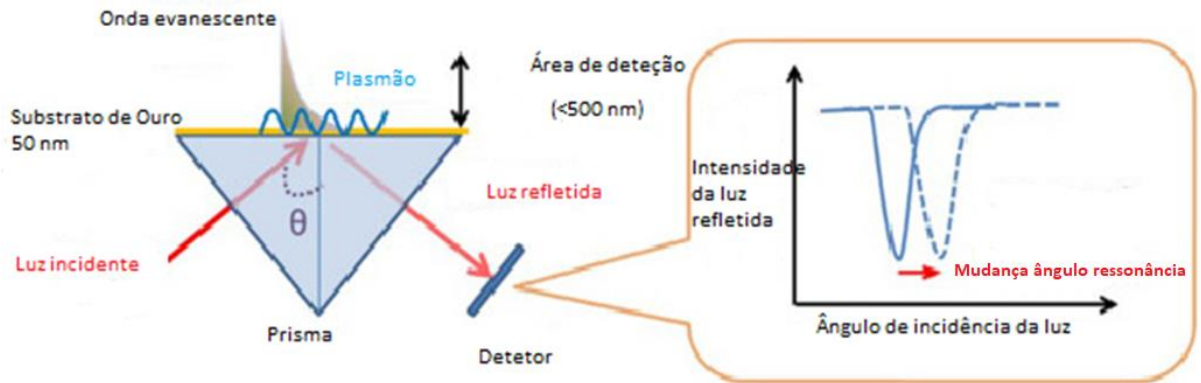


Figura 1.2- Biossensor através de SPR [8], [9].

## 1.2 Parâmetros vitais

A biometria tem como definição toda a metodologia ou tecnologia que permite identificar um humano a partir de suas características físicas. Ao conjunto das características físicas, dá-se o nome de parâmetros biométricos. Dentro dos parâmetros biométricos existem aqueles que são considerados vitais e são os utilizados para avaliar o estado físico de um indivíduo. Alguns destes parâmetros são: temperatura, ritmo cardíaco, velocidade respiratória, pressão arterial e saturação de oxigênio [10].

A localização do biossensor é preponderante para que se tenha uma melhor ou pior medição dos parâmetros. Como tal, é necessário fazer o estudo da possível melhor implementação do sensor[11]. Os biossensores são muito promissores devido à sua alta especificidade, velocidade, portabilidade, baixo custo e requisitos de baixa potência [12].

A medição pode ser feita em diversas localizações do corpo humano, tendo de ser estas acompanhadas de uma percepção profunda da composição biomecânica dos fluídos do corpo humano. Na figura 2.3, apresentam-se diversas localizações já estudadas e aplicadas com intuítos distintos na detecção de suor, glucose, lactato, frequência cardíaca, ácido úrico e bactérias [12].

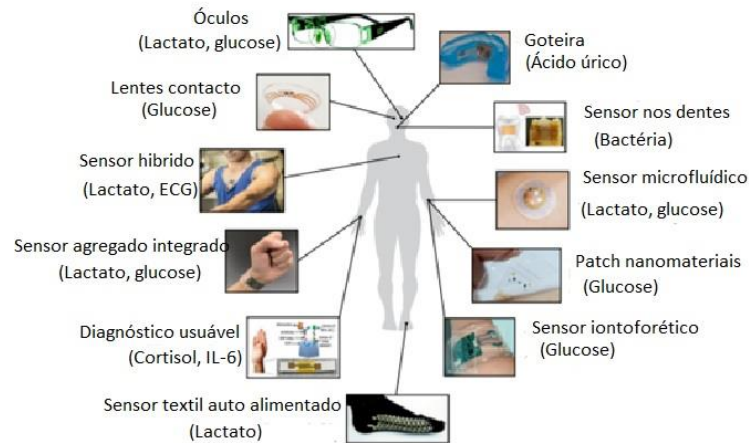


Figura 1.3 – Diversas disposições de biossensores no corpo humano [12].

### 1.3 Propriedades da pele

A caracterização da pele, das suas camadas e índices de refração equivalente, concentração de sangue em cada camada, reação das diferentes camadas da pele a diferentes estímulos baseados em exposições a frequências variadas dentro do espectro do infravermelho e variâncias em relação ao tipo de indivíduo são muito importantes, uma vez que, todos esses fatores influenciam de forma decisiva a definição do biossensor e funcionalidade no mesmo.

A definição do número de camadas de pele e vasos sanguíneos para modelar o sistema, é muito importante pois só assim podemos passar à fase de modelação e simulação. Assim iremos considerar três camadas na pele: epiderme, derme e hipoderme (substrato de lípidos na sua maioria) como se pode ver na figura 4.1 [65].

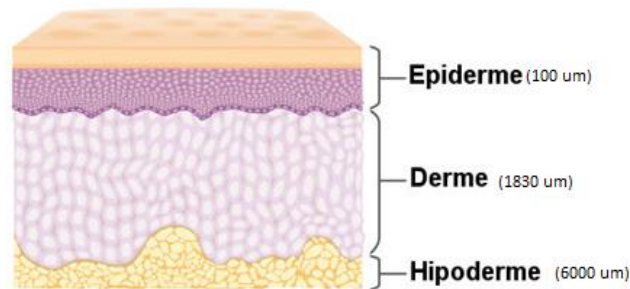


Figura 1.4 – representação esquemática das Camadas da pele [11].

A epiderme tem uma espessura de 100 µm, a derme com uma espessura de 1830 µm e a última camada cerca de 6000 µm [11].

Uma vez que existem diferenças significativas dentro das duas primeiras grandes camadas (epiderme e derme), e que, a concentração de vasos sanguíneos dentro das mesmas varia, a propagação da luz será diferente em cada uma delas. a [11].

As camadas da pele podem assim ser definidas consoante a concentração de vasos sanguíneos são caracterizadas por: estrato córneo (20 µm), epiderme viva (80 µm), derme papilar (150 µm), rede de vasos da derme superior (80 µm), derme reticular (1500 µm), rede de vasos da derme profunda (100 µm) e a camada de gordura

conhecida por hipoderme (6000  $\mu\text{m}$ ) [11]. Na figura 4.2 pode-se visualizar a divisão que será feita para a realização do estudo.

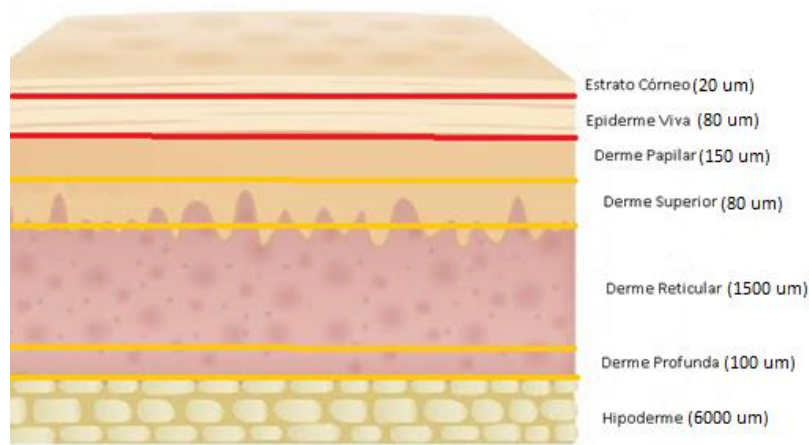


Figura 1.5 - Configuração das camadas da pele segundo a espessura das camadas e a quantidade de vasos sanguíneos nelas contidos [11].

A tabela 1 seguinte define o índice de refração, a espessura, a concentração de sangue e a função de fase de dispersão ( $g$ ) de cada camada.[11], [66].

Tabela 1- Definição de parâmetros referentes às diferentes camadas da pele

Camada da Pele	$n$	Largura	$g$	$C_{sangue}$
Estrato Córneo	1.5	20 $\mu\text{m}$	0.9	0
Epiderme viva	1.34	80 $\mu\text{m}$	0.85	0
Derme papilar	1.4	100 $\mu\text{m}$	0.8	0.04
Derme superficial	1.39	80 $\mu\text{m}$	0.9	0.3
Derme reticular	1.4	1500 $\mu\text{m}$	0.76	0.04
Derme profunda	1.39	200 $\mu\text{m}$	0.95	0.1
Hipoderme	1.44	5000 $\mu\text{m}$	0.8	0.05

As propriedades óticas dos substratos biológicos são: absorção, reflexão, transmissão e refração (figura 2.5). A maior parte da luz incidente penetra o tecido biológico e esta penetração depende de fatores como o índice de refração e a absorção do tecido. A forma de classificar a interação com o tecido é feita através do comprimento de onda. A região do espectro entre os 400-1100nm é considerada a zona ótica. Esta está dividida no infravermelho (1100-750nm), visível (750-500nm) e no ultravioleta (500-350nm) [67].

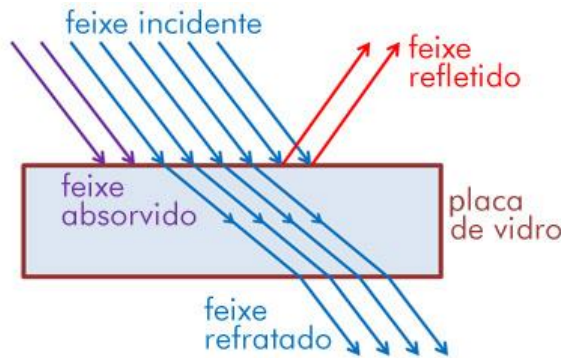


Figura 1.6 - Esquema dos quatro fenômenos que acontecem no tecido humano [67].

A probabilidade de não haver dispersão do fóton que se propaga segundo o eixo  $x$  é dada pela lei de Beer [67]:

$$T(x) = e^{-\sigma x} \quad (2.4)$$

Na maioria dos tecidos biológicos a luz segue o percurso direto da propagação ( $+x$ ). A função de fase de dispersão pode ser dependente de  $\theta$ , sendo o tecido considerado anisotrópico, ou a função ser uma constante, sendo o tecido considerado isotrópico. Esta função varia entre -1 e 1 e a maioria dos tecidos biológicos têm um  $g > 0,7$ , uma vez que  $g=1$  significa que existe uma dispersão direta dos fótons. [67]

Em relação à absorção ( $\alpha$ ) esta pode ser definida pela probabilidade média de o fóton ser absorvido por unidade de distância. A absorção no tecido biológico é realizada pela água, hemoglobina e melanina. A expressão que define o coeficiente de absorção é:

$$\alpha = \frac{2,303 \cdot e \cdot x}{64500} \quad (2.5)$$

sendo  $e$  e  $x$  o valor do coeficiente de extinção molar ( $cm^{-1}/M$ ) e o número de gramas por litro respectivamente. O valor de  $x$  para o sangue é normalmente  $x=150 \text{ g Hb}/dm^{-3}$ . O valor 64500 vem em  $g \text{ Hb}/mol$  e é o número de gramas por mol de hemoglobina [67].

O pico de absorção nas proteínas e nos ácidos nucléicos está na região UV entre 260 e 280 nm. Assim, na região UV, a luz é fortemente absorvida pela água e pelas proteínas no tecido, resultando numa fraca penetração da luz no tecido. O sangue absorve a luz numa ampla região de comprimento de onda até ao vermelho (630 nm), e acima de 600 nm, a absorção de sangue é fraca. A melanina absorve a luz numa região de UV até IV. Entre 600 nm e 1,3  $\mu m$ , o coeficiente de absorção das moléculas do tecido é baixo, sendo propício à penetração da luz laser no tecido. Quando o tecido é irradiado pela luz, a maioria da energia da luz é absorvida pelos tecidos, e estes são excitados. As moléculas podem voltar ao estado anterior à excitação, emitindo fluorescência, dependendo da vida útil do eletrão excitado. O tempo de vida de fluorescência está na ordem dos nanossegundos, mas a vida útil da fosforescência é mais longa ( $ms$  ou mais longo) [67].

Na zona do infravermelho é possível detetar proteínas (pico de absorção a 6.1, 6.45 e 8.3  $\mu\text{m}$ ), água (pico de absorção a 0.96, 1.44, 1.95, 2.94 e 6.1  $\mu\text{m}$ ) e hemoglobina na zona do infravermelho próxima [68].

O espectro de absorção de um tecido típico é dominado pela absorção de ADN, proteínas e outras pequenas moléculas no ultravioleta (comprimentos de onda curtos), e pela absorção de água no infravermelho (longos comprimentos de onda). Existe uma "Janela de Diagnóstico e Terapêutica" nos comprimentos de onda 600-1300 nm gama onde a absorção é baixa e os fótons podem sobreviver o tempo suficiente para alcançar profundamente em tecido. Nesta janela, dois absorvedores naturais são dominantes: (1) hemoglobina em sangue, e (2) melanina, e água ainda tem um efeito. Uma distinção chave deve ser feita entre a absorção local de estruturas como um glóbulo vermelho (gb), um vaso sanguíneo ou um melanócito e a absorção média de um tecido contendo estas estruturas. A absorção local especifica a deposição de energia no glóbulo vermelho ou melanócito, e é frequentemente muito elevado. A absorção média determina a propagação da luz através de um tecido, uma vez que os fótons podem mover-se em torno dos glóbulos vermelhos, vasos e melanócitos, e é normalmente bastante baixo. A melanina encontra-se na camada mais superficial da pele protegendo o ser das radiações mais perigosas, por esta razão a melanina tem uma absorção significativa para comprimentos de onda na zona do UV. A absorção por parte da hemoglobina varia consoante a oxigenação do sangue. A figura 6.4 mostra o coeficiente de extinção molar para o sangue oxigenado e desoxigenado e a figura 6.5 mostra a variação do coeficiente de absorção em ordem ao comprimento de onda incidente [11], [69].

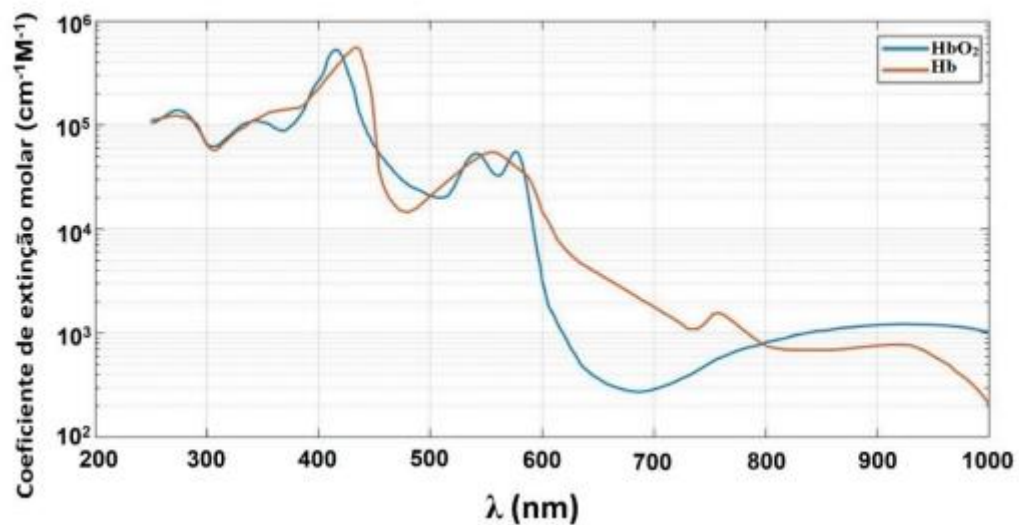


Figura 1.7 – Variação do coeficiente de extinção molar para a hemoglobina oxigenada ( $\text{HbO}_2$ ) e desoxigenada ( $\text{Hb}$ ) [11], [69].

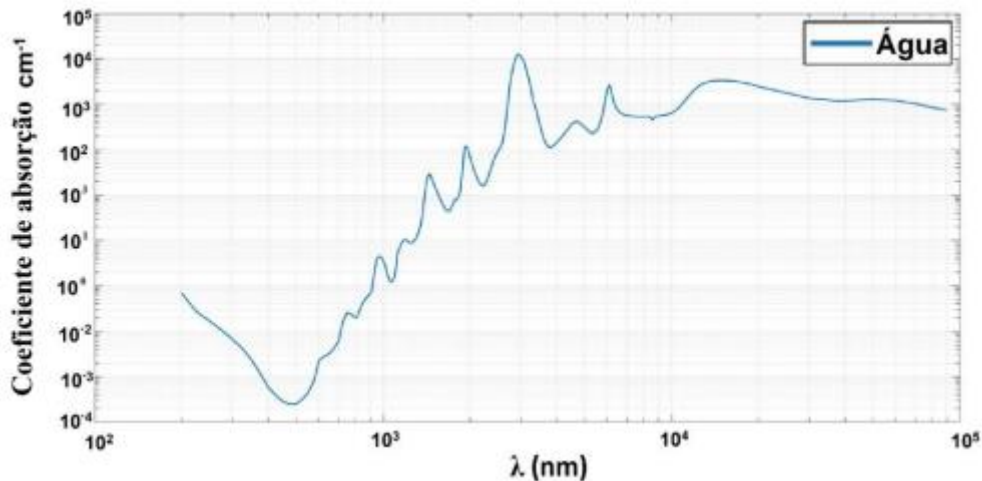


Figura 1.8 – Coeficiente de absorção da água [11], [69].

## 1.4 Nanoantenas e aplicações

Em 1928 Einstein propôs um método de imagem no qual era usada uma pequena partícula de ouro como fonte de radiação. Passado 54 anos, foi possível fazer a verificação experimental daquilo que Einstein tinha proposto. Foi realizado na IBM e conseguiu-se obter a primeira resolução abaixo do limite de difração [13].

Uma onda eletromagnética pode ser amplificada através da Transmissão Ótica Extraordinária (TOE). Em aplicações de imagiologia médica, raios X ou ressonância magnética, a TOE e as nanoantenas podem ser utilizadas para diminuir a potência necessária por varrimento, mas também para focar a radiação, de tal forma que, a intensidade máxima do campo poderá ser concentrada na área afetada, levando a uma exposição menos intensa à radiação das áreas saudáveis [14].

As técnicas mais comuns para produzir nanoantenas são os métodos *top-down*, tais como a litografia por feixe de elétrons, e os esquemas de automontagem *bottom-up* como a construção de monocamadas. As nanoestruturas feitas de metal, são quimicamente estáveis, duram muito tempo, mesmo expostas a radiação ultravioleta e a uma gama de temperaturas elevada. [15]–[18].

A maioria dos sensores de nanoantenas baseia-se no deslocamento do pico de ressonância no comprimento de onda. A posição do mesmo pode variar e a sua intensidade altera-se com as diferentes condições dos sensores. Dependendo das condições monitorizadas, a posição de pico de ressonância mudará e, consequentemente o valor de intensidade também. No entanto, o valor de pico de intensidade deve ser detetável a fim de determinar a sua posição [19], [20].

Nanoantenas óticas permitem manipular a radiação numa escala muito mais pequena do que o comprimento de onda da radiação usada. Estas antenas usam a interação entre os campos eletromagnéticos e as frequências de oscilação e ressonância dos elétrons na superfície metálica [21].

O aumento do campo eletromagnético por meio de uma nanoantena ótica é realizado, através da interação de várias nanopartículas que causam uma acumulação de cargas nos espaçamentos nanométricos [22]. Quanto

maior o espaçamento menor será a intensidade do campo criado. Isto porque haverá uma menor acumulação de cargas de nanopartículas nos mesmos [1], [2].

Os metais são em toda a banda de RF bons condutores e usados como bons refletores. Alguns exemplos de metais que são usados regularmente na fabricação de Nanoantenas óticas são o ouro, a prata e o alumínio. O ouro é usado devido às suas propriedades não oxidantes perante a exposição ao ar e à sua ductilidade. Uma limitação é o facto de apenas poder usar a região do vermelho no espectro do visível [23].

A prata também apresenta boas propriedades metálicas e uma boa absorção [24], mas oxida com mais facilidade.

As nanoantenas têm diversas aplicações uma vez que apresentam diversidade variada de campos. Estas podem ser aplicadas em nanocircuitos óticos como forma a estabelecer ligações de rede sem fios eficientes [25], aplicação em DNA de forma a aumentar e intensificar sinais espetroscópios [26].

Em relação a aplicações do âmbito militar podemos associar as nanoantenas a estruturas de UAV, uma vez que estas são usadas na vigilância e exploração em operações militares, de forma a aumentar o campo eletromagnético envolvente. Isto só é possível com a utilização de agregados de nanoantenas que permitem o aumento da sua diretividade. Os seus objetivos são terem uma maior capacidade de envio de dados, tornarem o sistema mais seguro, porque reduzem a capacidade de interceção pelo inimigo e aumentarem a fiabilidade do sistema de comunicações incorporado no UAV [27]. Outra possível aplicação é a implementação de nanoantenas na pessoa, isto é, no fardamento ou no corpo humano. Alguns dos desafios são a otimização das características do sistema, o facto de ter um tamanho reduzido e a dificuldade de obter uma boa propagação no corpo humano. Estas duas abordagens irão ter desafios diferentes [4].

As nanoantenas têm uma aplicação muito grande na biologia uma vez que é possível interagir com as células e controlar os marcadores das mesmas através de limitações de frequências de ressonância. A interação da luz com as células é um avanço enorme pois pode ajudar no combate ao cancro e a outras patologias [24].

Uma forma de criar um biossensor baseado em TOE está representado na figura 2.4, onde cada lado da nanoantena está em contacto com um material diferente. Tem de existir um material sólido (substrato com função dielétrica  $\epsilon_3$ ), uma nanoantena (colocada no topo de  $\epsilon_1$  tendo estas função dielétrica  $\epsilon_2$ ). O espectro de transmissão pode ter dois ressonâncias, correspondentes a diferentes modos de plasmões de superfície, porque cada lado da superfície metálica tem uma constante dielétrica diferente, o substrato sólido e a amostra [28].

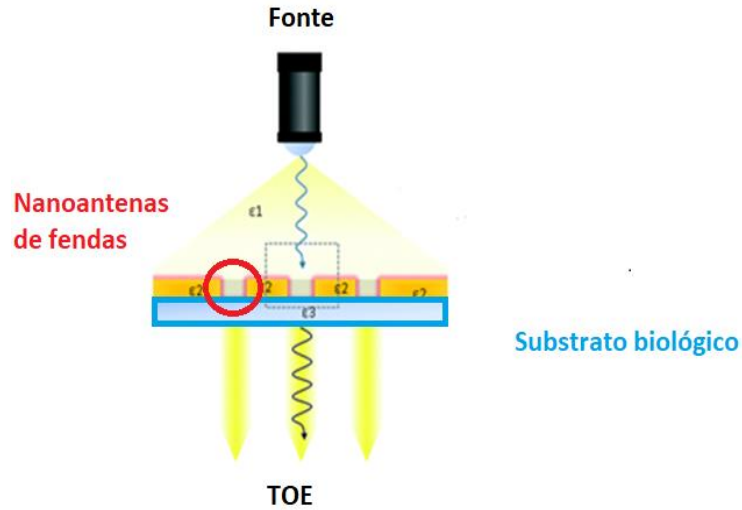


Figura 1.9- Tipologia de TOE num sensor [23].

Existe uma dependência entre a escolha do emissor e a banda de comprimento de onda. O emissor deve ter uma lente objetiva, a fim de ajustar o feixe incidente e concentrar a luz na área ativa do sensor e um polarizador, a fim de garantir que o campo elétrico incidente é paralelo ao sensor [28].

O sangue e as diferentes camadas da pele são exemplos de diferentes características, as quais vão apresentar diferentes permitividades elétricas e índices de refração [27]-[29].

Considerando uma absorção efetiva por parte da pele e dos vasos sanguíneos, a integral que define a permitividade elétrica está limitada à espessura da camada. A expressão da permitividade dielétrica é definida por [29], [30]:

$$\bar{\epsilon}_1 = \frac{2}{z} \int_0^{\infty} \bar{\epsilon}(z) e^{-\frac{2z}{z}} dz \quad (2.1)$$

onde  $z$  é a extensão da camada e  $\bar{\epsilon}(z)$  é o valor médio da permitividade elétrica.

Depois de definida a expressão podemos fazer a aproximação para calcular o índice de refração complexo que será usado para definir os modelos que se irão produzir. A variação do índice de refração complexo pode ser definida pela expressão 2.2 [30], [31]:

$$\bar{\epsilon} = \bar{n}^2 = (n + ik)^2 \quad (2.2)$$

onde  $k$  é o coeficiente de extinção que dá a relação entre a luz absorvida e luz incidente. As relações numéricas deste parâmetro definem três posições diferentes que podem ser usadas no estudo [30]–[32]:

- $k < 0$ , existe a possibilidade de amplificar o campo;
- $k > 0$ , a luz é absorvida e existem perdas;
- $k = 0$ , não há perdas.

A expressão 2.3 define a relação entre a variação do índice de refração e o comprimento de onda máximo [31]:

$$\Delta\lambda_{max} = s_n \Delta n [1 - e^{-\frac{2z}{z}}] \quad (2.3)$$

onde  $s_n$  é a sensibilidade do comprimento de onda à variação do índice de refração.

## 1.5 Tipologia de duas antenas

### 1.5.1 Campo próximo e campo distante

O campo distante e o campo próximo são consequências da emissão de radiação eletromagnética através de antenas e caracterizados pela interação com a matéria. Estes estão localizados nas fontes primárias (zonas de radiação ótica) ou nas fontes secundárias (superfícies de matérias que interagem com a radiação) [33].

Em 1968, Andreas Otto e Ervin Kretschmann e Heinz R ather demonstraram que as oscilações do plasma em pequenas camadas de um metal podem excitadas através de uma reflexão interna [33].

A região próxima ou de Fresnel e a região afastada ou de Fraunhofer definem assim dois tipos de interação diferentes com os campos eletromagnéticos. A diferença entre a distância à fenda (ponto de observação) e a zona onde se tem uma maior intensidade de campo eletromagnético é que define qual a região a considerar (figura 2.6).

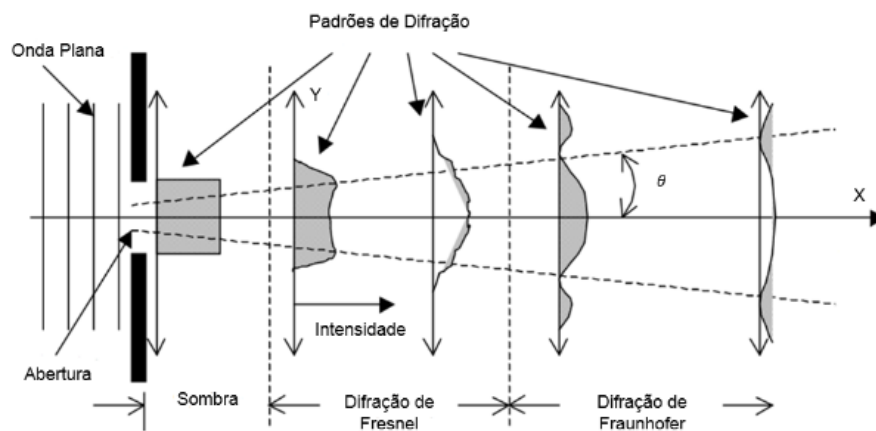


Figura 1.10 - Diferentes difrações a variar com a proximidade à fenda [34].

A difração de Fresnel é definida por o por o ponto de observação estar longe e as franjas serem bem definidas. Por outro lado, se aumentarmos a distância ainda mais do ponto de observação iremos verificar variações de forma contínua nas franjas e a mesma cobre uma distância muito maior (figura 2.5) [34], [35].

### 1.5.2 Antena Bowtie

Uma antena ótica é um dispositivo feito de forma eficiente para converter radiação ótica em energia localizada e vice-versa. O conceito de antena ótica também tem fortes paralelos com o desenvolvimento dos díodos. Uma antena ligada a um ponto de contato de metal foi usada em 1968 por Ali Javan e colegas de trabalho como detetor de radiação IV [36].

A antena Bowtie apresenta várias estruturas que tem como objetivo aumentar a performance da mesma. Entre estas estruturas podemos apresentar as seguintes segundo Kaur Baljinder e Lakhvinder Singh Solanki em [37]:

### 1) Triangular

Este tipo foi introduzido por Olivier Logde em 1898. Nesta tipologia o ângulo da antena não influencia as perdas, mas o facto de esta ser mais elevada torna a mesma mais direcional (figura 2.7).

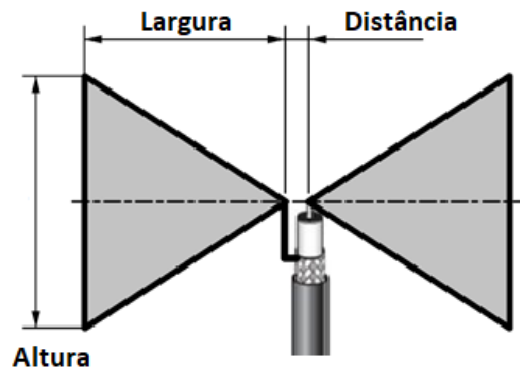


Figura 1.11 - Geometria de uma antena Bowtie triangular [66].

### 2) Bordas arredondadas

Qu e Ruan em [37] introduziram uma estrutura quadrada com os cantos arredondados. A eficiência das antenas bowtie com cantos arredondados não diminui. Compararam os resultados das três antenas para diferentes valores de raio (R) de cantos arredondados, e observaram que o aumento de R para além de determinado valor não tem mais efeito positivo no desempenho e perda de retorno [37].

Os cantos arredondados proporcionam melhor perda de retorno, impedância de entrada mais plana, e padrões de radiação mais estáveis. Também diminuem a área da antena [37].

### 3) Abertura

A abertura nesta tipologia de antena foi proposta uma vez que diminui as perdas, a dispersão e tem uma mais fácil integração.

Para terem maior largura de banda e configuração de antena planar simples, as antenas de encaixe bowtie são bons candidatos [37].

Em [38], [39] estudou-se o efeito do campo próximo na excitação de uma antena de tipologia Bowtie através de meios computacionais. O padrão de emissão não depende do formato da antena. Este está apenas localizado de forma que dependa do estado de polarização da luz.

Este tipo de antena teve diversas evoluções quando começaram a aparecer antenas com aberturas pois é uma variante de uma antena dipolo, mas com este tipo de estrutura conseguimos ter um aumento dos campos eletromagnéticos.

### 1.5.3 Antena de Fendas

O primeiro estudo acerca de nanoantenas de fendas de forma a aumentar o campo eletromagnético data do ano de 1986. Este estudo começou por tratar substratos de prata e ouro de forma a detetar moléculas únicas através da fluorescência e do aumento da mesma. O aumento do interesse da deteção de moléculas através da fluorescência e ao fenómeno de TOE levou a diversos estudos na área com diversas tipologias de antenas, aberturas, metais e camadas de adesão às moléculas que se pretendiam detetar (figura 2.9) [40].

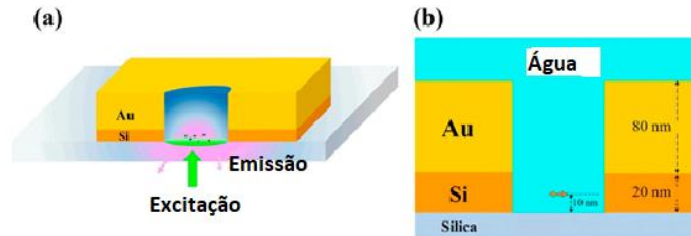


Figura 1.12- Excitação de um substrato composto por Sílica e Ouro com uma fenda a) excitação e respetiva emissão de fluorescência b) dimensões de cada substrato [41].

A influência da camada de metal e o diâmetro da abertura são os focos do estudo. Através da comparação de simulações numéricas revela que o aumento da fluorescência máxima se dá quando o diâmetro da abertura corresponde ao mínimo da velocidade de grupo dentro do buraco. Com esta informação podemos ter a noção de qual o diâmetro da abertura se deve usar de forma a se conseguir os melhores resultados no aumento da fluorescência [40].

A velocidade de grupo pode ser descrita pela expressão [42]:

$$v_{grupo} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_0}{Re(n) + \omega \frac{dRe(n)}{d\omega}} = \frac{1}{\frac{dk}{d\omega}} \quad (2.6)$$

onde  $n$  é o índice de refração,  $c_0$  a velocidade da luz no vazio,  $\omega$  a frequência angular.

Existem antenas com uma fenda, com uma fenda rodeada de corrugações e um agregado de fendas. O facto de usar corrugações (figura 2.10) leva-nos a aumentar a área efetiva da fenda sem esta aumentar fisicamente. Isto permite-nos apresentar melhores valores de diretividade e intensidade de campo. As superfícies corrugadas proporcionam um aumento da intensidade local e da diretividade. Para que exista este efeito, o espaçamento da corrugação tem de ser menor que o comprimento de onda [34].

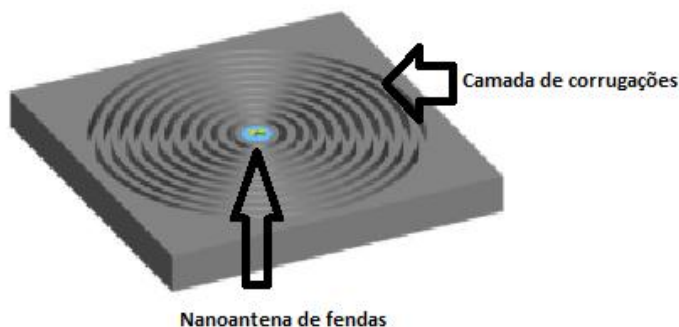


Figura 1.13 – Nanoantena de fendas com camada de corrugação [41].

Os agregados de antenas óticas de fendas (figura 2.11) são constituídos por um conjunto de fendas espaçadas periodicamente. Esta estrutura permite acoplar a radiação da zona distante a ondas eletromagnéticas superficiais. Estas capacidades têm estimulado o estudo da TOE neste tipo de antenas [34].

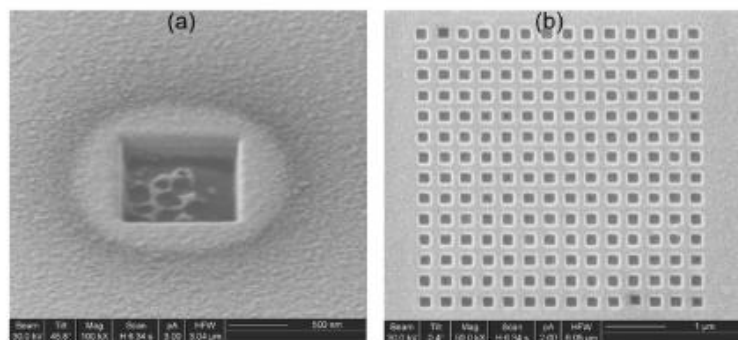


Figura 1.14 – Agregado de nanoantenas óticas de fendas [43].

## 1.6 Transmissão Ótica Extraordinária

Toda a tecnologia descrita na secção anterior, está baseada num fenómeno denominado Transmissão Ótica Extraordinária (TOE) e este tem sido observado em todo o espectro de frequências, desde a gama de áudio até à gama de raios X. Na zona do infravermelho, visível e ultravioleta do espectro eletromagnético, a designada zona ótica, as antenas utilizadas para tirar partido da TOE têm dimensões de comprimento de onda mais baixas, na ordem dos nanómetros [14], [18].

O termo TOE refere-se à existência de ressonâncias eletromagnéticas através de aberturas de comprimento de onda menores que a fenda usando camadas planas ou de metal corrugado. Com este processo conseguimos o aumento da diretividade e da intensidade de campo [44].

Este processo tem diversas aplicações onde a que mais se destaca e irá ser usada no estudo em questão, a aplicação em sensores de cariz biológico. Este fenómeno pode aumentar a resposta ótica e denunciar a presença de uma certa substância. Para isto usamos o aumento de fluorescência (emissão de luz aquando está em contacto com radiação) de uma única molécula usando a TOE [44].

Em termos de sensores, podemos fazer a divisão em duas aplicações de estudo: Ressonância de Superfícies Plasmónicas e o Aumento da Fluorescência de moléculas. No primeiro, a TOE pode ser aplicada através do uso de fendas que provocam a modificação da intensidade do campo que envolve a fenda fazendo com que a deteção

de uma TOE seja mais fácil. No segundo exemplo, a fenda pode ser usada de fora a aumentar a fluorescência por molécula [44].

## 2. Interação da luz com os metais

Os metais exibem comportamentos diferentes consoante as frequências a que estão sujeitos. Os metais têm propriedades estáveis em toda a banda de rádio frequência (RF) assim, não se pode reger o comportamento dos mesmos em frequências óticas com as teorias aplicadas à exposição em RF. Novos modelos têm de ser definidos de forma a conseguir explicar o seu comportamento. Estes modelos são: o Modelo de Drude-Lorentz e Modelo de Brendel-Bormann [41],[42]. O modelo de Brendel-Bormann tem uma absorção muito menos intensa e muito mais curta, devido à função de erro usado para caraterizar o modelo [46]. Os valores dos dois modelos podem ser aplicados no modelo de Rakic sendo este o que retrata uma adequada caraterização de propriedades óticas nos metais, permitindo a verificação da TOE.

### 2.1 Modelo de Drude-Lorentz

O modelo de Drude foi proposto em 1900 na tentativa de explicar as propriedades de transporte de eletrões em metais e em semicondutores. A equação que permite caraterizar o movimento dos eletrões livres é a seguinte [28], [34], [47]:

$$m_e \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + m_e \gamma \frac{\partial r}{\partial t} = e \overline{E_0} \quad (3.1)$$

tendo em conta que o coeficiente de amortecimento  $\gamma = \frac{v_f}{\zeta}$ , onde  $v_f$  é a velocidade de Fermi e  $\zeta$  o percurso médio livre do eletrão entre duas colisões consecutivas.

A função que define a permitividade elétrica de um metal é dada por [47]:

$$\overline{\epsilon}_r(Drude)(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\gamma \omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} \quad (2.8)$$

onde  $\epsilon_\infty$  é o valor de permitividade nas frequências elevadas,  $\gamma$  o termo de amortecimento e  $\omega_p$  a frequência angular do plasma dada pela expressão [47]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}} \quad (2.9)$$

onde  $m^*$  é a massa efetiva de um eletrão,  $e$  a carga do eletrão e  $n$  a densidade volúmica de eletrões.

Por sua vez o modelo de Lorentz consegue descrever a resposta em frequência de muitos materiais e demonstra uma dispersão em volta das frequências de ressonância. A expressão que define este modelo é [47]:

$$\bar{\epsilon}_r(Lorentz)(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\omega_0 \omega_p^2}{(-\omega^2 + i\gamma\omega + \omega_0)} \quad (2.10)$$

O modelo apresenta falhas perto da frequência de ressonância logo não o podemos usar para descrever os metais e os semicondutores. O Modelo Drude-Sommerfeld tenta colmatar as limitações em cima referidas. Este passa a ser definido pela equação onde se tem de adicionar o movimento dos eletrões ligados para além dos movimentos dos eletrões livres [19], [27]:

$$m_e \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + m_e \gamma \frac{\partial r}{\partial t} + \alpha r = e \bar{E}_0 \quad (2.11)$$

Assim podemos definir a equação da permitividade elétrica desta vez com contribuição dos eletrões ligados [19], [27], [36] :

$$\bar{\epsilon}_r(Drude-Sommerfeld)(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} + \frac{\nabla_\epsilon \omega_p^2}{(-\omega^2 + i\gamma\omega + \omega_0)} \quad (2.12)$$

Se separarmos em parte real e imaginária obtem-se a seguinte expressão [27], [41]:

$$\bar{\epsilon}_r(Drude-Sommerfeld)(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} + i \frac{\omega_p^2 \gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \quad (2.13)$$

Finalmente chegamos à definição do Modelo de Drude-Lorentz. Este é o modelo que mais se aproxima das condições reais e tem em conta o movimento dos eletrões livres, a interação dos eletrões ligados e a permitividade elétrica dos metais e semicondutores. A expressão que define as condições é [27], [41]:

$$\bar{\epsilon}_r(Drude-Lorentz)(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2 f_0}{(\omega_0^2 - \omega^2) + i\omega\gamma} + \sum_n \frac{\omega_p^2 f_n}{(\omega^2 - \omega_n^2) + i\omega\gamma_n} \quad (2.14)$$

sendo  $f_n$  a frequência de oscilação,  $\gamma_n$  o coeficiente de amortecimento e  $n$  o número de osciladores com frequência  $\omega_n$  [27], [41].

No modelo de Drude (correspondente à primeira componente do modelo de Drude-Lorentz) avalia-se a evolução da permitividade elétrica apenas tendo em conta os efeitos intrabanda [47]. Os gráficos da figura 3.1 e

3.2 foram obtidos através do uso da ferramenta MATLAB usando as equações (2.8) e (2.14) e os valores utilizados para a definição do ouro e o níquel, sendo estes obtidos de [47]:

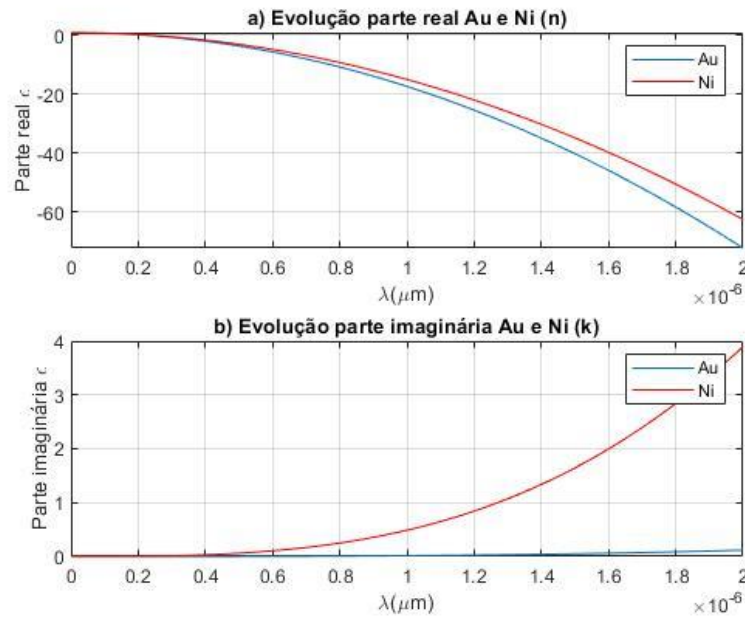


Figura 2.1 - Evolução da permissividade elétrica do ouro e do níquel com o modelo de Drude. a) Evolução da componente real ( $n$ ). b) evolução da componente imaginária ( $k$ ) [48].

Quando adicionamos as interações dos elétrons ligados e as transições eletrônicas interbanda passamos a ter um modelo que caracteriza melhor a variação da permissividade elétrica com a variação do comprimento de onda. Esta componente é caracterizada pelo oscilador de Lorentz [47] (figura 3.2).

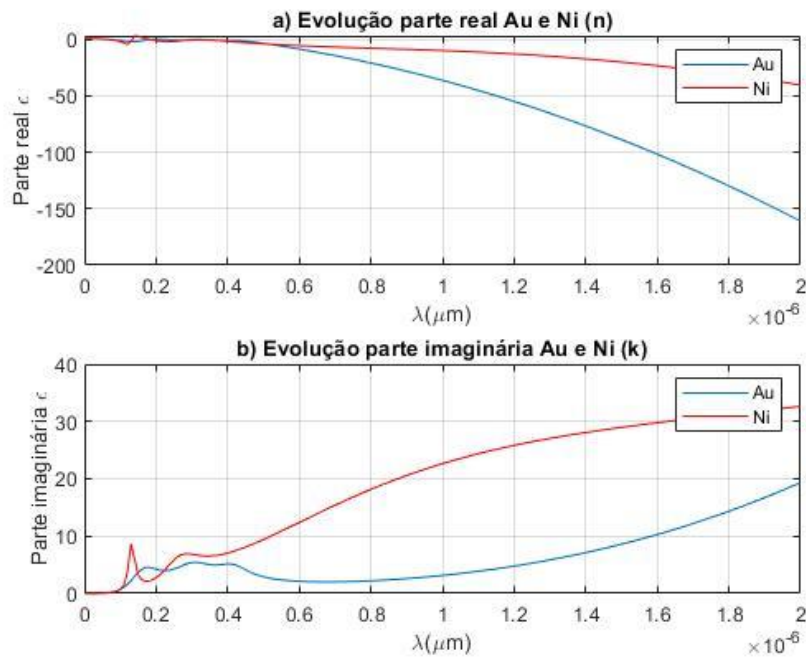


Figura 2.2 - Evolução da permissividade elétrica do ouro e do níquel com o modelo de Drude-Lorentz. a) Evolução da componente real ( $n$ ). b) evolução da componente imaginária ( $k$ ) [48].

A componente real é maioritariamente negativa devido à interação dos eletrões livres. Existe uma ressonância entre os 50 nm e os 200 nm. Na figura 3.3 pode-se observar com mais pormenor as frequências de ressonância e a diferença entre os materiais.

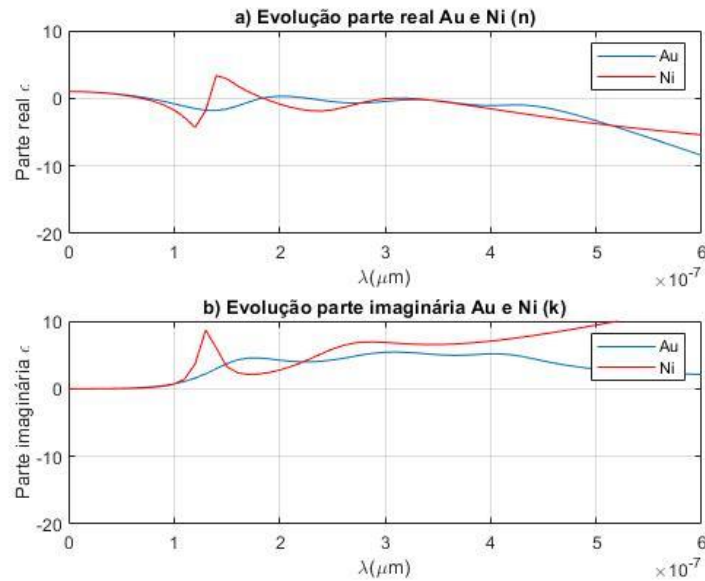


Figura 2.3 - Evolução da permitividade elétrica do ouro e do níquel com o modelo de Drude-Lorentz. a) Evolução da componente real (n). b) evolução da componente imaginária (k) [48].

O modelo de Drude-Lorentz usa normalmente um oscilador nos pontos mais críticos, isto é, nos pontos onde existe mais concentração de estados [46].

## 2.2 Modelo de Brendel-Bormann

O modelo de Brendel-Bormann é usado para permitividades dielétricas em metais e é calculado através da função complexa do erro gaussiano. Comparando a função laurentziana e a Gaussiana, pode provar-se que a Gaussiana, para as mesmas condições, uma absorção muito menos intensa e muito mais curta [46]. Pode-se usar este modelo de forma a obter uma melhor descrição dos efeitos da absorção nas zonas interbanda. Neste modelo substitui-se o termo do modelo de Drude-Lorentz pelo polinómio de Brendel-Bormann,  $X_j$ . O parâmetro n representa o número de osciladores usados para interpretar a interbanda no espetro [41],[42]:

$$\bar{\epsilon}_r^{(Brendel-Bormann)}(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2 f_0}{\omega(\omega - i\omega\gamma)} + \sum_n X_j(\omega) \quad (2.17)$$

O polinómio que define a função de erro complexo é dado por [46]:

$$X_j(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\sigma_j)^2}{2\sigma_j^2}} \frac{f_j \omega_p^2}{(x^2 - \omega^2) + \omega\gamma_j} dx \quad (2.18)$$

Aplicando agora as expressões 2.17 e 2.18 e os valores em [46], pode-se retirar graficamente (figura 3.4) a evolução numa base logarítmica, da permitividade dielétrica no modelo de Brendel-Bormann.

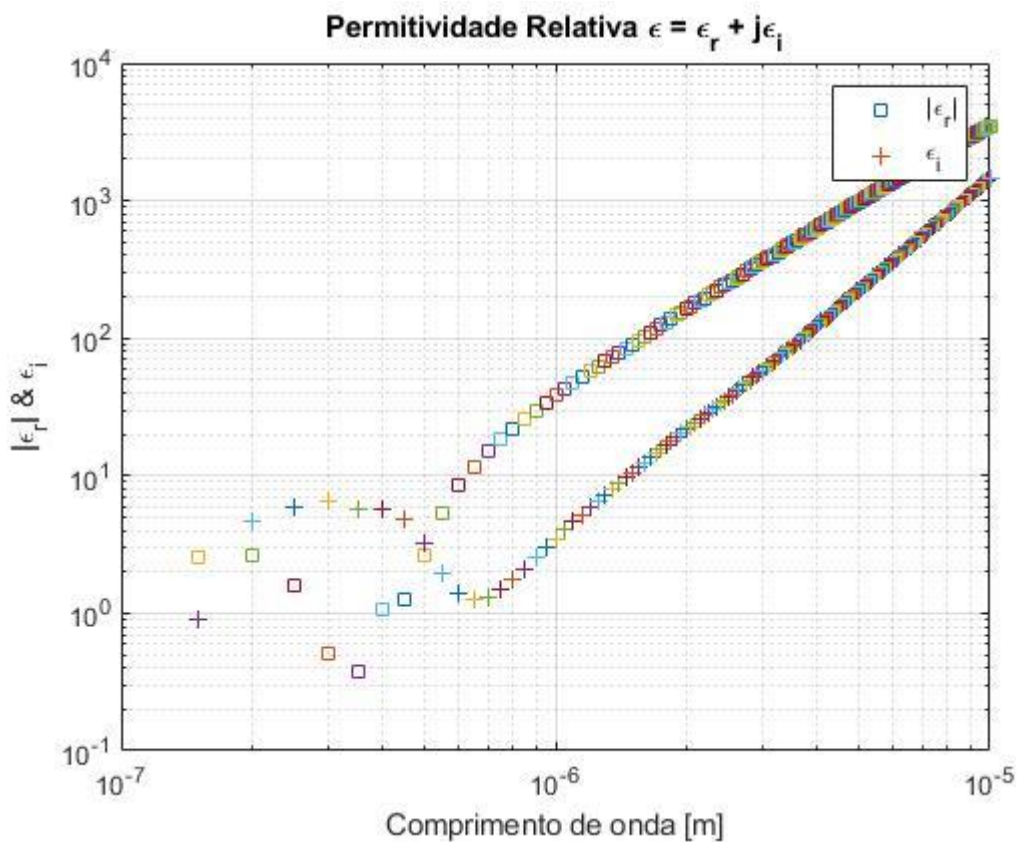


Figura 2.4 - Evolução da permissividade elétrica do ouro com o modelo de Brendel-Bormann. [49].

### 2.3 Modelo de Rakic

O modelo de Rakic para os metais tenta caracterizar as propriedades óticas usando a definição de permissividade elétrica ou o índice de refração. Este utiliza valores dos Modelos de Drude-Lorentz e Brendel-Bormann de forma a caracterizar os metais [46].

É possível definir o índice de refração ( $\eta$ ) e o coeficiente de extinção ( $\kappa$ ) através dos modelos anteriores. Sabendo que o índice de refração complexo é dado da forma  $N = n - jk = \sqrt{\epsilon}$ , pode-se calcular os componentes da seguinte forma [46], [50]:

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2)} + \epsilon_r} \quad (2.15)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(\epsilon_r^2 + \epsilon_i^2)} - \epsilon_r} \quad (2.16)$$

onde  $n$  representa a componente real do índice de refração e  $k$  a componente imaginária da mesma [46].

O modelo de Rakic é um estudo realizado de forma a simplificar a caracterização dos modelos já existentes. Muitas vezes modelos que estão intimamente relacionados com a estrutura da banda eletrónica provam ser extremamente complicados para uso prático ou estão restringidos a um determinado material. Um exemplo, são os modelos de Ashcroft e Sturm que têm como finalidade a caracterização da função dielétrica do alumínio. Modelos mais simplistas como o de Drude-Lorentz, baseado no oscilador harmónico amortecido, pode ser utilizado para descrever as propriedades óticas de um metal. Embora existam várias compilações das propriedades óticas dos metais, até então não existia uma parametrização sistemática, a não ser estudos no qual foi utilizado o modelo Drude, o que não é adequado na zona do IR próximo e na zona do visível. Por conseguinte, existiu necessidade de um estudo que forneça uma descrição das funções dos metais em termos de um modelo simples e que abranja todos os metais utilizados para aplicações optoelectrónicas [46].

Assim o modelo de Rakic trata uma adequada caracterização de propriedades óticas nos metais, permitindo a verificação da TOE.

## 2.4 Plasmões Polaritões Superficiais

As PPS são ondas eletromagnéticas que viajam ao longo de uma interface metal-dielétrica, praticamente no infravermelho ou na frequência visível. O termo polaritão de plasmões de superfície envolve tanto o movimento de carga no metal como ondas eletromagnéticas no ar ou dielétricos. As PPSs são mais curtas em comprimento de onda do que a luz incidente (fotões) tendo um confinamento espacial mais apertado e uma maior intensidade do campo local. Uma PPS propagar-se-á ao longo da interface até a sua energia se perder, quer por absorção no metal, quer por dispersão noutras direções (tais como no espaço livre) (figura 3.5) [27]-[29].

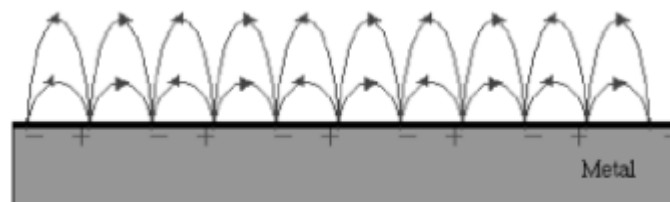


Figura 2.5 - Representação da propagação do campo eletromagnético ao longo de uma superfície plasmónica polarizada [54].

O acoplamento é um comportamento ressonante capaz de amplificar e de concentrar a luz perto da superfície, devido à geração de polaritão. Este comportamento ressonante é a consequência da transferência de energia entre a luz incidente, os plasmões de superfície e a propagação do polaritão (figura 3.6) [28].

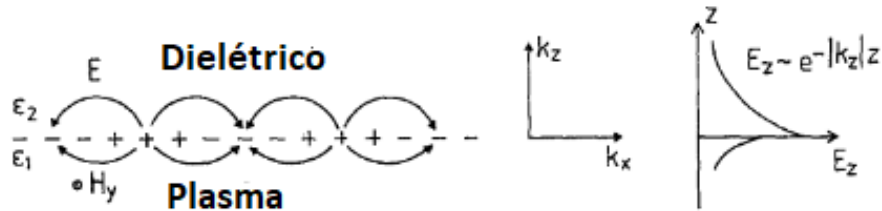


Figura 2.6- PPSs a propagar-se numa superfície na direção de x [54].

O vetor de onda  $K_x$  é paralelo à direção x sendo  $K_x = 2\pi/\lambda_p$ , onde  $\lambda_p$  é o comprimento de onda da oscilação do plasma. Podemos também definir o vetor de decaimento segundo o eixo z. Este tem em atenção a expressão ( $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + i\varepsilon''_1$ ). Se este for adjacente a um meio composto por ar ou o vácuo [54], [55]:

$$k_{zi} = [\varepsilon_1 \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 K_x^2]^{1/2} \quad (2.19)$$

$$k_x = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}\right)^{1/2} \quad (2.20)$$

Tendo em conta a parte imaginária da permitividade elétrica uma vez que existem perdas por causa efeito de amortecimento,  $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + i\varepsilon''_1$  e  $k_x = k'_x + ik''_x$ . Usando estas expressões e a expressão 2.19 e 2.20, conseguimos obter os vetores de onda e de decaimento [54], [55]:

$$k'_x = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}\right)^{1/2} \quad (2.21)$$

$$k''_x = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon'_1 \varepsilon_2}{\varepsilon'_1 + \varepsilon_2}\right)^{3/2} \frac{\varepsilon''_1}{2(\varepsilon'_1)^2} \quad (2.22)$$

O valor de  $k'_x$  precisa de  $|\varepsilon'_1| > \varepsilon_2$  e  $\varepsilon'_1 < 0$  da qual pode ser preenchido por um metal semiconductor perto da frequência própria. Já  $k''_x$  define a absorção interna. Se a relação de dispersão se aproximar da linha da luz

(figura 3.7) para  $K_{zi}$  pequenos não conseguimos ter a transformação de PPSs em luz. Para  $K_{zi}$  grandes aproximamos a frequência de ressonância para (figura 3.7) [54], [55]:

$$\omega_{sp} = \left(\frac{\omega_p}{1 + \varepsilon_2}\right)^{1/2} \quad (2.23)$$

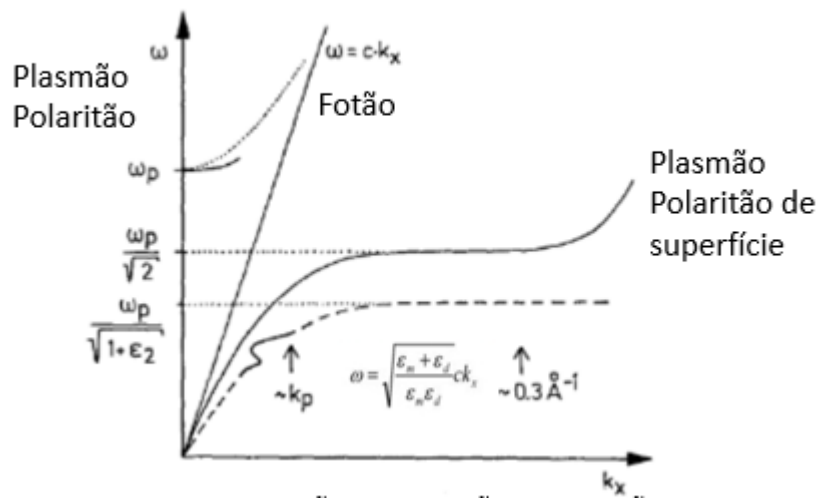


Figura 2.7 - Relação de dispersão de PPSs não reativos (linha a cheio, curva), reativos (linha a tracejado) e a dispersão da luz no metal (linha a ponteados) [54].

Portanto, como a curva de dispersão está do lado direito da linha a tracejado, as polaritões de superfície plasmônicas têm modos evanescentes uma vez que têm um comprimento de onda menor do que em espaço livre. A amplitude de campo das PPSs diminui exponencialmente com a dependência de  $e^{-|K_{zi}||z|}$  normal para a superfície segundo a extensão espacial. O valor do campo assim cai sobre a relação de  $\frac{1}{e}$  e permite a definição das seguintes expressões [54], [55]:

$$\hat{z}_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{\varepsilon'_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_2'^2}\right)^{1/2} \quad (2.24)$$

$$\hat{z}_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{\varepsilon'_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1'^2}\right)^{1/2} \quad (2.25)$$

Da mesma forma podemos definir o comprimento  $L_i$  segundo a propagação e dispersão através do comprimento das PPSs:

$$L_i = (2k_x'')^{-1} \quad (2.26)$$

As excitações podem ser por elétrons ou por luz. Uma forma é utilizar feixes de elétrons para explorar os elétrons que dispersam a energia, que é transferida para o volume do plasma, para originar um vetor de onda paralelo à superfície. A outra possibilidade é utilizar fótons para excitar um polaritão de superfície, que vai ter a mesma frequência e momento linear. Um fóton incidente pode excitar um elétron livre na superfície [28].

A excitação por feixes de luz pode ser dividida em acoplamento em grelha e acoplamento ATR. O primeiro é usado se a luz ( $K=\omega/c$ ) atinge uma grelha constante  $a$  com ângulo de incidência  $\theta_0$  e  $g=2\pi/a$ . A uma dada energia de fótons  $\hbar\omega$  o vetor de onda  $\hbar\omega/c$  tem de ser aumentado por um  $\Delta K_x$  valor para transformar os fótons em PPSs (figura 3.8) [54], [55].

Assim a relação de dispersão passa a ser definida de forma genérica por:

$$K_x = \frac{\omega}{c} \sin \theta_0 + \Delta K_x \quad (2.27)$$

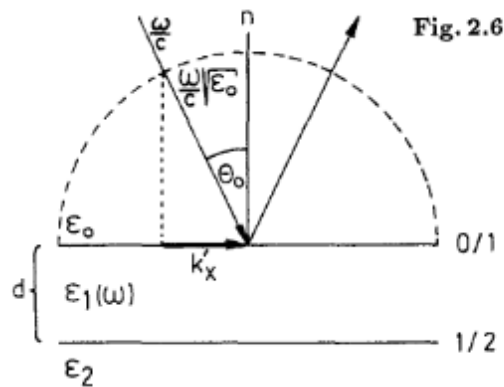


Figura 2.8 - Reflexão da luz no metal [54].

O acoplamento ATR é definido pela luz que é refletida na superfície metálica com um dielétrico no meio ( $\epsilon_0 > 1$ ). Assim o fator de dispersão é definido por (figura 3.9)[54], [55]:

$$K_x = \sqrt{\epsilon_0} \frac{\omega}{c} \sin \theta_0 \quad (2.28)$$

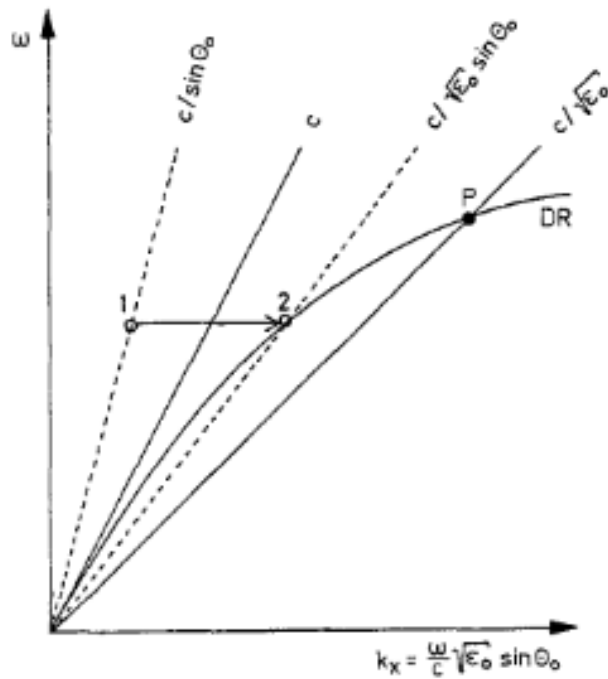


Figura 2.9 - Definição do acoplamento ATR para a luz no vácuo, luz no meio e o ponto onde começa a ter excitação através do método [54].

## 2.5 Teorias de Difração

As teorias que definem a difração por fendas evoluíram ao longo do tempo. Começaram pela definição de Fresnel e Fraunhofer. Kirchhoff considerou uma onda opaca plana de forma a estudar a difração da fenda [14]. Bethe mais tarde, considerou as condições de Kirchhoff, mas fez o estudo para comprimento de onda menores que a fenda [28], [56], [57]. Bouwkamp, considerou as condições de Bethe, mas tentou respeitar algumas condições de fronteira que não estavam a ser cumpridas [28], [34], [58], [59].

### 2.5.1 Difração Fraunhofer

A aproximação Fraunhofer para difração a partir de uma abertura planar é de facto a transformação de Fourier aplicada à abertura. O limite entre os domínios Fraunhofer e Fresnel é diferenciado pelo ponto de observação como mostrado na figura 19 [35].

Assumindo uma onda plana e monocromática com incidência perpendicular a um metal condutor perfeito, onde existe apenas uma fenda de tamanho  $a$ , distanciada de  $L$  de um alvo, a relação entre a irradiância num determinado ângulo de difração  $\theta$  e o lóbulo principal,  $\theta = 0^\circ$ , é dada pela teoria da difração Fraunhofer (figura 3.10) [28], [35].

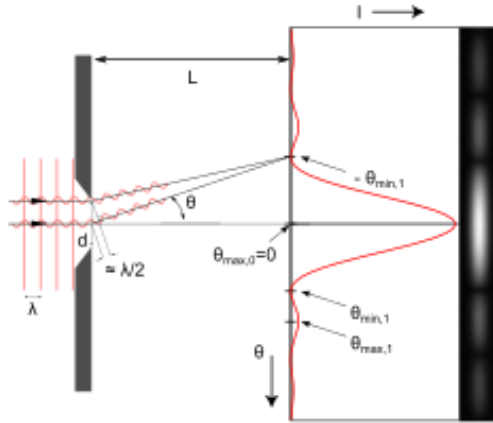


Figura 2.10 - Difração de Fraunhofer [60].

### 2.5.2 Difração de Fresnel

A teoria da difração de Fresnel ocorre quando a distância da fonte à obstrução é comparável ao tamanho da obstrução (figura 3.11). Assim trata problemas onde o comprimento de onda é a mesma escala de grandezas que a abertura [34], [59].

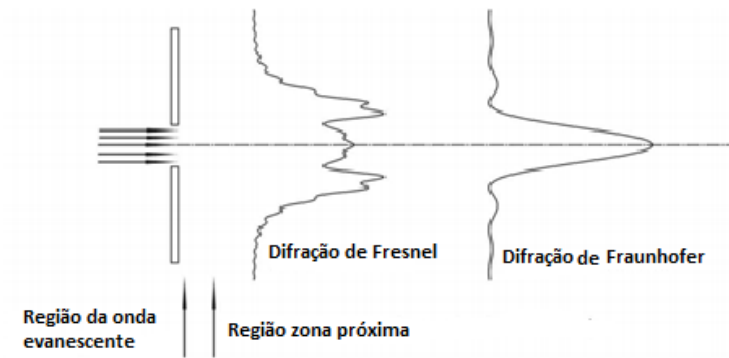


Figura 2.11 - Variação de intensidade característica de uma difração de Fresnel [61].

Os integrais de Fresnel definem a chamada espiral de Cornu são definidos por  $C(w)$  e  $S(w)$  [34], [59]:

$$C(w) = \int_0^w \cos\left(\frac{\pi w'^2}{2}\right) dw' \quad (2.29)$$

$$S(w) = \int_0^w \sin\left(\frac{\pi w'^2}{2}\right) dw' \quad (2.30)$$

onde a variável  $w$  define tanto as coordenadas  $y$  e  $z$ . Estes definem a parte imaginária e real do componente  $z$  e  $y$ . Assim é possível escrever a equação que define o campo elétrico e consequentemente a irradiância  $\left(\frac{\vec{E}_p \vec{E}_p^*}{2}\right)$  que é dada pela dependência do campo elétrico [34], [59]:

$$\widetilde{E}_p = \frac{\widetilde{E}_u}{2} [C(u) + iS(u)]_{u_1}^{u_2} [C(v) + iS(v)]_{v_1}^{v_2} \quad (2.31)$$

$$I_p = \frac{I_u}{4} \{ [C(u_2) - C(u_1)]^2 + [S(u_2) - S(u_1)]^2 \} \times \{ [C(v_2) - C(v_1)]^2 + [S(v_2) - S(v_1)]^2 \} \quad (2.32)$$

### 2.5.3 Difração de Kirchhoff

Kirchhoff considerou uma incidência de uma onda plana num plano opaco, propagando-se ao longo do eixo x, de modo que uma abertura neste plano origina uma onda transmitida determinada pela expressão 2.33 [14]. Este tipo de ondas apenas é usado para cálculos em superfícies fechadas [33].

A equação de Helmholtz é dada por [62]:

$$\nabla^2 \psi + K^2 \psi = 0 \quad (2.33)$$

sendo  $\nabla^2$  o Laplaciano, K o número de onda e  $\psi$  a amplitude da onda. Depois de resolvida a expressão 2.33 pode verificar-se a dependência exponencial da distância.

O procedimento padrão para encontrar soluções do campo eletromagnético é utilizar o teorema de Green [14]:

$$\psi(r) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[ \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \pi} \frac{e^{ik_0 r}}{r} - \bar{\psi} \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{ik_0 r}}{r} \right) \right] dS \quad (2.34)$$

onde S simboliza a superfície de integração e n o valor normal ao volume fechado da superfície.

Para a resolução desta equação tem de se fazer aproximações uma vez que tem de se conhecer a superfície de integração e a derivada da normal. Assim foram propostas por Kirchhoff duas aproximações que pretendem responder a esta situação [62]:

- 1°.  $\bar{\psi} = 0$  e  $\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \pi} = 0$  ;
- 2°.  $\bar{\psi} = \bar{\psi}_0$ , onde isto implica que não existe perturbações quando existe incidência na fenda.

Esta solução apresenta resultados bastante válidos para comprimentos de onda  $\lambda_0$  iguais ou maiores que o tamanho da abertura da fenda. Esta é uma boa aproximação em muitos casos, mas na problemática desta dissertação onde se trabalha com  $\lambda_0$  menores que a abertura da fenda se têm de recorrer a diferentes teorias para

explicar a aplicação dos modelos. Este problema para o estudo dá-se uma vez que a abertura é maior que o  $\lambda_0$ , os lóbulos de difração apresentam diferentes características em direção à superfície [34].

#### 2.5.4 Difração Bethe

Tendo em conta as condições que a teoria de Kirchhoff assume, se considerarmos as fendas com dimensões menores que o comprimento de onda, esta aproximação não garante resultados corretos. Assim, em 1944, Hans Albrecht Bethe completou a teoria de Kirchhoff, assumindo uma onda plana normalmente incidente a uma superfície metálica condutora infinita e perfeita, propagando-se ao longo de  $z$  e polarizada ao longo de  $x$ . Esta foi a primeira teoria que abordava o facto de aberturas poderem ser muito menor que o comprimento de onda, usando fendas circulares [28], [56], [57].

A fenda é definida pela condição  $x^2 + y^2 \leq a^2$ , em que  $a$  corresponde ao raio da fenda circular e a onda incidente na fenda com polarização segundo o eixo  $x$  e propagando-se no sentido positivo do eixo  $z$  [58].

Sabendo que a expressão que define o vetor de Poyting na zona de difração é dado por [59]:

$$\vec{S} = \frac{1}{4} \langle \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* + \mathbf{E}^* \times \mathbf{H} \rangle \quad (2.35)$$

e visto que a abertura é muito pequena em relação ao comprimento de onda podemos definir o dipolo elétrico efetivo e magnético como [59]:

$$p = \frac{4\epsilon_0}{3} a^3 E_0 \quad (2.36)$$

$$m = \frac{8}{3} a^3 H_0 \quad (2.37)$$

Para caracterizar os campos eletromagnéticos que se encontram na região da fenda, tem-se de definir os campos segundo os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  [59]:

$$H_z = -\frac{4}{\mu_0 c \pi} \frac{y}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \quad (2.38)$$

$$H_x = 0 \quad (2.39)$$

$$H_y = \frac{1}{\mu_0 c} \quad (2.40)$$

$$E_z = ikx \quad (2.41)$$

$$E_x = -\frac{4ik}{\mu_0 \pi} \sqrt{a^2 - x^2 - y^2} \quad (2.42)$$

$$E_y = 0 \quad (2.43)$$

Ao analisar as equações acima descritas podemos observar que as condições fronteiras não estão totalmente satisfeitas, uma vez que  $E_z \neq 0$  devido ao facto de ser negligenciado um termo da mesma ordem  $ka$  [28], [58].

#### 2.5.5 Difração de Bouwkamp

A teoria de Bouwkamp foi feita de forma a verificar as condições de fronteira que não eram respeitadas pela teoria de Bethe. Bouwkamp considera que a abertura é um disco em vez de uma abertura. Assim podemos definir as novas expressões dos campos eletromagnéticos por [28], [34], [58], [59]:

$$H_z = -\frac{4}{\mu_0 c \pi} \frac{y}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \quad (2.44)$$

$$H_x = 0 \quad (2.45)$$

$$H_y = \frac{1}{\mu_0 c} \quad (2.46)$$

$$E_z = ikx \quad (2.47)$$

$$E_x = -\frac{4ik}{3\pi} \frac{2a^2 - x^2 - 2y^2}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \quad (2.48)$$

$$E_y = -\frac{4ik}{\mu_3 \pi} \frac{xy}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \quad (2.49)$$

Uma vez que apresentamos diferenças no campo elétrico, o vetor de Poyting também será diferente.

$$\bar{S}_{tot} = -\frac{64}{27\pi} k^4 a^6 \frac{1}{2} c \varepsilon_0 \bar{E}_0^{-2} \quad (2.50)$$

### 2.5.6 Comparação entre teorias de difração

A solução apresentada por Kirchhoff apresenta três falhas [28], [34], [58], [59]:

- 1°. A teoria embora seja uma boa aproximação para explicar a difração em ondas escalares não é a mais apropriada para campos eletromagnéticos uma vez que não tem em conta o efeito de acoplamento.
- 2°. As condições fronteiras assumidas, por se considerar o material opaco.
- 3°. A consideração que o campo elétrico na abertura é similar ao que está fora da abertura.

A solução apresentada por Bethe não era a melhor, uma vez que, não satisfazia totalmente as condições fronteira. Por sua vez, Bouwkamp acabou com essa lacuna obtendo diferentes resultados. Bethe procurou para reparar o problema da condição de limite da teoria vetorial de Kirchhoff e mostrou que uma solução, satisfazendo a equações macroscópicas de Maxwell e as condições de contorno em toda a parte, poderia ser obtido para um furo circular com um raio pequeno comparado com o comprimento de onda da onda de entrada onda eletromagnética. O papel Bethe leva à conclusão de que o campo distante difratado pode ser representado como devido à radiação de um dipolo elétrico e magnético, ambos colocados no centro do pequeno buraco. Embora tenha sido mostrado por Bouwkamp em 1950 que o resultado do Bethe precisa uma correção no campo próximo da abertura Bethe's O papel ofereceu uma nova e substancial visão física do clássico problema de difração[28], [34], [58], [59].



### 3. Avaliação dos parâmetros das estruturas com nanoantenas Bowtie

Neste capítulo é necessário definir a avaliação dos diferentes parâmetros e os estudos que são realizados de forma a estudar a estrutura.

Inicialmente, é importante definir as duas estruturas utilizadas no presente estudo. A primeira representada na figura 4.1 e a segunda na figura 4.2. A diferença entre ambas está nos materiais utilizados para as diferentes partes da estrutura e a inclusão de uma placa de metal na segunda (figura 4.2). Posteriormente, será estudada uma terceira estrutura onde se utiliza os parâmetros otimizados da primeira.

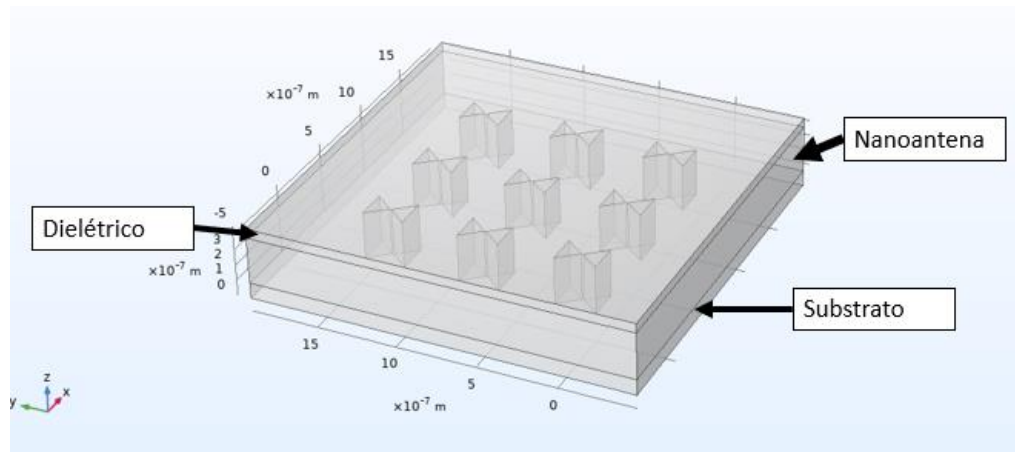


Figura 3.1- Exemplo da estrutura construída em simulação do agregado de nanoantenas Bowtie de metal.

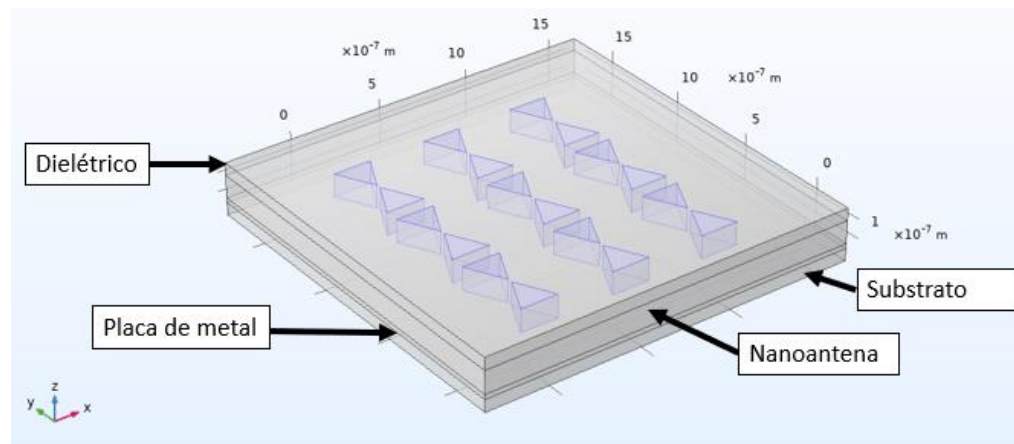


Figura 3.2 – Exemplo da estrutura construída em simulação do agregado de nanoantenas Bowtie de  $\text{SiO}_2$  e placa de metal.

A estrutura correspondente ao dielétrico na camada de cima é sempre ar para a estrutura representada na figura 4.2 será estudada a variação entre o ar e o  $\text{SiO}_2$  para a estrutura representada na figura 4.1. Considerou-se uma espessura de 65nm para o substrato de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ).

A nanoantena representada na figura 4.1 é um agregado de nanoantenas Bowtie constituídas por metal e a sua envolvente é o  $\text{SiO}_2$ . Os parâmetros em estudo, envolvidos nesta estrutura são: o comprimento e a largura da nanoantena, a abertura, a distâncias entre as nanoantenas e a altura das nanoantenas.

A onda eletromagnética é definida pelo campo de  $|\vec{E}_0| = 1\mu V/m$ , sendo este incidente na parte de cima da estrutura, como se encontra representado na figura 4.3.

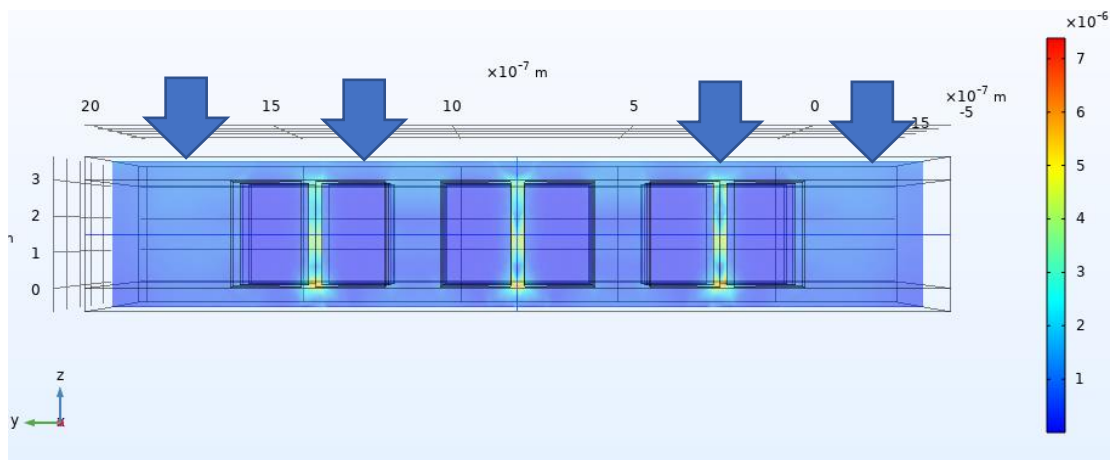


Figura 3.3 – Exemplo da excitação através do campo elétrico incidente e dos plasmões polaritões aglomerados.

Todas as simulações são realizadas de forma a estudar a relação existente entre o campo elétrico incidente e o medido na parte final do substrato, através do quadrado do módulo do máximo entre a relação do campo incidente e o medido. As medições são realizadas entre os 600 nm e os 3000 nm. O objetivo do estudo, é observar o comportamento das estruturas das nanoantenas na zona do infravermelho. Os gráficos com os dados são trabalhados recorrendo ao *software* MATLAB.

Na figura 4.4 está representado o significado de uma TOE graficamente. Quando a relação entre o campo incidente e o campo medido é superior a 1, existe TOE e acumulação de polaritões nas zonas das aberturas da estrutura das nanoantenas Bowtie. A zona pintada a verde define a largura de banda onde existe TOE.

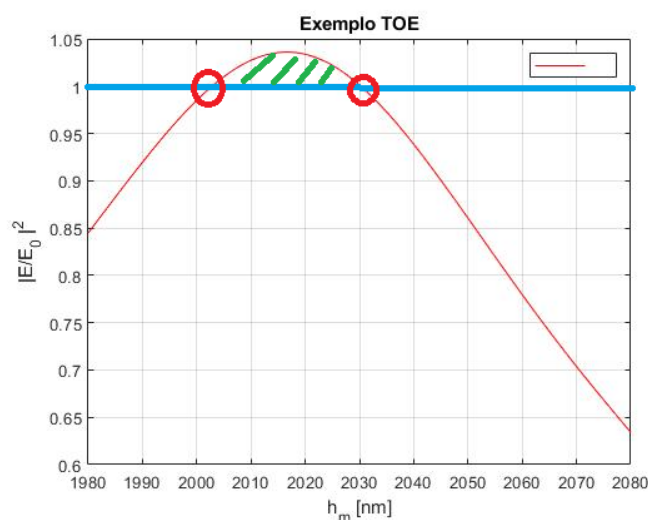


Figura 3.4 – Exemplo explicativo de uma TOE graficamente. Os pontos a vermelho simbolizam a largura de banda que existe o fenómeno.

As camadas referentes ao dielétrico e ao substrato têm uma espessura constante de 65 nm aproximadamente de  $\lambda/10$ . A altura inicial é cerca de  $\lambda/2$  e a espessura da placa metal inicial é de 25 nm. O agregado será composto por 3x3 nanoantenas.

Todos gráficos acerca dos índices de refração associados aos materiais utilizados estão contemplados no Anexo A. Os metais utilizados são: o ouro (Au), o alumínio (Al) e a platina (Pt). Todos os metais são definidos através dos seus índices de refração pelo modelo de Drude Lorentz. Isso torna-os excelentes candidatos para construir antenas para a região espectral do vermelho e do infravermelho próximo. A platina tem uma resposta de Drude para comprimentos de onda menores que 300 nm [63]. Finalmente, o alumínio possui uma parte real da função dielétrica bastante negativa e, portanto, pode ser considerado o material que entre os metais considerados, melhor se aproxima do comportamento de um metal ideal, especialmente na região espectral entre os 400 e os 600 nm. No entanto, tem um pico de absorção interbanda localizado em torno de comprimento de onda de 800 nm, de modo que o seu uso na região do infravermelho próximo é problemático [64].

### 3.1 Estudo da estrutura composta por Ar-Nanoantena-Substrato

A divisão do estudo para a estrutura acima referida é: a análise de comprimento em conjunto com a largura e abertura das nanoantenas de forma a variar estes três parâmetros simultaneamente uma vez que dependem uns dos outros, visto que fazem parte da estrutura em duas dimensões; a análise da altura das nanoantenas e por fim das distâncias entre nanoantenas. De realçar, uma vez que, o estudo se baseará na excitação da superfície de cima da estrutura com um campo eletromagnético e a variação do comprimento de onda é entre os 600 nm e os 3000 nm, todas as estruturas têm valores abaixo dos 600 nm de forma a serem menores que o limite inferior do comprimento de onda 600 nm.

A primeira variação de parâmetros passa pela análise do comprimento, da largura e da abertura das nanoantenas. Todos os outros valores são mantidos constantes de forma a ser possível comparar os resultados obtidos. A altura do dielétrico e do substrato foram mantidas constantes com o valor de 65 nm, a altura das nanoantenas é de  $\lambda/2$ , a distância entre as nanoantenas de 600 nm e o agregado utilizado é constituído por 9 nanoantenas (3x3).

Na segunda análise de parâmetros haverá a consequente variação das alturas das nanoantenas. À semelhança da primeira análise, todos os parâmetros se manterão e apenas haverá variação da altura das nanoantenas. A escolha dos valores até então já estudados na primeira análise serão os que obtiveram maior amplificação do campo elétrico medido na parte de baixo da estrutura em relação ao campo elétrico incidente. O objetivo é a otimização da estrutura.

Na terceira análise é estudada a variação entre as distâncias das nanoantenas. Todos os outros parâmetros são mantidos constantes.

#### 3.1.1 Variação do comprimento, da largura e da abertura das nanoantenas

Na figura 4.5 encontra-se representado o estudo da variação do quadrado dos campos normalizados em função do comprimento de onda para a estrutura com nanoantenas de ouro. O melhor resultado é obtido para uma estrutura de nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , a largura de  $\lambda/3$  e uma abertura de  $\lambda/15$  com um máximo do módulo do campo normalizado de 3.47 para um comprimento de onda de 1150 nm. Para todas as situações, observa-se TOE.

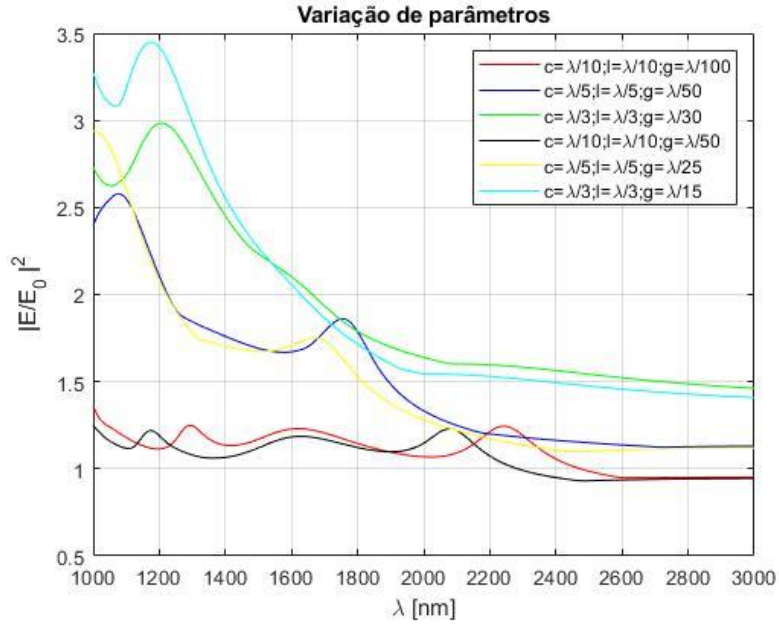


Figura 3.5 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

Nas figuras 4.6 e 4.7 apresenta-se os estudos da variação dos módulos dos campos normalizados em função do comprimento de onda para nanoantenas de alumínio. Para esta tipologia, o melhor resultado é observado para uma estrutura das nanoantenas com um comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura de  $\lambda/3$  e uma abertura de  $\lambda/15$  com o máximo do módulo do campo normalizado de aproximadamente 3.67 para um comprimento de onda de 1094 nm.

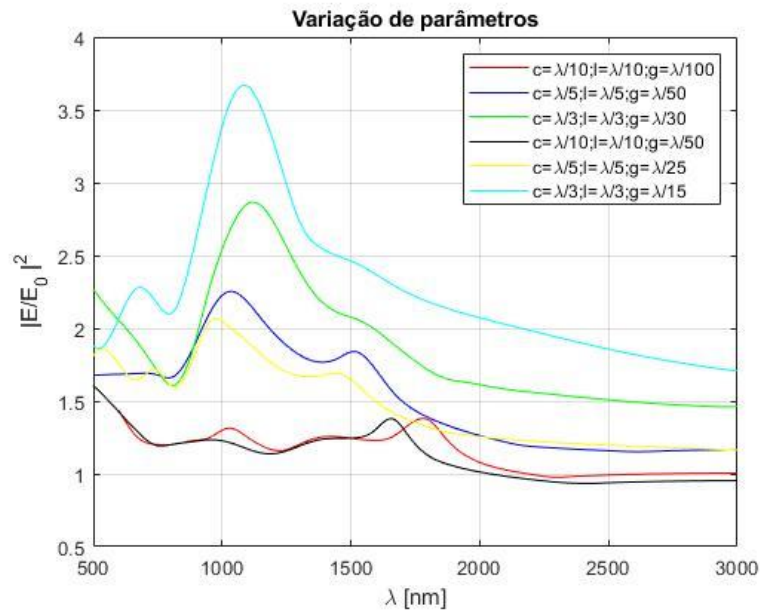


Figura 3.6 – Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

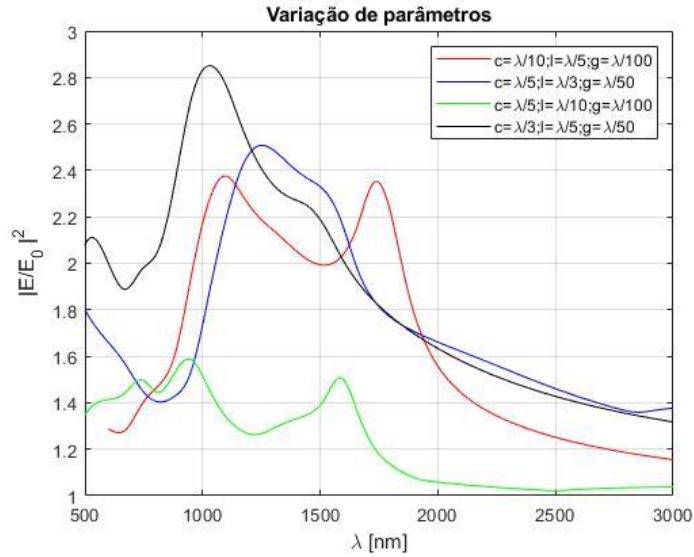


Figura 3.7 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato (continuação).

Nas figuras 4.8 e 4.9, para a platina observa-se que o melhor resultado corresponde à estrutura com o comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura de  $\lambda/3$  e uma abertura de  $\lambda/15$ . O máximo do módulo do campo normalizado é de 1.98 para um comprimento de onda incidente de 2788 nm. Outra estrutura que se destaca é a que tem o comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura de  $\lambda/5$  e abertura de  $\lambda/50$  com o máximo do módulo do campo normalizado de 1.85 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm o que pode permitir fazer detecções em zonas mais próximas do visível e do infravermelho próximo.

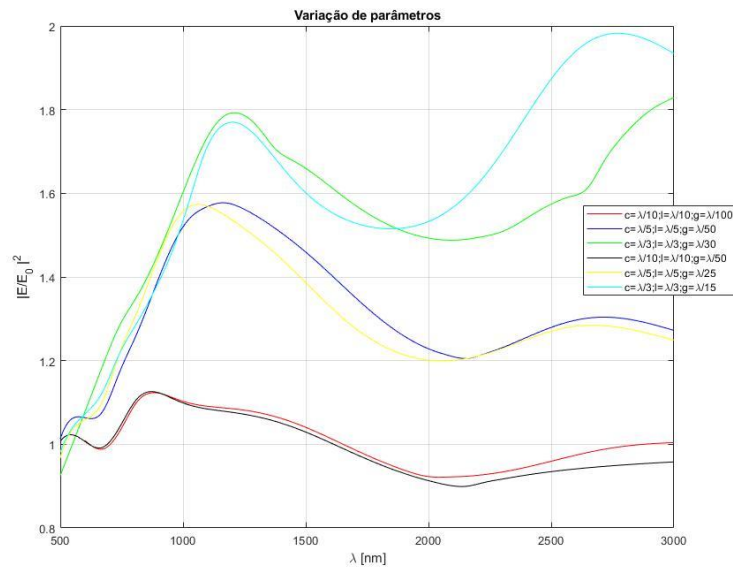


Figura 3.8 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) de Pt para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

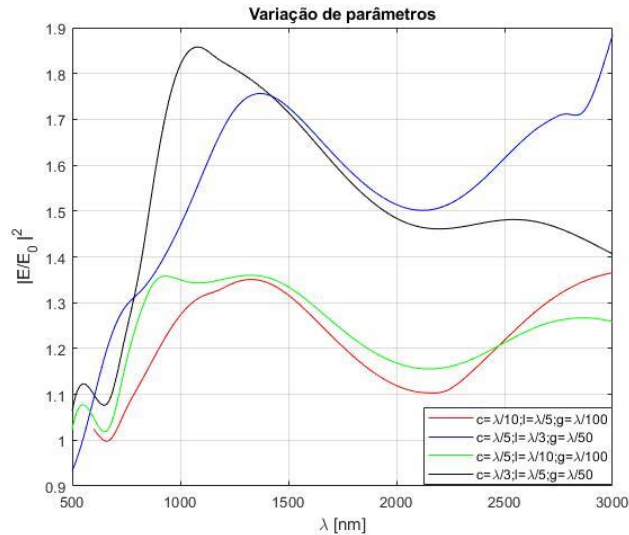


Figura 3.9 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) de Pt para a estrutura ar-nanoantena-substrato (continuação).

### 3.1.2 Variação da altura das nanoantenas

A figura 4.10 mostra a variação da relação do módulo dos campos normalizados em função do comprimento de onda para três alturas de nanoantenas ouro utilizadas. Usando a melhor configuração para o comprimento, a largura e a abertura das nanoantenas e depois de realizar o estudo da variação das alturas, deteta-se um máximo para o módulo de campo normalizado de 3.47 para um comprimento de onda incidente de 1150 nm e uma altura de h equivalente a  $\lambda/2$ .

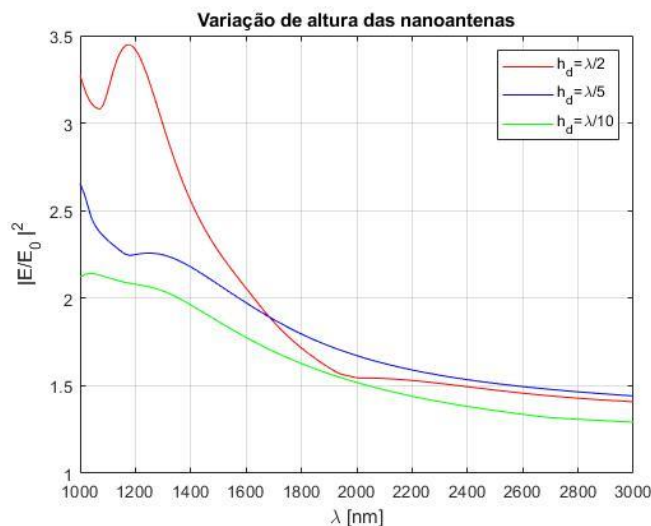


Figura 3.10 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

A figura 4.11 mostra a variação da relação do módulo do campo normalizado em função do comprimento de onda. Considerando a melhor configuração para o comprimento, a largura e a abertura das nanoantenas de alumínio e depois de realizar o estudo da variação das alturas, observa-se um máximo do módulo do campo normalizado de 3.67 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm e uma altura de h de aproximadamente  $\lambda/2$ .

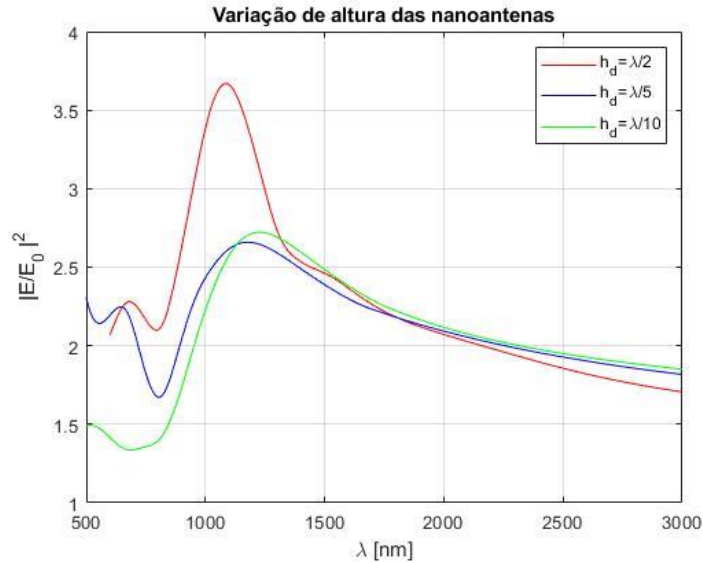


Figura 3.11 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

Nas figuras 4.12 e 4.13 estão apresentados os estudos da variação dos campos ao longo da variação do comprimento de onda incidente. Para as nanoantenas platina, o melhor resultado ocorre da estrutura com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/15$  e altura para  $\lambda/10$ , com um máximo de campo de 2.27 para um comprimento de onda incidente de 2788 nm. A outra estrutura tem o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/5$ , abertura de  $\lambda/50$  e altura de  $\lambda/2$  com o máximo de campo de 1.85 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm. Quando a abertura é  $\lambda/15$ , o comportamento do campo normalizado é crescente ao longo dos comprimentos de onda incidentes. Este pode ser explicado pelo acompanhamento do perfil dos índices de refração caracterizador do metal. Por sua vez, quando a abertura é  $\lambda/50$ , é apresentado um pico em torno dos 1100 nm (infravermelho próximo).

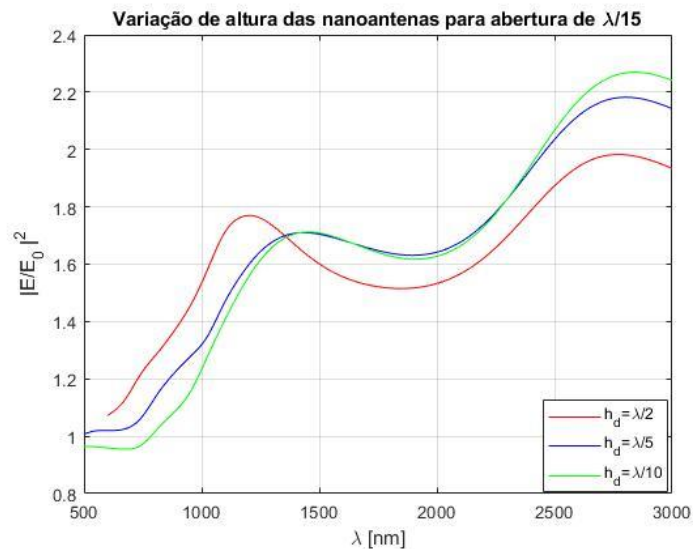


Figura 3.12 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Pt com uma abertura de  $\lambda/15$  para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

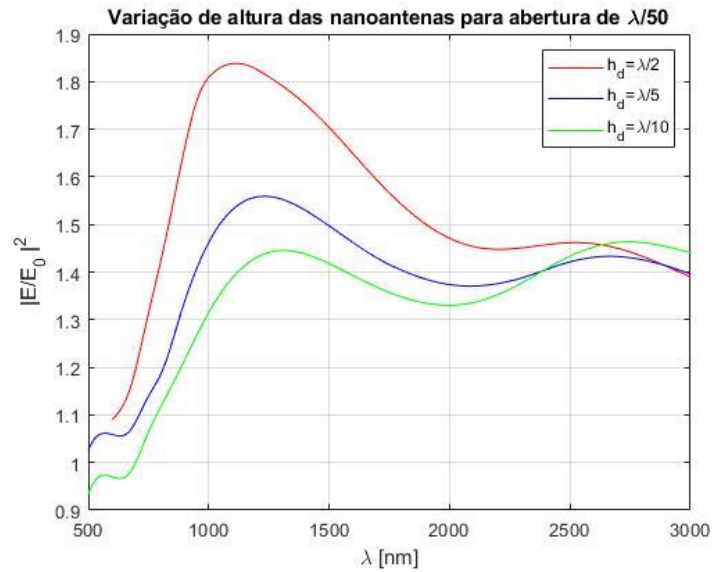


Figura 3.13 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Pt com uma abertura de  $\lambda/50$  para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

### 3.1.3 Variação das distâncias das nanoantenas

A figura 4.14 mostra que usando a melhor configuração para os parâmetros até então estudados e após realizar o estudo da variação das distâncias entre as nanoantenas de ouro, o máximo de campo normalizado é de 3.75 para um comprimento de onda incidente de 1000 nm para uma distância de 1000 nm.

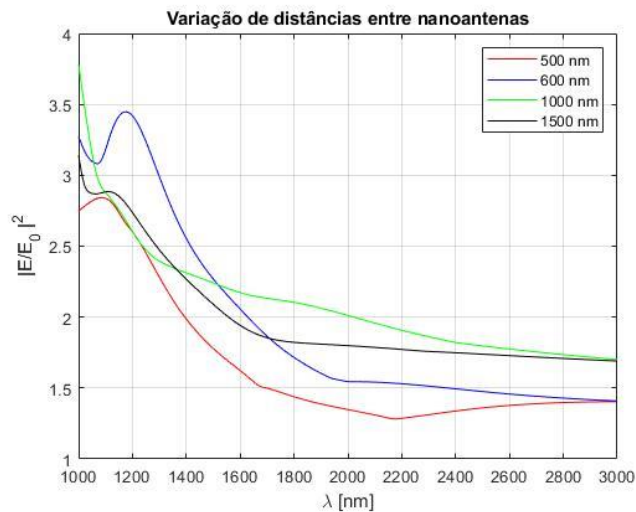


Figura 3.14 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas de Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

A figura 4.15 mostra que usando a melhor configuração para os parâmetros até então estudados e depois de realizar o estudo da variação das distâncias entre nanoantenas de alumínio, o máximo de campo é de 3.67 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm o que corresponde a uma distância de 600 nm.

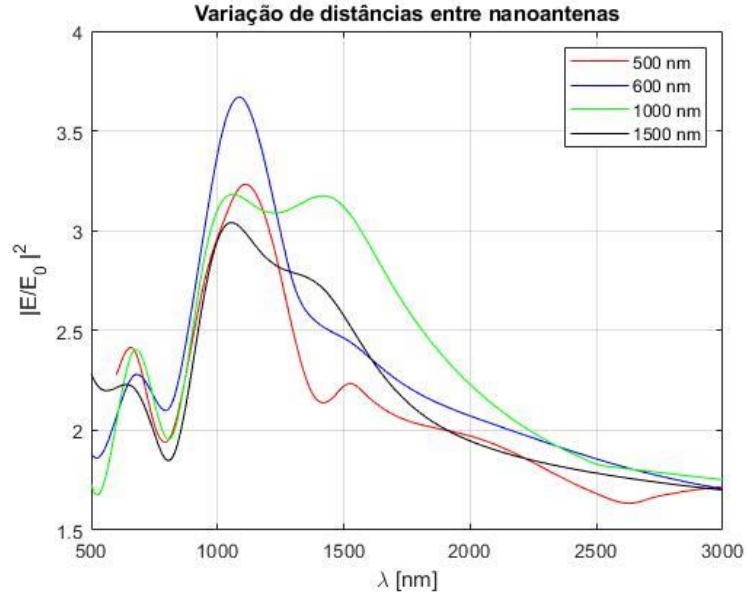


Figura 3.15 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas de Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

Nas figuras 4.16 verifica-se que o melhor resultado ocorre da estrutura com nanoantenas de platina com o comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura de  $\lambda/3$ , uma abertura de  $\lambda/15$ , uma altura de  $\lambda/10$  e uma distância de 1000 nm, com um máximo de campo de 2.56 para um comprimento de onda incidente de 2788 nm.

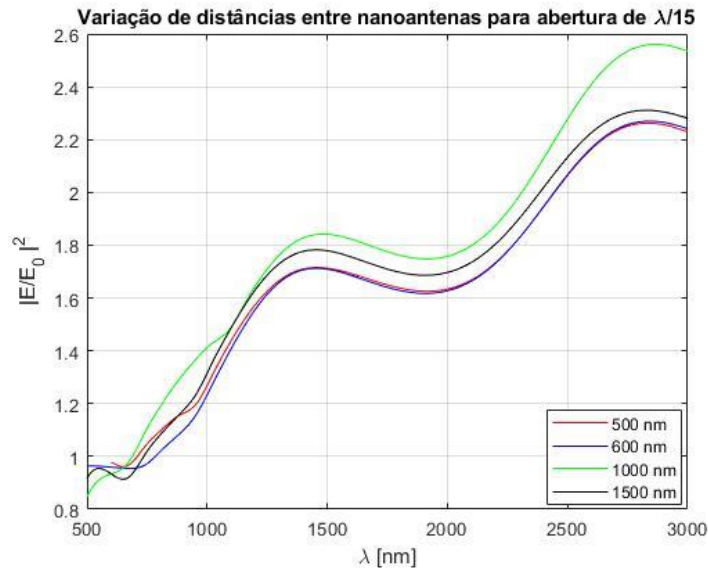


Figura 3.16 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas de Pt para uma abertura de  $\lambda/15$  para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

### 3.1.4 Estrutura ar-nanoantena-substrato otimizada

Na figura 4.17 verifica-se que a melhor configuração para os parâmetros até então estudados para a estrutura com nanoantenas de ouro e substrato de ar apresenta o máximo de campo normalizado em 3.5 para um comprimento de onda incidente de 1150 nm e uma distância entre nanoantenas de 1000 nm.

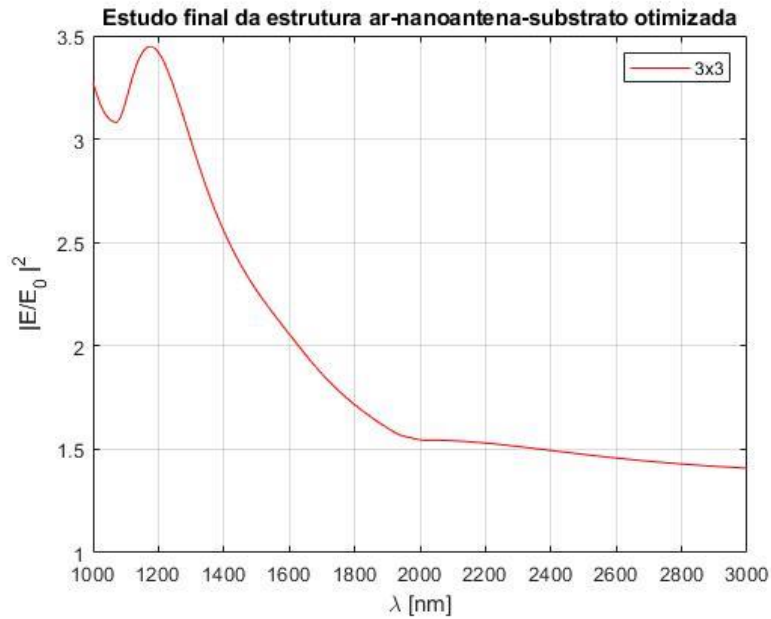


Figura 3.17 - Estudo otimizado de nanoantenas de Au para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

Na figura 4.18 verifica-se que a melhor configuração para os parâmetros até então estudados com máximo de campo normalizado de 3.59 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm.

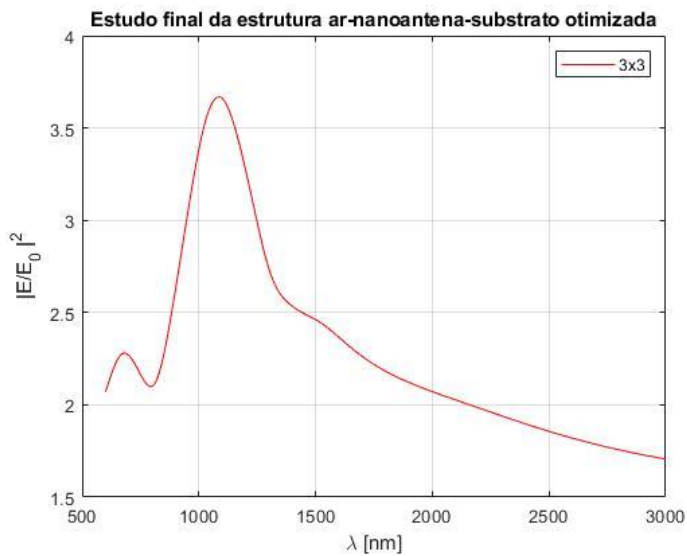


Figura 3.18 - Estudo otimizado de nanoantenas de Al para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

Na figura 4.19, a estrutura tem o comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura  $\lambda/5$ , uma abertura de  $\lambda/15$ , uma altura de  $\lambda/2$  e uma distância de 1000 nm com o máximo de campo de 1.43 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm bastante próximo do infravermelho próximo.

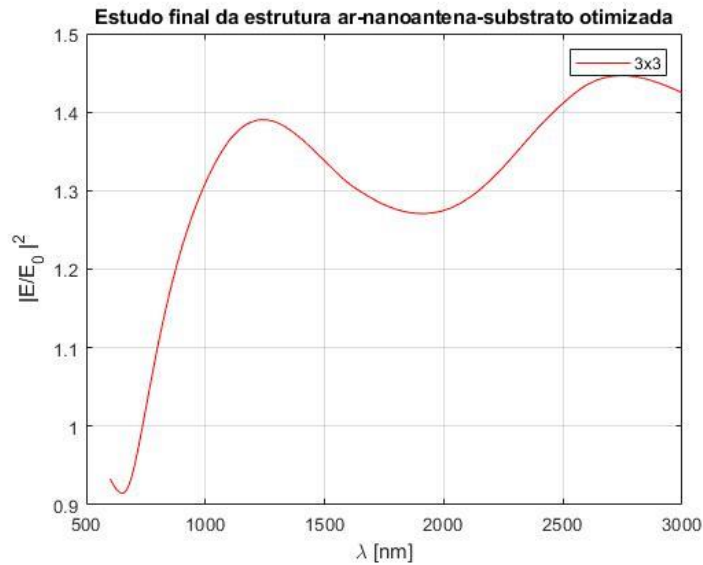


Figura 3.19 - Estudo otimizado de nanoantenas de Pt com uma abertura de  $\lambda/15$  para a estrutura ar-nanoantena-substrato.

### 3.2 Estudo da estrutura composta por Dielétrico-Nanoantena-Substrato

O dielétrico considerado nesta estrutura é o SiO<sub>2</sub>. O estudo realizado encontra-se dividido da mesma forma que no subcapítulo 4.1 e é seguido de forma semelhante com objetivo de otimizar a estrutura.

A primeira análise de parâmetros passa pela análise do comprimento, da largura e abertura das nanoantenas. Todos os outros valores serão mantidos de forma a poder haver uma comparação. A altura do dielétrico e do substrato é mantida contante com o valor de 65 nm. A altura das nanoantenas são de  $\lambda/2$ . A distância para as nanoantenas é de 600nm. O agregado utilizado é de 9 nanoantenas (3x3).

Na segunda análise de parâmetros existe a variação das alturas das nanoantenas. O comprimento, a largura e a abertura das nanoantenas a considerar será o que apresentar melhores resultados na primeira análise. O objetivo é ir construindo a melhor estrutura de forma a obter os melhores resultados.

Na terceira análise é estudado a variação entres distâncias das nanoantenas. Todos os outros parâmetros são mantidos sendo estes analisados nas primeiras duas análises e já otimizados para os valores estudados.

#### 3.2.1 Variação do comprimento, largura e abertura das nanoantenas

Na figura 4.20, está representado o gráfico onde se relaciona o quadrado do campo normalizado em função do comprimento de onda para a estrutura compostas por nanoantenas de ouro. O melhor resultado ocorre para uma estrutura das nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$  e abertura de  $\lambda/15$  com o máximo de campo de 4 para um comprimento de onda incidente de 1210 nm. Todas as configurações estudadas apresentam TOE.

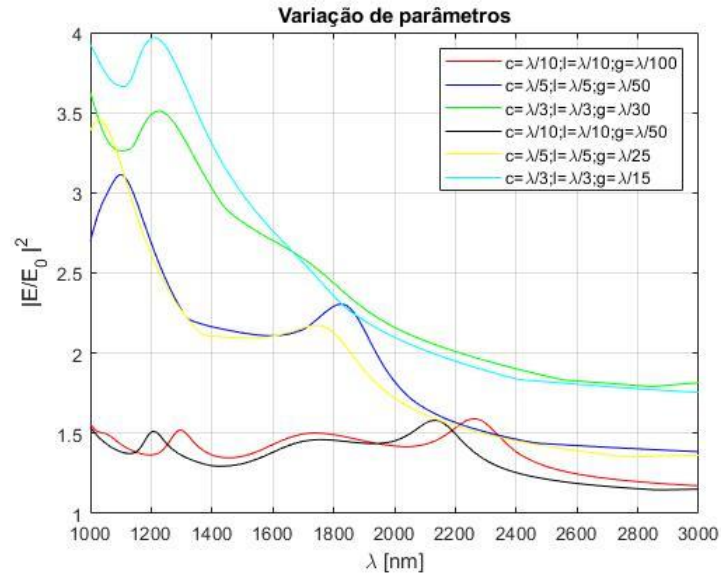


Figura 3.20 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

Nas figuras 4.21 e 4.22 o melhor resultado é apresentado para uma estrutura das nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$  e abertura de  $\lambda/15$  com o máximo de campo de 4.25 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm, sendo este gráfico caracterizador de quadrado do campo normalizado em função do comprimento de onda para a estrutura compostas por nanoantenas de alumínio.

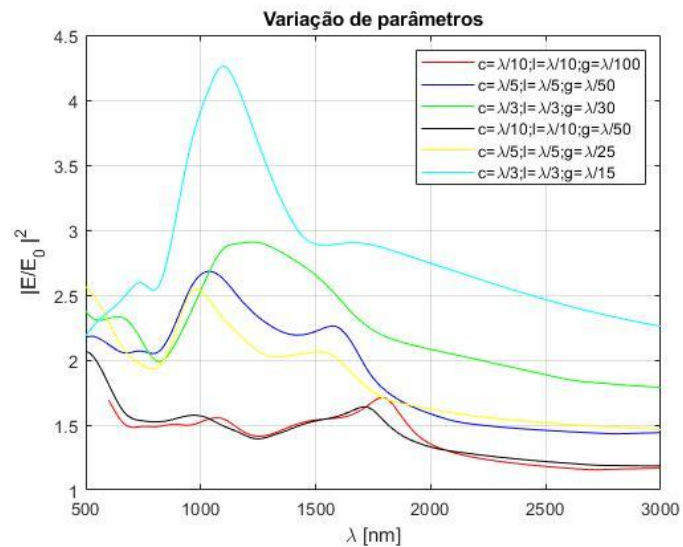


Figura 3.21 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

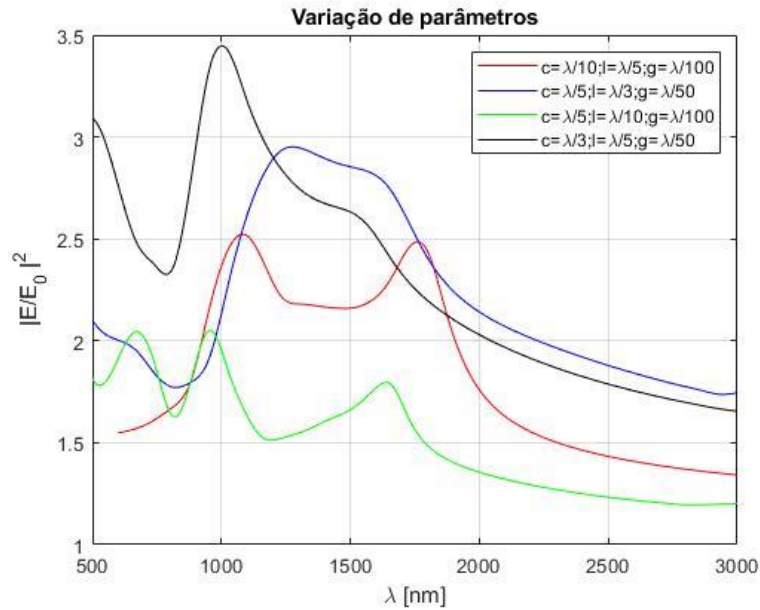


Figura 3.22 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato (continuação).

Nas figuras 4.23 e 4.24 o melhor resultado ocorre para uma estrutura das nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$  e abertura de  $\lambda/30$  com o máximo de campo de 2.51 para um comprimento de onda incidente de 1235 nm, sendo este gráfico caracterizador de quadrado do campo normalizado em função do comprimento de onda para a estrutura compostas por nanoantenas de platina.

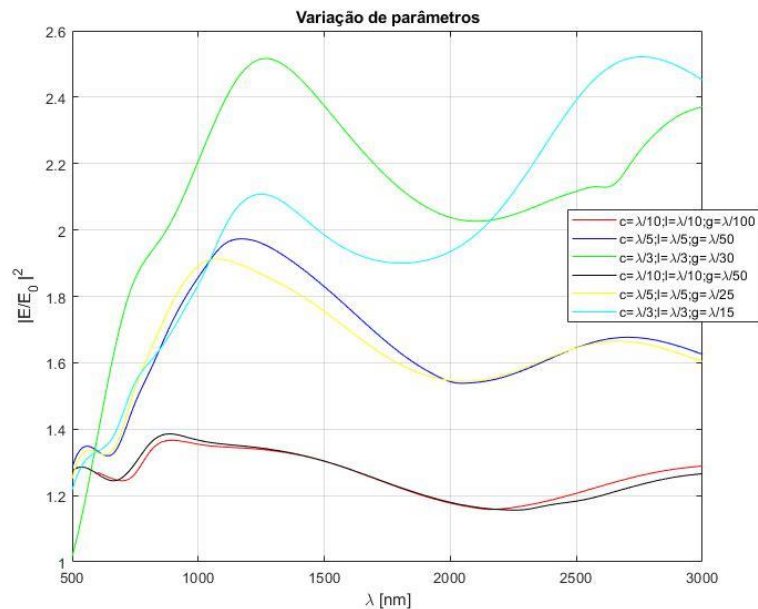


Figura 3.23 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

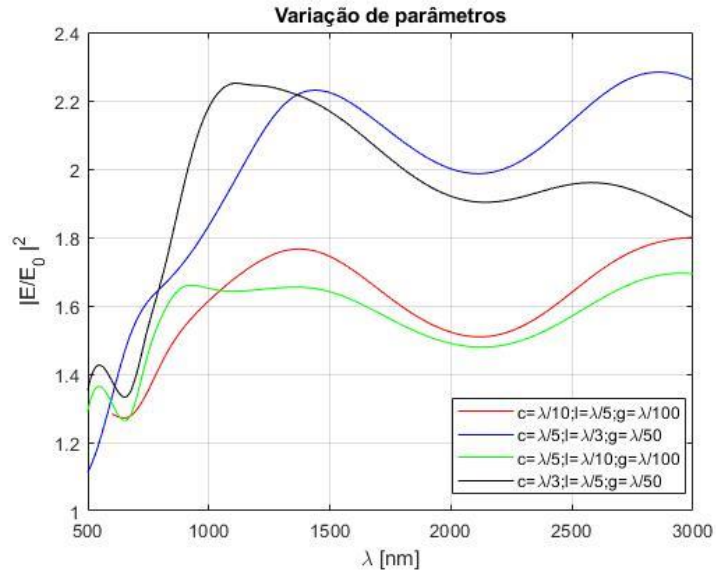


Figura 3.24 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura e abertura) compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato (continuação).

### 3.2.2 Variação da altura das nanoantenas

Analisando agora a estrutura da nanoantena de ouro e a variação da altura da mesma, a melhor configuração, utilizando os resultados já otimizados anteriormente em relação a esta estrutura (para o comprimento, largura e abertura das nanoantenas) e depois de realizar o estudo da variação das alturas, o máximo do módulo do campo normalizado com valor 4 para um comprimento de onda incidente de 1210 nm e uma altura de  $h$  equivalente a  $\lambda/2$ . Todos estes resultados são espelhados na figura 4.26.

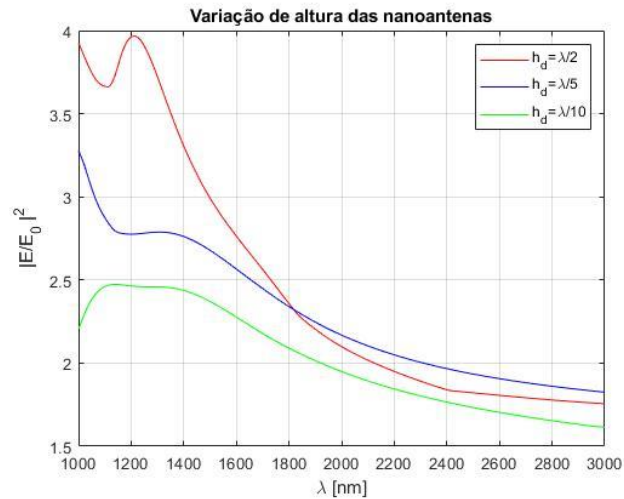


Figura 3.25 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

Na figura 4.26, a melhor configuração, utilizando os resultados já otimizados anteriormente em relação a esta estrutura (para o comprimento, a largura e a abertura das nanoantenas) e depois de realizar o estudo da variação das alturas apresenta o máximo do módulo do campo elétrico normalizado de 4.26 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm e uma altura de  $h$  equivalente a  $\lambda/2$ . Este resultado é apresentado para a estrutura

de nanoantenas de alumínio e relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente.

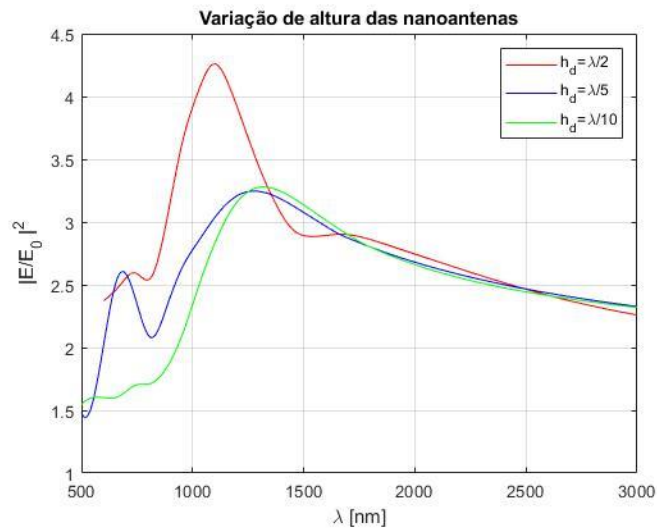


Figura 3.26 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

Na figura 4.27, a melhor configuração, utilizando os resultados já otimizados anteriormente em relação a esta estrutura (para o comprimento, a largura e a abertura das nanoantenas) e depois de realizar o estudo da variação das alturas apresenta máximo do módulo da relação dos campos elétricos incidentes e medidos de 2.51 para um comprimento de onda incidente de 1235 nm e uma altura de  $h$  equivalente a  $\lambda/2$ . Este resultado é apresentado para a estrutura de nanoantenas de platina e relaciona o quadrado do campo normalizado com o a variação comprimento de onda incidente.

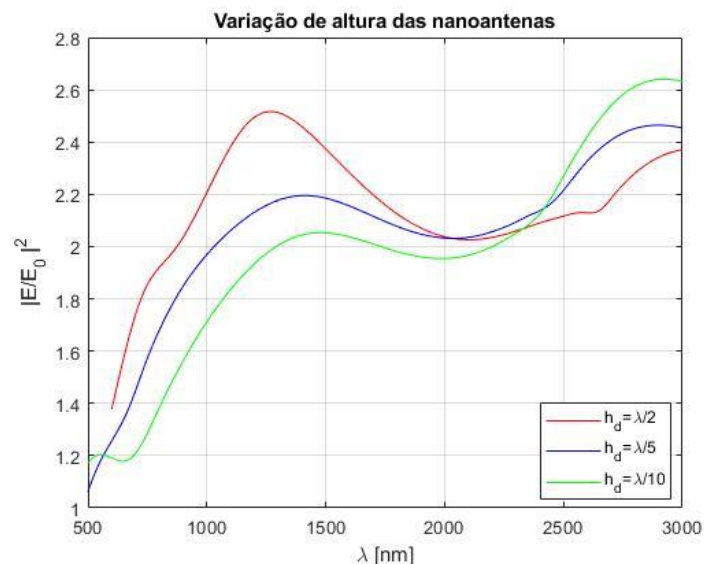


Figura 3.27 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (altura) compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

### 3.2.3 Variação das distâncias das nanoantenas

Na figura 4.28, a melhor configuração para os parâmetros até então estudados e depois de realizar o estudo da variação das distâncias entre as nanoantenas apresenta o máximo do módulo do campo elétrico normalizado de 4.3 para um comprimento de onda incidente de 1000 nm e para uma distância de 1000 nm com a estrutura de ouro. Os parâmetros em estudo são o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente.

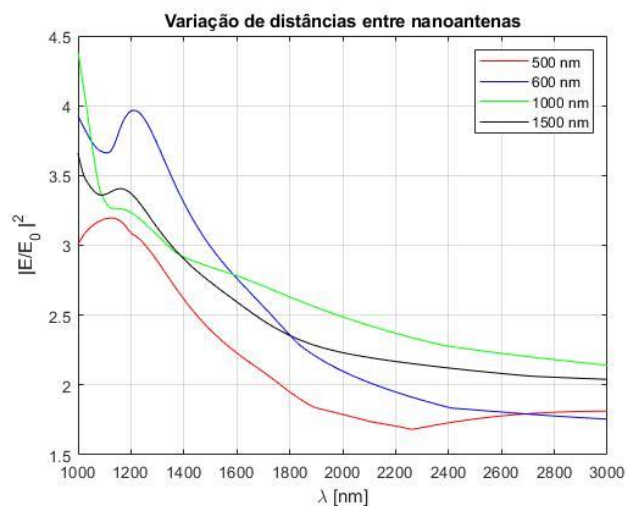


Figura 3.28 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas compostas por Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

A figura 4.29 representa o estudo da variação da distância entre nanoantenas de alumínio e a melhor configuração para os parâmetros até então estudados e depois de realizar o estudo da variação das distâncias apresenta o máximo do módulo do campo elétrico normalizado é 4.27 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm e uma distância entre nanoantenas de 600 nm.

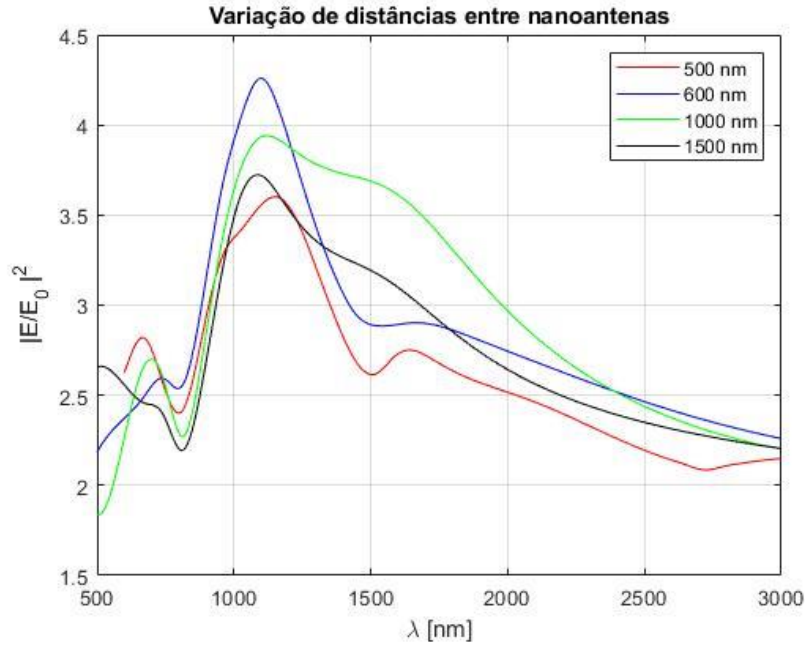


Figura 3.29 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas compostas por Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

Na figura 4.30, a melhor configuração para os parâmetros até então estudados e depois de realizar o estudo da variação das distâncias dá-se com o máximo do módulo do campo elétrico normalizado em 2.51 para um comprimento de onda incidente de 1235 nm para uma distância de 600 nm para a estrutura de platina. Os parâmetros em estudo são o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente.

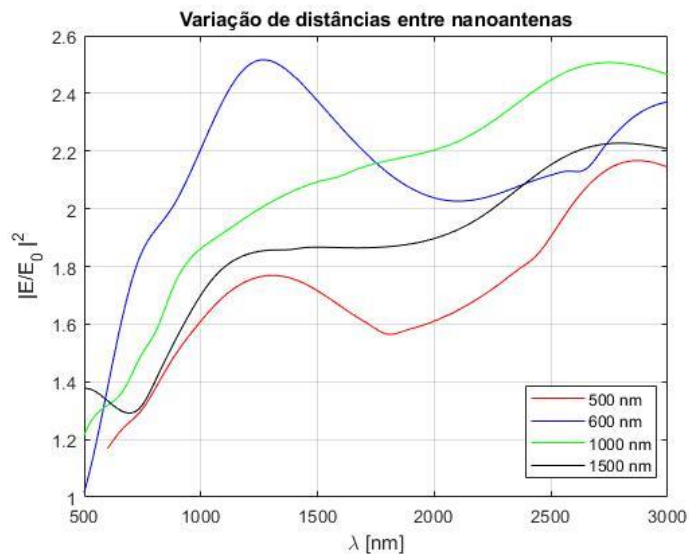


Figura 3.30 - Estudo da variação da distância entre nanoantenas compostas por Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

### 3.2.1 Estrutura dielétrico-nanoantena-substrato otimizada

Na figura 4.31 é apresentado o gráfico da relação entre o quadrado do campo normalizado e comprimento de onda incidente na parte superior da estrutura. A melhor configuração para os parâmetros até então estudados apresenta o máximo de campo é 6.21 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm.

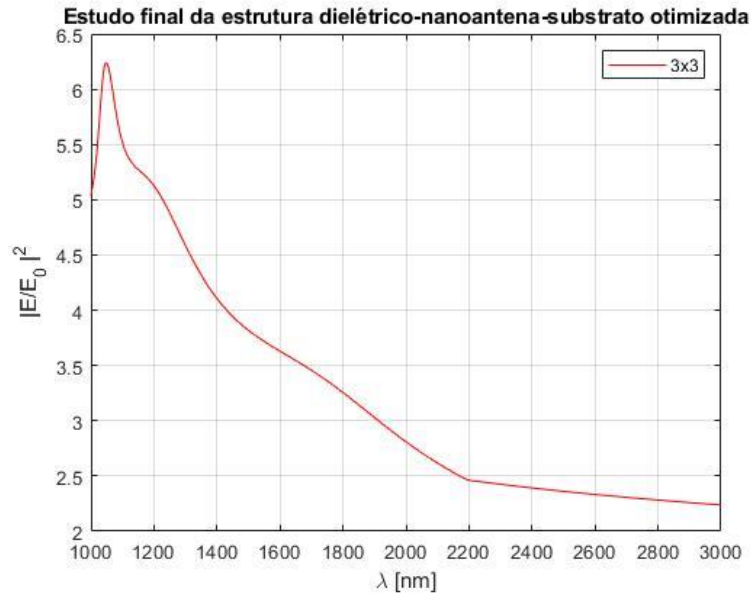


Figura 3.31 - Estudo otimizado de nanoantenas de Au para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

A figura 4.32 apresenta o gráfico da relação entre o quadrado do campo normalizado e comprimento de onda incidente na parte superior da estrutura. A melhor configuração para os parâmetros até então estudados, o máximo de campo é 4.26 para um comprimento de onda incidente de 1094 nm.

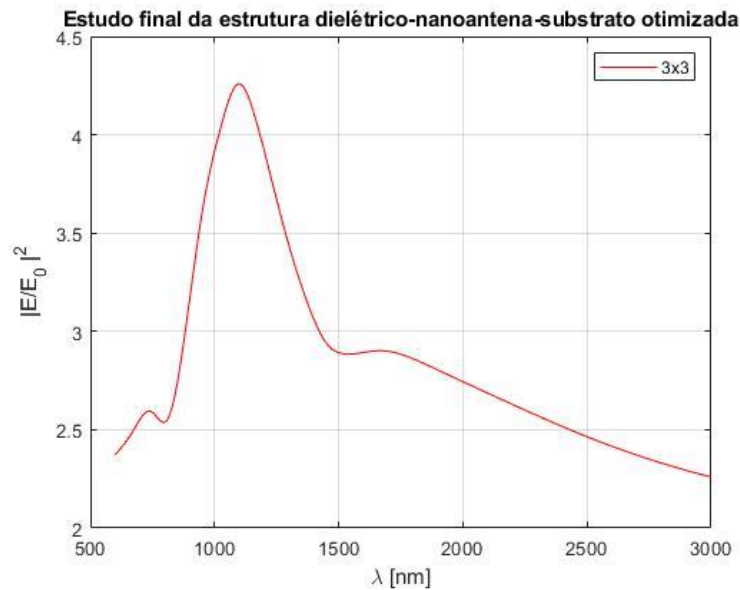


Figura 3.32 - Estudo otimizado de nanoantenas de Al para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

A figura 4.33, é estudada a estrutura da nanoantena de platina otimizada. O gráfico apresenta a relação entre o quadrado do campo normalizado e comprimento de onda incidente na parte superior da estrutura. A melhor configuração para os parâmetros até então estudados apresenta o máximo de campo é 2.51 para um comprimento de onda incidente de 2788 nm.

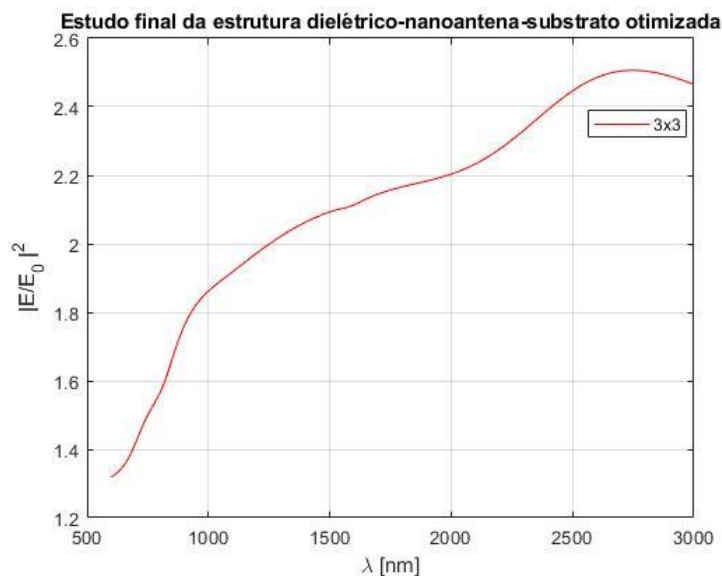


Figura 3.33 - Estudo otimizado de nanoantenas de Pt para a estrutura dielétrico-nanoantena-substrato.

### 3.3 Estudo da estrutura composta por nanoantenas de SiO<sub>2</sub> com uma placa de metal

Na estrutura considerada nesta subsecção, as nanoantenas são de SiO<sub>2</sub> e o meio envolvente é um metal. Os estudos efetuados estão divididos da seguinte forma: análise de comprimento, da largura da abertura das nanoantenas e altura das nanoantenas; da espessura da placa metálica.

A primeira análise de parâmetros passa pela análise do comprimento, da largura, da abertura e da altura das nanoantenas. Todos os outros valores serão mantidos constantes de forma a ser possível fazer uma análise comparativa entre os resultados. Foram consideradas para a uma dimensão de 65nm para as alturas do dielétrico e do substrato. A distância entre as nanoantenas foi considerada de 600 nm. O agregado utilizado é de 9 nanoantenas (3x3) e a espessura da placa de metal de 25 nm.

Na segunda análise de parâmetros haverá a variação das alturas das nanoantenas. O comprimento, a largura e a abertura das nanoantenas será considerado o valor que apresentar melhores resultados na primeira análise. O objetivo é ir construindo uma estrutura que permita obter o máximo valor de amplificação do campo elétrico.

#### 3.3.1 Variação do comprimento, largura, abertura e altura das nanoantenas

Nas figuras 4.34, 4.35 e 4.36 estão representados os estudos do módulo do quadrado do campo elétrico normalizado em função do comprimento de onda considerando nanoantenas de dielétrico rodeadas por ouro. Pelos resultados, observa-se que o melhor resultado ocorre para uma estrutura das nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura de  $\lambda/3$ , uma largura da abertura de  $\lambda/50$  e uma altura de  $\lambda/5$  com o máximo do quadrado do campo normalizado de 1.6 para um comprimento de onda de 2153 nm. Para esta estrutura apenas existe TOE para a largura de banda entre os 2100 nm e os 2300 nm.

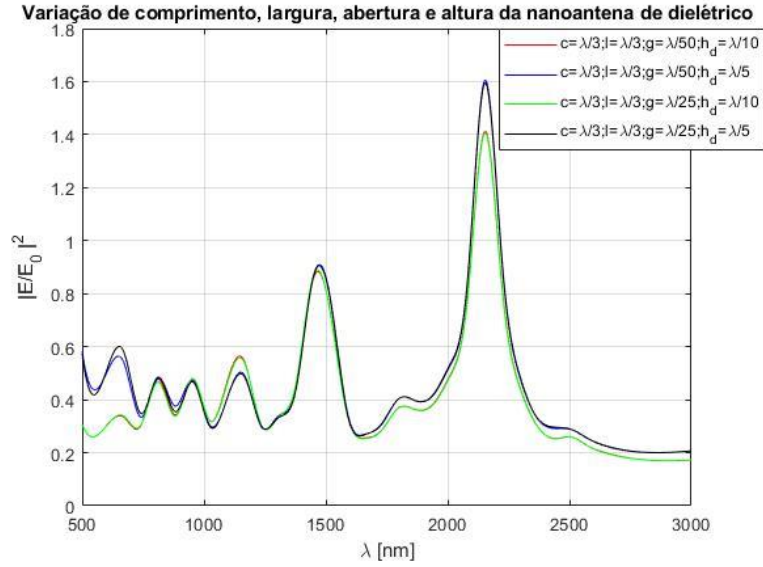


Figura 3.34 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/3$ .

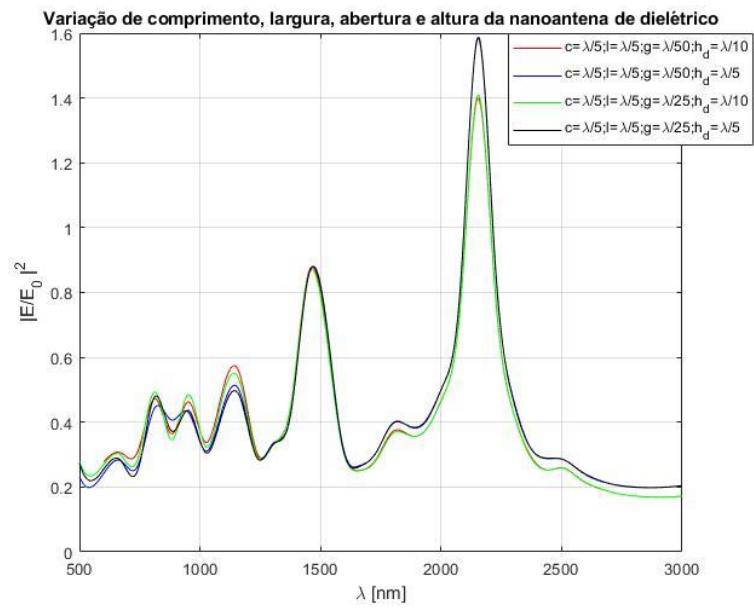


Figura 3.35 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/5$ .

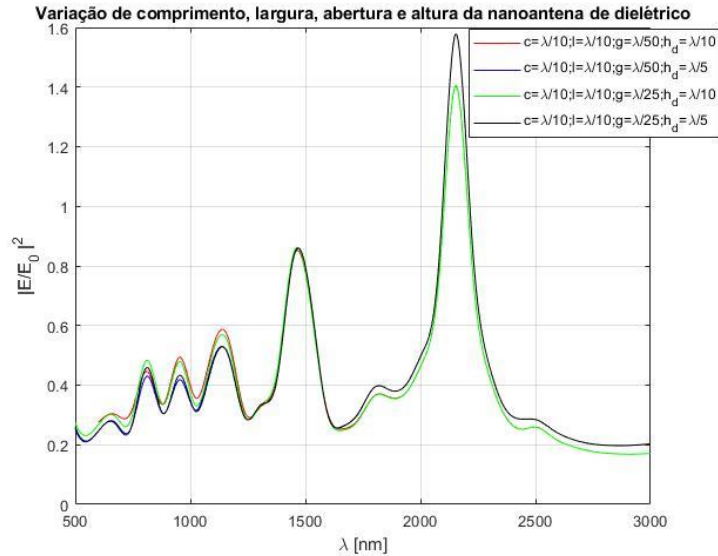


Figura 3.36 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/10$ .

Nas figuras 4.37, 4.38 e 4.39 encontra-se representados o quadrado do módulo do campo elétrico normalizado em função do comprimento de onda, considerando nanoantenas de dielétrico com uma placa rodeadas por alumínio. Observa-se que o resultado que apresenta uma melhor amplificação do campo corresponde a uma estrutura com nanoantenas de comprimento de  $\lambda/3$ , uma largura de  $\lambda/3$ , uma abertura de  $\lambda/50$  e uma altura de  $\lambda/5$  com o máximo do quadrado do módulo do campo elétrico normalizado de 0.64 para um comprimento de onda incidente de 1941 nm. Com a placa de metal de alumínio não se verifica TOE.

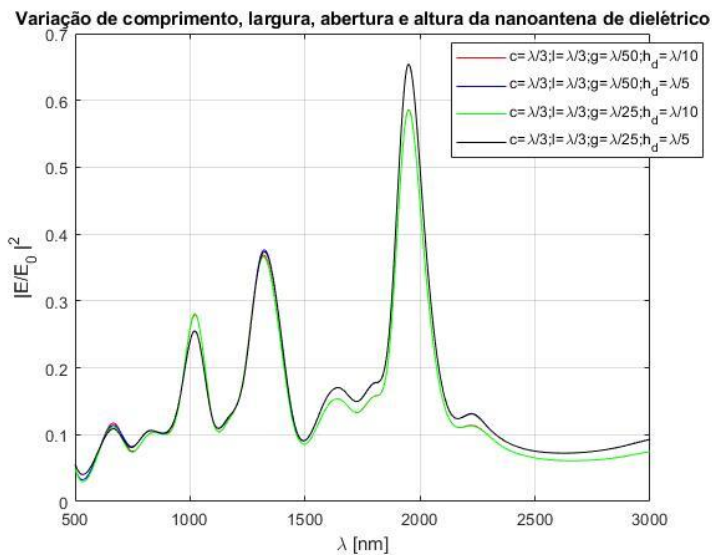


Figura 3.37 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/3$ .

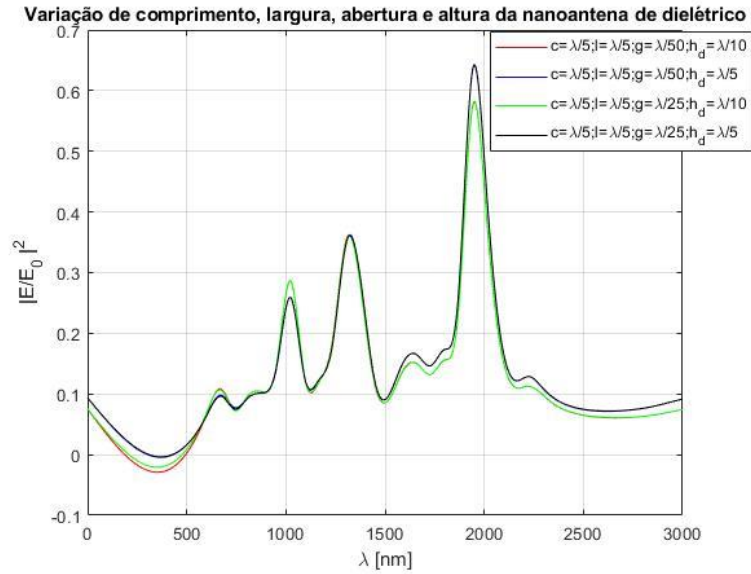


Figura 3.38 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/5$ .

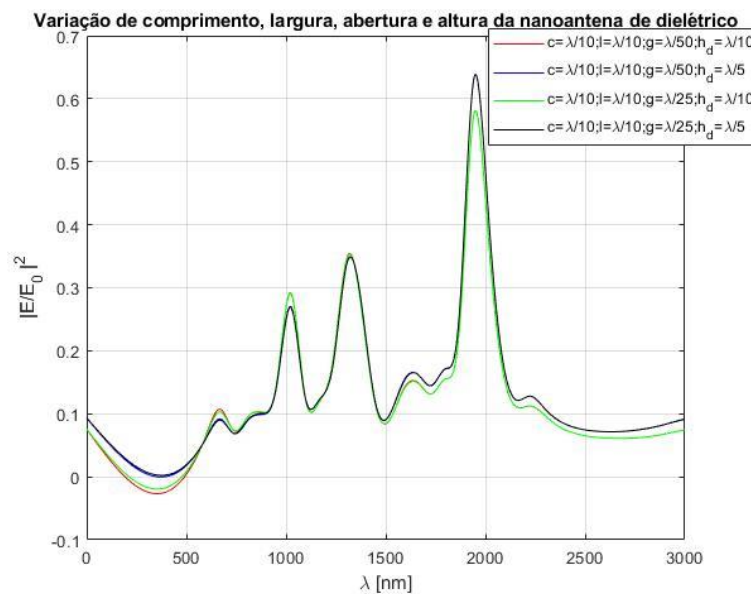


Figura 3.39 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/10$ .

Nas figuras 4.40, 4.41e 4.42 encontram-se representados os estudos da variação dos campos ao longo da variação do comprimento de onda incidente através da evolução do quadrado do módulo do campo elétrico normalizado. Para as nanoantenas de dielétrico e uma placa de metal de platina, o melhor resultado é apresentado para uma estrutura de nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/25$  e altura de  $\lambda/5$  com o máximo de campo de 0.47 para um comprimento de onda incidente de 3000 nm. Com a placa de platina não se verifica TOE.

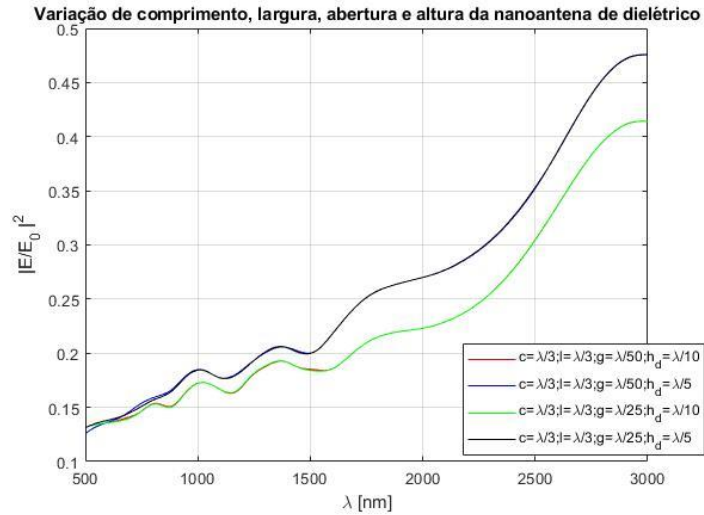


Figura 3.40 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Pt para a estrutura constituída por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/3$ .

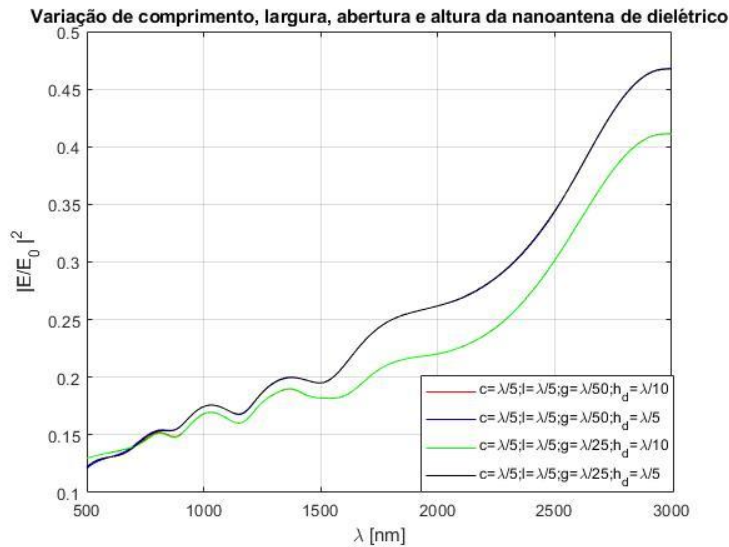


Figura 3.41 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Pt para a estrutura constituída por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/5$ .

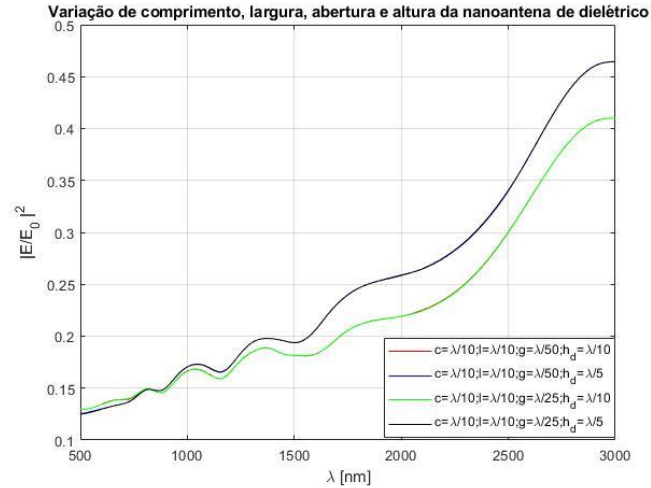


Figura 3.42 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas das nanoantenas (comprimento, largura, abertura e altura) compostas por Pt para a estrutura constituída por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal onde se fixa o comprimento e a largura das nanoantenas em  $\lambda/10$ .

### 3.3.2 Variação da espessura da placa de metal

A variação da espessura da placa de metal tem influência direta na posição dos valores máximos da relação do campo normalizado. Sendo assim, quanto maior for a espessura menor será o comprimento de onda incidente do pico máximo do campo. Um exemplo é a figura 4.43. Para valores de  $h_p=50$  nm o seu pico é em 2082 nm, para o valor  $h_p=30$  nm o seu pico é em 2152 nm, para  $h_p=25$  nm o seu pico é em 2160 nm e por fim, para o valor de  $h_p=15$  nm o seu pico é em 2294 nm.

A figura 4.43 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para a placa de metal de ouro. O melhor resultado ocorre para uma estrutura de nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 25 nm e 15 nm com o máximo de campo de 1.61 e 1.49 para um comprimento de onda incidente de 2153 nm e 2294 nm respectivamente. As duas situações são analisadas mais ao detalhe, pois embora com a espessura menor, a relação do campo é menor, este apresenta uma largura de banda maior como é verificado, onde se mantém acima da TOE, o que pode ter aplicações visto que existe a amplificação do campo incidente em mais comprimentos de onda.

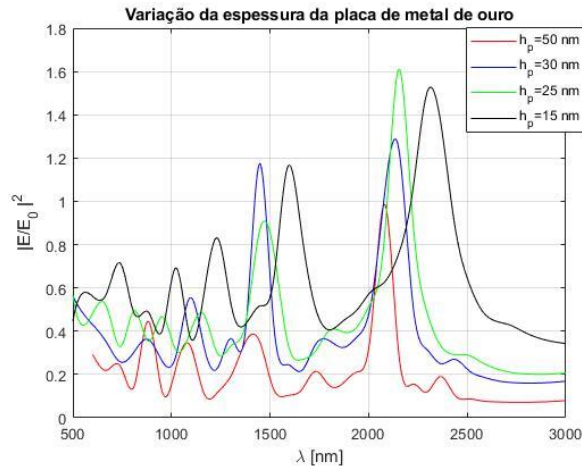


Figura 3.43 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas da espessura da placa de metal de Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

A figura 4.44 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para a placa de metal de alumínio. O melhor resultado ocorre quando a estrutura de nanoantenas tem o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 15 nm e 10 nm com o máximo de campo de 1.03 e 1.04 para um comprimento de onda incidente de 2011 nm e 2082 nm respectivamente. As duas situações são analisadas mais ao detalhe, pois embora com a espessura menor, a relação do campo é menor, este apresenta uma largura de banda maior como será verificado, onde se mantém acima da TOE. Na primeira análise não existe TOE, mas com a variação da espessura da placa de metal foi possível obter a mesma amplificação do campo normalizado.

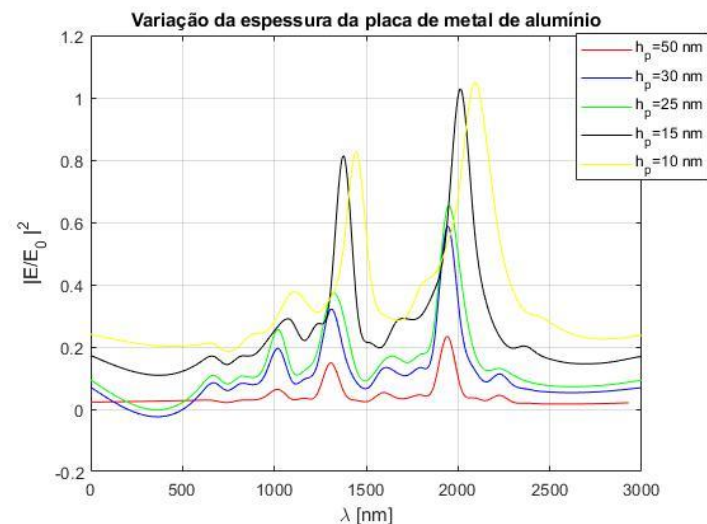


Figura 3.44 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas da espessura da placa de metal de Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

A figura 4.45 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para a placa de metal de platina. O melhor resultado é obtido para a estrutura de nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/25$  e altura de  $\lambda/5$  com o máximo de campo de 0.43 para um comprimento de onda incidente de 3000 nm. Mais uma vez esta estrutura não apresenta TOE.

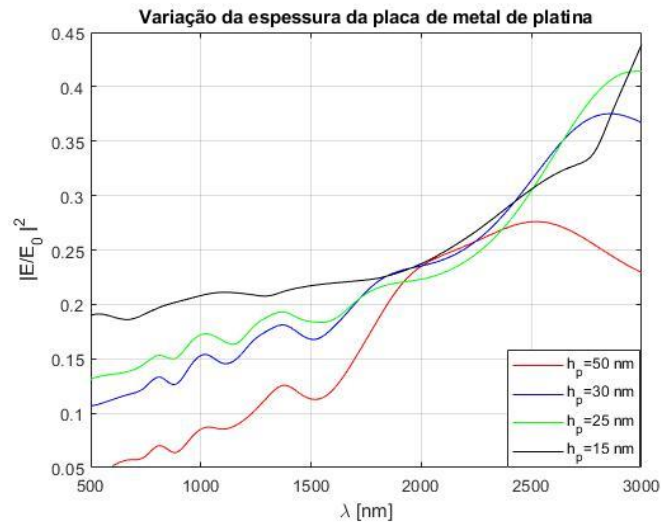


Figura 3.45 - Estudo da variação de parâmetros referentes a medidas da espessura da placa de metal de Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

### 3.3.1 Estrutura ar-nanoantena-placa metálica-substrato otimizada

A figura 4.46 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para a placa de metal de ouro. O melhor resultado é obtido com a estrutura de nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 25 nm com o máximo de campo de 1.61 para um comprimento de onda incidente de 2153 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3).

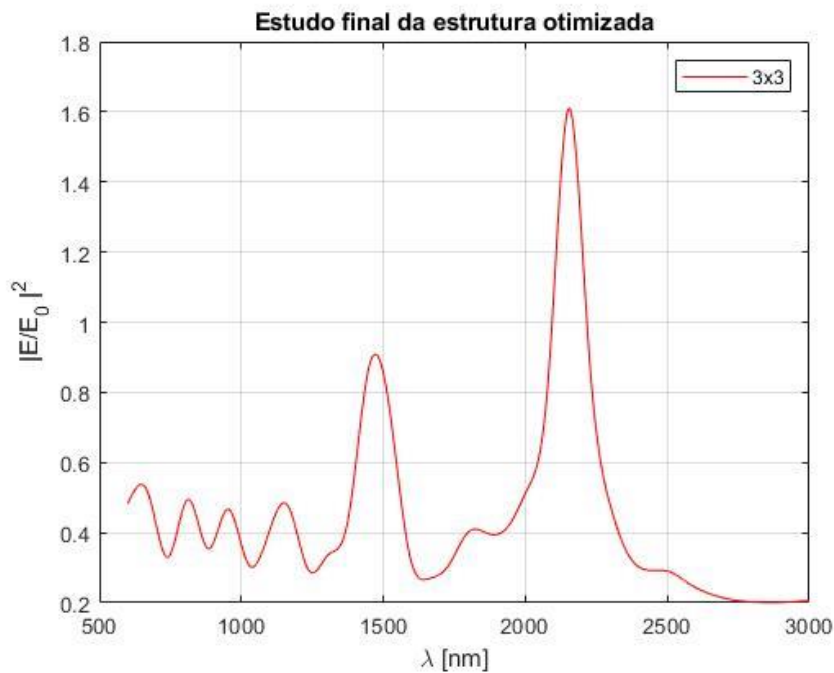


Figura 3.46 - Estudo otimizado de nanoantenas de Au para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

A figura 4.47 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para a placa de metal de alumínio. O melhor resultado é obtido com a estrutura de nanoantenas com o

comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 15 nm com o máximo de campo de 1.03 para um comprimento de onda incidente de 2153 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3).

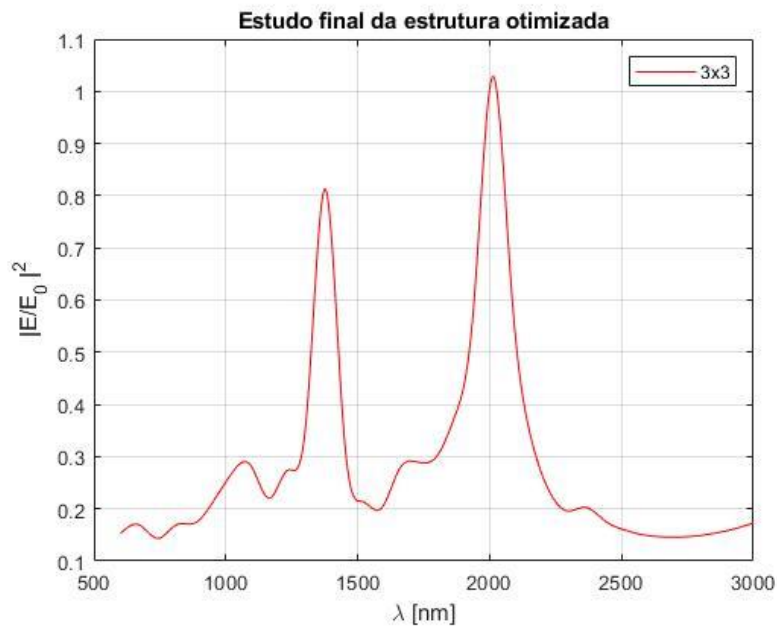


Figura 3.47 - Estudo otimizado de nanoantenas de Al para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

A figura 4.48 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para a placa de metal de platina. O melhor resultado é obtido com a estrutura de nanoantenas com o comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/25$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 25 nm com o máximo de campo de 0.43 para um comprimento de onda incidente de 3000 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3) para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

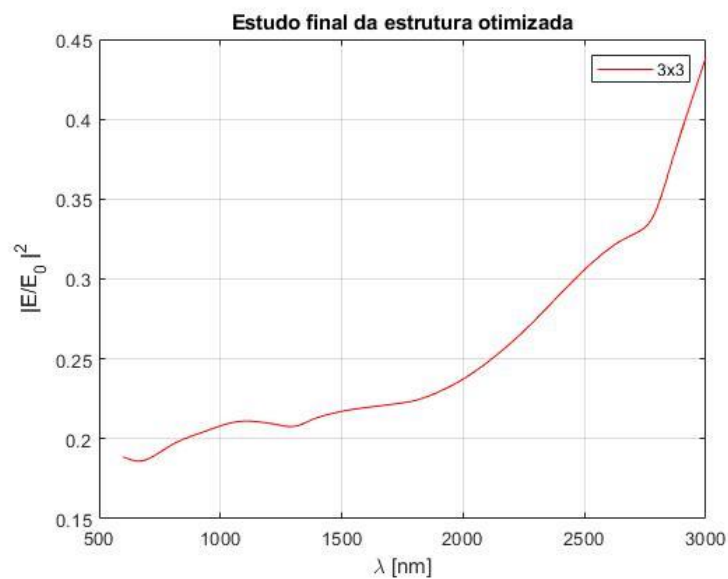


Figura 3.48 - Estudo otimizado de nanoantenas de Pt para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

### 3.3.2 Análise detalhada da estrutura composta pela placa de ouro

Para a realização detalha dos gráficos 4.49 e 4.50 usou-se acréscimos de 2 em 2 nm na amostragem dos mesmos. O objetivo destes gráficos é mostrar em detalhe os momentos para a configuração da estrutura composta por nanoantenas de dielétrico e uma placa de metal de ouro por baixo o momento que começa a existir TOE e qual o pico máximo da relação entre os campos incidentes e medidos.

Na figura 4.49, referente à configuração com comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 25 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3), a largura de banda onde existe TOE corresponde a 110 nm (largura de banda de 2102 a 2212 nm) com um pico de campo normalizado em 2160 nm para o valor de 1.60.

Na figura 4.50, referente à configuração com comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 15 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3), a largura de banda onde existe TOE corresponde a 194 nm (largura de banda de 2220 a 2414 nm) com um pico de campo em 2318 nm para o valor de 1.54.

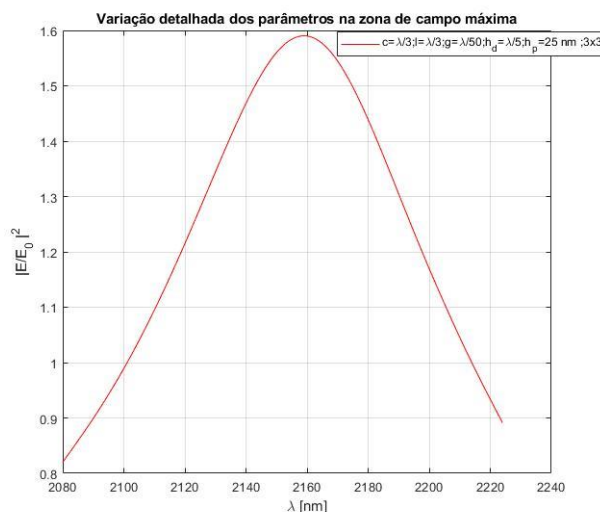


Figura 3.49 - Estudo da variação detalhado da estrutura com espessura da placa de metal de 25 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

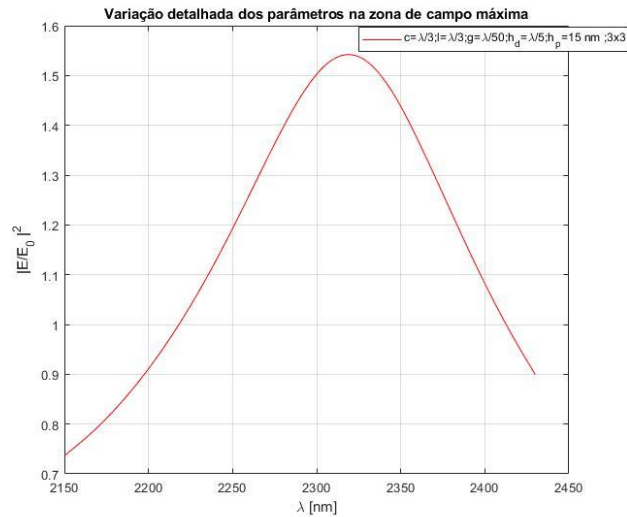


Figura 3.50 - Estudo da variação detalhada da estrutura com espessura da placa de metal de 15 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

### 3.3.3 Análise detalhada da estrutura composta pela placa de alumínio

Para a realização detalha dos gráficos 4.51 e 4.52 usou-se saltos de 2 em 2 nm na amostragem dos mesmos. O objetivo destes gráficos é mostrar em detalhe os momentos para a configuração da estrutura composta por nanoantenas de dielétrico e uma placa de metal de alumínio por baixo o momento que começa a existir TOE e qual o pico máximo da relação entre os campos incidentes e medidos.

Na figura 4.51, referente à configuração com comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 15 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3), a largura de banda onde existe TOE corresponde a 26 nm (largura de banda de 2004 a 2030 nm) com um pico de campo em 2016 nm para o valor de 1.03.

Na figura 4.52, referente à configuração com comprimento de  $\lambda/3$ , largura  $\lambda/3$ , abertura de  $\lambda/50$ , altura de  $\lambda/5$  e espessura do metal 10 nm para um agregado de 9 nanoantenas (3x3), a largura de banda onde existe TOE corresponde a 58 nm (largura de banda de 2070 a 2128 nm) com um pico de campo em 2100 nm para o valor de 1.067.

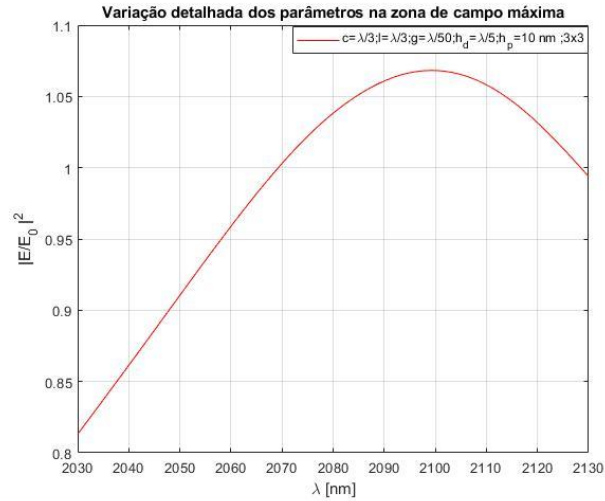


Figura 3.51 - Estudo da variação detalhada da estrutura com espessura da placa de metal de 10 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

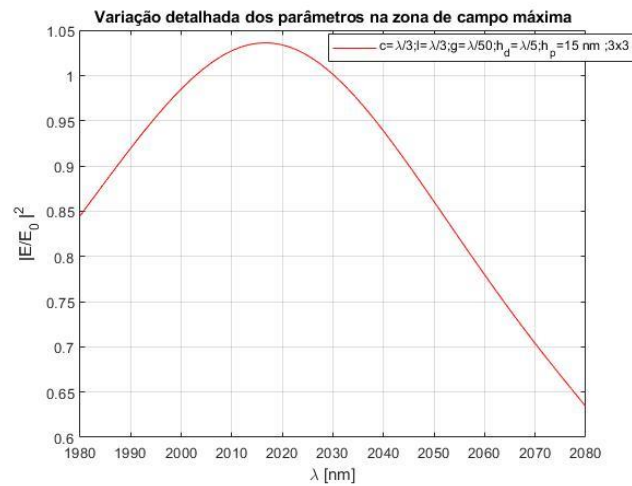


Figura 3.52 - Estudo da variação detalhada da estrutura com espessura da placa de metal de 25 nm para a estrutura constituinte por nanoantenas SiO<sub>2</sub> e placa de metal.

### 3.4 Estudo do agregado de 3 estruturas cada uma com 9 nanoantenas cada

Neste subcapítulo é apresentado o estudo de uma estrutura de 27 nanoantenas de metal de alumínio distribuídas por três camadas, cada uma delas com 9 nanoantenas cada como demonstrado na figura 4.53. Todos os valores dos parâmetros utilizados para dimensionar as nanoantenas são os que foram otimizados no capítulo 5. Na figura 4.53 encontra-se representado a distribuição dos polaritões com uma aglomeração bastante substancial, na zona das aberturas das nanoantenas.

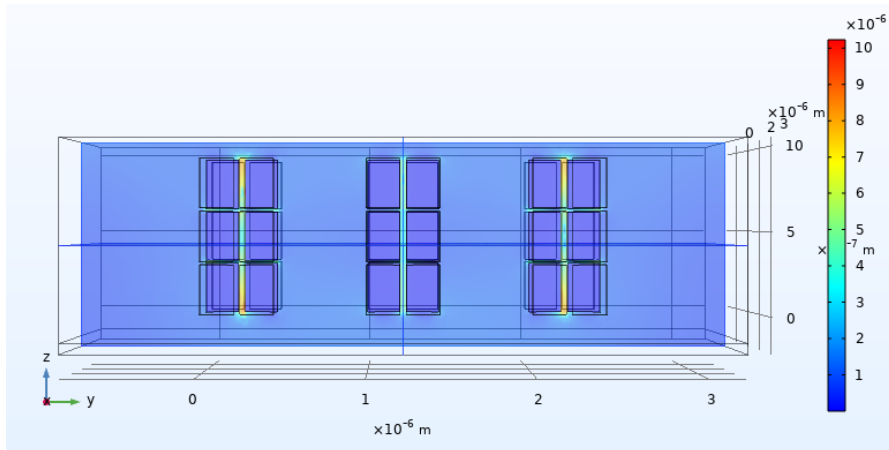


Figura 3.53 – Estrutura com agregado composto por 3x3 nanoantenas de Al utilizado para a simulação e estudo e distribuição dos polaritões para a estrutura composta por nanoantenas de Al quando excitado na parte superior da estrutura.

Na figura 4.54 faz-se o estudo da variação da distância entre os agregados de 9 nanoantenas cada. Concluiu-se que para os comprimentos de onda em estudo é possível obter para uma distância entre os agregados de 60 nm valores de amplificação aproximadamente de 1.9.

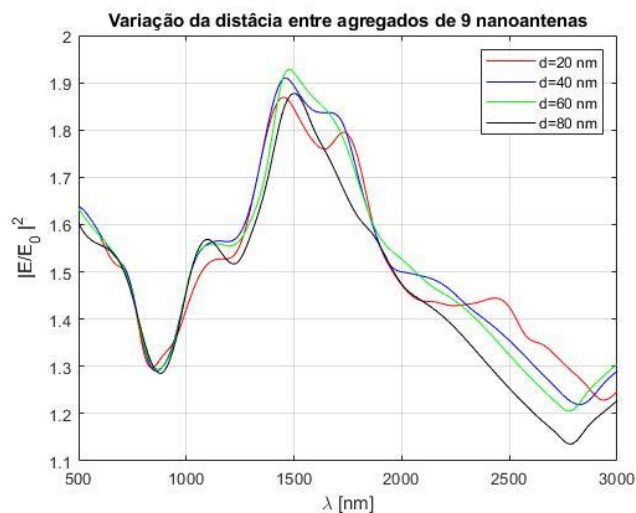


Figura 3.54 - Variação da distância entre agregados de nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de Al.

### 3.5 Conclusões da análise das estruturas estudadas

Depois da realização do estudo acerca da estrutura Ar-Nanoantena-Substrato, que termina na otimização e análise da variação da distância entre nanoantenas, chega-se à conclusão que para esta tipologia, o melhor metal a utilizar para a definição das nanoantenas Bowtie é o alumínio. Este é o que apresenta amplificações de campo maiores, tendo no final da otimização uma multiplicação do valor do campo elétrico incidente de quatro vezes.

De seguida realiza-se o estudo acerca da estrutura Dielétrico-Nanoantena-Substrato. No final da otimização do mesmo, constata-se que o melhor metal a utilizar é o ouro. Este é o que apresenta amplificações de campo maiores, tendo no final da otimização uma multiplicação do valor do campo elétrico normalizado de seis vezes.

Esta estrutura apresenta melhores resultados quer para o alumínio, quer para o ouro em relação à anterior estudada em 4.1. Para capítulos seguintes, usa-se a estrutura de alumínio, pois em termos computacionais é mais fácil de analisar e apresenta ampliações de campo elétrico incidente próximas da estrutura em ouro.

De seguida realiza-se o estudo onde se inverte a estrutura que é aplicada nos subcapítulos 4.1 e 4.2. Nesta estrutura tem-se as nanoantenas compostas por um dielétrico ( $\text{SiO}_2$ ) e uma placa metálica por baixo. No fim da análise desta estrutura e da variação dos parâmetros da mesma, chega-se à conclusão de que a placa metálica composta por ouro é a que apresenta os melhores resultados. Uma conclusão bastante interessante e que pode ter aplicações diversas em estudos futuros é que a espessura da placa está relacionada com a posição do pico de amplificação de campo elétrico incidente. Uma espessura menor está relacionada com o deslocamento do pico para comprimentos de onda incidentes maiores e vice-versa.

Por fim, ao analisar-se a estrutura apresentada no subcapítulo 4.4, figura 4.54, consegue obter valores de amplificação de campo na ordem das duas vezes para comprimentos de onda na banda dos 1400-1500 nm.

Quando as nanoantenas são de metal, as respostas das mesmas, face à incidência de um campo elétrico na estrutura, têm tendência a seguir os índices de refração do seu metal. Estes gráficos encontram-se no ANEXO A.

## 4. Difração através de uma nanoantena de fendas

Este capítulo tem como intuito fazer um estudo acerca da difração do campo elétrico através de nanoantenas de fendas na zona do IV e posteriormente comparar com as estruturas de nanoantenas Bowtie.

### 4.1 Estudo do dimensionamento da estrutura de nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício

A estrutura estudada, é constituída por fendas de SiO<sub>2</sub> rodeadas por um substrato de metal. O estudo encontra-se dividido da seguinte forma: a análise do raio ( $r$ ) das aberturas; a altura/profundidade ( $h$ ) das aberturas e a variação distância entre as aberturas.

A primeira análise de parâmetros passa pelo estudo da variação do raio das aberturas. Todos os outros valores serão mantidos constantes de forma a ser possível comparar os vários resultados obtidos. Considerou-se para a altura do dielétrico e do substrato uma espessura de 65 nm e de 600nm para a distância para as nanoantenas. O agregado utilizado é de 9 nanoantenas (3x3) com uma altura de  $\lambda/20$ .

Na segunda análise de parâmetros, variou-se a altura das nanoantenas. O raio das aberturas das nanoantenas considerados nesta análise foram os que apresentaram melhores resultados na primeira análise.

Para o presente estudo, apenas vai ser considerar o metal alumínio. Serve de comparação dos resultados os valores apresentados em [28]. O melhor desempenho neste estudo foi para as nanoantenas de ouro, o que foi verificado da mesma forma no capítulo 4. Obteve-se valores na ordem dos quatro a cinco vezes maior do campo normalizado e no capítulo anterior foi obtido para a estrutura dielétrico-nanoantenas-substrato com nanoantenas de ouro na ordem dos seis a sete vezes o campo normalizado.

#### 4.1.1 Estudo da variação do raio da abertura as nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício

A figura 5.1 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda do campo elétrico da onda incidente. O melhor resultado na estrutura com aberturas de SiO<sub>2</sub> e envolvente de alumínio é observado para um raio igual a  $\lambda/3$  com uma amplificação do campo elétrico na ordem de 1,6 vezes para comprimentos de onda compreendido no intervalo dos 1400 aos 1600 nm. Existe TOE e os valores estão de acordo com o estudo realizado em [28].

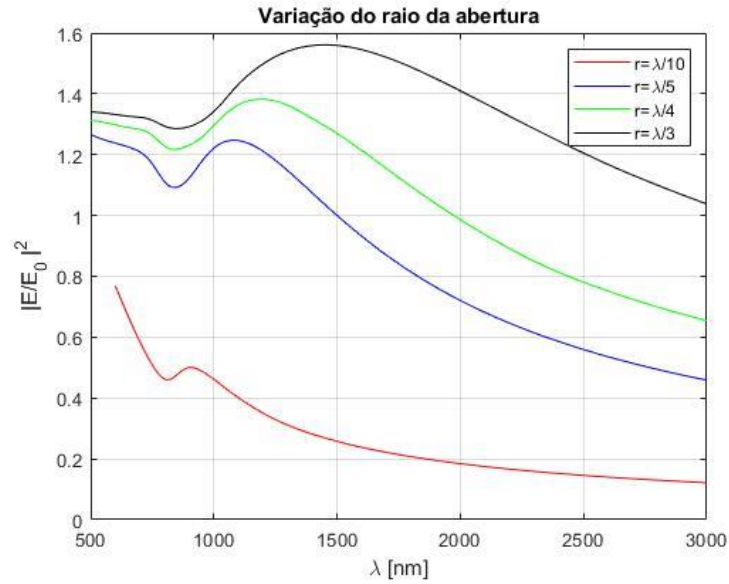


Figura 4.1 - Variação do raio da abertura com envolvente de alumínio e aberturas de SiO<sub>2</sub>.

#### 4.1.2 Estudo da variação da altura da abertura das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício

A figura 5.2 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para diversos valores da altura das aberturas das nanoantenas com envolvente de alumínio. O melhor resultado ocorre com aberturas de SiO<sub>2</sub> de altura igual a  $\lambda/30$  com a amplificação do campo elétrico em cerca de 1.6 vezes para comprimentos de onda compreendidos entre os 1400 e os 1500 nm.

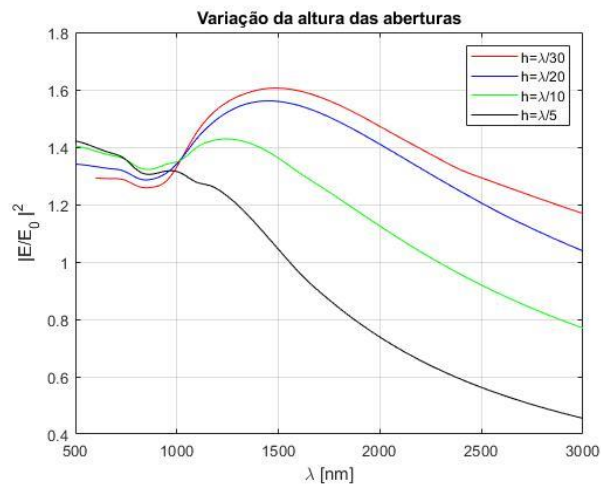


Figura 4.2 - Variação da altura da abertura com envolvente de alumínio e aberturas de SiO<sub>2</sub>.

#### 4.1.3 Estudo da variação das distâncias entre as aberturas das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício

A figura 5.3 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para diversos valores da distância entre as aberturas com envolvente de alumínio. O melhor resultado ocorre com a estrutura de aberturas de SiO<sub>2</sub> para uma distância entre as aberturas de 500 nm com uma amplificação do campo elétrico em cerca de 1.6 vezes na gama de comprimentos de onda entre os 1300 e os 1400 nm.

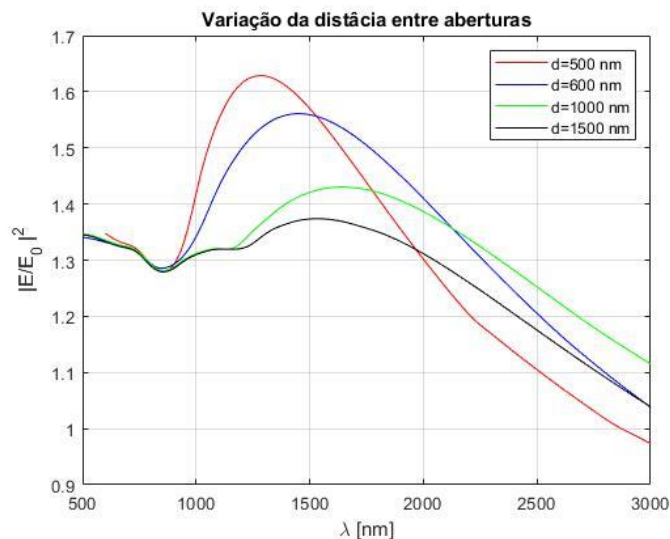


Figura 4.3 - Variação das distâncias entre aberturas com envolvente de alumínio e aberturas de SiO<sub>2</sub>.

## 4.2 Estudo do dimensionamento da estrutura com nanoantenas de aberturas de alumínio e substrato Ar

A estrutura analisada, é uma nanoantena com abertura de alumínio e envolvente e ar. O estudo realizado encontra-se dividido da seguinte forma: análise do raio (r) das aberturas; variação da altura/profundidade (h) das aberturas e a variação distância entre aberturas.

A primeira análise de parâmetros passa pela variação do raio das aberturas. Todos os outros parâmetros serão mantidos constantes de forma a poder haver uma comparação entre os resultados. Assumiu-se um valor de 65nm para a altura do dielétrico e do substrato de 600nm para a distância entre as nanoantenas. O agregado utilizado é de 9 nanoantenas (3x3) assumindo uma a altura de  $\lambda/20$ .

Na segunda análise de parâmetros haverá a variação das alturas das nanoantenas. O raio das aberturas das nanoantenas serão os que apresentaram melhores resultados na primeira análise.

### 4.2.1 Estudo da variação do raio da abertura das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de ar

Na figura 5.5 encontra-se representado o campo normalizado ao quadrado em função do comprimento de onda para diversos valores do raio das aberturas das nanoantenas de alumínio. O melhor resultado ocorre para a estrutura com um raio igual a  $\lambda/3$  com a amplificação do campo elétrico em cerca de 1.2 vezes para comprimentos de onda entre os 1300 e os 1400 nm.

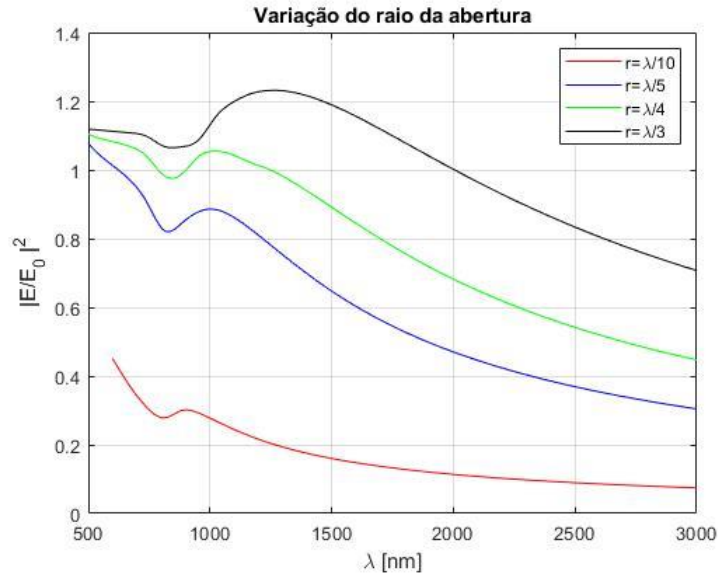


Figura 4.4 - Variação do raio da abertura com envoltório de alumínio com envoltório de alumínio e aberturas de ar.

#### 4.2.2 Estudo da variação da altura das aberturas das nanoantenas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício

A figura 5.6 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente para diversos valores de variação. O melhor resultado ocorre para uma estrutura com aberturas de ar de altura igual a  $\lambda/30$  com a amplificação do campo elétrico em cerca de 1.3 vezes para comprimentos de onda de 1300-1400 nm.

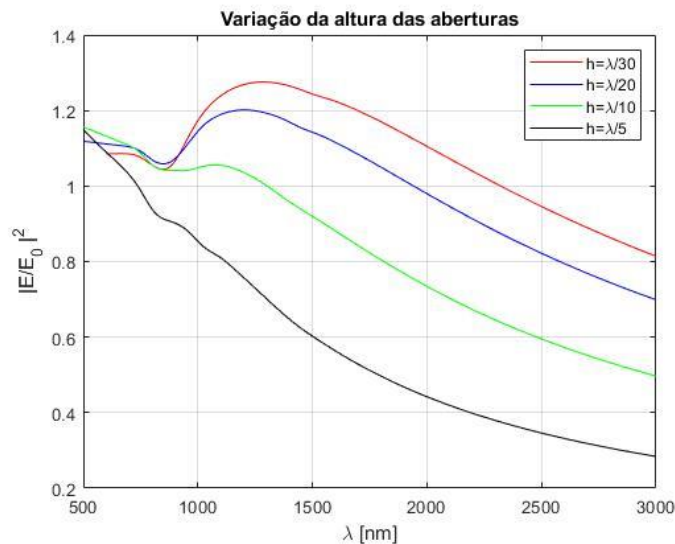


Figura 4.5 - Variação da altura das aberturas com envoltório de alumínio e aberturas de ar.

#### 4.2.3 Estudo da variação da distância entre as aberturas para a estrutura composta por nanoantenas de fendas e substrato de dióxido de silício

A figura 5.7 relaciona o quadrado do campo normalizado com a variação do comprimento de onda incidente e a variação do número de nanoantenas das aberturas de alumínio. O melhor resultado ocorre para uma distância entre as aberturas igual a 500 nm com a amplificação do campo elétrico em cerca de 1.35 vezes para comprimentos de onda de 1200-1300 nm.

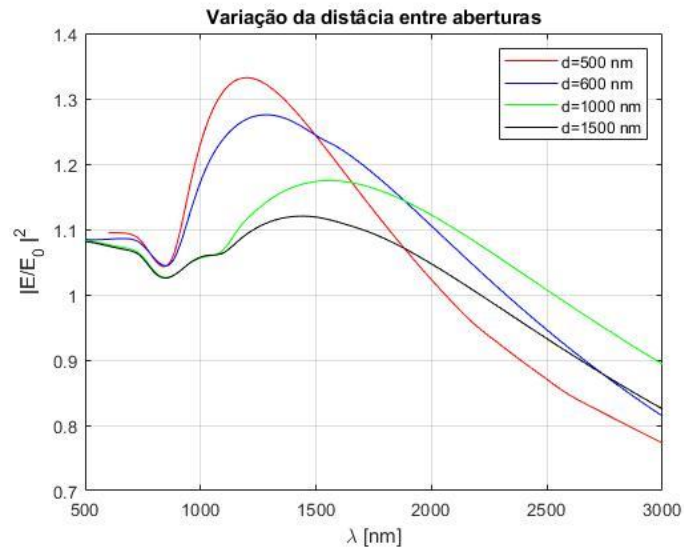


Figura 4.6 - Variação das distâncias entre aberturas com envolvente de alumínio com envolvente de alumínio e aberturas de ar.



## 5. Difração por uma nanoantena Bowtie com a primeira camada de pele

Devido ao facto de as camadas da pele serem muito profundas em relação à estrutura da nanoantena utilizada apenas é possível realizar o estudo na primeira camada da pele. Foram utilizadas duas estruturas para fazer esta análise. Uma com as nanoantenas de metal (Alumínio) e outra com as nanoantenas dielétricas e uma placa de metal (Ouro) por baixo.

O objetivo neste capítulo é verificar se existe TOE para um determinado comprimento de onda ao longo da camada de pele. Para a primeira estrutura (nanoantenas de metal de alumínio) foi escolhido um comprimento de onda de 1112 nm porque foi o que obteve melhores resultados para esta tipologia de estrutura apresentada no capítulo 5; para a segunda estrutura, (nanoantenas dielétricas com placa de metal de ouro) foi utilizada o comprimento de onda de 2153 nm. Este foi selecionado pela mesma razão do anterior.

É de realçar que se está a considerar que a camada de pele é homogénea caracterizada pelo índice de refração que será apresentado mais à frente.

Neste capítulo, todas as figuras que contém gráficos relacionam o campo normalizado com a profundidade do estrato córneo para um determinado comprimento de onda.

### 5.1 Estudo da estrutura de nanoantenas de alumínio e envolvente de dióxido de silício ao longo da primeira camada da pele

Nesta estrutura podemos verificar o fenómeno da TOE até aos 5000 nm de profundidade da camada, como se pode observar na figura 7.1. No início da camada a amplificação do campo é muito maior que no final. Na figura 7.2 podemos ver o comportamento da variação da amplificação do campo nos primeiros 50 nm da camada. Sendo esta máxima no início com o valor aproximado de 8.7.

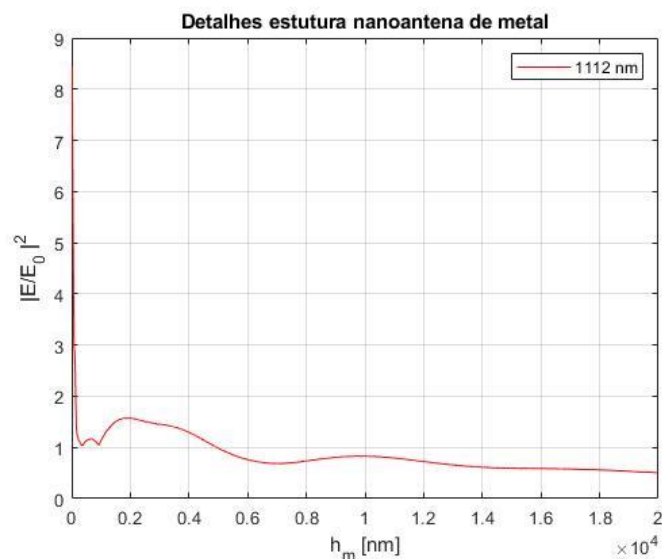


Figura 5.1 - Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de alumínio-estrato córneo.

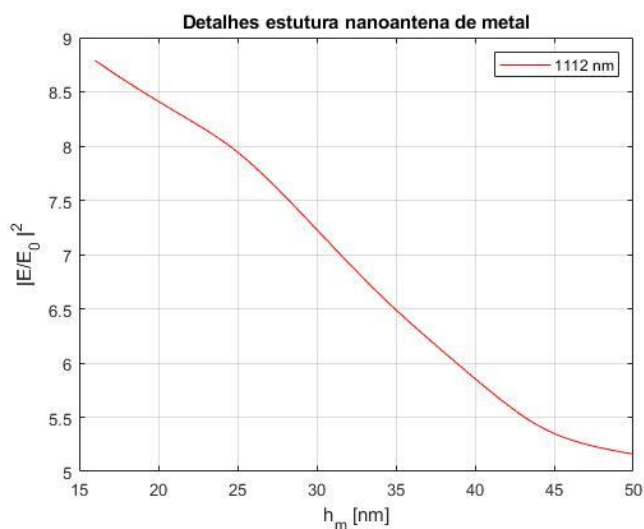


Figura 5.2 - Detalhe entre a profundidade 15 a 50 nm para variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de alumínio-estrato córneo.

Com estes resultados podemos verificar que existe TOE até uma profundidade de 4940 nm. Depois dessa profundidade o valor do campo elétrico incidente é maior que o medido a meio da profundidade. Este resultado vai e encontro ao esperado, uma vez que, à medida que se percorre a camada da pele a sua profundidade da pele aumenta.

## 5.2 Estudo da estrutura de nanoantenas de dióxido de Silício e placa de ouro ao longo da primeira camada da pele

Nesta estrutura pode-se verificar o fenómeno da TOE em para determinadas profundidades da camada de pele, como se pode observar na figura 7.3. Logo a seguir à nanoantena, existe o fenómeno de TOE mais acentuado, fenómeno que se repete para outros valores de profundidade da pela, mas com valores de TOE pouco superiores a 1. Na figura 7.4 pode-se verificar a distribuição do campo ao longo da camada de pele. Como se pode observar, o campo apresenta uma variação periódica ao longo da camada de pele.

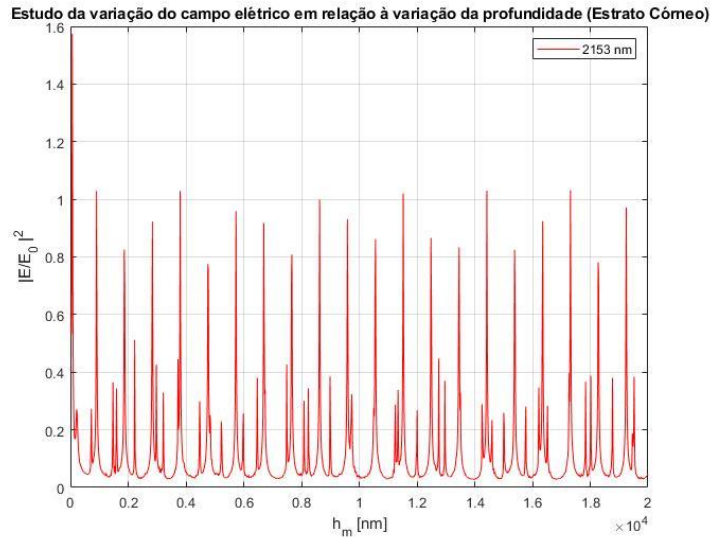


Figura 5.3 - Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

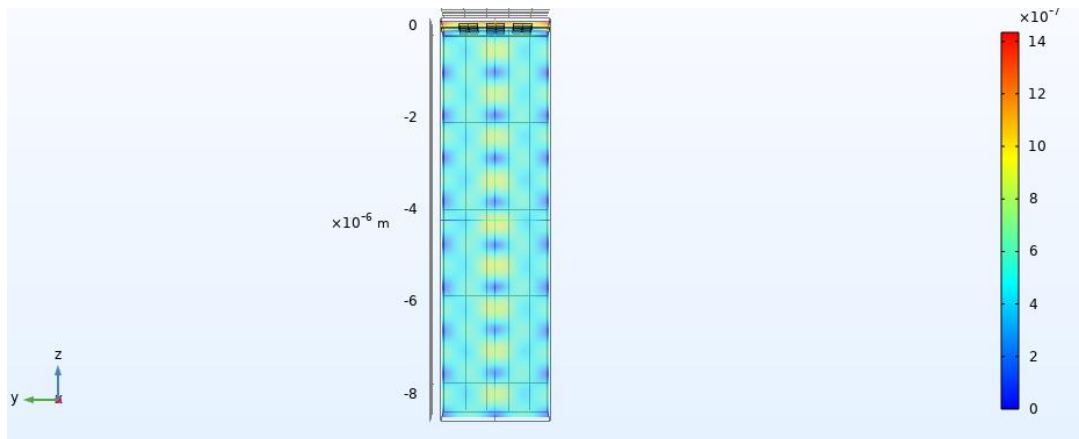


Figura 5.4 - Distribuição do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

De forma a verificar que existem profundidades na camada na figura 7.3 que apresentam TOE realizou-se uma pesquisa mais aprofundada para em certos valores de profundidade onde se fez um varrimento ao longo da profundidade utilizando um passo mais apertado (de 2nm em 2nm) de forma a verificar se existia TOE. Da figura 7.5 até à figura 7.12 é realizado esse estudo. E pode-se verificar que existem zonas onde existe TOE. Sendo essa mais evidenciada no início da camada entre os 30 nm e os 80 nm.

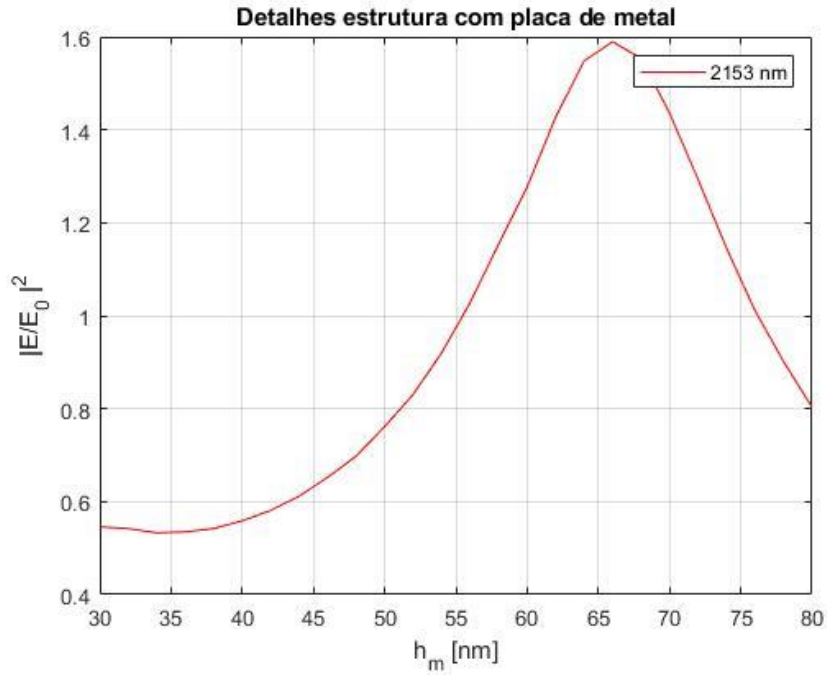


Figura 5.5 – Detalhe entre a profundidade 30 e 80 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

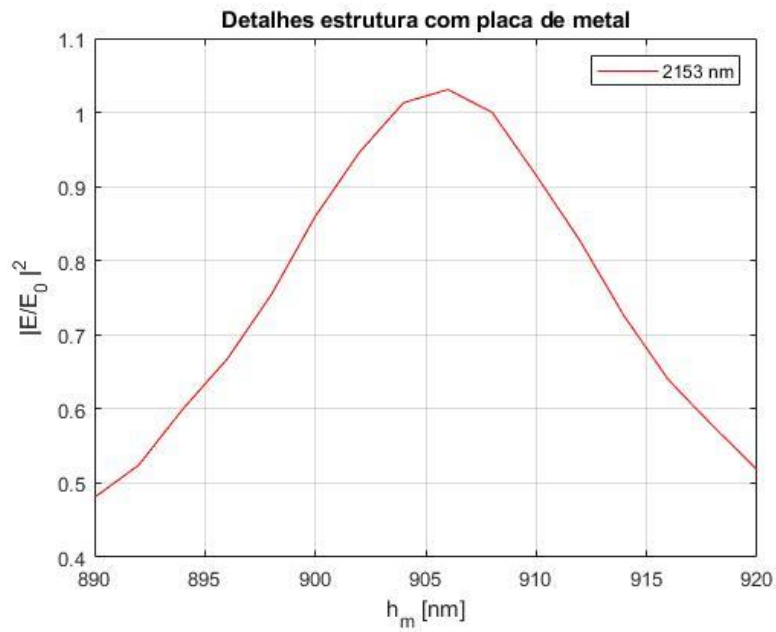


Figura 5.6 - Detalhe entre a profundidade 890 e 920 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

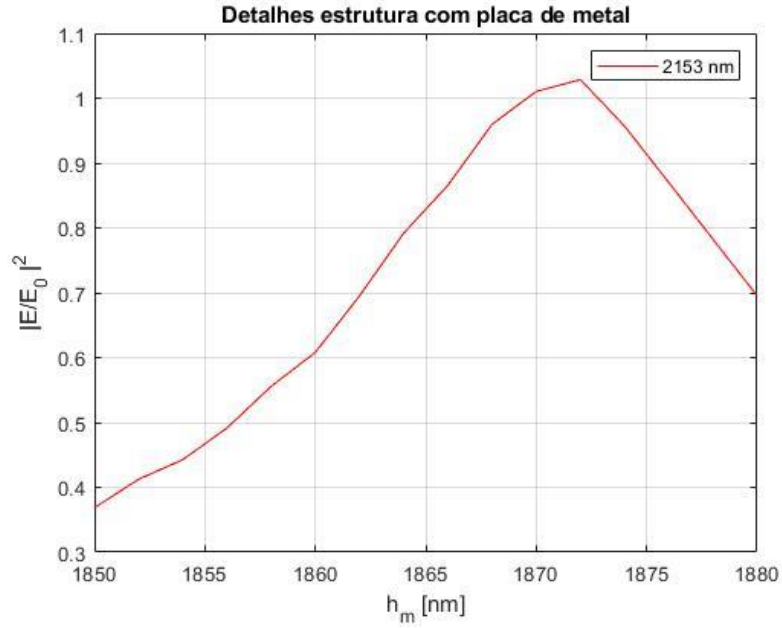


Figura 5.7 - Detalhe entre a profundidade 1850 e 1880 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

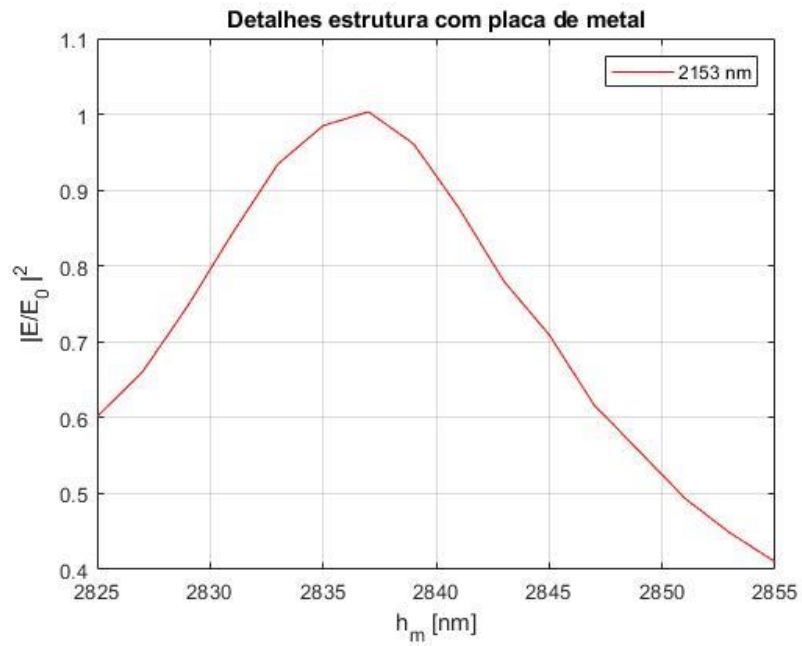


Figura 5.8 - Detalhe entre a profundidade 2825 e 2855 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

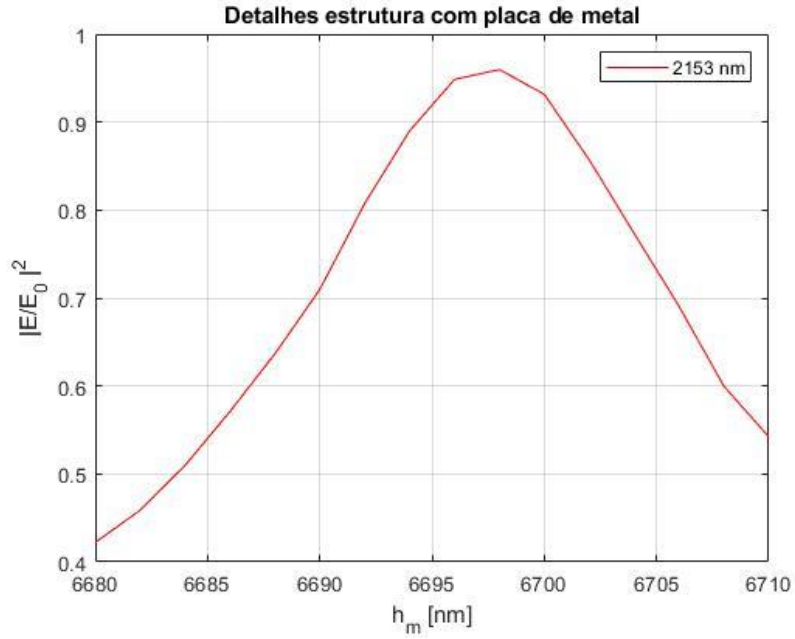


Figura 5.9 - Detalhe entre a profundidade 6680 e 6710 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

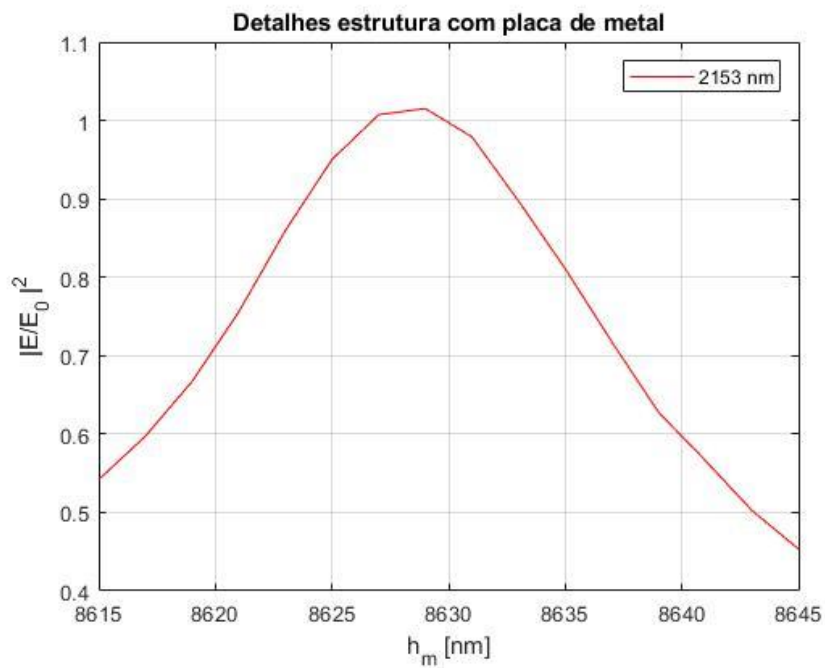


Figura 5.10 - Detalhe entre a profundidade 8615 e 8645 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

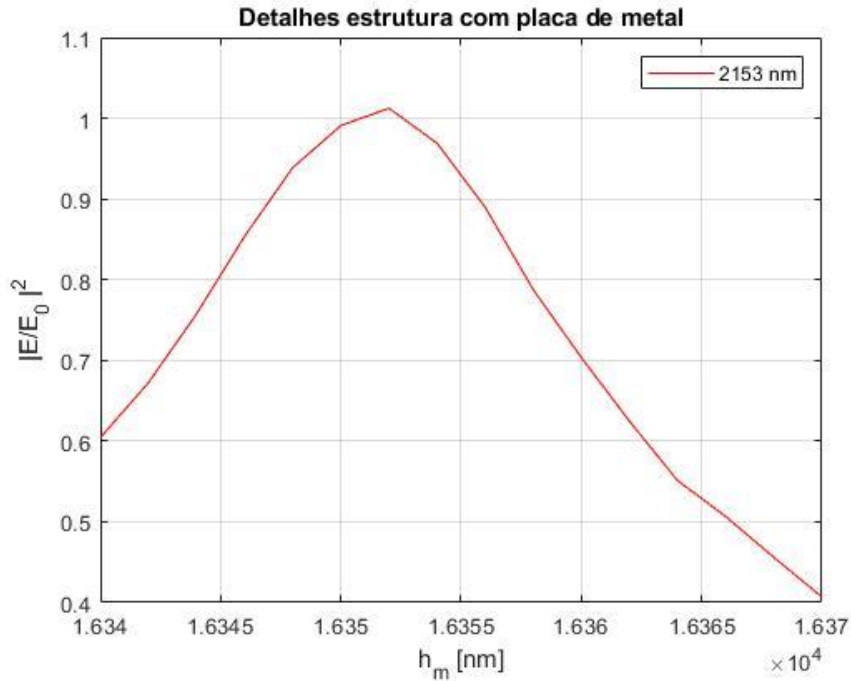


Figura 5.11 - Detalhe entre a profundidade 16340 e 16370 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

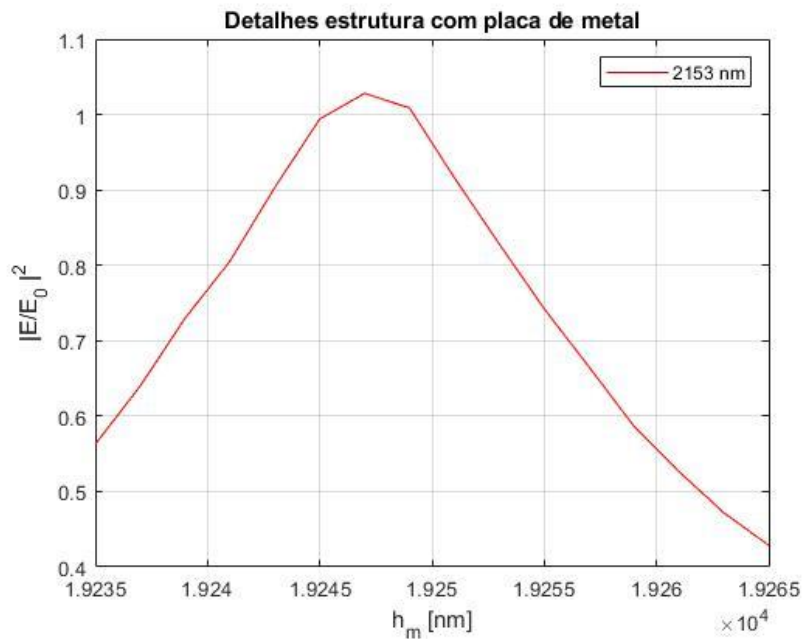


Figura 5.12 - Detalhe entre a profundidade 19235 e 19265 nm para Variação do campo ao longo da 1ª camada da pele (Estrato Córneo) para a estrutura composta por dielétrico-nanoantena de dióxido de silício-placa metálica de ouro-estrato córneo.

### 5.3 Estudo da estrutura agregado de 3 estruturas cada uma com 9 nanoantenas cada ao longo da primeira camada da pele

Este subcapítulo tem como finalidade estudar a possibilidade da estrutura desenvolvida e estudada no subcapítulo 4.4 apresentar TOE ao longo da primeira camada da pele.

A figura 7.13 demonstra o estudo em relação à variação da profundidade da primeira camada de pele (Estrato Córneo). O valor mais alto é aproximadamente de 1.8 para a profundidade de 3800 nm. Com esta estrutura é possível observar TOE até aos 9500 nm de profundidade da camada de pele.

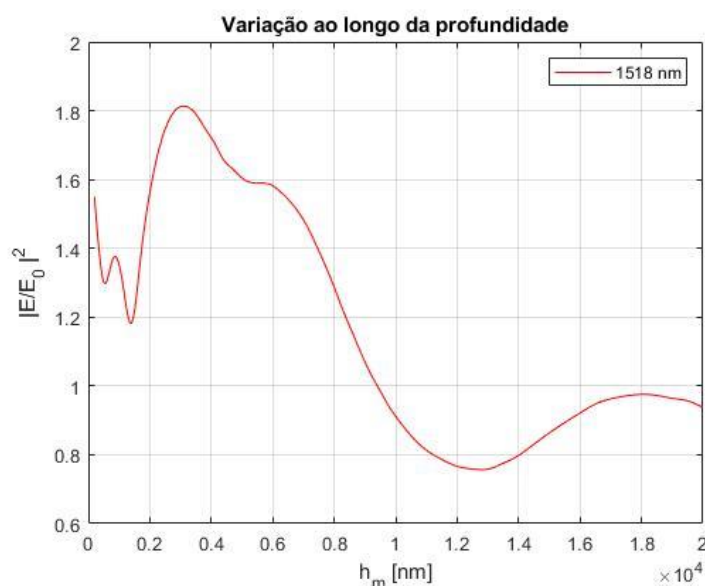


Figura 5.13 – Estudo da variação do campo incidente com o campo medido ao longo da camada de pele (Estrato Córneo) para a estrutura 3x3x3 com nanoantenas de alumínio.

## 5.4 Conclusões da análise das estruturas expostas à primeira camada da pele

A primeira estrutura a ser estudada com a inclusão da primeira camada da pele (20  $\mu\text{m}$  de profundidade), foi constituída por Dielétrico-Nanoantena-Substrato, onde o substrato é a própria camada. Esta estrutura apresentou uma descida do campo ao longo da profundidade da camada. No início da mesma, observou-se uma amplificação do módulo do campo normalizado de 8.5 vezes mantendo a existência de TOE até cerca dos 4940 nm de profundidade. A partir dessa profundidade deixa de haver TOE e conseqüente amplificação do campo.

Na segunda estrutura analisada; nanoantenas de SiO<sub>2</sub> e uma placa de ouro, observa-se a existência de TOE ao longo da profundidade de pele de forma periódica. A amplificação não apresenta valores tão altos como a estudada anteriormente, mas apresenta características interessantes do ponto de vista da detecção de TEO ao longo da camada da pele.

Por fim, analisou-se o comportamento da estrutura com 27 nanoantenas, separadas por 3 camadas de 9 nanoantenas cada. Esta estrutura não apresenta os melhores resultados, observando-se profundidades da camada de pele onde ocorre TOE (1.8 vezes de amplificação). Com esta estrutura consegue-se ter TOE até os 9500 nm. Assim existe um aumento de quase duas vezes em relação à largura de banda com TOE em relação à estrutura com apenas 3x3 nanoantenas embora o módulo do campo elétrico normalizado seja menor.

## 6. Influência da temperatura e da velocidade do sangue na estrutura constituída por nanoantenas de alumínio e dióxido de silício

De forma a conseguir estudar a influência da temperatura na estrutura é necessário calcular o novo índice de refração tendo em conta o efeito da temperatura. Através da figura 8.1 é possível obter o coeficiente de absorção para uma determinada temperatura.

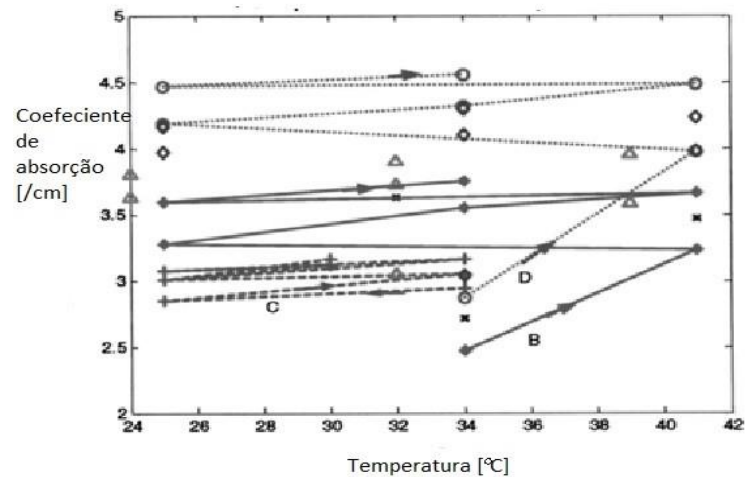


Figura 6.1 – Gráfico que relaciona temperatura com o coeficiente de absorção [71].

Tendo em conta que:

$$k = \frac{\alpha_T \lambda_0}{4\pi} \quad (9.01)$$

É possível determinar os valores componente real do índice de refração[72] que se encontram na tabela 2.

Tabela 2 - variação da temperatura, coeficiente de absorção, componente real e imaginária do índice de refração.

T [°C]	$\alpha$ [1/cm]	$k$	$n$	$n-ik$
25	3.25	1.506E-06	1.364	1.364-i1.506E-06
34	2.5	1.15846E-06	1.364	1.364-i1.15846E-06
41	3.2	1.48283E-06	1.366	1.366-i1.48283E-06

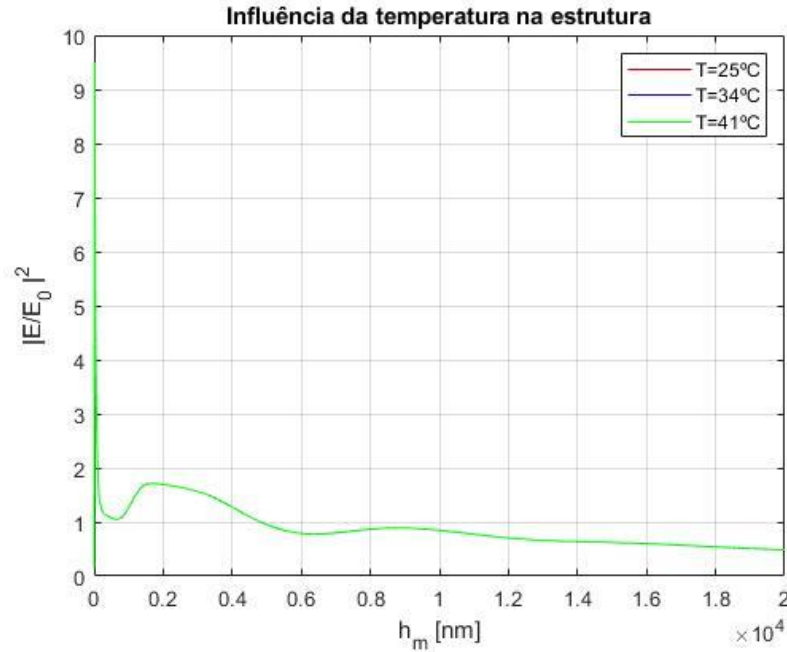


Figura 6.2 – Influência da temperatura da estrutura composta por dielétrico-nanoantenas de alumínio-estrato córneo.

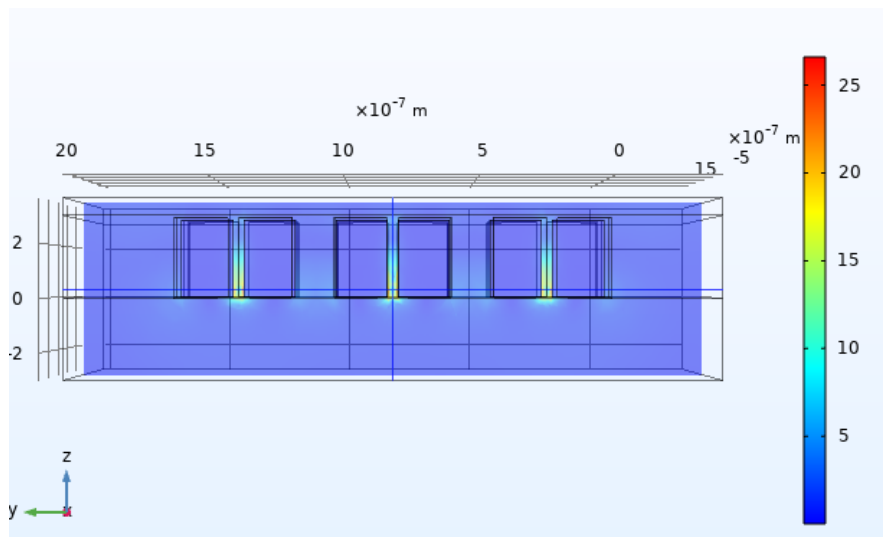


Figura 6.3 - Distribuição dos polaritões quando se aplica na pele 25°C da estrutura composta por dielétrico-nanoantenas de alumínio-estrato córneo.

Após o cálculo do índice de refração em função da temperatura foi possível analisar a sua influência na propagação ao campo elétrico ao longo da estrutura nanoantena mais pele como se pode observar no gráfico apresentado na figura 8.2. Ao analisar o gráfico da figura 8.2 podemos verificar que as discrepâncias são poucas entre as três temperaturas. Os valores obtidos são bastante semelhantes uma vez que o índice de refração possui valores muito próximo tanto na componente imaginária como na componente real.

De forma a analisar a influência da velocidade do sangue usou-se a seguinte metodologia [73]:

1. Aplicação da estrutura com uma análise do fluxo, dividindo a camada da pele em sete partes de forma a retirar o valor médio da pressão;

2. De seguida, retirou-se os valores médios da pressão em cada camada. Segundo Weiss [73], existe uma associação direta entre o índice de refração e a pressão.;
3. Por fim, usa-se os valores do índice de refração na simulação estudada no capítulo 6 de forma a caracterizar a primeira camada da pele e obter a variação da relação dos campos elétricos incidentes e medidos.

As pressões sistólicas e diastólicas para um jovem adulto são de 130/80 mmHg, correspondendo estes valores a de 17331.6 Pa e 10665.6 Pa [74].

De forma a conseguir realizar os estudos em questão, é necessário definir os valores da densidade ( $kg/m^3$ ) e da viscosidade dinâmica ( $Pa \cdot s$ ) do dióxido de silício, do alumínio e da primeira camada da pele. O dióxido de silício tem como valores de densidade  $2410 [kg/m^3]$  e de viscosidade  $0.7 Pa \cdot s$ . O alumínio tem como valores de densidade  $2702 [kg/m^3]$  e de viscosidade  $0.001 Pa \cdot s$ . Por fim, a primeira camada da pele tem como valores de densidade  $1040 [kg/m^3]$  e de viscosidade  $85.37 Pa \cdot s$ . [75], [76].

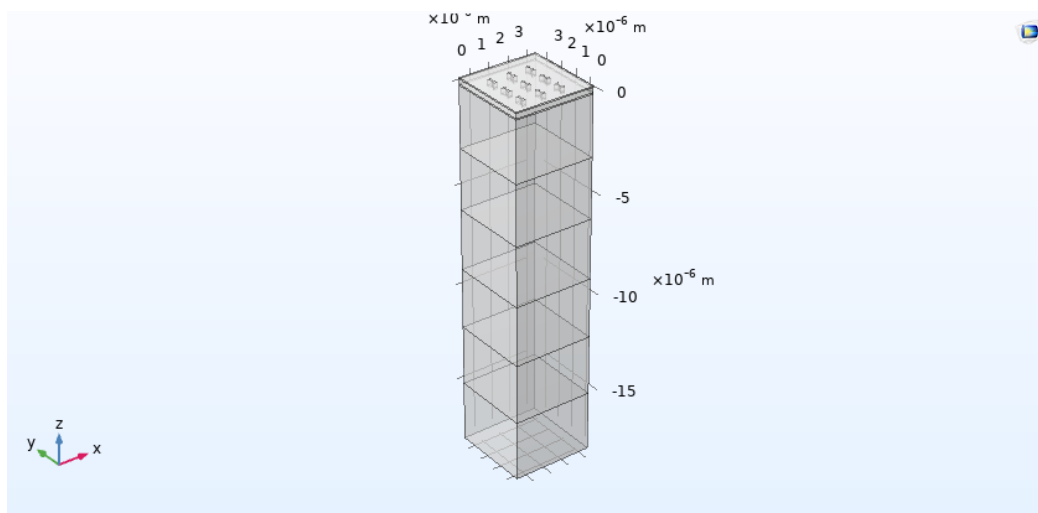


Figura 6.4 - Estudo segmentado da pressão medida em cada uma das caixas de forma a fazer uma análise da pressão e associação com o respetivo índice de refração.

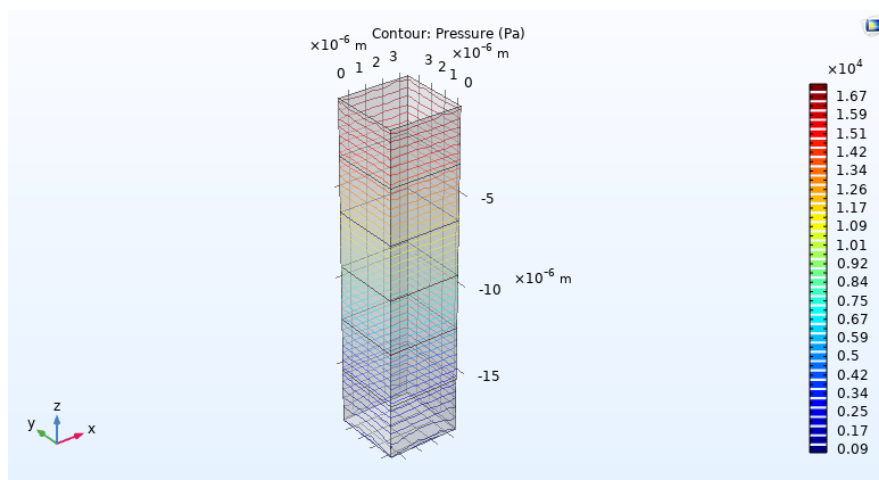


Figura 6.5 – Variação da pressão aos longo das camadas em Pa.

Seguidamente, fez-se a associação entre os valores médios da pressão em cada camada e o índice de refração correspondente. Os valores médios de cada camada de acordo com a figura 8.4 são: 15.1 KPa, 12.6 KPa, 9.2 KPa, 7.5 KPa, 4.2 KPa e 1.7 KPa, respetivamente.

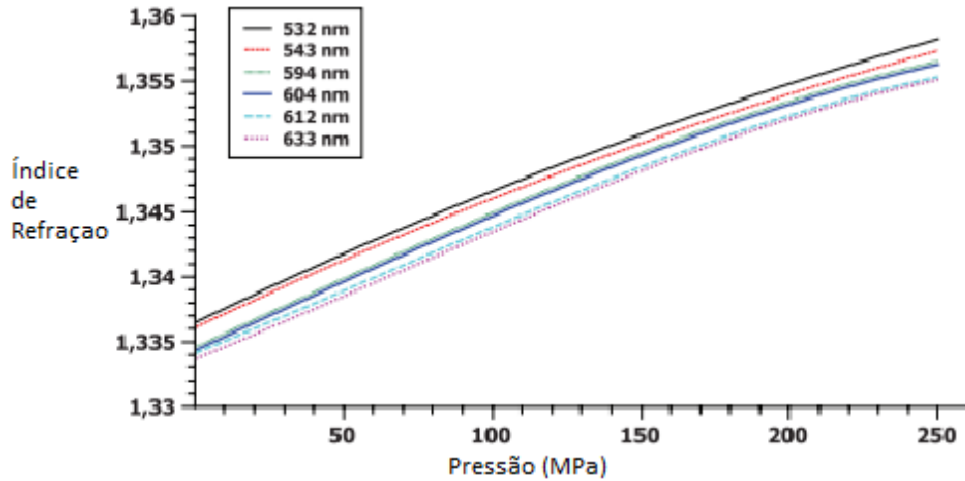


Figura 6.6 – Variação do índice de refração dependendo da variação da pressão[77].

Depois de se realizar a simulação para um comprimento de onda otimizado para a estrutura de nanoantenas (1100 nm) observou-se uma amplificação de campo na ordem de 0.94643. Ora, antes da influência do fluxo do sangue, foi obtido uma amplificação do campo na ordem dos 0.5 o que demonstra uma melhoria embora que ainda não haja TOE.

## Conclusão

A dissertação apresentada teve como principal objetivo o estudo e simulação do comportamento de uma nanoantena ótica integrada num biossensor de forma a aumentar a sua sensibilidade. Neste capítulo é apresentado um resumo geral dos objetivos da dissertação que foram cumpridos, bem como das conclusões que foram sendo obtidas ao longo da dissertação. Todas as simulações efetuadas ao longo deste trabalho foram realizadas com recurso ao programa Matlab, para efetuar toda a componente gráfica, e através do programa COMSOL Multiphysics®. Neste capítulo serão ainda apresentadas as contribuições originais desta dissertação, bem como algumas propostas de trabalho futuro.

A realização desta dissertação é composta por vários capítulos. O primeiro capítulo incluía introdução e a estrutura da dissertação. No segundo capítulo é apresentado uma breve introdução histórica do campo próximo e as suas aplicações, aplicações estas baseadas nos fenómenos óticos importantes para os sensores e biossensores. No terceiro capítulo efetuou-se o estudo dos plasmões polaritões superficiais, que são determinantes na transmissão ótica extraordinária. O estudo do comportamento dos metais nas frequências óticas é fundamental para a propagação dos plasmões superficiais, que influenciam a propagação da luz em estruturas com dimensões inferiores ao comprimento de onda. No quarto capítulo, foram apresentados os resultados da avaliação dos parâmetros das estruturas investigadas. Neste caso foram consideradas estruturas usando nanoantenas Bowtie, em que se estudou a influência dos diferentes metais que podem ser usados na sua construção. No quinto capítulo efetuou-se a comparação do estudo realizado no capítulo quatro com alguns resultados de nanoantenas com fendas circulares, tendo-se chegado à conclusão de que a difração com a tipologia de nanoantenas Bowtie apresenta maior amplificação do campo elétrico do que a estrutura com fendas circulares.

No capítulo seis, apresentou-se toda as componentes acerca da pele e as suas propriedades relevantes para o estudo, entre elas, os índices de refração caracterizadores das diferentes camadas da pele, coeficientes de absorção, entre outros.

No capítulo sete, estudou-se a aplicação da estrutura à primeira camada da pele, através de duas estruturas anteriormente estudadas. A primeira com as nanoantenas de alumínio e a segunda com as nanoantenas dielétricas com uma placa de ouro por baixo. As duas apresentam TOE embora que o primeiro estudo apresentou maiores valores de amplificação do campo elétrico em relação ao campo incidente. A segunda opção é muito interessante, uma vez que, conseguimos ter um aumento relativamente periódico ao longo da camada de pele, embora a amplificação seja muito menor do que na primeira alternativa. No capítulo oito, estudou-se a aplicação de um agregado com 27 nanoantenas (3x3x3), distribuídas por 3 camadas de 9 nanoantenas umas por baixo das outras. A configuração que revelou melhores resultados, conseguindo-se para certos comprimentos de onda incidentes amplificações na ordem das 8 vezes, sendo a estrutura com as nanoantenas de ouro e a envolvente de dióxido de silício. De seguida estudou-se a influência da temperatura e da velocidade do sangue no sistema.

De seguida, foi analisada a influência da temperatura e da velocidade do sangue no sistema. A influência da temperatura não é muito considerável, uma vez que origina pequenas alterações ao nível do índice de refração. Quanto à velocidade do sangue, altera muito o campo medido na parte inferior da camada cutânea, mas mesmo assim, não há verificação TOE.

A realização desta dissertação de mestrado, prova que, os agregados periódicos de fendas com dimensões menores que o comprimento de onda, permitem manipular a luz levando à ocorrência da transmissão ótica extraordinária, tal como foi previsto por Ebbesen em [5]. Este fenómeno permite melhorar o desempenho dos sensores. Em suma, com a realização desta dissertação adquiriu-se um vasto leque de conhecimentos teóricos sobre os fenómenos óticos em agregados periódicos de fendas menores que o comprimento de onda, importantes para a ocorrência da transmissão ótica extraordinária e principalmente de simulação em 2D e 3D no COMSOL Multiphysics® e no Mathematica, cujo papel será fulcral num futuro profissional militar.

Este estudo teve algumas limitações principalmente devido à necessidade de recursos computacionais. Para todas as estruturas compostas com ouro era muito difícil utilizar o COMSOL Multiphysics®, principalmente para comprimentos de onda abaixo de 1000 nm. Outra limitação foi a análise aprofundada apenas da primeira camada da pele. Devido à estrutura ser muito menor que a profundidades das restantes camadas, tornou a sua simulação pouco viável uma vez que se tentou usar os tamanhos já estudados da espessura das camadas da pele.

Devido à inovação do assunto em estudo e da sua até então pouca aplicação no EP as perspetivas de trabalho futuro são muitas. Entres elas existem algumas que se destacam: fabricação e testagem da estrutura em laboratório produzida de forma a verificar todo o trabalho de simulação e teórico realizado no presente trabalho; aplicação da fabricação da estrutura no Homem.

## Referências bibliográficas

- [1] “Downloaded From: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 06/08/2013 Terms of Use: <http://spiedl.org/terms>,” 2003. [Online]. Available: <http://spiedl.org/terms>
- [2] R. A. Andrews, A. F. Milton, and T. G. Giallorenzi, “Military Applications of Fiber Optics and Integrated Optics,” *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 21, no. 12, pp. 763–769, 1973, doi: 10.1109/TMTT.1973.1128129.
- [3] S. Santarelli *et al.*, “Military antenna design using simple and competent genetic algorithms,” *Math Comput Model*, vol. 43, no. 9–10, pp. 990–1022, May 2006, doi: 10.1016/j.mcm.2005.05.024.
- [4] H. Lee, J. Tak, and J. Choi, “Wearable Antenna Integrated into Military Berets for Indoor/Outdoor Positioning System,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 16, pp. 1919–1922, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2688400.
- [5] J. C. Juarez, A. Dwivedi, A. R. Hammons, S. D. Jones, V. Weerackody, and R. A. Nichols, “Free-Space Optical Communications for Next-generation Military Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 11, pp. 46–51, 2006, doi: 10.1109/MCOM.2006.248164.
- [6] H. Xin, B. Namgung, and L. P. Lee, “Nanoplasmonic optical antennas for life sciences and medicine,” *Nature Reviews Materials*, vol. 3, no. 8. Nature Publishing Group, pp. 228–243, Aug. 01, 2018. doi: 10.1038/s41578-018-0033-8.
- [7] N. A. Mohd Said, V. Ogurtsov, and G. Herzog, “ELECTROCHEMICAL BIOSENSOR BASED ON MICROFABRICATED ELECTRODE ARRAYS FOR LIFE SCIENCES APPLICATIONS,” 2014. doi: 10.13140/RG.2.2.11066.49603.
- [8] C. Andrade, M. Danielly, T. Faulin, V. Hering, and D. S. Parra Abdall, “Biosensors for detection of Low-Density Lipoprotein and its modified forms,” in *Biosensors for Health, Environment and Biosecurity*, InTech, 2011. doi: 10.5772/19938.
- [9] P. Singh, “SPR Biosensors: Historical Perspectives and Current Challenges,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 229. Elsevier, pp. 110–130, Jun. 28, 2016. doi: 10.1016/j.snb.2016.01.118.
- [10] A. Sapra, A. Malik, and P. Bhandari, “Vital Sign Assessment.” StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), 2021. [Online]. Available: <http://europepmc.org/books/NBK553213>
- [11] I. v Meglinski and S. J. Matcher, “Quantitative assessment of skin layers absorption and skin reflectance spectra simulation in the visible and near-infrared spectral regions,” 2002. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0967-3334/23/4/312>
- [12] J. Kim, A. S. Campbell, B. E.-F. de Ávila, and J. Wang, “Wearable biosensors for healthcare monitoring,” *Nat Biotechnol*, vol. 37, no. 4, pp. 389–406, 2019, doi: 10.1038/s41587-019-0045-y.
- [13] L. Novotny, “From near-field optics to optical antennas,” *Phys Today*, vol. 64, no. 7, pp. 47–52, Jul. 2011, doi: 10.1063/PT.3.1167.
- [14] R. D. F. R. Gomes, M. J. Martins, A. Baptista, and J. P. N. Torres, “Study of a nano optical antenna for intersatellite communications,” *Opt Quantum Electron*, vol. 49, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.1007/s11082-017-0966-y.
- [15] R. Gordon, “Commentary: Extraordinary optical transmission for surface-plasmon-resonance-based sensing,” *J Nanophotonics*, vol. 2, no. 1, p. 020305, Oct. 2008, doi: 10.1117/1.3013629.
- [16] R. Gordon, D. Sinton, K. L. Kavanagh, and A. G. Brolo, “A new generation of sensors based on extraordinary optical transmission,” *Acc Chem Res*, vol. 41, no. 8, pp. 1049–1057, Aug. 2008, doi: 10.1021/ar800074d.

- [17] Y. Gu, L. Zhang, J. K. W. Yang, S. P. Yeo, and C. W. Qiu, "Color generation via subwavelength plasmonic nanostructures," *Nanoscale*, vol. 7, no. 15. Royal Society of Chemistry, pp. 6409–6419, Apr. 21, 2015. doi: 10.1039/c5nr00578g.
- [18] L. Novotny and N. van Hulst, "Antennas for light," *Nat Photonics*, vol. 5, no. 2, pp. 83–90, Feb. 2011, doi: 10.1038/nphoton.2010.237.
- [19] A. G. Brolo, R. Gordon, B. Leathem, and K. L. Kavanagh, "Surface plasmon sensor based on the enhanced light transmission through arrays of nanoholes in gold films," *Langmuir*, vol. 20, no. 12, pp. 4813–4815, Jun. 2004, doi: 10.1021/la0493621.
- [20] S. Unser, I. Bruzas, J. He, and L. Saglé, "Localized surface plasmon resonance biosensing: Current challenges and approaches," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 7. MDPI AG, pp. 15684–15716, Jul. 02, 2015. doi: 10.3390/s150715684.
- [21] H. Xin, B. Namgung, and L. P. Lee, "Nanoplasmonic optical antennas for life sciences and medicine," *Nature Reviews Materials*, vol. 3, no. 8. Nature Publishing Group, pp. 228–243, Aug. 01, 2018. doi: 10.1038/s41578-018-0033-8.
- [22] M. Manjare, F. Wang, S. G. Rodrigo, and H. Harutyunyan, "Exposing optical near fields of plasmonic patch nanoantennas," *Appl Phys Lett*, vol. 111, no. 22, Nov. 2017, doi: 10.1063/1.5001199.
- [23] I. S. Maksymov, I. Staude, A. E. Miroshnichenko, and Y. S. Kivshar, "Optical yagi-uda nanoantennas," *Nanophotonics*, vol. 1, no. 1, pp. 65–81, Jul. 2012, doi: 10.1515/nanoph-2012-0005.
- [24] V. Giannini, A. I. Fernández-Domínguez, S. C. Heck, and S. A. Maier, "Plasmonic nanoantennas: Fundamentals and their use in controlling the radiative properties of nanoemitters," *Chemical Reviews*, vol. 111, no. 6. pp. 3888–3912, Jun. 08, 2011. doi: 10.1021/cr1002672.
- [25] N. Liu *et al.*, "Individual nanoantennas loaded with three-dimensional optical nanocircuits," *Nano Lett*, vol. 13, no. 1, pp. 142–147, Jan. 2013, doi: 10.1021/nl303689c.
- [26] P. Kühler, E. M. Roller, R. Schreiber, T. Liedl, T. Lohmüller, and J. Feldmann, "Plasmonic DNA-origami nanoantennas for surface-enhanced Raman spectroscopy," *Nano Lett*, vol. 14, no. 5, pp. 2914–2919, May 2014, doi: 10.1021/nl5009635.
- [27] M. S. Sharawi, D. N. Aloï, and O. A. Rawashdeh, "Design and implementation of embedded printed antenna arrays in small UAV wing structures," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 58, no. 8, pp. 2531–2538, Aug. 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2050440.
- [28] R. Alexandre M. Lameirinhas, "A Sensor Based on Nanoantennas," 2020.
- [29] A. G. Brolo, R. Gordon, B. Leathem, and K. L. Kavanagh, "Surface plasmon sensor based on the enhanced light transmission through arrays of nanoholes in gold films," *Langmuir*, vol. 20, no. 12, pp. 4813–4815, Jun. 2004, doi: 10.1021/la0493621.
- [30] S. Unser, I. Bruzas, J. He, and L. Saglé, "Localized surface plasmon resonance biosensing: Current challenges and approaches," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 7. MDPI AG, pp. 15684–15716, Jul. 02, 2015. doi: 10.3390/s150715684.
- [31] S. Wu, P. Guo, W. Huang, S. Xiao, and Y. Zhu, "Dielectric thickness detection sensor based on metallic nanohole arrays," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no. 31, pp. 15205–15209, Aug. 2011, doi: 10.1021/jp2030472.
- [32] S. Wu, P. Guo, W. Huang, S. Xiao, and Y. Zhu, "Dielectric thickness detection sensor based on metallic nanohole arrays," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no. 31, pp. 15205–15209, Aug. 2011, doi: 10.1021/jp2030472.
- [33] L. Novotny, "Chapter 5 The history of near-field optics," vol. 50, E. Wolf, Ed. Elsevier, 2007, pp. 137–184. doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(07\)50005-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(07)50005-3).

- [34] Gomes, R.D.F.R., Martins, M.J., Baptista, A. et al. Study of a nano optical antenna for intersatellite communications. *Opt Quant Electron* 49, 135 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0966-y>
- [35] S. Mezouari and A. R. Harvey, “Validity of Fresnel and Fraunhofer approximations in scalar diffraction,” 2003. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/1464-4258/5/4/360>
- [36] L. O. Hocker, D. R. Sokoloff, V. Daneu, A. Szoke, and A. Javan, “Frequency mixing in the infrared and far-Infrared using a metal-to-metal point contact diode,” *Appl Phys Lett*, vol. 12, no. 12, pp. 401–402, 1968, doi: 10.1063/1.1651873.
- [37] B. Kaur and L. Singh Solanki, “A Brief Review on Bowtie Antenna Gain and Bandwidth Enhancement of Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Corner Rounding Technique View project Gain and Bandwidth Enhancement of Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Corner Rounding Technique View project”, doi: 10.13140/RG.2.1.2206.4805.
- [38] P. Melchior *et al.*, “Optical near-field interference in the excitation of a bowtie nanoantenna,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 83, no. 23, Jun. 2011, doi: 10.1103/PhysRevB.83.235407.
- [39] K. Sendur and W. Challener, “Near-field radiation of bow-tie antennas and apertures at optical frequencies,” *J Microsc*, vol. 210, pp. 279–283, Jan. 2003, doi: 10.1046/j.1365-2818.2003.01145.x.
- [40] J. Wenger, “Aperture optical antennas,” in *Optical Antennas*, A. Alù and M. Agio, Eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, pp. 369–386. doi: DOI: 10.1017/CBO9781139013475.023.
- [41] R. R. Ghosh and A. Dhawan, “Extremely large near-field enhancements in the vicinity of plasmonic nanoantennas on top of bull’s eye structures exhibiting the extraordinary transmission of light,” *OSA Contin*, vol. 4, no. 1, p. 193, Jan. 2021, doi: 10.1364/osac.396029.
- [42] B. Jakobsen *et al.*, “Formation and subdivision of deformation structures during plastic deformation,” *Science (1979)*, vol. 312, no. 5775, pp. 889–892, May 2006, doi: 10.1126/science.1124141.
- [43] Q. M. Ngo, Y. L. D. Ho, J. R. Pugh, A. Sarua, and M. J. Cryan, “Enhanced UV/blue fluorescent sensing using metal-dielectric-metal aperture nanoantenna arrays,” *Current Applied Physics*, vol. 18, no. 7, pp. 793–798, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.cap.2018.04.007.
- [44] S. G. Rodrigo, F. de León-Pérez, and L. Martín-Moreno, “Extraordinary Optical Transmission: Fundamentals and Applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 12, pp. 2288–2306, Dec. 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2580664.
- [45] P. Jahanshahi, M. Ghomeishi, and F. R. M. Adikan, “Study on dielectric function models for surface Plasmon resonance structure,” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/503749.
- [46] Rakic AD, Djurisic AB, Elazar JM, Majewski ML. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Appl Opt*. 1998 Aug 1;37(22):5271-83. doi: 10.1364/ao.37.005271. PMID: 18286006.
- [47] M. Eldlio, F. Che, and M. Cada, “Drude-Lorentz model of semiconductor optical plasmons,” in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, vol. 247 LNEE, pp. 41–49. doi: 10.1007/978-94-007-6818-5\_4.
- [48] B. Ung and Y. Sheng, “Interference of surface waves in a metallic nanoslit,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 3, pp. 1182–1190, Feb. 2007, doi: 10.1364/OE.15.001182.
- [49] Collin Meierbachtol (2022). Permittivity of Metals at Optical Wavelengths (Brendel-Bormann) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26025-permittivity-of-metals-at-optical-wavelengths-brendel-bormann>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved October 25, 2022.
- [50] E. Petryayeva and U. J. Krull, “Localized surface plasmon resonance: Nanostructures, bioassays and biosensing—A review,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 706, no. 1, pp. 8–24, Nov. 07, 2011. doi: 10.1016/j.aca.2011.08.020.
- [51] R. H. Ritchie, “Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films,” *Physical Review*, Vol. 106, No. 5, 1957, pp. 874–881.

- [52] R. H. Ritchie, E. T. Arakawa, J. J. Cowan, and R. N. Hamm, "PHYSICAL REVIEW LETTERS SURFACE-PLASMON RESONANCE EFFECT IN GRATING DIFFRACTION\*," 1968.
- [53] "2. Surface Plasmons on Smooth Surfaces 2.1 Fundamental Properties: Dispersion Relation, Extension and Propagation Length for the Electromagnetic Fields of the Surface Plasmons Dispersion Relation."
- [54] H. Raether, "Surface plasmons on smooth surfaces," in *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 4–39. doi: 10.1007/BFb0048319.
- [55] J. M. Pitarke, V. M. Silkin, E. v. Chulkov, and P. M. Echenique, "Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons," *Reports on Progress in Physics*, vol. 70, no. 1, pp. 1–87, Jan. 2007, doi: 10.1088/0034-4885/70/1/R01.
- [56] J. Jung and O. Keller, "QED theory for small-hole diffraction: Young diffraction from two Bethe holes," *Phys Rev A (Coll Park)*, vol. 104, no. 1, Jul. 2021, doi: 10.1103/PhysRevA.104.013714.
- [57] H. A. Bethe, "1 ~ Jc adjournal of experimental and theoretical physics established by F L bl Theory of Diffraction by Small Holes," 1944.
- [58] J. D. Dias *et al.*, "Estudo de antenas óticas para sensores," 2017.
- [59] A. Lahiri, "Diffraction and Scattering," in *Basic Optics*, Elsevier, 2016, pp. 385–537. doi: 10.1016/b978-0-12-805357-7.00005-8.
- [60] "https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction," Dec. 10, 2021.
- [61] "https://www.steadyrun.com/comparison-and-difference-between-fresnel-and-fraunhofer-diffraction," Dec. 10, 2021.
- [62] J. H. Hannay, "Kirchhoff diffraction optics and the nascent Aharonov-Bohm effect: A theorem," *J Phys A Math Theor*, vol. 43, no. 35, Sep. 2010, doi: 10.1088/1751-8113/43/35/354001.
- [63] E. Perini Muniz, "Tese de Doutorado Absorção Óptica Aumentada de Elipsóides Metálicos Cobertos com uma camada Orgânica na Região do Infravermelho."
- [64] P. Biagioni, J.-S. Huang, and B. Hecht, "Nanoantennas for visible and infrared radiation," *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, no. 2, p. 24402, Jan. 2012, doi: 10.1088/0034-4885/75/2/024402.
- [65] M. H. Ross and W. Pawlina, *Histology : a text and atlas : with correlated cell and molecular biology*, 6th ed. Philadelphia : Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health, 2011. [Online]. Available: <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001638312>
- [66] I. v Meglinski and D. Yu. Churmakov, "Spatial Localization of Biosensor Fluorescence Signals in Human Skin under the Effect of Equalization of the Refractive Index of the Surrounding Medium," *Opt Spectrosc*, vol. 96, no. 6, pp. 946–951, 2004, doi: 10.1134/1.1771433.
- [67] M. A. Ansari and E. Mohajerani, "Mechanisms of Laser-Tissue Interaction: I. Optical Properties of Tissue," 2011. [Online]. Available: [www.SID.ir](http://www.SID.ir)
- [68] Wilson, B.C. (1995). Measurement of Tissue Optical Properties: Methods and Theories. In: Welch, A.J., Van Gemert, M.J.C. (eds) Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue. Lasers, Photonics, and Electro-Optics. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6092-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6092-7_8)
- [69] S.L. Jacques, "Tissue Optics", Short Course 29, SPIE Photonics West Conference, San Francisco, Feb. 2, 2020.
- [70] D. Chan, B. Schulz, K. Gloystein, H. H. Müller, and M. Rübhausen, "In vivo spectroscopic ellipsometry measurements on human skin," *J Biomed Opt*, vol. 12, no. 1, p. 014023, 2007, doi: 10.1117/1.2435703.
- [71] O. S. Khalil *et al.*, "Temperature modulation of the visible and near infrared absorption and scattering coefficients of human skin," *J Biomed Opt*, vol. 8, no. 2, p. 191, 2003, doi: 10.1117/1.1559997.

- [72] H. Li, S. Xie, and L. Lin, "Refractive index of biotissue and its thermal response." [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/>
- [73] L. Weiss, A. Tazibt, A. Tidu, and M. Aillerie, "Water density and polarizability deduced from the refractive index determined by interferometric measurements up to 250 MPa," *Journal of Chemical Physics*, vol. 136, no. 12, Mar. 2012, doi: 10.1063/1.3698481.
- [74] L. T. Yang *et al.*, "Diastolic Blood Pressure and Heart Rate Are Independently Associated With Mortality in Chronic Aortic Regurgitation," *J Am Coll Cardiol*, vol. 75, no. 1, pp. 29–39, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jacc.2019.10.047.
- [75] "Silica - Silicon Dioxide (SiO<sub>2</sub>)," <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>. Set. 15, 2022.
- [76] "Tabela de Densidade dos Materiais" <https://pt.scribd.com/doc/101542267/Tabela-de-Densidade-Dos-Materiais>. Set. 15, 2022.
- [77] Y. Ma *et al.*, "Relation between blood pressure and pulse wave velocity for human arteries," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 115, no. 44, pp. 11144–11149, Oct. 2018, doi: 10.1073/pnas.1814392115.
- [78] "Refractive index database - refractive index," <https://refractiveindex.info/> Set. 5, 2022.



## A. Anexos

Neste apêndice são fornecidas as características da função dielétrica complexa para cada material utilizado em simulações. Os materiais são: alumínio, platina e ouro. Todos as funções seguem o modelo de Drude Lorentz, aplicadas no modelo de Rakic e estas são retiradas do COMSOL Multiphysics®. Estas funções dielétricas que são apresentadas no software de simulação estão retratadas também numa base de dados online [78].

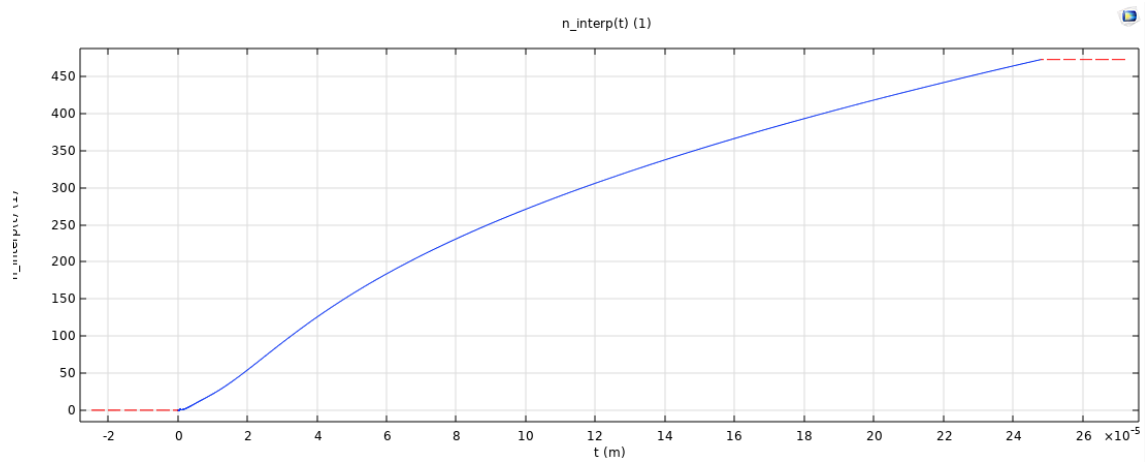


Figura A.1 – Componente real da função dielétrica do Alumínio segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

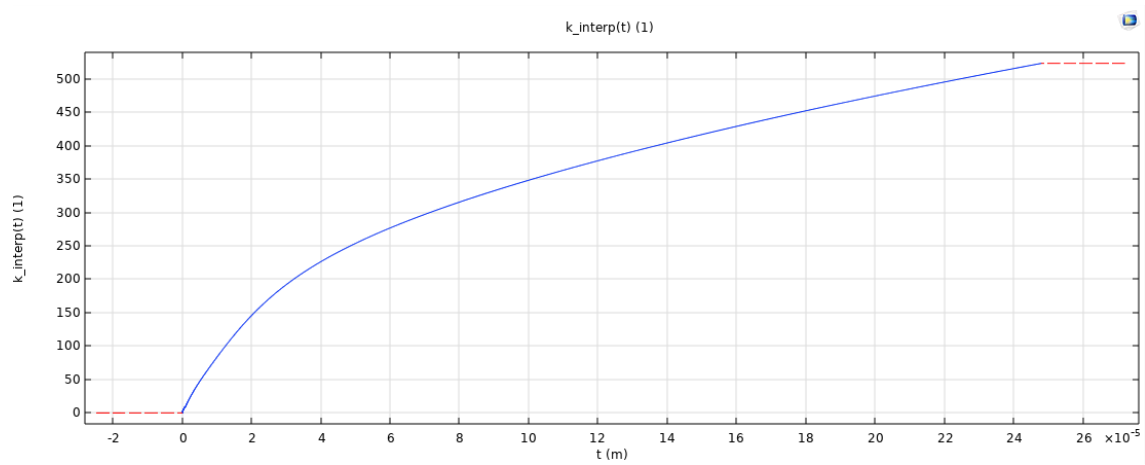


Figura A.2 – Componente imaginária da função dielétrica do Alumínio segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

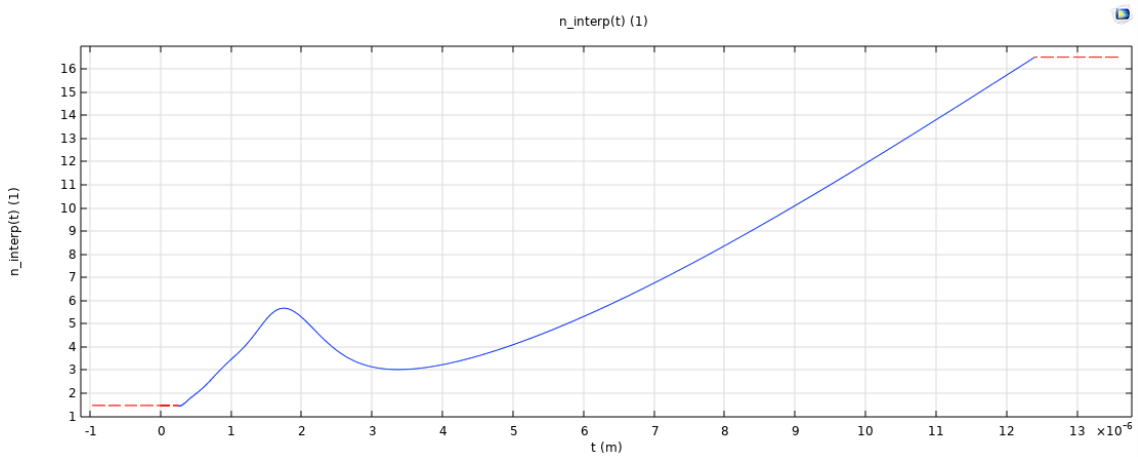


Figura A.3 - Componente real da função dielétrica da Platina segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

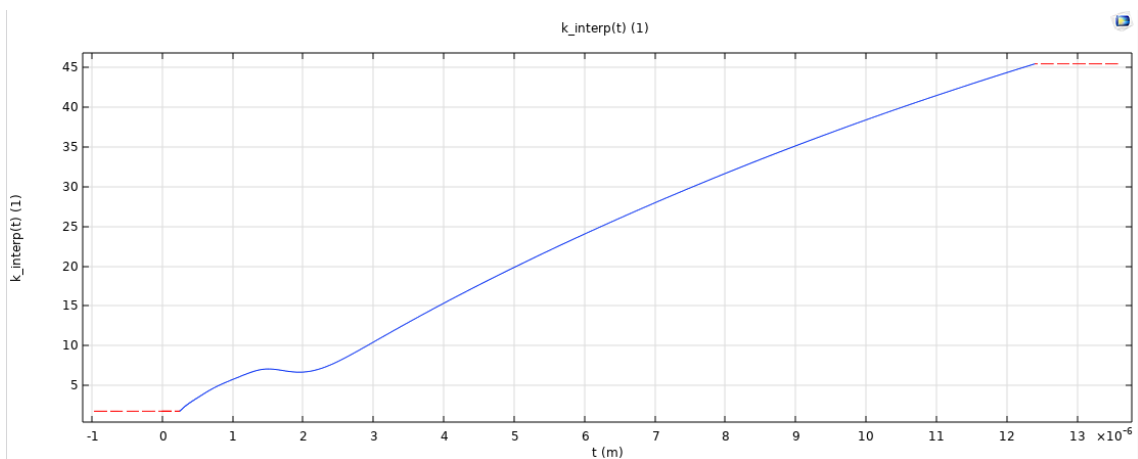


Figura A.4 - Componente imaginária da função dielétrica da Platina segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

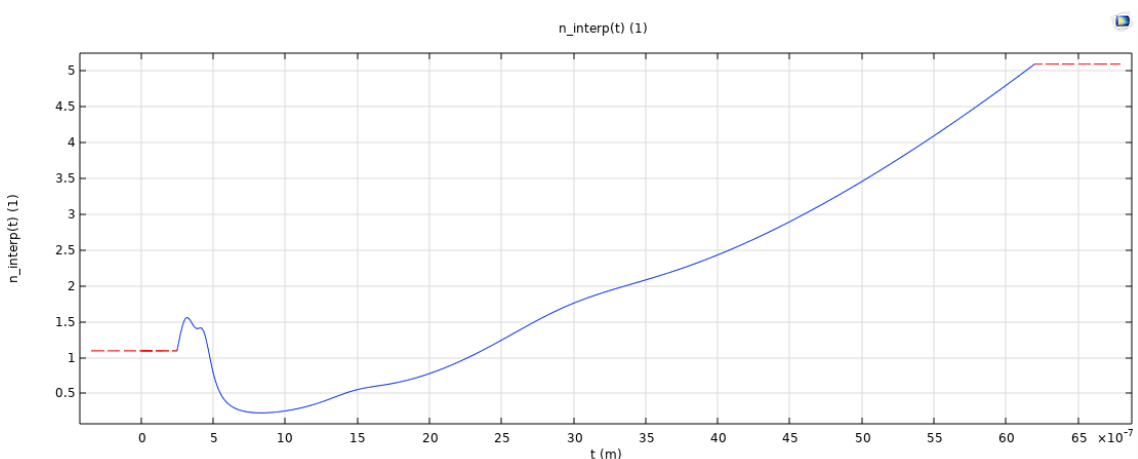


Figura A.5 - Componente real da função dielétrica do Ouro segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

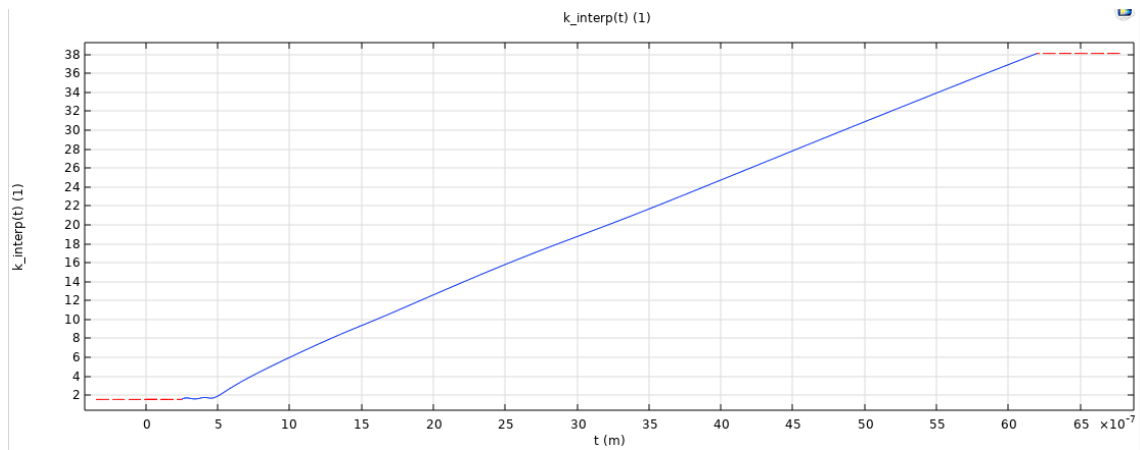


Figura A.6 - Componente imaginária da função dielétrica do Ouro segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

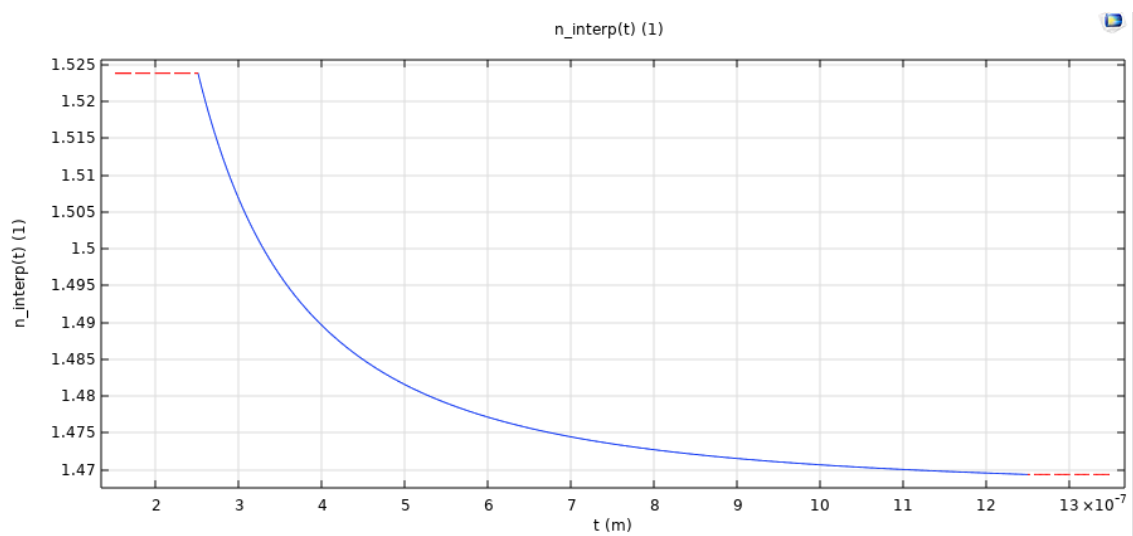


Figura A.7 - Figura A.5 - Componente real da função dielétrica do Ouro segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].

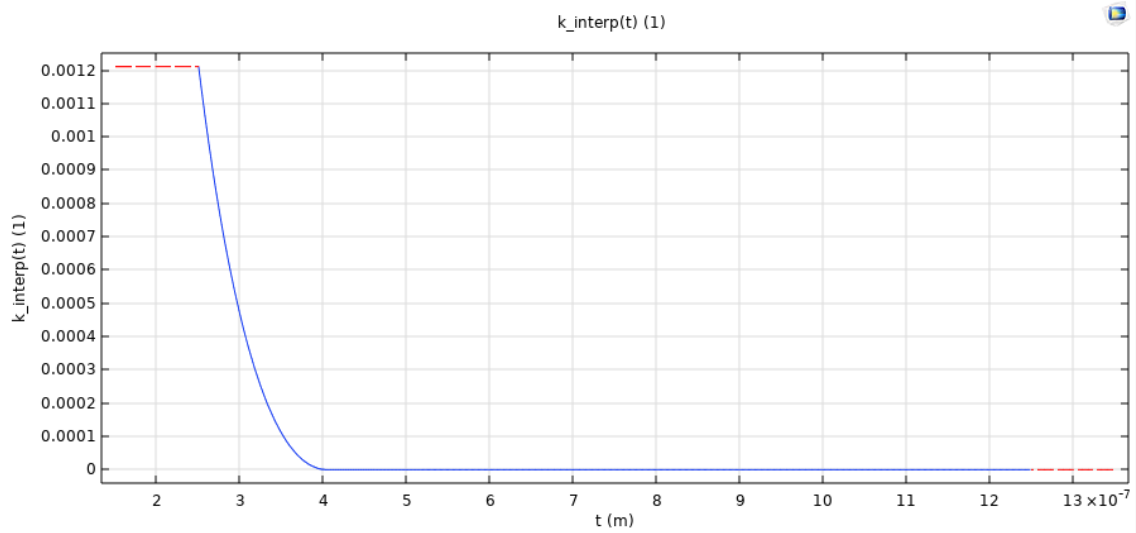


Figura A.8 - Componente imaginária da função dielétrica do Ouro segundo o modelo de Rakic com os valores do modelo de Drude Lorentz [78].