



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Mestrado em Engenharia Elétrica

Igor Leonardo Gomes de Souza

**Análise da Reflexão, Transmissão e Absorção
em Grades Nanométricas**

SALVADOR

2014

Análise da Reflexão, Transmissão e Absorção em Grades Nanométricas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia - UFBA, como pré-requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez
Esquerre.

SALVADOR

2014

S729 Souza, Igor Leonardo Gomes de

Análise da reflexão, transmissão e absorção em grades nanométricas (SLICE) /Igor Leonardo Gomes de Souza. – Salvador, 2014.

81 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Grades nanométricas. 2. Difração e dispersão da luz. 3. Fractais. I. Esquerre, Vitaly Felix Rodriguez. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 535.42



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UFBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Mestrado em Engenharia Elétrica

Análise da Reflexão, Transmissão e Absorção em
Grades Nanométricas

Dissertação de Mestrado

Autor: Igor Leonardo Gomes de Souza

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre

Prof. Dra. Marcela Silva Novo

Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis

Prof. Dr. Christiano José Santiago de Matos

Agradecimentos

Aos meus pais Maria Ivonete e José Fernando, aos meus irmãos Bruno e Fernanda, a Thiago o meu recém chegado sobrinho neste ano de 2014, a todos meus familiares que compreenderam por muitas vezes minha ausência e distância neste importante período de minha vida, aos amigos mais próximos de Salvador, aos amigos que fiz neste período Davi, Anderson e Joaquim, aos professores das disciplinas cursadas pelos valiosos ensinamentos e em especial ao professor amigo e orientador Dr. Vitaly Félix Rodriguez Esquerre pelo conhecimento transmitido de forma clara e objetiva nas duas disciplinas cursadas, pelas sugestões e correções feitas nos artigos e Dissertação. Agradeço ainda a Universidade Federal da Bahia pela a estrutura e apoio técnico fornecido e a CAPES pelo apoio financeiro concedido através da Bolsa de Estudos.

Resumo

Nesta dissertação foram analisados numericamente o comportamento absorvedor, transmissor e refletor de grades nanométricas metálicas de difração nos modos Transversal Elétrico (TE) e Magnético (TM). Em todas as três formas de operação analisadas, que são: reflexão, transmissão e absorção, foram propostas diferentes geometrias, com diferentes materiais metálicos e dielétricos, dando ênfase às geometrias fractais, os resultados obtidos foram iguais e/ou superiores aos encontrados até o presente momento na literatura. As grades de reflexão e transmissão foram analisadas em uma grande largura de banda de comprimentos de onda (700-2300nm) utilizando como metal o Ouro (Au), as grades absorvedoras foram divididas em duas faixas, a do visível correspondente a 400-700nm e a do infravermelho 800-2300nm, em ambas as faixas foram obtidos altos coeficientes de absorção, na faixa do espectro visível foi possível determinar uma dependência linear do comprimento de onda com a periodicidade da grade. Estas estruturas analisadas numericamente podem em um futuro próximo com o avanço da tecnologia de fabricação serem fabricadas e testadas em dispositivos fotônicos.

Palavras-Chave: Grades Nanométricas Metálicas, Método dos Elementos Finitos – FEM, Geometria Fractal, Difração e Dispersão da Luz.

Abstract

The aim of this work is the numerical analysis of the absorbing, transmitting and reflecting behavior of nanometric metallic gratings of diffraction for Transverse Electric (TE) and Magnetic (TM) modes. In all the cases, several geometries were proposed considering different metallic and dielectric materials, with emphasis in fractal geometries. The obtained results were equal or better than the ones reported so far in the technical literature. The reflection and transmission gratings were analyzed in a broadband wavelength interval (700-2300nm). The analysis of absorbing gratings were divided in two bands, the visible correspondent to 400-700nm and the infrared in the interval 800-2300nm. High absorbing coefficients were obtained in both bands. It is expected that in a near future, considering the technological advances in the fabrication processes, the proposed geometries may be manufactured and tested in photonic devices.

Key words: metallic nanometric gratings, finite elements method (FEM), fractal Geometry, light dispersion and diffraction

Lista de Figuras

Figura 1- Guia de Onda 1D utilizando fractais analisado em [10].	4
Figura 2- Estrutura fractal baseada em “Buracos de ar” utilizada em [11].	4
Figura 3- Estrutura 3D analisada em [12] utilizando Fractal H.	5
Figura 4- Estrutura fractal aperiódica 2D baseado na Sequência de Fibonacci utilizada por [13].	5
Figura 5- Cristal fotônico composto por uma estrutura fractal baseado no Tapete de Sierpinski utilizado em [14]	6
Figura 6- Grade de Difração Metálica (Ouro) com Geometria Fractal Box, a Região 1 representa o Substrato e a Região 2 a Vizinhança.	6
Figura 7- (a) Grade Periódica de Difração com elementos de geometria cilíndrica, periodicidade d , ângulo de incidência e ângulo de refração.	7
Figura 8 – Definição dos modos transversais Elétrico(TE) e Magnético(TM) em Grades de Difração.	8
Figura 9 - Elemento quadrático isoparamétrico.	10
Figura 10 - Discretização de uma grade periódica de Prismas com base Triangular.	11
Figura 11 - Geometria dos Fractais: (a) Koch Antisnow (b) Koch (c) Sierpinski e (d) Box.	16
Figura 12 - (a) Representa os quatro primeiros níveis do Floco de Koch. (b) O processo Iterativo dos quatro níveis iniciais.	16
Figura 13 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Box, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.	22
Figura 14 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $h = 100\text{nm}$.	22
Figura 15 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $d = 380\text{nm}$.	23
Figura 16 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $h = 100\text{nm}$.	24
Figura 17 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $d = 380\text{nm}$.	24
Figura 18 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Koch, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.	25
Figura 19 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $h=80\text{nm}$.	26
Figura 20 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $d=380\text{nm}$.	27
Figura 21 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ , $d=380\text{nm}$ e $h=90\text{nm}$.	27
Figura 22 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e $d=380\text{nm}$.	28
Figura 23 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Koch Antisnow, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.	28

Figura 24 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TE, substrato de SiO ₂ , vizinhança de Si e d=380nm.....	29
Figura 25 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TE, substrato de SiO ₂ , vizinhança de Si e h=80nm.....	30
Figura 26 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Koch Antisnow, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.	30
Figura 27 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Sierpinski, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e d=380nm.	32
Figura 28 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Sierpinski, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO ₂ e h=25nm.	32
Figura 29 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TE, d= 380nm, Substrato de SiO ₂ e vizinhança de Si.	35
Figura 30 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria FractalBOX, modo TE, d= 380nm, imersa em um meio de índice 1.	35
Figura 31 -Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de SiO ₂ (resultado similar com ITO) e vizinhança de Si, d= 380nm.	36
Figura 32 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TE, substrato de SiO ₂ e vizinhança de Si, d= 380nm.	36
Figura 33 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Sierpinski, modo TE, substrato de ITO e vizinhança de Si, d=380nm.	37
Figura 34 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato de Si e vizinhança de ITO, d= 380nm.	38
Figura 35 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, d= 380nm.	39
Figura 36 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, d= 380nm, para fendas muito estreitas.	40
Figura 37 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, d= 380nm, h= 80nm para cinco valores do ângulo de incidência θ compreendidos entre 0 ⁰ e 50 ⁰	41
Figura 38 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, d= 380nm, h= 100nm para cinco valores do ângulo de incidência θ compreendidos entre 0 ⁰ e 50 ⁰	41
Figura 39 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, d= 380nm, h= 80nm para cinco valores do ângulo de incidência θ compreendidos entre 50 ⁰ e 90 ⁰	42
Figura 40 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TM, Substrato de Si e vizinhança de SiO ₂ , d= 380nm.	43
Figura 41 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, Modo TM, grade imersa em um meio de índice de refração 1, d= 380nm. ..	43
Figura 42– Grade de Difração com Geometria composta de um Cilindro Dielétrico imerso no interior do metal.	46
Figura 43– Grade de Difração composta de um Prisma metálico de base triangular com duas camadas dielétricas.	46

Figura 44—Grade de Difração composta de um Prisma metálico de base trapezoidal e por duas camadas dielétricas.	46
Figura 45 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $d=380\text{nm}$, modo TE.	46
Figura 46 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $r=5\text{nm}$, modo TE.	47
Figura 47 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $r=10\text{nm}$, modo TE.	47
Figura 48 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $r=15\text{nm}$, modo TE.	48
Figura 49 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, dependência $\lambda(d)$, modo TE. ...	49
Figura 50 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO_2 , metal Au, $d=380\text{nm}$, modo TM.	49
Figura 51 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO_2 , metal Au, $r=5\text{nm}$, modo TM.	51
Figura 52 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO_2 , metal Au, $r=10\text{nm}$, modo TM.	51
Figura 53 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO_2 , metal Au, $r=15\text{nm}$, modo TM.	52
Figura 54 - Comportamento da dependência $\lambda(d)$ de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, modo TM.	52
Figura 55 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=400\text{nm}$, metal Au, modo TE.	53
Figura 56 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=390\text{nm}$, metal Au, modo TE.	54
Figura 57 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=400\text{nm}$, metal Au, modo TE.	55
Figura 58 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=410\text{nm}$, metal Au, modo TE.	55
Figura 59 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=380\text{nm}$, metal Al, modo TM.	56
Figura 60 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=390\text{nm}$, metal Al, modo TM.	57
Figura 61 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=400\text{nm}$, metal Al, modo TM.	57
Figura 62- Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=410\text{nm}$, metal Al, modo TM.	58

Figura 63 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{Si}=30nm$, $d=410nm$, metal Au, modo TE.....	58
Figura 64 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Sierpinski, modo TM, $d=400nm$, substrato de SiO_2 e vizinhança Si.	60
Figura 65 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Sierpinski, modo TE, $d=400nm$, substrato de SiO_2 e vizinhança Si.	60
Figura 66- Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Box, modo TM, $h=86nm$, substrato de ITO e vizinhança de Si.	61
Figura 67 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Box, modo TE, $h=86nm$, substrato de ITO e vizinhança de Si.	62
Figura 68- Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Koch, modo TM, $d=400nm$, substrato Si e vizinhança de ITO.	63
Figura 69 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Koch, modo TE, $d=400nm$, substrato Si e vizinhança de ITO.	64
Figura 70 – Quadro comparativo relacionando os Coeficientes de Transmissão obtidos numericamente nesta dissertação com os relatados na revisão bibliográfica [35].	66
Figura 71 - Quadro comparativo relacionando os Coeficientes de Absorção obtidos numericamente nesta dissertação com os relatados na revisão bibliográfica [35] e “Triangular metallic gratings for large absorption enhancement in thin film Si solar cells”.....	66

Sumário

I. Capítulo	1
1 – Introdução	1
1.1 – Objetivo do Trabalho	2
1.2 – Estado da Arte	3
1.3 – Organização da Dissertação	4
II. Capítulo	7
2.1 - Grades de Difração	7
2.2 – Metodologia e Formulação Matemática	9
2.2.1- Discretização do Modelo e o Método dos Elementos Finitos - FEM.....	9
2.3 – Geometria Fractal	15
2.4 – Índice de Refração de Metais	17
III. Capítulo	19
3.1 – Grades de Reflexão.....	20
3.1.1 – Resultados e Discussões	21
3.2 – Grades de Transmissão	33
3.2.1 – Resultados e Discussões modo TE.....	34
3.2.2 - Resultados e Discussões Modo TM.....	38
3.3 – Grades de Absorção	44
3.3.1. - Resultados e Discussões na Faixa Visível (400-700nm)	45
3.3.2 - Resultados e Discussões na Faixa do Infravermelho (800-2300nm).....	59
IV. Capítulo	65
4.1 – Conclusão	65
4.2 – Sugestões para Futuros Trabalhos	66

I. CAPÍTULO

1 – Introdução

Uma grade óptica de difração é definida como uma estrutura igualmente espaçada [1] em uma ou duas dimensões onde o período tem valores próximos ao comprimento de onda da luz incidente, tais grades possuem uma infinidade de aplicações em diversas áreas da ciência e tecnologia, dentre as quais podemos destacar: a espectroscopia óptica, comunicações ópticas, astronomia, dentre outras [2]. Estas estruturas são descritas pelos parâmetros geométricos: período, altura da grade, comprimento da grade, largura, bem como outros que dependem de como esta foi projetada. As grades geralmente são constituídas de materiais com altos contrastes de índice de refração (HCG), tal contraste associado à geometria do dispositivo fazem com que a grade apresente características diversas, dentre as interessantes para a construção de dispositivos fotônicos podemos citar: reflexão, absorção e transmissão da onda nos modos transversal elétrico (TE) e magnético (TM). A difração é um fenômeno físico que ocorre quando ondas (mecânicas ou eletromagnéticas) contornam um objeto ou passam por um orifício cuja a dimensão é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda [3]. Uma onda eletromagnética ao incidir sobre uma grade de difração tem a amplitude do campo (elétrico ou magnético), a fase ou ambos modificados de forma previsível [1].

Materiais metálicos podem refletir quase que totalmente a luz incidente sobre sua superfície, porém quando este é posto em contato com um material dielétrico e com uma geometria apropriada pode absorver fortemente o campo, refletir quase que totalmente o campo incidente ou refletir apenas comprimentos de ondas específicos. Anomalias em superfícies metálicas foram descobertas há mais de um século por Wood [4], sabe-se que o efeito destas anomalias estão associado aos Surface Plasmons- SPs, o trabalho pioneiro que se propôs a explicar foi feito por Ritchie. As Sps são ondas que se propagam ao longo da superfície do condutor metálico, ou podem ser excitações locais. Estas excitações são essencialmente ondas de luz que se propagam na superfície do metal por causa da interação com os elétrons livres, a rigor são chamados de Polariton Plasmons de Superfície devido ao seu caráter híbrido. Na interação luz-matéria os elétrons livres na superfície do metal oscilam em ressonância com a frequência da luz incidente, tais

excitações são altamente dependentes da polarização da luz e podem se propagar ao longo de uma distância de poucos micrômetros, sendo depois atenuada [5].

Grades com altos coeficientes de absorção podem ser utilizadas em substituição aos Refletores de Bragg – DBRS, que são estruturas altamente refletoras utilizadas em Lasers Emissores de Superfície (VCSEL), estas são compostas de diferentes materiais onde é possível modular o índice de refração efetivo com a periodicidade da estrutura, para atingir uma alta refletividade existe a necessidade de uma grande quantidade de camadas, o que acaba dificultando a miniaturização da estrutura. Grades com altos coeficientes de transmissão podem ser utilizadas na confecção de filtros ópticos de alta qualidade, permitindo que apenas determinadas frequências sejam transmitidas. Com o advento da necessidade de energias renováveis, a energia solar se apresenta como uma boa alternativa, porém as células solares atuais possuem baixos coeficientes de absorção da luz, grades com altos coeficientes de absorção que opere na faixa da luz visível (400-700nm) são de grande interesse para a indústria de placas fotovoltaicas. A geometria fractal é bastante utilizada em pseudocristais fotônicos e dispositivos de microondas, porém até o presente momento não consta em artigos científicos sobre o tema o uso desta geometria em grades manométricas.

Embora o estudo de grades tenha sido amplamente pesquisado e analisado na literatura, existe ainda a necessidade de melhorar os resultados, uma possibilidade seria sintonizar os parâmetros geométricos para se obter altos coeficientes de reflexão, transmissão e absorção destas estruturas.

1.1– Objetivo do Trabalho

Este trabalho visa projetar e analisar numericamente Grades Nanométricas Metálicas que tenham a capacidade de Refletir, Absorver ou Transmitir o campo incidente no modo transversal elétrico (TE) e no modo transversal magnético (TM) e que estas possam ser sintonizadas com os parâmetros físicos e geométricos, ou seja, com a escolha adequada destes parâmetros a grade apresente o comportamento desejado, para que determinados comprimentos de onda sejam refletidos/transmitidos, podendo assim serem utilizadas na confecção de Filtros Ópticos ou Polarizadores, que reflitam uma ampla faixa de

frequência com o intuito de serem aplicadas na confecção de espelhos em substituição aos atuais Refletores de Bragg – DBRS, ou que sejam excelente absorvedores para uma larga faixa de Ângulos de incidência, podendo serem utilizadas na confecção de placas fotovoltaicas.

1.2– Estado da Arte

A primeira grade de “difração” que se tem conhecimento, foi desenvolvida pelo astrônomo americano David Rittenhouse em 1785, tal grade era constituída de uma largura de aproximadamente 1,25cm (0,5”) e possuía cinquenta e três aberturas [2]. Em 1821 Joseph Von Fraunhofer desenvolveu uma grade de alta qualidade que permitiu determinar as linhas de absorção do espectro solar é ele também é responsável pelo desenvolvimento das equações que governam o comportamento dispersivo das grades. Com o passar dos anos houve grandes avanços na confecção de grades de alta qualidade [1] com : F. A. Nobert (1850), L.M. Rutherford (1870) e Rowland(1901), em 1950 David Richardson e Robert Wiley do MIT, fundaram a empresa Bausch&Lomb e começaram a produzir e comercializar redes de difração de alta qualidade, que consiste na capacidade de se projetar grades com uma grande variedade de tamanhos e espaçamentos o que melhora qualidade do dado a ser avaliado.

Em [6] foi proposta uma grade(HCG) com índice de refração de 3,6 e alta refletividade(acima de 99% no modo TM), o autor analisou numericamente, fabricou e caracterizou, verificando a possibilidade desta vir a ser uma alternativa aos espelhos DBR, neste mesmo artigo também foi demonstrado que uma modificação nos parâmetros geométricos da HCG faria com que esta também fosse utilizada como um espelho de banda estreita, ou seja, possuiria uma alta refletividade para um determinado comprimento de onda podendo funcionar como um Ressonador de Alto Fator de Qualidade – Q e sendo insensível a variações abruptas de temperatura.

Na referência [7] foi projetado uma grade cilíndrica de SiO₂ cercada por Al(Alumínio) altamente absorvedora no modo TE para o comprimento de onda de 632,8nm, em uma faixa de ângulos de incidência 0 a 10⁰, em [8] foi proposta uma estrutura metálica de prata(Ag) com uma camada dielétrica de SiO₂, esta estrutura apresentou uma absorção máxima de 80% no modo TM no comprimento de onda de 450nm,em [9] foi analisada uma grade altamente absorvedora em uma ampla largura de banda de comprimento de

onda(700-2300nm) no modo TM, com diferentes geometrias: circular, quadrada, trapezoidal e elíptica, podendo ser sintonizadas com a periodicidade. Em [35] foi proposta uma grade de Au que tinha a capacidade de ter uma transmissão de 80% para um comprimento de onda de 632nm no modo TE e de 65% no comprimento de onda de 634nm no modo TM.

A geometria fractal tem sido utilizada na análise de dispositivos fotônicos tais como: guias ópticos e fibras ópticas, em [10] foi proposto um guia de onda de cristal fotônico(PCWs) 1D(Figura 1) que foi gravado com uma distribuição fractal do tipo “*Barras de Cantor*”, esta estrutura apresentou picos de transmissão equidistante dentro do gap fotônico, uma estrutura fractal composta por uma rede quadrada com “*buracos de ar*” foi utilizado em [11] (Figura 2) , foi demonstrado a possibilidade de se ajustar o bandgap fotônico com a constante de rede e o aparecimento de mini-bandgaps ao longo de determinadas direções, em [12] foi analisado uma estrutura fractal H (Figura 3) metálica tridimensional, a estrutura apresentou ressonâncias localizadas com comprimentos de onda da ordem de dez vezes o tamanho da amostra, foi também demonstrado que devido a anisotropia da geometria fractal esta estrutura era altamente dependente da polarização da luz.

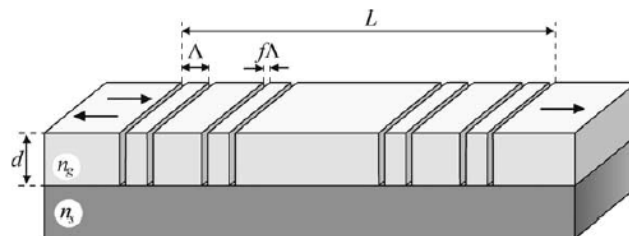


Figura 1- Guia de Onda 1D utilizando fractais analisado em [10].

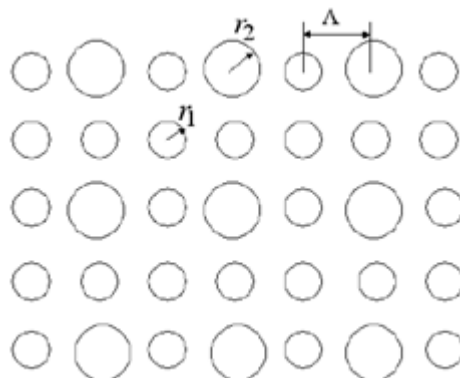


Figura 2- Estrutura fractal baseada em “Buracos de ar” utilizada em [11].

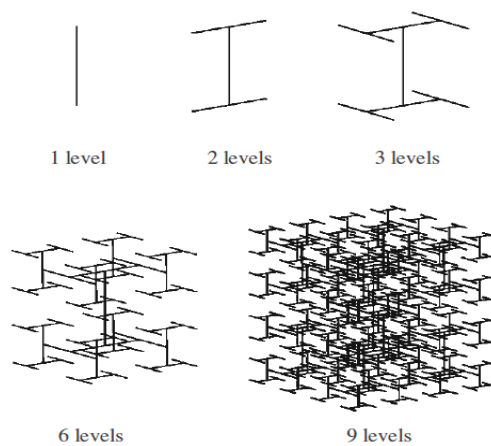


Figura 3- Estrutura 3D analisada em [12] utilizando Fractal H.

Uma estrutura fractal aperiódica 2D baseado na Sequência de Fibonacci(Figura 4) foi investigada em [13], esta estrutura criou várias lacunas de banda proibida que poderiam ser ajustadas variando a ordem da sequência de Fibonacci, podendo esta estrutura ser utilizada como um filtro óptico e aumentar as propriedades de radiação de antenas, em [14] foi analisado um cristal fotônico composto por uma estrutura fractal baseado no Tapete de Sierpinski(Figura 5), foram calculados as bandas fotônicas dos cristais e o resultado mostra que as frequências centrais das bandas variam com os ângulos dos vértices dos triângulos que compõe o Tapete de Sierpinski. A geometria fractal utilizada nesta dissertação será discutida na seção 2.3, foi analisado pioneiramente nesta Dissertação a utilização desta geometria em Grades Nanométricas.

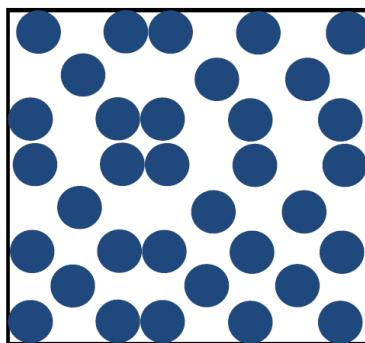


Figura 4- Estrutura fractal aperiódica 2D baseado na Sequência de Fibonacci utilizada por [13].

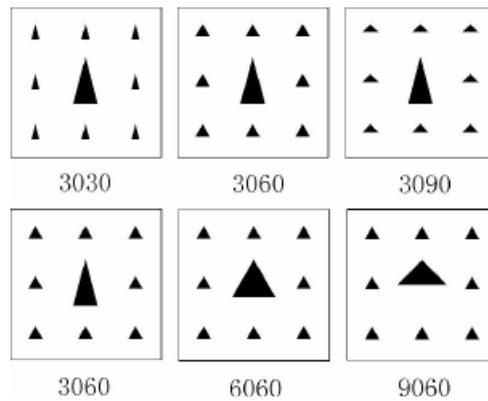


Figura 5- Cristal fotônico composto por uma estrutura fractal baseado no Tapete de Sierpinski utilizado em [14]

A estrutura proposta nesta dissertação Figura 6 consiste de uma grade periódica metálica (ou circundada por metal), com período d e separada por duas regiões 1 e 2, que são respectivamente o substrato e a vizinhança da grade, a propagação do campo nos modos transversal elétrico (TE) e magnético (TM) luz se dá no eixo z .

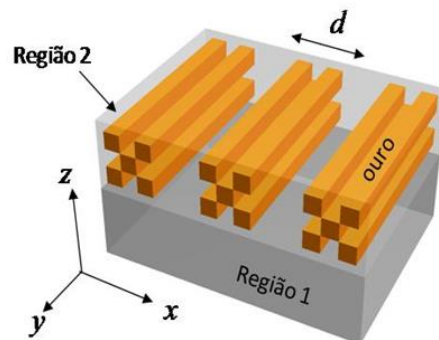


Figura 6- Grade de Difração Metálica (Ouro) com Geometria Fractal Box, a Região 1 representa o Substrato e a Região 2 a Vizinhança.

1.3– Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos da seguinte forma: no Capítulo 1 é realizada uma Introdução sobre o estudo das grades e os objetivos do trabalho, o Capítulo 2 é referente a Metodologia/Geometria utilizada e a Formulação Matemática, o Capítulo 3 é dedicado à análise das grades de reflexão, transmissão e absorção nos modos TE e TM e os seus resultados obtidos e no Capítulo 4 a conclusão do trabalho é apresentada junto com as contribuições obtidas e as sugestões para futuros trabalhos.

II. CAPÍTULO

2.1 - Grades de Difração

Uma Grade de Difração Nanométrica consiste em uma estrutura periódica de elementos igualmente separados por uma distância d , cujo valor do período(d) é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda λ da luz incidente[1], as grades podem refletir, transmitir ou absorver o campo elétrico/ou magnético incidente, os parâmetros físicos são: índices de refração dos materiais que compõem a grade e os parâmetros geométricos: periodicidade, abertura, dentre outros, definem tais propriedades. Uma onda eletromagnética incidente sobre uma Grade de Difração tem a amplitude do campo, a fase ou ambos modificados, controlando de forma adequada os parâmetros físicos e geométricos a onda incidente pode sofrer dois tipos de interferência, construtiva ou destrutiva. A Figura 7 representa a ilustração de uma Grade Periódica de Difração, onde a luz incide em um ângulo α em relação ao plano normal da grade e é transmitida com um ângulo β em relação a normal da grade.

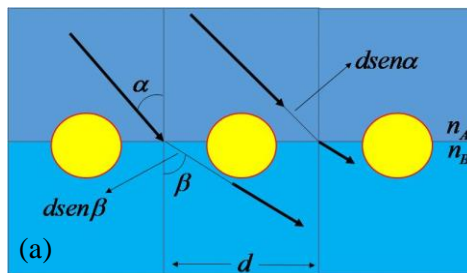


Figura 7- (a) Grade Periódica de Difração com elementos de geometria cilíndrica, periodicidade d , ângulo de incidência e ângulo de refração.

O critério para a interferência construtiva entre dois feixes consecutivos é que a diferença de caminho ($\Delta x = dsen\beta - dsen\alpha$) óptico entre os dois seja igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda, ou seja,

$$m\lambda_0 = \Delta x \quad (1)$$

$$m\lambda_0 = d(n_B sen\beta - n_A sen\alpha) \quad (2)$$

onde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, na situação onde $m=0$ a luz incidente é refratada e a equação (1) é reduzida a Lei de Snell(3),

$$n_A \text{sen} \alpha = n_B \text{sen} \beta \quad (3)$$

Através de (4) é possível obter uma relação matemática para o cálculo do ângulo de difração β , onde

$$\beta = \text{sen}^{-1} \left(n_A \frac{\text{sen} \alpha}{n_B} \right) \quad (5)$$

Por outro lado, a função seno tem seu intervalo de variação entre -1 e 1, logo por (2) a existência de difração de ordem superior exige que,

$$-(n_A + n_B) < \frac{m\lambda_0}{d} < (n_A + n_B). \quad (6)$$

Nas situações analisadas neste trabalho com exceção das grades absorvedoras na faixa do visível(400-700nm) foi considerada a incidência da onda perpendicular à superfície da grade. A Figura 1b ilustra uma Grade de Difração nanométrica com Geometria Fractal Box, composta por Ouro(Au), a Região 1 representa o Substrato e a Região 2 a vizinhança do Fractal. O modo Transversais Magnético(TM) Figura 8 é definido quando a componente do campo magnético \vec{H} (para a ilustração H_x) é paralelo a ranhura da grade, o Modo transversal Elétrico(TE) é definido de forma análoga.

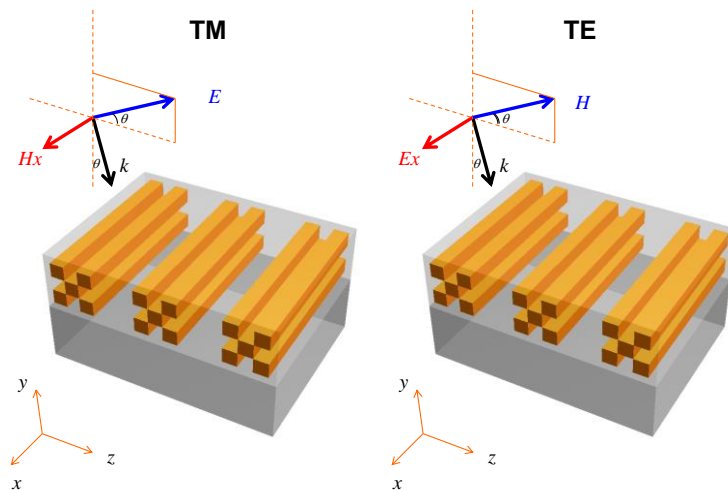


Figura 8 – Definição dos modos transversais Elétrico(TE) e Magnético(TM) em Grades de Difração.

2.2 – Metodologia e Formulação Matemática

O comportamento da propagação da onda eletromagnética em meios materiais e no espaço livre (o vácuo) é obtido através da solução das Equações de Maxwell com as devidas condições de fronteira/e ou vizinhança. A solução analítica da Equação de Maxwell embora seja exata só pode ser obtida em situações particularmente simples [9], neste trabalho foi utilizada além da geometria euclidiana, uma geometria complexa e não-exata (geometria fractal), composto de materiais metálicos e dielétricos que possuem diferentes propriedades físicas, devido a complexidade do problema como um todo tornando as soluções analíticas das Equações de Maxwell se tornou inviável, como alternativa a este problema foi utilizado o Método Numérico que embora seja uma solução aproximada tem sido amplamente utilizado devido a sua excelente convergência [10]. O Método dos Elementos Finitos – FEM surgiu na década de 40 e tem sido utilizado vastamente com o passar dos anos devido aos avanços computacional [15], ele consiste em uma adaptação/modificação de métodos conhecidos no início do século, sendo o mais conhecido o Método de Ritz [16].

O FEM é utilizado nesta dissertação para a solução das equações diferenciais parciais de Poisson ou Laplace com as devidas condições de contorno, a grande vantagem do método é a economia computacional uma vez que ele trabalha com matrizes esparsas [17]. Neste trabalho o comportamento da propagação da luz no meio material foi analisado utilizando o FEM, a formulação detalhada do método pode ser encontrada nas [17] e [10], será realizado uma sucinta explanação de como o método funciona, o que calcula e as Equações utilizadas.

2.2.1- Discretização do Modelo e o Método dos Elementos Finitos - FEM

Um programa computacional que permite realizar a análise numérica utilizando o método dos Elementos Finitos-FEM para problemas eletromagnéticos obtém como

resposta uma solução aproximada da Equação de Maxwell em um domínio previamente determinado, a solução deste problema consiste em determinar o valor do campo elétrico/ou magnético em cada ponto do domínio. Para resolver um problema utilizando o FEM inicialmente deve-se seguir os seguintes passos: (i) definir a geometria; (ii) definir as equações que regem o problema; (iii) determinar as propriedades físicas do meio, na situação de propagação de ondas eletromagnéticas o parâmetro físico é o índice de refração; (iv) utilizar a condição de periodicidade e contorno; (v) gerar a malha de Elementos Finitos. Após definida a geometria, seus domínios e os materiais associados a cada domínio que se pretendem analisar o comportamento do campo, o passo seguinte seria a discretização da geometria, o método dos elementos finitos utilizado faz a discretização usando triângulos isoparamétricos

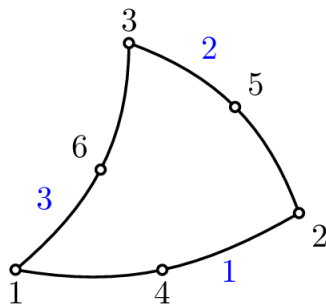


Figura 9 - Elemento quadrático isoparamétrico.

O elemento da Figura 9 representa o Elemento Quadrático Isoparamétrico, onde os números pretos são os nós e os azuis os três lados do Elemento, esta geometria tem a capacidade de se adaptar mais facilmente a domínios irregulares, diferentemente do Método das Diferenças Finitas que utiliza quadriláteros para discretizar o modelo, a Figura 10 representa uma das geometrias analisadas nesta dissertação, que é uma grade com geometria prisma de base triangular, a região 1 é composta de Ar, a região 2 de Silício(Si), região 3 de ITO (Óxido de Índio Estanho)e na região 4 foi utilizado o Ouro(Au), a região 3 foi ampliada pontualmente os termos Ω 's representam os subdomínios da região e os pontos 1, 2, 3, 4,5, 6, e 7 os nós.

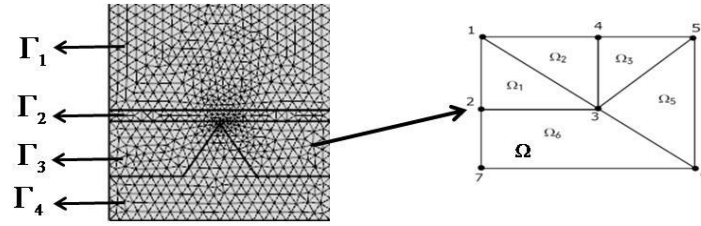


Figura 10 - Discretização de uma grade periódica de Prismas com base Triangular.

Os elementos da Figura 10 são gerados pela conexão dos nós da vizinhança, sendo assim os nós constituem os vértices dos elementos, o FEM calcula o campo em cada nó utilizando a contribuição de cada elemento, uma grande quantidade de elementos aumenta o custo computacional, porém a solução tende a se aproximar mais da verdadeira.

As equações de Maxwell na forma diferencial são descritas por (7), (8), (9) e (10), que são respectivamente a Lei de Gauss da Eletrostática, a Lei de Gauss da Magnetostática, a Lei de Faraday e a Lei de Ampère, onde \vec{E} e \vec{H} são respectivamente as intensidades do campo elétrico e magnético; \vec{D} e \vec{B} representam respectivamente o vetor deslocamento (ou densidade de fluxo elétrico) e a densidade de fluxo magnético; \vec{J} e ρ a densidade de corrente elétrica e carga elétrica respectivamente.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (8)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (10)$$

Para complementar às Equações de Maxwell existem três relações constitutivas entre os vetores, \vec{B} e \vec{J} .

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (11)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (12)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (13)$$

As constantes, μ e σ são respectivamente a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica e representam as propriedades físicas do meio, em

meios isotrópicos esses valores são escalares e em meios anisotrópicos tensores. Supondo que os campos elétrico/ou magnético oscilam harmonicamente com uma frequência angular ω , onde

$$\omega = 2\pi f \quad (14)$$

sendo f a frequência da onda incidente, as equações (9) e (10) podem ser expressas no domínio da frequência, ou seja fazendo com que tais equações sejam independentes do tempo, logo a substituição do termo $\frac{\partial}{\partial t}$ por $j\omega$, sendo assim as equações (9) e (10) utilizando as relações constitutivas (11) e (12) podem ser reescritas como

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (15)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} \quad (16)$$

As equações (15) e (16) estão acopladas, ou seja \vec{E} e \vec{H} aparecem em cada uma delas, aplicando o rotacional em ambos os membros de cada uma das equações e utilizando a identidade vetorial:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \vec{\nabla}^2 \vec{A} \quad (17)$$

as equações (15) e (16) podem ser reescritas como

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (18)$$

$$\vec{\nabla}^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (19)$$

que são as equações de onda dos campos elétricos e magnético desacopladas, onde

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon \quad (20)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$

Logo, devido a semelhança é possível reescrever uma única equação da onda generalizada para qualquer campo U

$$\vec{\nabla}^2 \vec{U} + k^2 \vec{U} = 0 \quad (22)$$

No problema bidimensional analisado neste trabalho U tem apenas uma componente. Considerando que a propagação ocorra apenas em uma direção (o eixo), a componente do campo pode ser escrita como

$$\vec{U} = U_z \hat{z} \quad (23)$$

onde \hat{z} é o vetor unitário que orienta a direção de propagação do campo, substituindo (11) ou (12) em (22) temos:

$$\vec{\nabla}(\alpha_1 \vec{\nabla} U_z) + k^2 \alpha_2 U_z = 0 \quad (24)$$

onde as constantes são para o modo TE

$$\alpha_1 = \frac{1}{\mu} \quad (25)$$

$$\alpha_2 = \varepsilon \quad (26)$$

e para o modo TM ,

$$\alpha_1 = \frac{1}{\varepsilon} \quad (27)$$

$$\alpha_2 = \mu \quad (28)$$

A equação (24) pode ser escrita como

$$s_y \frac{\partial}{\partial y} \left(p \frac{s_y}{s} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + s_x \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{s_x}{s} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + k^2 q s \alpha_1 = 0 \quad (29)$$

Os termos s , s_y e s_z são as PMLS (Perfectly Matched Layer) definidas em [19], [20] e [21], e são postas na equação com o intuito de minimizar as reflexões não físicas na fronteira do domínio analisado, evitando assim soluções espúrias. Fazendo uso do método de Galerkin [19] na equação (29) e utilizando a técnica de integração por partes e considerando o campo $U = 0$ na fronteira externa da PML, a equação matricial que representa o domínio Ω ,

$$[A]\{U\} = \sum_e \int_e p \frac{s_y}{s_y s_x} \{N\}_\Gamma \left(\frac{\partial U_1}{\partial x} - \frac{\partial U_2}{\partial x} \right) d\Gamma \quad (30)$$

Com

$$[A] = \sum_e \iint_e \left[p \frac{s_y^2}{s} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} + p \frac{s_x^2}{s} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} - k_0^2 q s \{N\} \{N\}^T \right] dy dx \quad (31)$$

Onde as componentes do vetor campo $\{U\}$ são os valores de U em todos os nós dos domínios Ω 's, o somatório \sum é executado em todos elementos pertencente a todos os domínios Ω , e \int é realizado em Γ . As funções vetoriais 1D representando o nó no modelo são os termos $\{N\}_\Gamma$, $\{N\}$ é a função vetor forma 2D que é obtido quando o domínio Ω computacional é discretizado e o índice T indica que a matriz foi transposta. O campo U na região Ω_I pode ser descrito segundo [20], onde é definido que os campos incidentes ($U_{in,i}$) e o espalhado ($U_{scat,i}$) n domínio Ω_I é,

$$U_i = U_{in,i} + U_{scat,i} \quad (32)$$

As condições para que os campos elétricos e magnéticos se mantenham contínuos no plano de incidência é definido como,

$$\frac{\partial U_{scat,1}}{\partial z} = \frac{\partial U_{scat,2}}{\partial z} \quad (33)$$

Sendo assim a equação (16) pode ser reescrita como

$$[A]\{U\} = \sum_e \int_e p \frac{s_y}{s_z s_x} \{N\}_\Gamma \left(\frac{\partial U_{in,1}}{\partial z} - \frac{\partial U_{in,2}}{\partial z} \right) d\Gamma \quad (34)$$

Utilizando a condição descrita em [15] o termo do lado direito da equação (34) que representam os campos, teremos que,

$$[A]\{U\} = [C]\{U\}_\Gamma \quad (35)$$

Com a matriz $[C]$ definida como,

$$[C] = 2j\beta \sum_e \int_e p \frac{s_z^2}{s} \{N\}_\Gamma \{N\}_\Gamma^T d\Gamma \quad (36)$$

Utilizando as componentes do vetor $\{U\}_0$ como sendo os valores de U nos pontos nodais dos domínios Ω exceto para os nós da fronteira entre dois domínios Γ , sendo assim a equação (35) pode ser definida como,

$$\begin{bmatrix} [A]_{00} & [A]_{0\Gamma} \\ [A]_{\Gamma 0} & [A]_{\Gamma\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U\}_0 \\ \{U\}_\Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{0\} \\ [C]\{U_{inc}\}_\Gamma \end{bmatrix} \quad (37)$$

Onde $[A]_{00}$, $[A]_{0\Gamma}$, $[A]_{\Gamma 0}$, e $[A]_{\Gamma\Gamma}$ são as matrizes parciais de $[A]$.

2.3 – Geometria Fractal

O fractal, cujo termo vem do latim “*fractus*”, que significa *quebrar*, são estruturas geométricas cuja principal característica é a auto-similaridade [22], onde as figuras geradas contêm dentro de si cópias exatas delas mesmas, tais geometrias não são explicadas pela geometria euclidiana, pois estas estruturas não possuem uma dimensão exata e sim dimensões fracionárias, tal fração está associada com a quantidade e a escala de ampliação das cópias. Os fractais são classificados segundo a autossimilaridade, basicamente existem três tipos, que são: a autossimilaridade exata, quase-auto-similaridade e auto-similaridade estatística [23]. Nesta dissertação será utilizado o fractal com auto-similaridade exata, que tem como característica a capacidade de ser gerado por algoritmos recursivos e funções iterativas. Devido a complexidade de descrição da geometria as estruturas analisadas nesta dissertação o nível 1, correspondente a primeira iteração e dos quatro modelos abaixo da Figura 11, que são: Box, Koch, Koch Antisnow e Sierpinski, onde h é a constante do fractal.

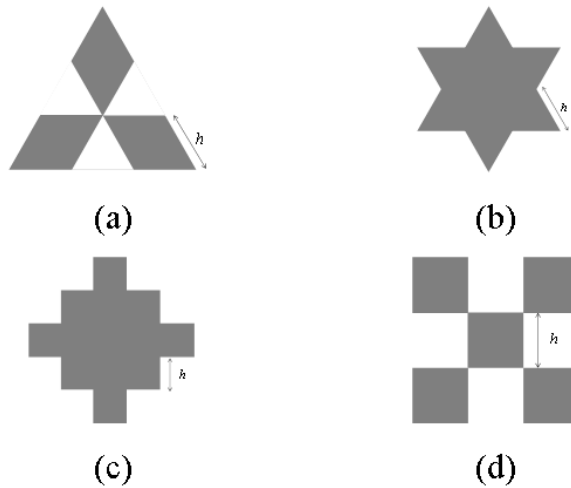


Figura 11 - Geometria dos Fractais: (a) Koch Antisnow (b) Koch (c) Sierpinski e (d) Box.

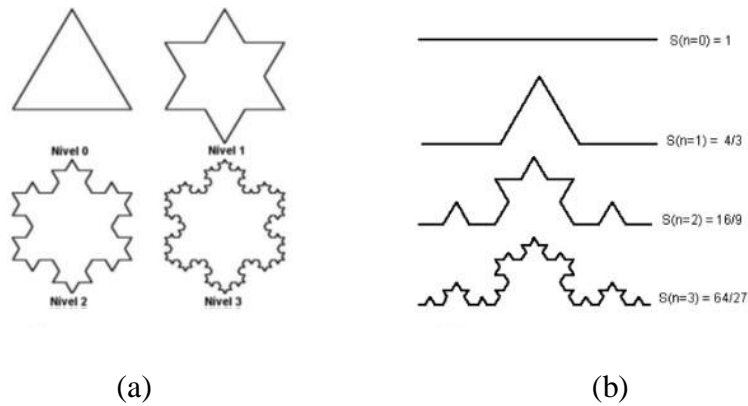


Figura 12 - (a) Representa os quatro primeiros níveis do Floco de Koch. (b) O processo Iterativo dos quatro níveis iniciais.

A Figura 12 representa os quatro primeiros níveis do floco de Koch. O ponto de partida é um segmento de reta que é dividido em três partes iguais e o segmento central é substituído por outros dois de mesmo comprimento formando uma estrutura triangular sem base, o processo é repetido para os quatro segmentos (Figura 12b) e a cada iteração o padrão de repetição é mantido até a ordem n que se deseja[20]. Para o nível inicial $n=0$ tem-se uma área de um triângulo equilátero

$$S_0 = h^2 \frac{\sqrt{3}}{4} \quad (38)$$

No segundo nível($n=1$) são acrescentados mais três triângulos de lado $\frac{h}{3}$

$$S_1 = S_0 + 3\left(\frac{h}{3}\right)^2 \frac{\sqrt{3}}{4} \quad (39)$$

A expressão geral para a área em qualquer nível é

$$S_N = S_0 + h^2 \frac{\sqrt{3}}{12} \sum_{i=1}^N \left(\frac{4}{9}\right)^{i-1} \quad (40)$$

E a dimensão é definida como $D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1,26$ [41], ou seja, não exata.

Cada fractal possui suas equações e seus padrões de iteração, devido a complexidade de descrição da geometria bem como para um futuro processo de fabricação desta estrutura, em todos os modelos analisados foi utilizado apenas o nível 1.

2.4 – Índice de Refração de Metais

Os metais diferentemente dos materiais dielétricos e semicondutores possuem em sua estrutura uma grande quantidade de elétrons livres, estes elétrons podem ser considerados como um “plasma de elétrons” [25], quando um campo eletromagnético($E(t)$ e $H(t)$) incide sobre uma superfície metálica exerce uma força sobre os elétrons livres do tipo:

$$F(t) = -eE(t) = -eE_0 e^{-i\omega t}, \quad (41)$$

para a polarização elétrica, onde e é a carga elementar do elétron ($1,6 \times 10^{-19} C$), E_0 é o valor da amplitude do campo elétrico(V/m) e ω a frequência da onda incidente, sabendo que existe uma força relativo ao “atrito” das colisões entre os elétrons e a estrutura do material[22] definida como,

$$F_a = -m\gamma \frac{dx}{dt} \quad (42)$$

onde m é a massa do elétron ($\sim 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$) e γ é o coeficiente de amortecimento(ou frequência de colisão), pela segunda lei de Newton, temos:

$$F = F(t) + F_a \quad (43)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -eE_0 e^{-i\omega t} - m\gamma \frac{dx}{dt} \quad (44)$$

Assumindo uma solução harmônica para a equação do tipo

$$x(t) = x_0 e^{-i\omega t} \quad (45)$$

$$x(t) = \frac{eE(t)}{m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (46)$$

Onde x_0 é uma das condições iniciais do problema. Sendo a polarização (P) de um “gás de elétrons” definida como:

$$P = N\mu_e \quad (47)$$

onde o Momento de dipolo elétrico μ_e é definido como:

$$\mu_e = -ex \quad (48)$$

Onde x é a distância entre as cargas. O vetor de fluxo elétrico D é uma grandeza elétrica definida como sendo:

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon_0 E + P \quad (49)$$

$$D = \epsilon_0 E - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\omega^2 + i\gamma\omega)} E \quad (50)$$

Sendo ϵ_0 a permissividade elétrica(ou constante dielétrica) no vácuo, e a permissividade dielétrica do metal podendo ser escrita como sendo:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (51)$$

ou

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (52)$$

com

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0} \quad (53)$$

ω_p é definida uma frequência de plasma do metal. Neste trabalho foram feitas análises da transmissão óptica em diversas geometrias exatas (euclidiana) e não-exatas (fractais), utilizando materiais dielétricos e metais. Os valores dos índices de refração dos metais foram calculados em função da frequência da onda ($n(\omega)$) utilizando o modelo de Drude-Lorentz [27] determinados pelas equações (54) e (55).

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)} \quad (54)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \right) \quad (55)$$

Onde a permissividade do metal é uma função da frequência, ω_p é a frequência do plasma do metal e γ representa a frequência de colisão. Para o metal ouro (Au) a equação é ajustada para comprimentos de onda na faixa de 700-2300nm [8], para a prata (Ag), alumínio (Al), cobre (Cu) e níquel (Ni) a faixa analisada foi entre 200 – 2500nm [9]. A fração de potência transmitida pela grade foi calculada como a razão da integral de potência de saída e a de entrada da componente z do vetor de Poynting (S_z).

$$T(\lambda, \theta) = \frac{\int_0^a S_z(x, z = b, \lambda, \theta) dx}{\int_0^a S_z(x, z = 0, \lambda, \theta) dx} \quad (56)$$

III. CAPÍTULO

Neste Capítulo serão discutidos individualmente os três tipos de grades analisadas nesta dissertação, bem como os modelos e parâmetros físicos e a geometria utilizada para cada modelo.

3.1 – Grades de Reflexão

Com o avanço da tecnologia das Comunicações Ópticas tem-se a necessidade de dispositivos otimizados com alta refletividade em uma grande largura de banda de comprimentos de onda e dispositivos que apresentem alta refletividade para comprimentos de ondas específicos, concomitante a este avanço está o advento das tecnologias de nanofabricação [28] que tem possibilitado a fabricação, caracterização e teste destas estruturas. Grades periódicas nanométricas têm sido exploradas como elementos de difração de alta refletividade(85-90%) [29] e baixa absorção na largura de banda utilizada nas comunicações ópticas. As grades vem a ser um eficiente dispositivo podendo serem utilizadas na confecção de: isoladores ópticos, em guias de onda ressonantes tais como: switches e moduladores ópticos, filtros ópticos [30], em lasers VCSEL substituindo os refletores DBRs[31], dentre outras aplicações. A alta refletividade associada a estas grades estão associados a junção de dois fatores que são: os materiais e a geometria que a compõe, foi demonstrado em [31] que grades dielétricas nanométricas com alto contraste de índices(HCG) e com parâmetros geométricos otimizados, ou seja, uma estrutura periódica com alto índice de refração cercada na vizinhança/fronteira por um material com baixo índice de refração possuía uma alta refletividade $> 99\%$ para comprimentos de onda no intervalo de 1300-1900nm no modo TM, em [32] foi proposta uma HCG que poderia funcionar como um espelho refletor de banda estreita ou ressonador com um alto fator de qualidade(Q), este espelho reflete praticamente toda a luz incidente no modo TE para um comprimento de onda de 1550nm, para qualquer outro valor de comprimento de onda próximo a 1550nm a refletividade decrescia abruptamente. Em [33] foi proposta uma solução analítica para a refletividade de grades nanométricas dielétricas e uma diretriz para se obter valores ótimos do período e do índice de refração, com isso foi possível obter uma refletividade máxima na faixa do infravermelho próximo de 850nm nos modo TE e TM, no recente trabalho [34] do nosso grupo de pesquisa foi apresentado uma grade periódica nanométrica metálica com geometria não exata Fractal com uma refletividade próxima de 100% para uma grande

largura de banda de comprimentos de onda em ambos os modos, também foi obtido picos de reflexão e transmissão para comprimentos de ondas específicos. Neste capítulo será apresentado e discutido os resultados referentes as grades nanométricas metálicas de reflexão com geometria fractal.

3.1.1 – Resultados e Discussões

As geometrias propostas nesta dissertação serão analisadas no intervalo de comprimentos de onda (700-2300nm), e serão calculadas as características de propagação de grades nanométricas com geometrias fractal.

FractalBox

A Figura 13 representa uma grade fractal com geometria BOX composta de Ouro(Au) e em suas vizinhanças e substrato foram utilizados respectivamente os dielétricos Si e SiO₂, a largura da camada do substrato em todas as análises foi de $3d$. O modo analisado na Figura 14 e na Figura 15 é o Transversal Elétrico(TE), foi utilizado nesta análise a metodologia da variação individual dos parâmetros geométricos da grade d e h , que são respectivamente o período(e largura) e a constante do fractal, na Figura 14 foi variado o período e mantido o valor de h constante igual a 100nm e na Figura 15 foi analisado a variação de h mantendo o valor do período constante igual a 380nm, é possível observar uma alta refletividade >90% para todo espectro analisado acima do visível (infravermelho), quando o valor do parâmetro geométrico h é variado Figura 15 nota-se uma quase invariância dos resultados, sendo assim pequenas imperfeições decorrentes no processo de fabricação não afetariam a alta refletividade da grade.

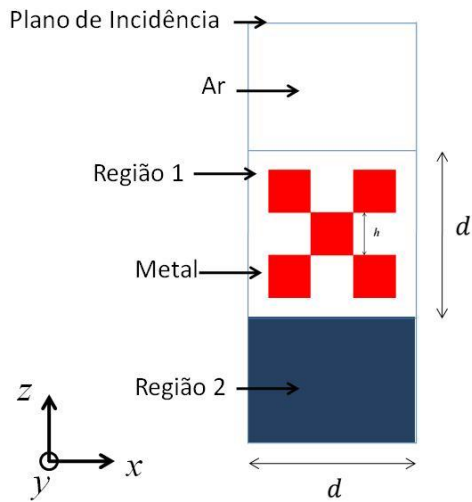


Figura 13 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Box, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.

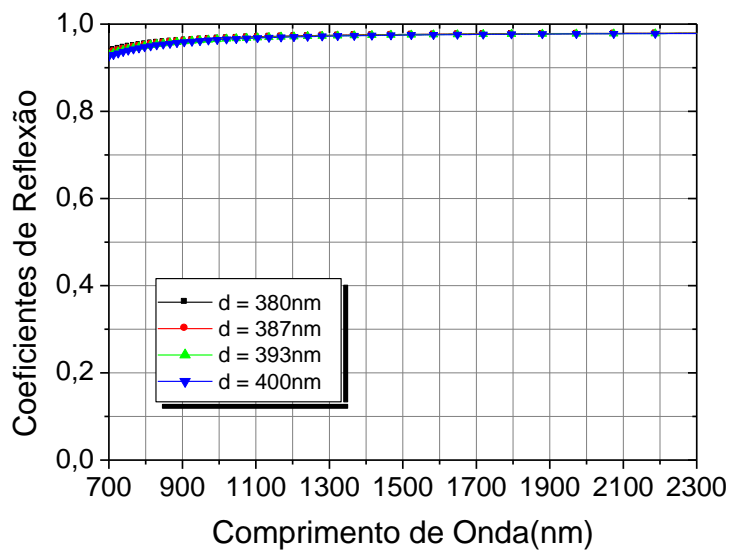


Figura 14 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO_2 e $h = 100\text{nm}$.

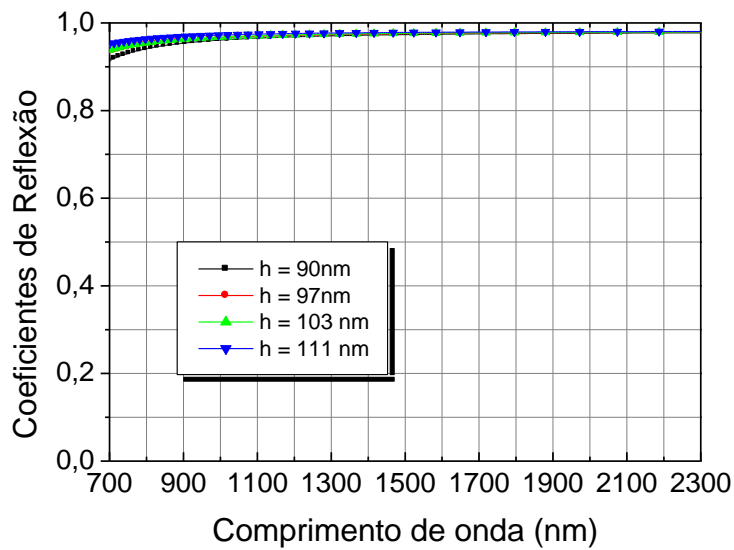


Figura 15 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO₂ e d = 380nm.

Na Figura 16 foi analisada a mesma estrutura da Figura 14 na polarização transversal magnética(TM), os resultados foram bastante diferentes com um pico de alta refletividade próximo de 90% em 1000nm e o segundo com uma grande banda de reflexão(400nm) na faixa compreendida entre 1900-2300nm com refletividade < 90%, para os outros comprimentos de onda a estrutura apresentou baixa refletividade, foi também analisado o efeito da variação de h na Figura 17 para o modo TM, ao variar a constante h as curvas que estavam quase que sobrepostas sofreram um deslocamento, uma provável causa deste deslocamento seria a interferência construtiva ou destrutiva dos feixes incidentes sobre a grade quando o parâmetro h foi variado. A estrutura da grade apresentada tem uma forte dependência com a polarização, esta característica é útil em aplicações que necessitam de uma seleção de polarização, como os VCSELS(Lasers Emissores de Superfície). A alta refletividade das grades estão relacionadas apenas ao alto contraste de índice de refração e a utilização dos parâmetros geométricos adequados, tais fatores criam uma banda proibida na grade impossibilitando a propagação dos modos, uma complexa explicação física da alta refletividade foi proposta em [6] utilizando grades com geometrias retangulares, porém a explicação era limitada apenas a este modelo.

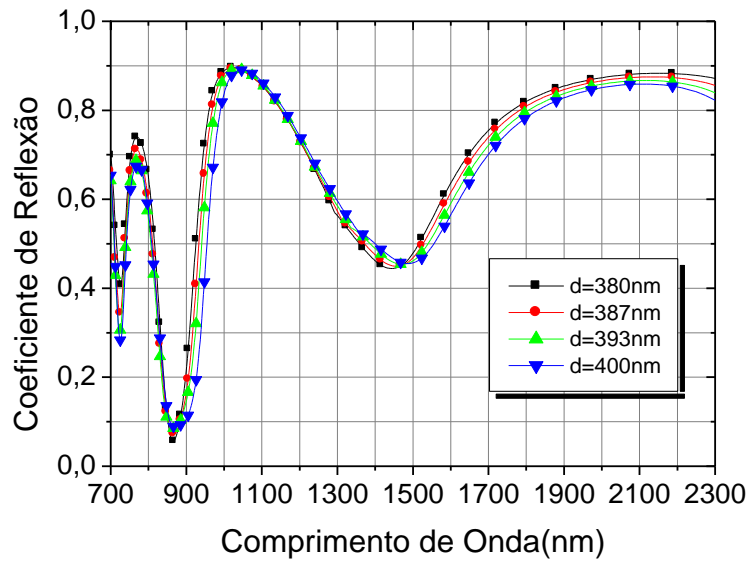


Figura 16 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO₂ e h = 100nm.

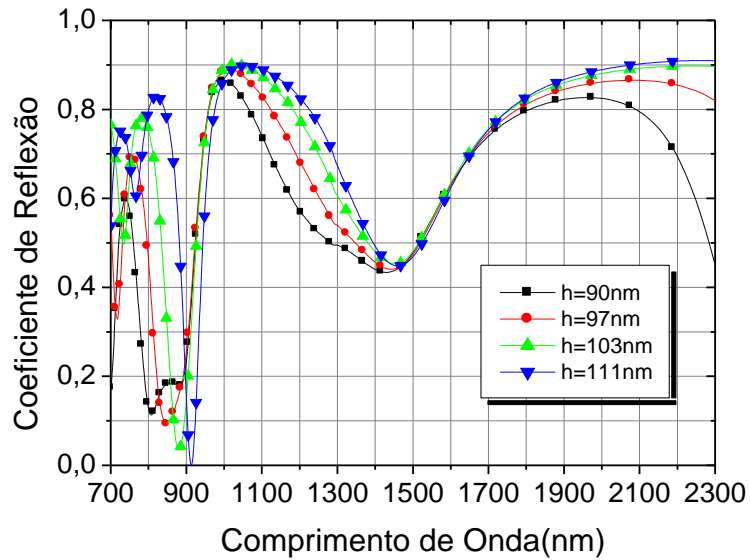


Figura 17 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO₂ e d = 380nm.

Fractal Koch

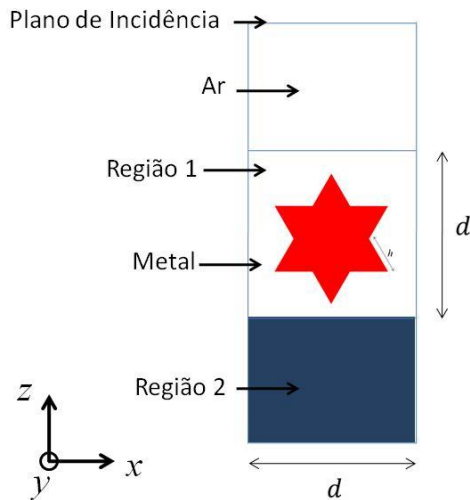


Figura 18 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Koch, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.

Outra geometria fractal que apresentou características de grade com alta refletividade foi a Koch Figura 18, as Figura 19 e Figura 20 representam o comportamento da análise numérica do coeficiente de reflexão versus o comprimento de onda, foi mantido a metodologia da estrutura anterior, onde inicialmente foi variado o período d e depois a constante da geometria h , o modo analisado foi o TE, com substrato de Si e vizinhança de SiO₂, a Figura 19 representa o comportamento desta grade com valor de h fixo em 80nm é possível notar uma grande largura de banda de reflexão >90% para comprimentos de onda no intervalo de 1100-2300nm e para todos valores de períodos, quando $d=360$ nm (estruturas metálicas estão mais próximas) a refletividade apresenta uma ligeira melhora, uma possível causa seria a proximidade estruturas metálicas que compõe a grade impossibilitando a propagação dos comprimentos de onda acima de 1100nm, na Figura 20 o período é mantido fixo em 380nm, é possível notar um comportamento similar a Figura 19 com uma alta refletividade para toda a faixa quando $h=90$ nm, pode-se concluir que uma grade com esta estrutura e com parâmetros geométricos d e h ótimos respectivamente iguais a 380nm e 90nm apresentaria uma alta refletividade em todo espectro analisado, a Figura 21 representa os resultados desta estrutura. Analogamente a geometria Box a alta refletividade está diretamente associada a polarização da onda, podendo assim ter as mesmas aplicabilidades em dispositivos ópticos citados anteriormente, a Figura 22 representa a grade Koch com os mesmos parâmetros físicos e

com $d=380\text{nm}$, foi variado o valor de h e alterado a polarização para magnética(TM), observa-se uma abrupta queda da refletividade para todos valores de h e em todo espectro analisado, ainda é possível notar nas estruturas nas Figuras 19, 20 e 21 alguns “dips” para comprimentos de onda compreendidos no intervalo de 700 e 1200nm, nos resultados apresentados em [6] os autores atribuem um comportamento similar a uma ressonância assimétrica, denominada de Fano Ressonância, por ser diferentes estruturas utilizadas nesta dissertação, não é possível afirmar com certeza se os resultados encontrados correspondem a esta ressonância assimétrica..

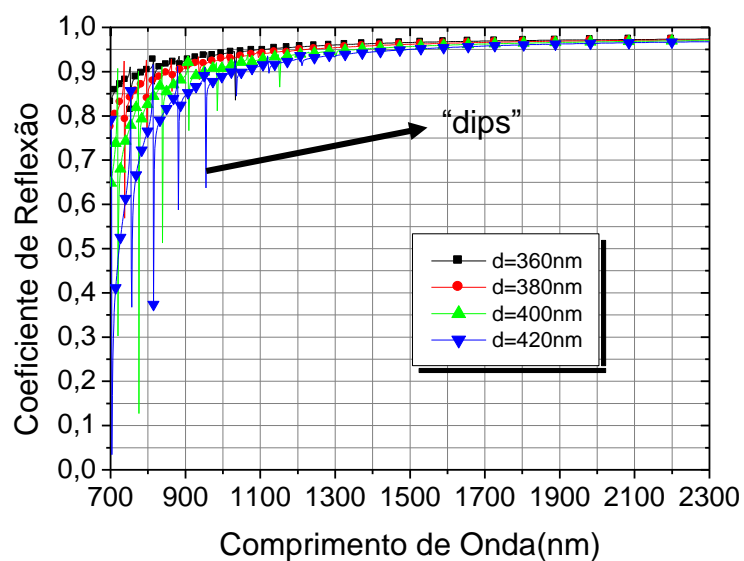


Figura 19 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO_2 e $h=80\text{nm}$.

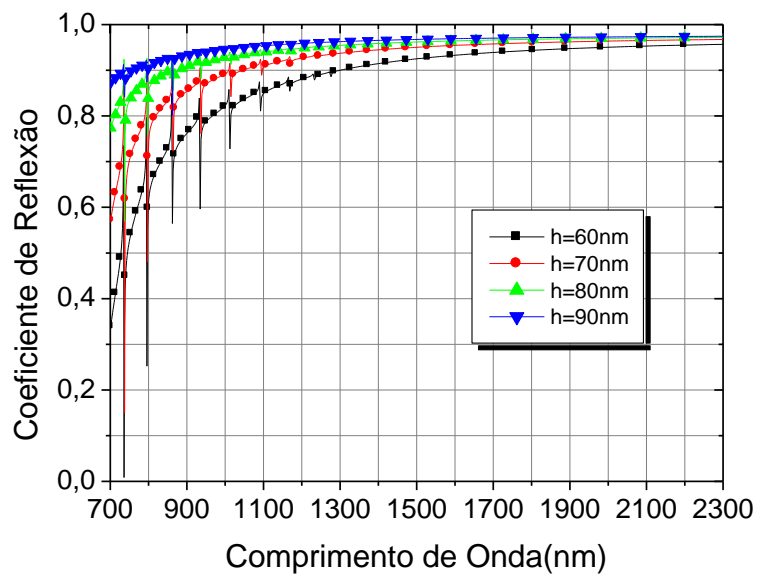


Figura 20 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO_2 e $d=380\text{nm}$.

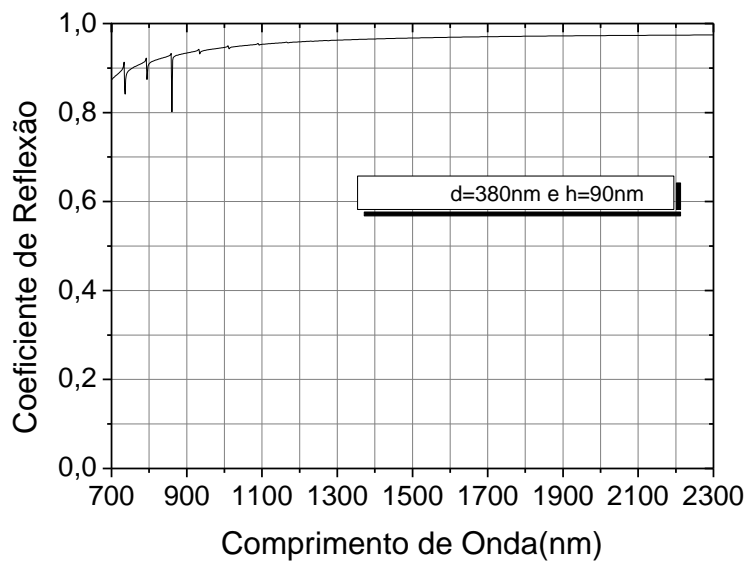


Figura 21 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de Si, vizinhança de SiO_2 , $d=380\text{nm}$ e $h=90\text{nm}$.

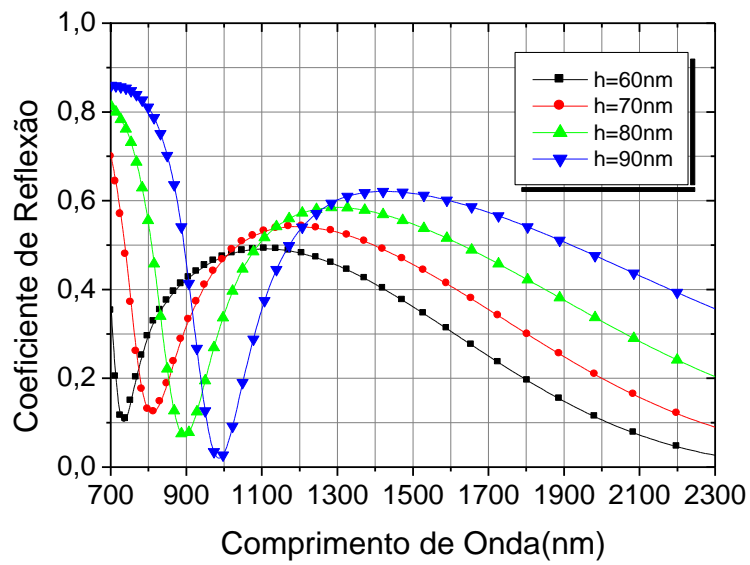


Figura 22 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO₂ e $d=380\text{nm}$.

Fractal Koch Antisnow

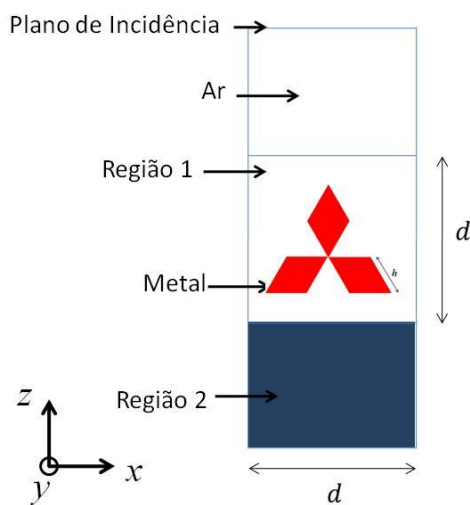


Figura 23 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Koch Antisnow, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.

A geometria fractal Koch Antisnow, Figura 23, com alto contraste de índices de refração apresentou um comportamento de alta refletividade em uma considerável largura de banda(1200-1600nm), a Figura 24 representa o comportamento da reflexão versus comprimento de onda para geometria fractal Koch Antisnow, no modo TE, com substrato de Si, vizinhança de SiO₂, o período foi mantido fixo em 380nm, e foi variado a constante h do fractal, é possível observar uma refletividade acima de 90% para $h=110\text{nm}$ no intervalo de 1200-1600nm,é possível observar uma diminuição da reflexão para menores valores de h , diminuindo de 93%($h=110\text{nm}$) para 87%($h=95\text{nm}$), os resultados não se mantêm quando a constante h é mantida fixa em 80nm e variado a periodicidade Figura 25, ocorre um deslocamento e decréscimo dos picos de reflexão para maiores valores de comprimentos de onda com o aumento do período. Embora a alta refletividade seja em uma largura de banda inferior aos modelos anteriormente analisados, a faixa se encontra na região do infravermelho(~1550nm) no modo TE utilizada nas Comunicações Ópticas.

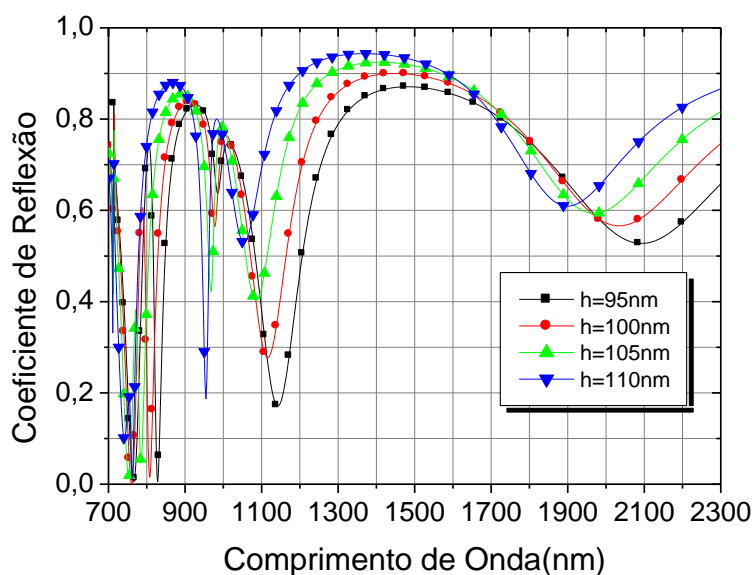


Figura 24 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TE, substrato de SiO₂, vizinhança de Si e $d=380\text{nm}$.

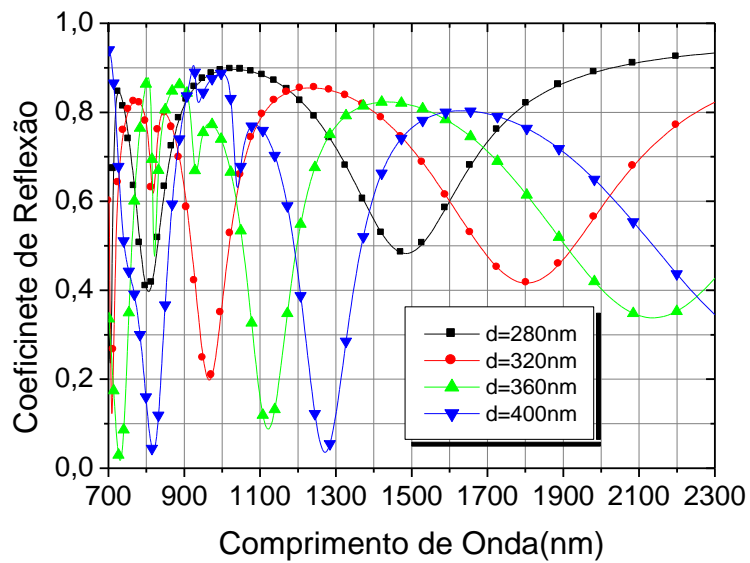


Figura 25 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TE, substrato de SiO₂, vizinhança de Si e $h=80$ nm.

Fractal Sierpinski

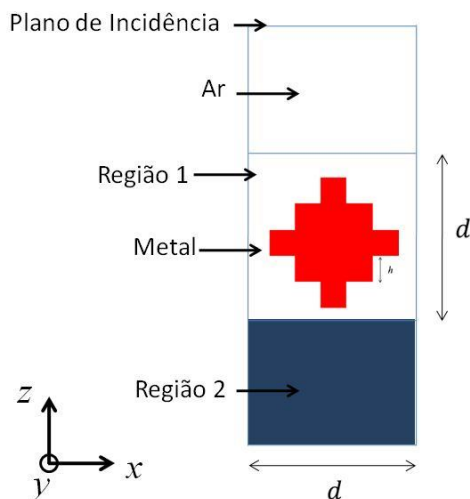


Figura 26 - Grade de Difração Metálica com Geometria Fractal Koch Antisnow, com os parâmetros geométricos d e h que foram variados, a Região 1 é a Vizinhança e a Região 2 é o Substrato, ambas são compostas por Dielétricos.

A grade fractal analisada com geometria Sierpinski, Figura 26, também apresentou uma alta refletividade no modo transversal magnético TM, as Figura 27 e Figura 28 representam uma grade nanométrica fractal com geometria Sierpinski, com substrato de Si e vizinhança de SiO₂, inicialmente foi mantido o valor do período fixo em 380nm(Figura 27) e foi variada a constante h do fractal, nota-se na região espectral analisada quatro diferentes picos de reflexão com pequenas larguras de banda cada, dentre esses picos o de maior refletividade ocorre para $h=20$ nm em 1600nm atingindo uma refletividade de 97,8%, neste mesmo pico observa-se que com o aumento de h ocorre um deslocamento dos picos de reflexão para maiores comprimentos de onda, embora o coeficiente de reflexão decaia, todos os valores analisados continuam acima de 90%, tal fato faz com que esta estrutura possa ser sintonizada de forma que controlando durante o processo de fabricação o valor do parâmetro geométrico h a alta reflexão ocorra para o comprimento de onda desejado, uma outra possibilidade analisada foi fixar o valor de h em 25nm e variar a periodicidade da grade(Figura 28), a capacidade de ser sintonizável com o parâmetro geométrico se mantém, observa-se que no quinto pico de reflexão quando o período é de 400nm a reflexão é próxima de 95%, para os outros valores de período a alta refletividade acima de 90% se mantém ocorrendo pequenos deslocamentos dos picos para menores comprimentos de onda. A possibilidade de ser sintonizável é de grande interesse na confecção de dispositivos ópticos-eletrônicos, pois com a escolha correta dos parâmetros geométricos e com um rigoroso controle no processo de fabricação a grade pode atingir alta refletividade para uma largura de banda de comprimento de onda desejado.

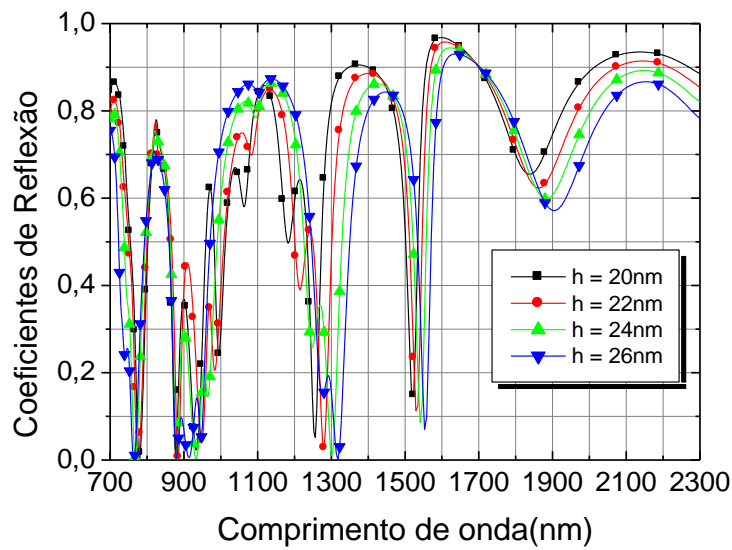


Figura 27 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Sierpinski, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO₂ e $d=380\text{nm}$.

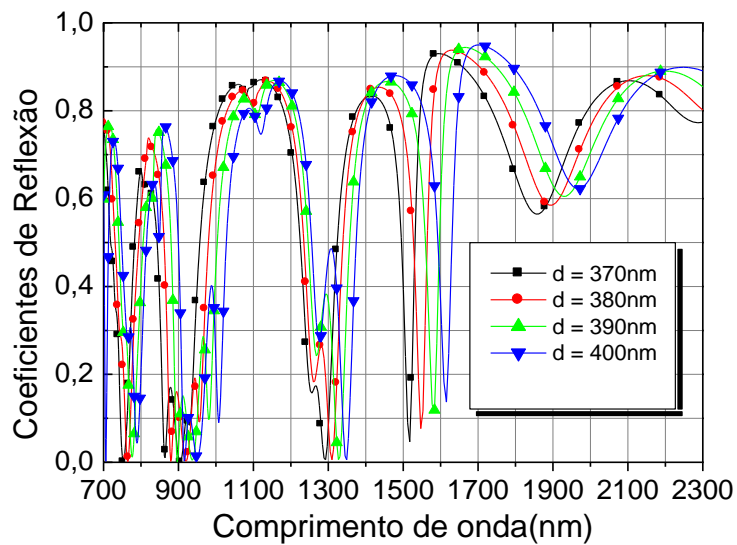


Figura 28 - Comportamento da Reflexão de uma grade com Geometria Fractal Sierpinski, modo TM, substrato de Si, vizinhança de SiO₂ e $h=25\text{nm}$.

Até o presente momento foi discutida a possibilidade de se obter uma grade altamente refletora de banda larga utilizando a geometria fractal, no entanto determinados dispositivos ópticos necessitam da propriedade de ser um refletor de banda estreita ou um ressonador de alto fator de qualidade Q, tais como: Lasers, fontes de fótons individuais,

microdiscos, cristais fotônicos, anéis ressonadores, refletores de Bragg(DBRS), filtros ópticos e sensores [3] , para se obter esta propriedade basta alterar corretamente os parâmetros Físicos determinados pelos índices de refração da vizinhança e substrato e dos parâmetros geométricos da grade determinados pelo período(d) e a constante do fractal(h), esta ressonância foi explorada com sucesso em [31] no desenvolvimento de um biosensor que utilizava um laser do tipo DFB, que era composto por uma grade dielétrica unidimensional sintonizável. O trabalho pioneiro a utilizar grades com geometria fractal foi [34], diferentemente do que consta na literatura até o presente momento que utilizam grades com geometria euclidiana, a geometria fractal possibilita uma sintonização da grade com os parâmetros geométricos de modo a se obter a ressonância e consequentemente uma alta reflexão nos modos TE e TM e em diferentes comprimentos de onda.

3.2 – Grades de Transmissão

Grades nanométricas compostas de dielétricos e metais imersas em um meio com índice de refração igual a 1,00 (Ar/vácuo) podem ter transmissão ótima na polarização magnética (TM) devido ao acoplamento dos plasmons de superfície [37] e [38], no entanto estas ondas plasmônicas não são excitadas quando temos uma incidência da luz no modo elétrico(TE), [39] observou e explicou ser possível obter alta transmissão em grades com metais no modo TE desde que estas fossem postas em contato (nas vizinhanças) com uma fina película dielétrica, [40] observou experimentalmente o modelo teórico de um aumento de 25 vezes na transmissão quando uma película dielétrica é inserida em uma grade metálica composta de ouro aumentando a eficiência da transmissão.

A alta transmissão em grades compostas de metal/dielétrico operando com polarização TE se deve a uma onda de superfície que se propaga no dielétrico [39] e [40], esta energia transmitida é devido a dois fatores [39], primeiro está associado a largura da fenda(distância entre duas grades consecutivas), onde esta deve ter um valor ótimo acima da largura de corte possibilitando assim a propagação dos modos de difração, o segundo fator é a presença do dielétrico envolvendo (nas vizinhanças) o metal, foram testados os seguintes dielétricos Silício (Si), Sílica (SiO₂) e a liga ITO(na faixa analisada a parte

imaginária do índice de refração é desprezível), com índices de refração respectivamente iguais a 3,40, 1,44 e 1.90, obtendo melhores resultados com o maior índice. Foram analisadas as transmissões em grades periódicas de difração utilizando as quatro geometrias fractais mencionadas, em todas estas geometrias foram considerados a periodicidade de 380nm e foram variados os valores de h da geometria fractal, obtendo altos coeficientes de transmissão para comprimentos de onda específicos.

3.2.1 – Resultados e Discussões modo TE

A Figura 29 representa o comportamento da transmissão em uma grade periódica de Au com geometria fractal Box e período de 380nm, onde foi utilizado nas vizinhanças Si e o substrato é composto de SiO₂, são observados picos de transmissão para comprimentos de onda de 1000-1200nm, estes efeitos não sofrem nenhum tipo de alteração quando o substrato foi substituído pelo ar, para efeito de validação foi verificado o comportamento das grades aqui analisadas sem a presença do dielétrico, ou seja imersas em um meio com índice de refração 1, para todas as análises não houve transmissão ou os valores foram inferiores a 3%, a Figura 30 representa a mesma estrutura analisada na Figura 29 sem a presença do dielétrico nas vizinhanças, a transmissão é totalmente suprimida e o campo incidente é quase que totalmente refletido, um efeito similar foi analisado numericamente e testado experimentalmente em [41] utilizando uma estrutura periódica de metal(Au)/Ar na faixa de comprimento de onda 400-900nm.

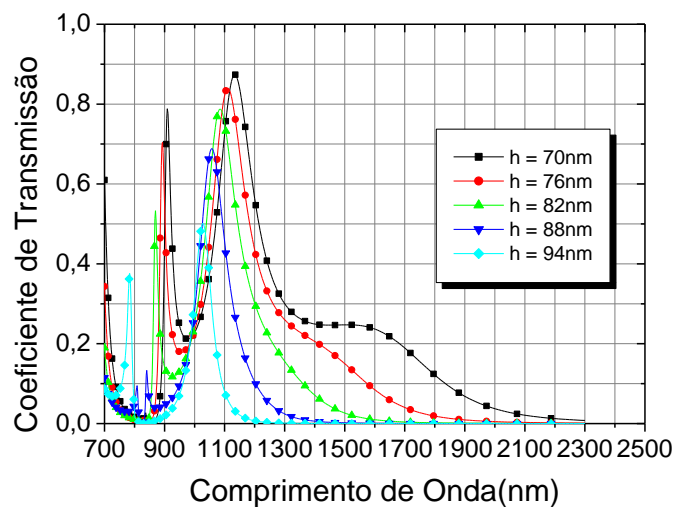


Figura 29 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal BOX, modo TE, $d= 380\text{nm}$, Substrato de SiO_2 e vizinhança de Si.

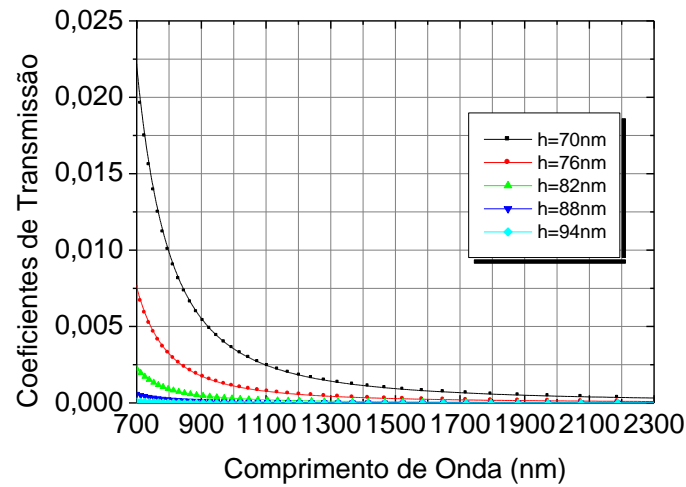


Figura 30 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria FractalBOX, modo TE, $d= 380\text{nm}$, imersa em um meio de índice 1.

Nas Figura 29, Figura 31, Figura 32 e Figura 33 em que foram analisados os comportamentos da transmissão, são verificados um ou mais picos de ressonâncias para comprimentos de ondas específicos, estes picos de ressonâncias são relatados em [39] como sendo uma consequência direta da alteração dos seguintes fatores: geometria (h) e o material (ϵ), pois os índices de refração em metais são constituídos pelas partes real e imaginária, fazendo com que uma parcela da energia do campo incidente seja absorvida na forma de uma onda evanescente. As particularidades de cada geometria fractal fazem com que estes picos sejam deslocados em alguns nanômetros, que podem ser visualizados nas Figura 29, Figura 31 e Figura 32 onde a única variação é a geometria, pois foi mantida a mesma combinação de materiais e periodicidade. Na Figura 29 o primeiro pico de ressonância ocorre próximo a 900nm para quase todos os valores de h , exceto $h = 88$ e 94nm, quando a geometria é modificada para a Koch (Figura 31) o primeiro pico de transmissão é reduzido para todos os valores de h para um comprimento de onda em torno de 720nm e para 750nm (Figura 32) mostrando uma forte dependência da geometria.

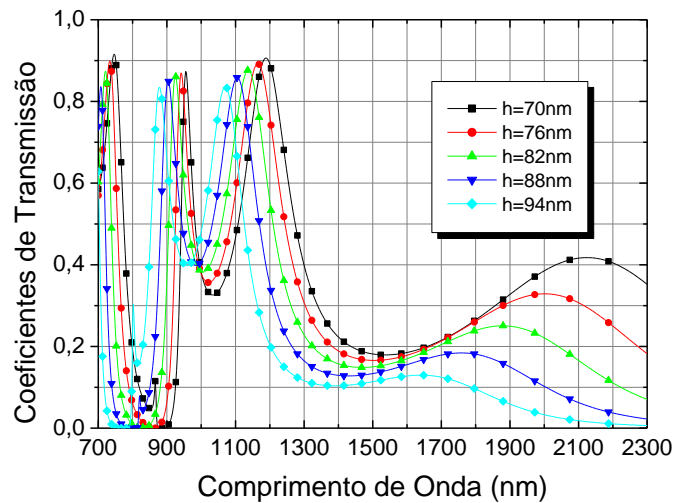


Figura 31 -Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TE, substrato de SiO₂(resultado similar com ITO) e vizinhança de Si, $d= 380\text{nm}$.

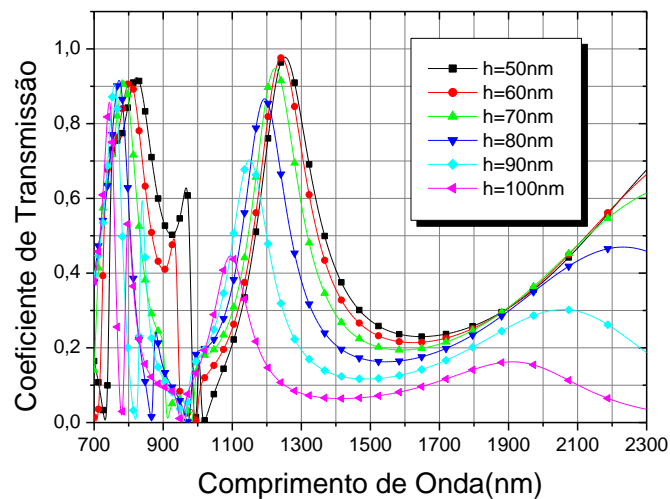


Figura 32 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TE, substrato de SiO₂ e vizinhança de Si, $d= 380\text{nm}$.

As grades com geometria Box, Koch e Sierpinski demonstraram uma alta dependência da transmissão com o valor de h , quanto maior for este valor fractal tende a ocupar quase todo o espaço da grade se aproximando do período, ou seja, as grades teriam fendas muito estreitas e conseqüentemente diminuindo a transmissão da luz no modo TE, tal fato pode ser observado na Figura 31, onde os dois máximos picos de transmissão estão localizados respectivamente em 790nm e 1000nm para $h = 94\text{nm}$ com transmissão próximo de 38 e

50% e na Figura 33 em 740 e 890nm, para $h = 30\text{nm}$ com transmissão de 20 e 80%. O segundo pico de ressonância relatado na literatura [39], corresponde a máxima transmissão/transmissão ótima e está presente em todas estruturas analisadas e para todos os valores de h , na Figura 29 temos uma transmissão acima de 80% para $h=70$ e 76nm ocorrendo para comprimentos de onda acima de 1100nm , para esses mesmos valores de h na geometria Koch Figura 31 a transmissão atinge 90% para comprimentos de onda compreendidos entre 1100 e 1300nm , sendo que para os outros valores de $h(94,88$ e $82\text{nm})$ foram obtidos excelentes coeficientes de transmissão $>80\%$, as maiores transmissões foram determinadas na geometria Koch Antisnow Figura 32 onde foi obtido transmissões próximas de 98% para valores de $h = 50$ e 60nm e comprimentos de onda em torno de 1250nm , outro fato a ser observado é a independência do primeiro pico de transmissão com a geometria, uma vez que não ocorre a excitação dos plasmons de superfície nesta polarização[41].

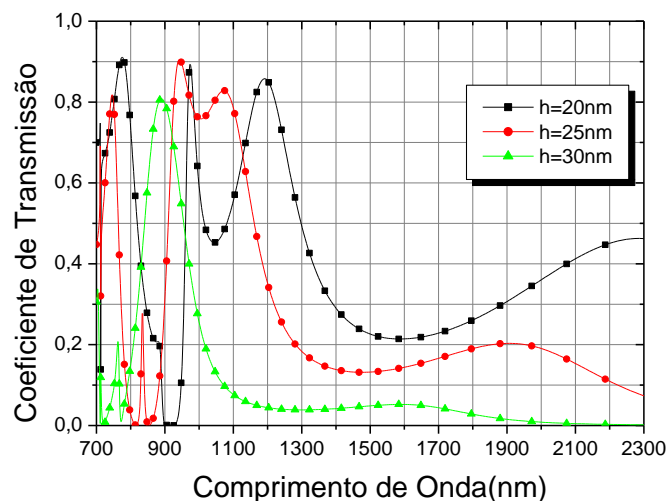


Figura 33 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Sierpinski, modo TE, substrato de ITO e vizinhança de Si, $d=380\text{nm}$.

A geometria fractal Sierpinski representada na Figura 33 é bastante sensível a variação de h , foram analisados três valores, para $h=30\text{nm}$ o primeiro pico de transmissão ocorreu próximo a 800nm e apresentou uma baixa transmissão de 20%, o segundo pico de ressonância ocorreu para o comprimento de onda próximo de 900nm apresentando uma boa transmissão de 80%, os melhores valores foram alcançados quando os valores de $h=20$ e 25nm que permitiram a propagação dos modos acima da largura de corte da

fenda(valor no qual determinados comprimentos de onda não se propagam) , associado com este fato a escolha da liga ITO nas vizinhanças do metal possibilitaram transmissões de 90% respectivamente nos comprimentos de onda de 780nm e 950nm.

3.2.2 - Resultados e Discussões Modo TM

As ressonâncias de transmissão em grades periódicas de difração no modo TM foram analisadas e estudadas em [42] e foi verificado que a alta transmissão está associada basicamente a situação na qual $\lambda \gg d$, nesta situação não ocorre a excitação dos plasmons de superfície(SSPs), o campo incidente induz densidades de corrente que flui paralela às paredes das fendas com sinais diferentes, tal fato pode ser verificado na Figura 34 que apresenta uma transmissão acima de 80% nos comprimentos de ondas compreendidos entre 1200 e 1490nm para todos valores de h analisados, mesmo quando h assume o maior valor (100nm), situação na qual a fenda da grade é muito menor que o período, a grade apresenta uma alta transmissão com valor próximo de 83%, quando o substrato de Si é substituído pelo vácuo ($n=1$) temos um pequeno aumento da transmissão para todos valores de h (Figura 35), mostrando a pouca sensibilidade da transmissão ao índice de refração do substrato, exceto para $h=80$ nm onde a transmissão teve um aumento substancial atingindo valor de transmissão próximo a 93%.

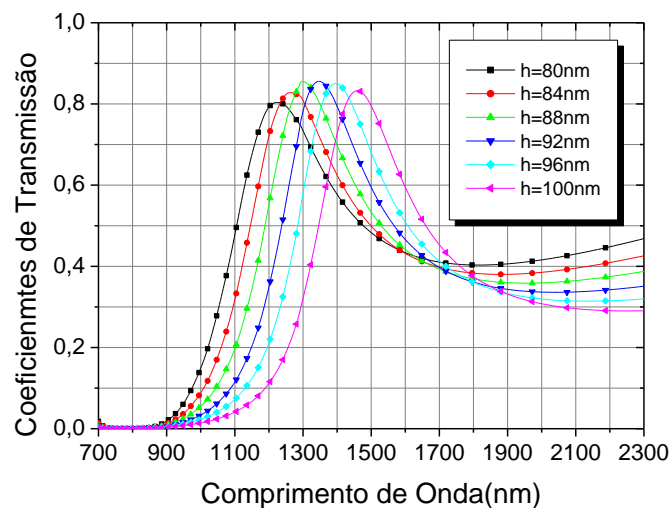


Figura 34 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato de Si e vizinhança de ITO, $d= 380$ nm.

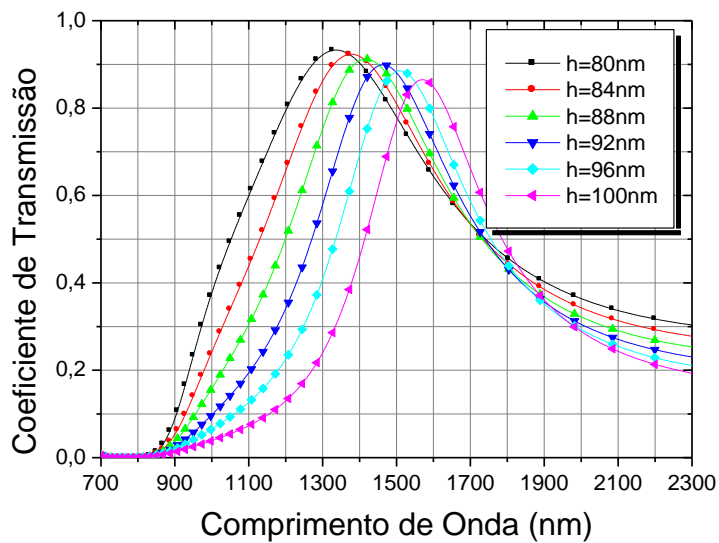


Figura 35 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, $d=380\text{nm}$.

Em [38] foi determinado uma relação geométrica direta para os picos de transmissão, onde as ressonâncias ocorriam para $\lambda \sim 2d$, esta possibilidade foi testada com $d \sim 320\text{nm}$ para valores de $102\text{nm} < h < 109\text{nm}$ (grade muito estreita) Figura 36, estes picos de ressonância da transmissão que deveriam ocorrer próximo a 700nm não foram verificados, muito provavelmente devido a alteração da geometria euclidiana para a geometria fractal, uma importante característica a ser mencionada é o deslocamento do pico de transmissão quando o valor de h é aumentado, fato observado experimentalmente em [41], que é característico da ressonância de transmissão causada pela interferência construtiva de ondas de superfície da grade.

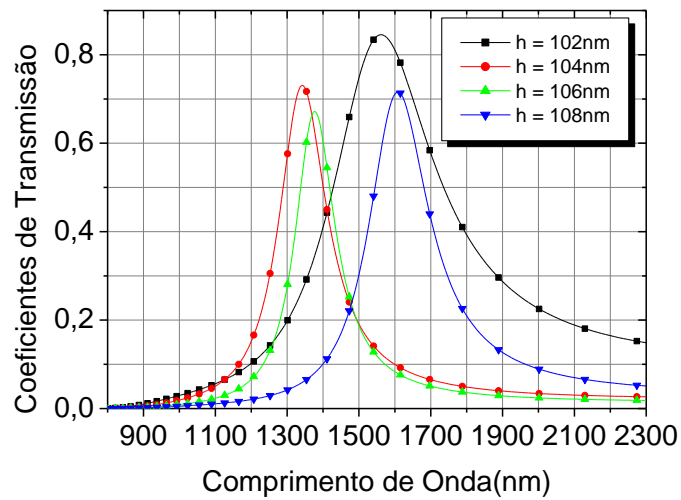


Figura 36 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, $d= 380\text{nm}$, para fendas muito estreitas.

Foi também analisada a dependência da transmissão em relação ao ângulo de incidência θ , e ficou constatado uma quase independência da transmissão em relação ao ângulo de incidência θ no intervalo de 0 a 50° para todos valores de h , Figura 37 para $h=80\text{nm}$ e a Figura 38 para $h=100\text{nm}$ representam os valores extremos de h e que demonstra uma fraca dependência com o ângulo de incidência neste intervalo, para ângulos maiores que 50° houve uma forte queda do coeficiente de transmissão Figura 39.

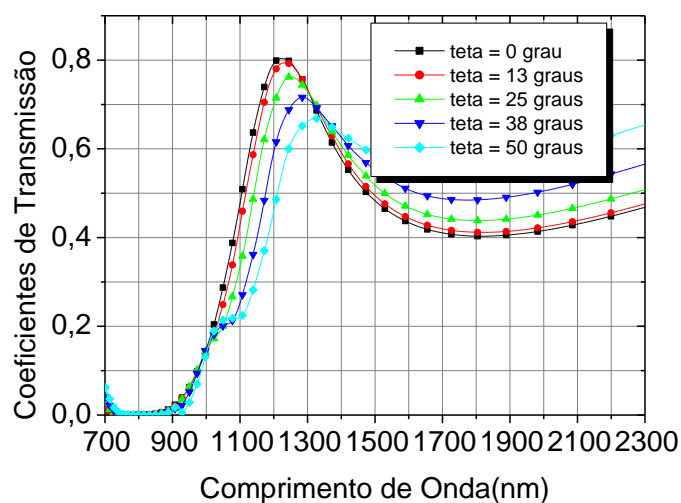


Figura 37 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, $d= 380\text{nm}$, $h= 80\text{nm}$ para cinco valores do ângulo de incidência θ compreendidos entre 0^0 e 50^0 .

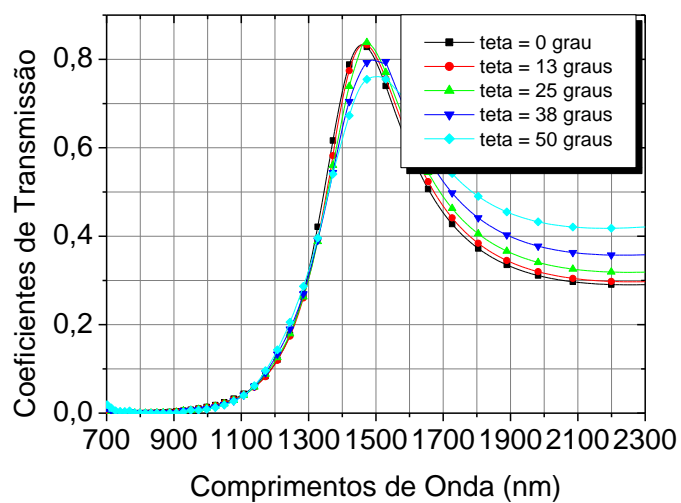


Figura 38 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, $d= 380\text{nm}$, $h= 100\text{nm}$ para cinco valores do ângulo de incidência θ compreendidos entre 0^0 e 50^0 .

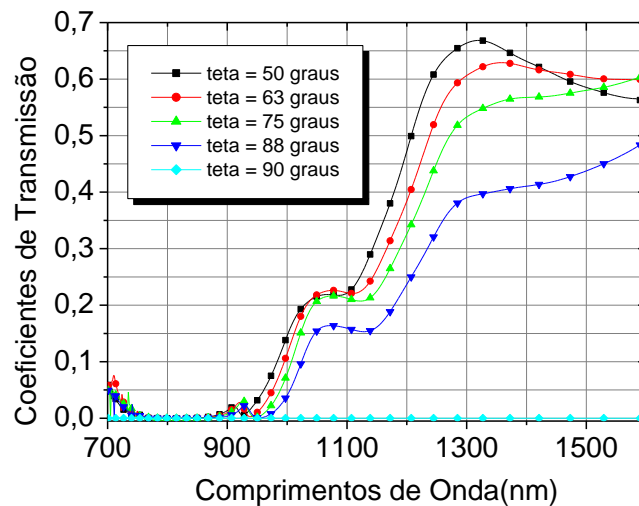


Figura 39 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch, modo TM, Substrato vácuo e vizinhança de ITO, $d= 380\text{nm}$, $h= 80\text{nm}$ para cinco valores do ângulo de incidência θ compreendidos entre 50° e 90° .

O comportamento do espectro da transmissão de uma grade fractal com geometria Koch Antisnow é apresentada na Figura 40, esta apresentou um bom comportamento para baixos valores de comprimento de onda (ou altas frequências) na janela de 700 a 850nm, após este primeiro pico houve uma brusca redução para todos valores de h analisado e não ocorreu transmissão, estes pontos foram analisados e foi constatado que cerca de 60% do campo foi refletido e o restante absorvido no interior da estrutura, para comprimentos de onda maiores que 1300nm foi notado um crescimento quase que linear da transmissão para todos os valores de h , também foi substituído o substrato de Si pelo ar e foi verificado que os resultados se mantêm praticamente imutáveis.

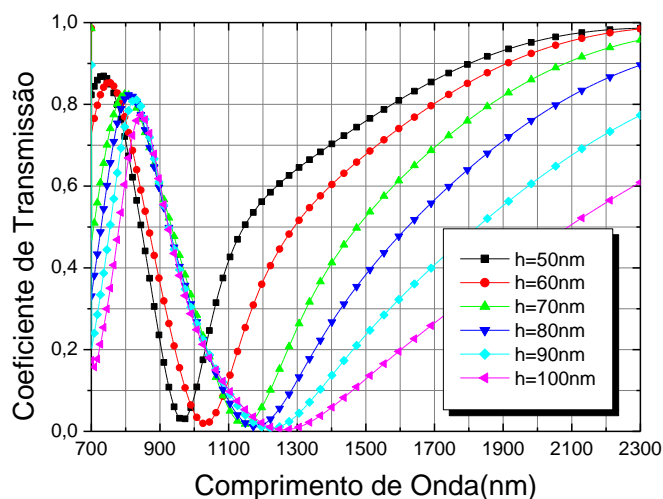


Figura 40 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, modo TM, Substrato de Si e vizinhança de SiO₂, $d= 380\text{nm}$.

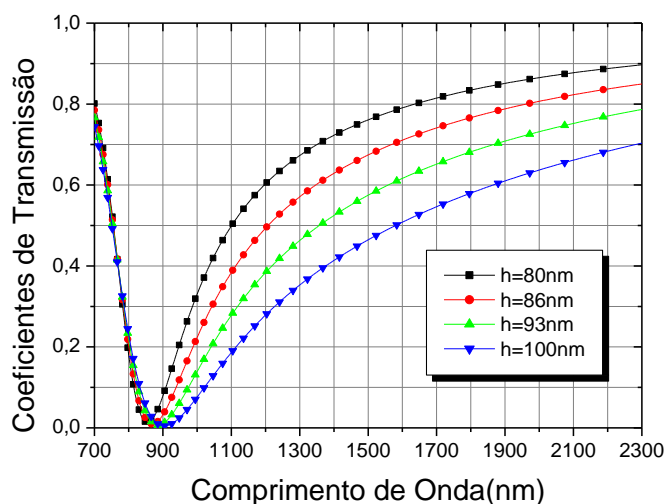


Figura 41 - Comportamento da Transmissão de uma grade com Geometria Fractal Koch Antisnow, Modo TM, grade imersa em um meio de índice de refração 1, $d= 380\text{nm}$.

Na Figura 41 foi a estrutura proposta na *Figura 40* porém foi substituído não só o substrato como também a vizinhança em que o fractal estava contido pelo ar, foi observada uma forte ressonância de transmissão em 700nm para os valores de h analisados e logo após em torno de 900nm não houve transmissão, como consequência todo o campo sofreu uma forte reflexão e absorção, para valores de comprimento de onda

acima de 900nm a grade apresentou um comportamento tendendo a linearidade, similar ao modelo da Figura 40.

3.3 – Grades de Absorção

Grades ópticas com alta capacidade de absorção do campo eletromagnético incidente tem diversas aplicações na composição de dispositivos fotônicos, podemos classificar estes dispositivos quanto a largura de banda do comprimento de onda de operação: (i) dispositivos que operam na faixa do visível 400-700nm e (ii) na faixa das comunicações ópticas(Infravermelho) 1100-1550nm. Na faixa do visível existe a necessidade de minimizar os custos na confecção de placas fotovoltaicas e ao mesmo tempo minimizar as perdas por reflexão da luz em ambas polarizações, as células solares convencionais de silício tem um alto valor agregado associado aos custos dos materiais para sua confecção [43] e ao mesmo tempo boa parte da luz incidente é refletida, a junção nanoestruturada de metais/dielétricos em estruturas nanométricas levam a modificações substanciais das propriedades ópticas, se uma superfície metálica pode refletir aproximadamente todo o campo incidente, a junção nanoestruturada pode absorver 99% do campo incidente [44], estas estruturas vem sendo amplamente estudadas devido a possibilidade de se obter altos coeficientes de absorção para diversos comprimentos de onda do espectro visível, grades retangulares e cilíndricas com substrato metálico e o topo com material dielétrico em uma e duas dimensões em substrato metálico foram analisadas em [45] melhorando substancialmente a absorção, em [7] cavidades cilíndricas de SiO₂ foram dispostas sobre um substrato de ouro e alumínio obtendo uma alta absorção de aproximadamente 95% em um intervalo de -9⁰ a 9⁰ do ângulo de incidência, em [7] foram analisadas estruturas dielétricas com geometria triangular e trapezoidal de prata com duas camadas de dielétrico Si/ITO obtendo uma absorvidade geral de 53,6% na polarização TE e 46,4% na TM, em [10] foi proposto um eficiente dispositivo consistindo de uma matriz bidimensional de nanocavidades em um substrato de ouro com alta absorção em ambos modos.

Os metais tendem a refletir quase todo o campo eletromagnético incidente sobre uma superfície plana independente da polarização, Wood foi o primeiro a observar anomalias em superfícies metálicas periódicas [46], essas anomalias denominadas “anomalias de

Wood” são conhecidas e se deve a oscilação coletiva dos elétrons da superfície metálica quando sobre esta incide luz em determinadas frequências, este “reforço” do campo na superfície metálica se deve a propagação de uma onda plasmônica, também conhecida como plasmons de superfície, este aumento atrai a atenção da comunidade científica devido ao grande interesse na interação luz-matéria [47], a absorção da luz se torna interessante pela capacidade de se confeccionar dispositivos que otimizem a absorção e que possam ser utilizados em células fotovoltaicas, espectroscopia Raman(SERS), bem como em óptica não-linear [7].

3.3.1. - Resultados e Discussões na Faixa Visível (400-700nm)

Os modelos propostos para a faixa espectral da luz visível foram: um cilindro dielétrico de raio igual ao período envolvido por um metal com uma distância r entre a superfície superior do cilindro e a interface metal/ar Figura 42, um prisma de base triangular Figura 43 e trapezoidal Figura 44. No primeiro modelo foram utilizados o Au e Al como metais, para os cálculos dos índices de refração na faixa espectral de 400-700nm foi utilizado a equação de Drude-Lorentz, os dielétricos utilizados foram SiO_2 e ITO com índices respectivamente iguais a 1,45 e 1,90, inicialmente foi analisado um valor de r ótimo para o qual a refletividade fosse mínima, como não houve transmissão, este ponto é de absorvidade máxima, Figura 45 representa o modelo citado acima com cilindro de ITO e metal Au, com período de 380nm e polarização TE, é possível observar uma alta absorção em torno de 97% para os valores de r iguais a 5nm e 15nm e um valor máximo da absorção de 99% para $r=10\text{nm}$.

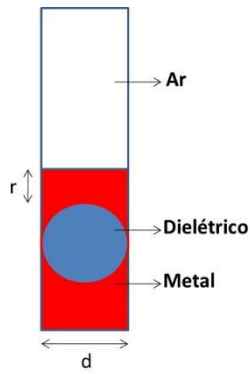


Figura 42– Grade de Difração com Geometria composta de um Cilindro Dielétrico imerso no interior do metal.

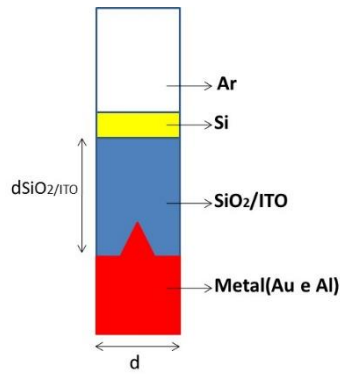


Figura 43– Grade de Difração composta de um Prisma metálico de base triangular com duas camadas dielétricas.

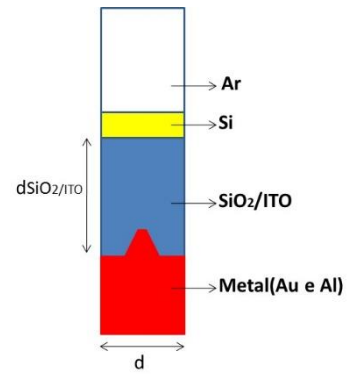


Figura 44– Grade de Difração composta de um Prisma metálico de base trapezoidal e por duas camadas dielétricas.

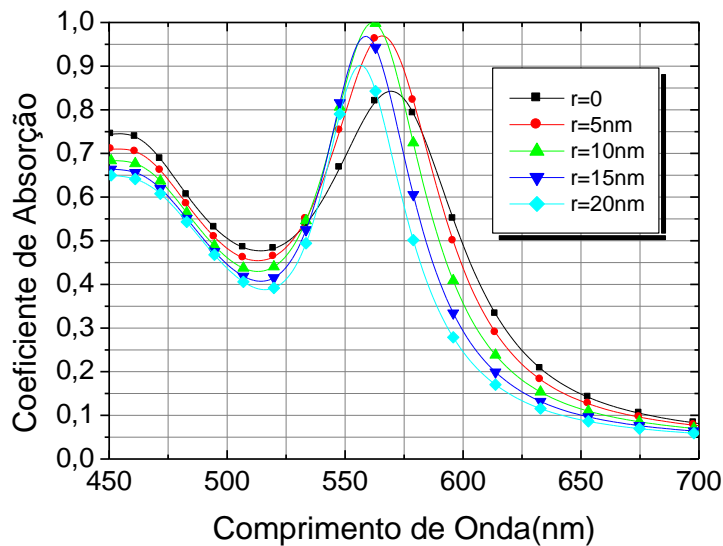


Figura 45 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $d=380\text{nm}$, modo TE.

Visando verificar a dependência do comprimento de onda e o período foi analisado o comportamento para diversos valores de r , $r=5\text{nm}$, 10nm e 15nm para uma faixa espectral de 400 a 1000nm, que pode ser observado nas Figura 46, Figura 47 e na Figura 48.

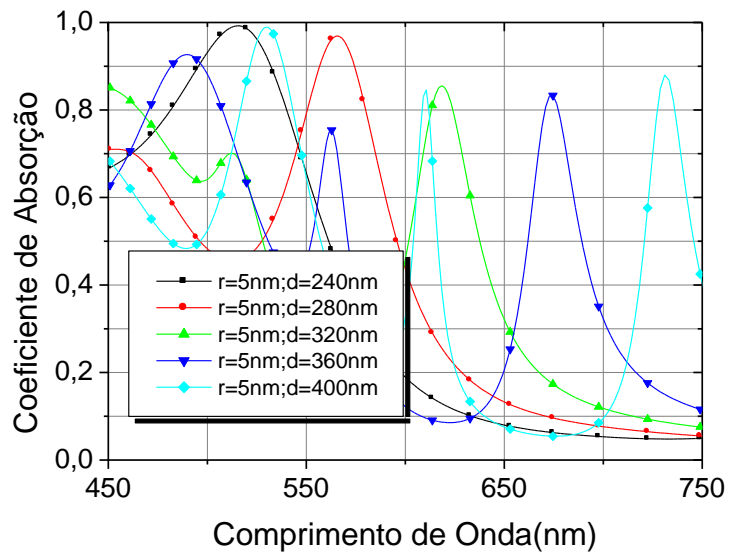


Figura 46 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $r=5\text{nm}$, modo TE.

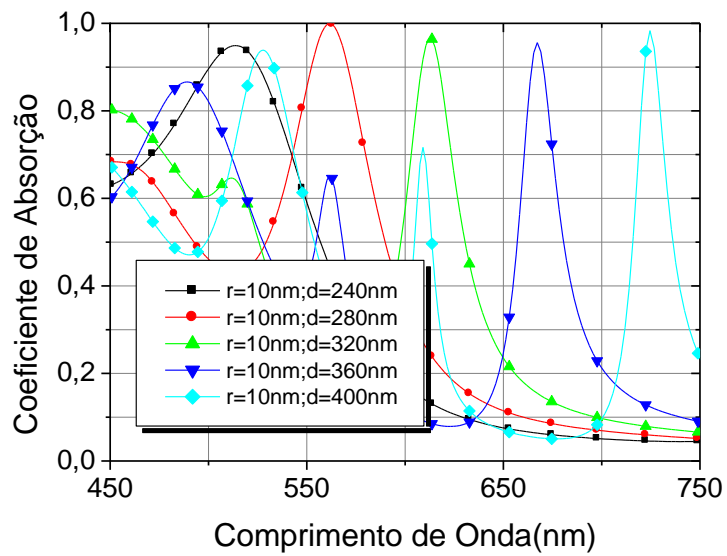


Figura 47 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $r=10\text{nm}$, modo TE.

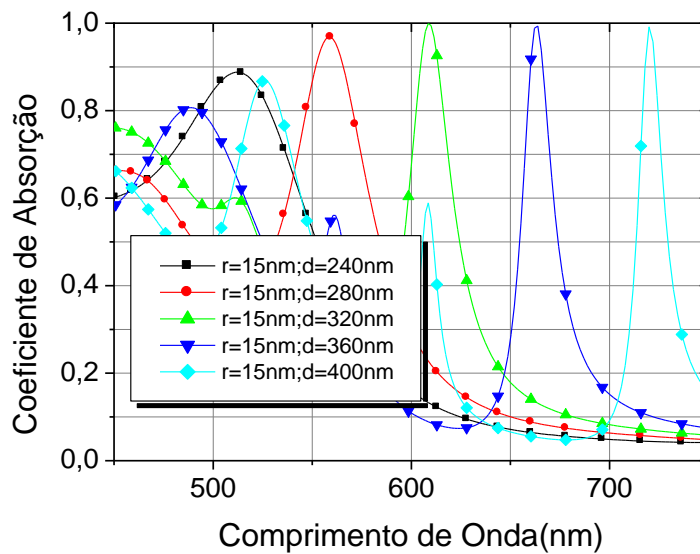


Figura 48 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, $r=15\text{nm}$, modo TE.

É possível observar para todos os valores de r uma dependência entre o comprimento de onda da luz incidente e o período da grade, esta dependência Figura 49 é praticamente linear, tal fato faz com que estas grades possam ser sintonizadas de tal forma que podemos obter máximos de absorção para determinados comprimentos de onda modificando o período da geometria, a forte absorção nesta polarização é uma consequência direta da excitação dos plasmons de superfície no metal, era de esperar quando ocorresse a incidência da luz sobre uma superfície metálica esta fosse completamente refletida, porém para pequenos valores de r analisados ocorre o acoplamento na onda incidente através do efeito túnel do metal [7], tal efeito associado a excitação dos SSPs fazem com que o campo elétrico na região da grade dielétrica cilíndrica seja intensificado, e a grade funcione como uma cavidade ressonante, confinando a luz em seu interior.

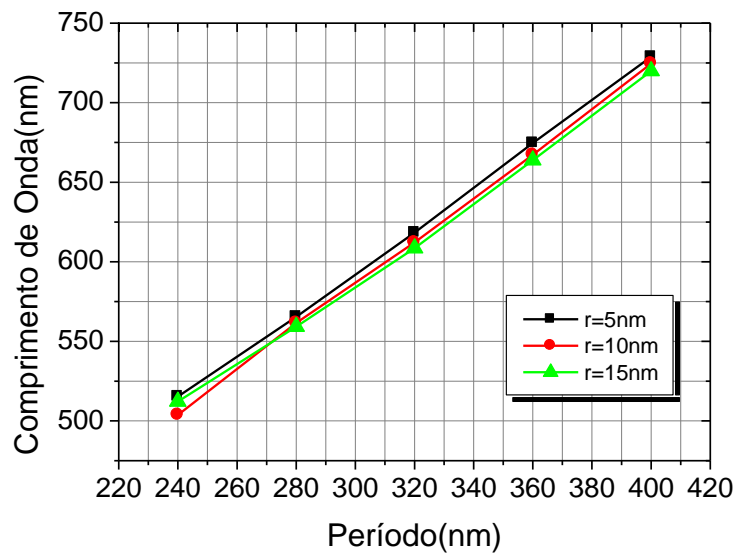


Figura 49 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, dependência $\lambda(d)$, modo TE.

Esta estrutura foi analisada no modo TM e não foi obtido os resultados desejados, ou seja, a alta absorção, então foi modificado o dielétrico para SiO₂, um comportamento diferente é observado Figura 50, pode-se notar um deslocamento dos picos de absorção para maiores valores de comprimentos de onda.

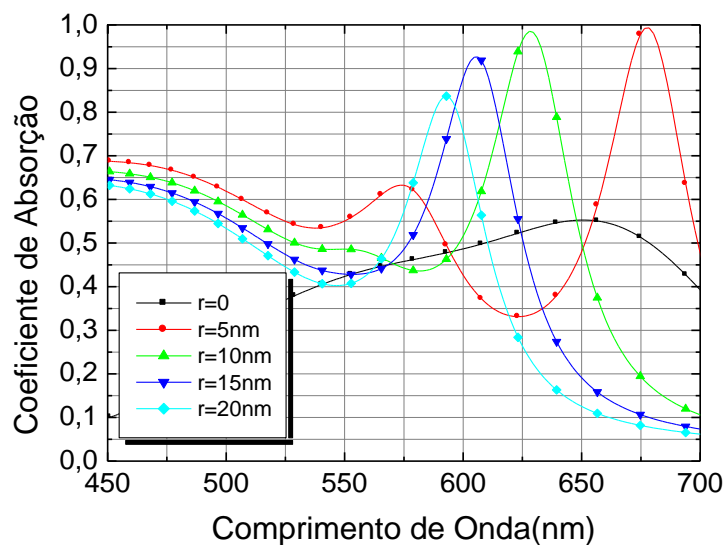


Figura 50 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO₂, metal Au, $d=380$ nm, modo TM.

Para $r=0$ pode-se observar que apenas 55% do campo é absorvido, os melhores valores de r para esta estrutura foram 5,10 e 15nm, estes valores de r foram analisados separadamente para diversos períodos compreendidos em intervalos iguais entre 240 e 400nm. Foi utilizado a mesma metodologia da grade anterior para verificar a dependência da absorção com o valor de r , analisando a Figura 51 nota-se que para o valor de $r=5$ nm apenas os períodos de 240nm e 280 tiveram bons resultados, na Figura 52 representa o comportamento de $r=10$ nm nota-se uma significativa melhora onde é possível obter três diferentes valores de período(240,280 e 320nm) com alto coeficiente de absorção, na Figura 53 é avaliado o valor de $r=15$ nm, obtém-se também três picos de absorção em $d=280,320$ e 360nm, porém com valores ainda melhores quando comparados com $r=10$ nm com coeficientes de absorção de 99%, assim como no modo TE também foi avaliado a dependência do comprimento de onda com a periodicidade da grade (Figura 54) e observa-se também uma dependência linear e um deslocamento de períodos ótimos para valores de r no intervalo de $0 \leq r \leq 15$ nm. O acoplamento da luz no interior da grade no modo TM é devido principalmente ao acoplamento de modos de ordem superior relatados em [7], este fato associado ao efeito túnel do metal pode conduzir a uma absorção total da luz para comprimentos de ondas específicos, pode-se compreender tal fenômeno observando uma diminuição de picos de absorção para a estrutura no modo TM quando comparada com o modo TE, existe também uma relação praticamente linear do período com o comprimento de onda para os valores de r analisados, e diferentemente do modo TE para pequenos valores de r , ou seja quanto mais próximo o dielétrico da interface metal/ar os picos de absorção tendem a ser suprimidos Figura 54.

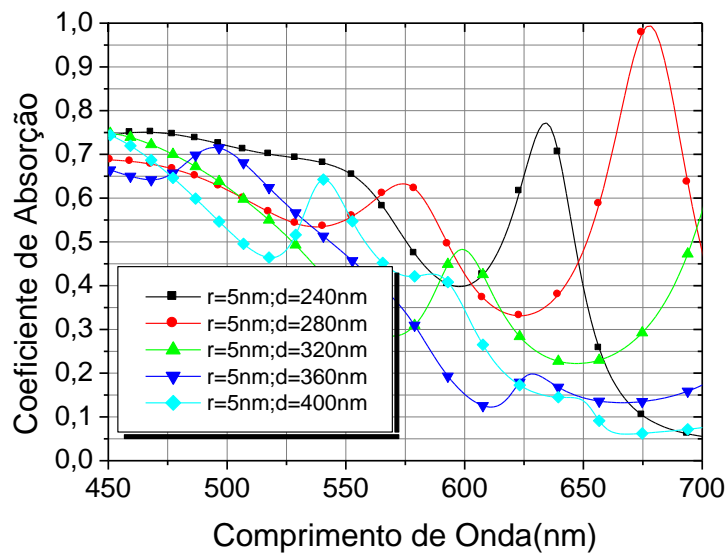


Figura 51 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO₂, metal Au, $r=5\text{nm}$, modo TM.

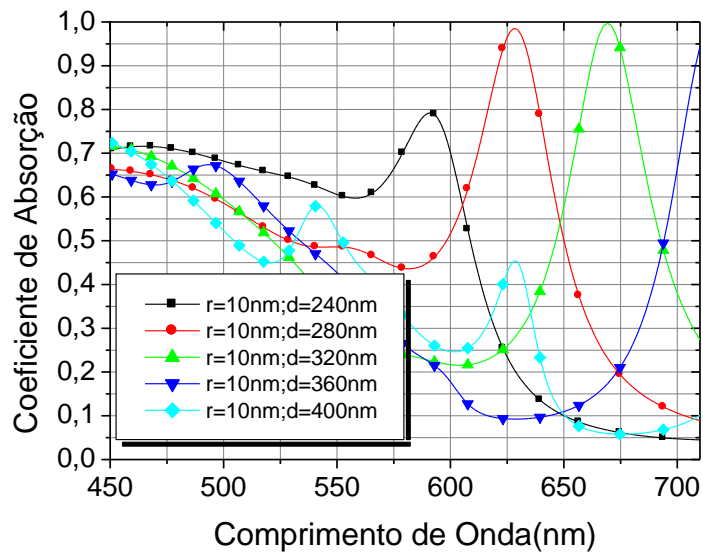


Figura 52 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO₂, metal Au, $r=10\text{nm}$, modo TM.

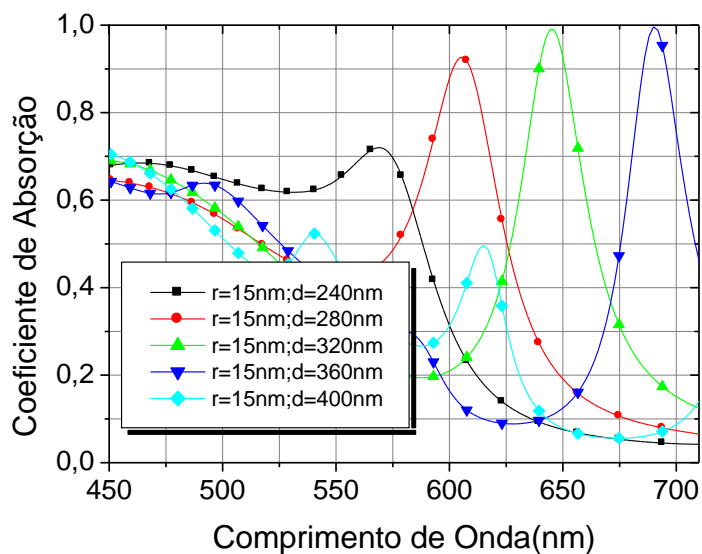


Figura 53 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de SiO₂, metal Au, $r=15\text{nm}$, modo TM.

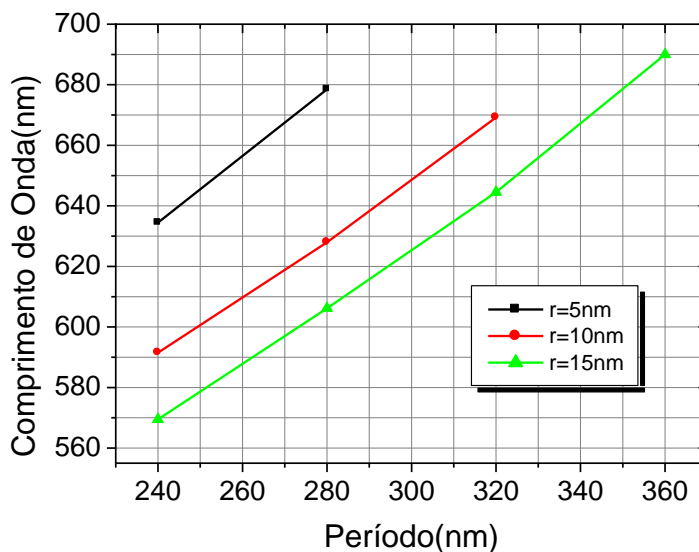


Figura 54 - Comportamento da dependência $\lambda(d)$ de uma Grade de Difração com geometria composta de um Cilindro Dielétrico de ITO, metal Au, modo TM.

Ainda na faixa da luz visível foi analisado o comportamento de uma grade periódica com a geometria de um prisma de base triangular Figura 43 e trapezoidal Figura 44, nesta estrutura foram utilizados os metais Au (para o modo TE) e Al (para o modo TM), os dielétricos foram a SiO₂, Si e o ITO, a altura do triângulo e o ângulo com a base foram

respectivamente próximos de 103nm e 53⁰, os índices de refração dos metais e do dielétrico permaneceram os mesmos da geometria cilíndrica, visto que a faixa espectral analisada não foi alterada, para esta estrutura foram variados inicialmente os parâmetros geométricos definidos nas Figura 43 e Figura 44: d , d_{SiO_2} e d_{Si} , foi notada uma constância nos resultados quando o parâmetro d_{Si} foi variado, então optamos por mantê-lo constante em 30nm e fazer uma variação simultânea de intervalos igualmente separados de d (380-410nm) e d_{SiO_2} (280-310nm). As Figura 55, Figura 56, Figura 57 e a Figura 58 representam o comportamento da estrutura citada acima no modo TE, com valores de períodos respectivamente iguais a $d=380,390,400$ e 410nm.

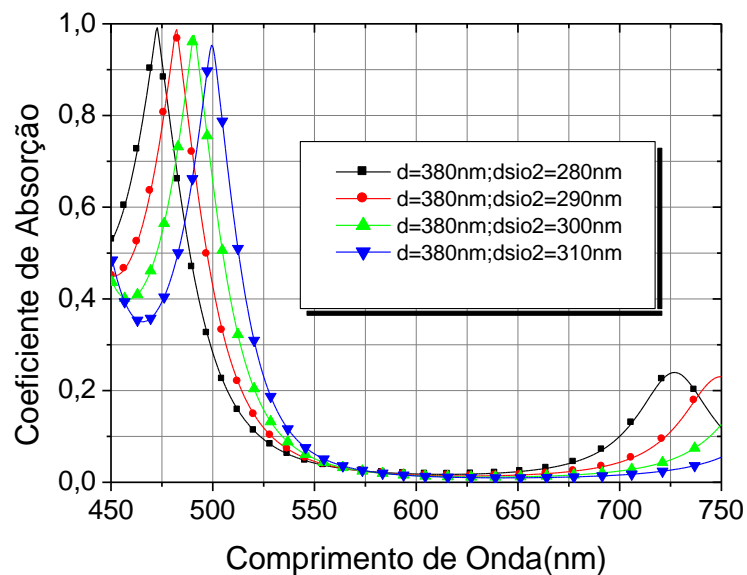


Figura 55 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{Si}=30$ nm, $d=400$ nm, metal Au, modo TE.

É possível observar uma alta absorção da luz para todas larguras de d_{SiO_2} e período de 380nm(Figura 55), com valores maiores de 93%, sendo que quando o valor da largura da camada de Sílica é de 280nm a absorção da luz é muito próxima da total, em todas outras estruturas (Figura 56, Figura 57 e Figura 58) analisadas o valor "ótimo" de d_{SiO_2} foi de 280nm, outro fato a ser observado é o deslocamento dos picos de absorção para comprimentos de onda maiores, tal conclusão faz com que esta estrutura seja sintonizada de forma a absorver quase que totalmente determinados comprimentos de onda da luz de acordo com o período que esta foi projetada. As fortes ressonâncias representadas pelos

picos de absorção nas grades estão associadas a uma forte excitação dos plasmons de superfície na interface Metal/Dielétrico, nesta estrutura não existe transmissão da luz pelo fato da camada ser metálica e espessa. Devido a possíveis imperfeições e erros no processo de fabricação de estruturas em escala nanométrica e pontiaguda, também foi analisado um prisma com base trapezoidal com valores da base maior, base menor e ângulo da base respectivamente iguais a 206nm, 180nm e 50° , os resultados foram muito parecidos com o prisma de base triangular e por vezes exatamente idênticos, devido a este fato os gráficos relativos a esta estrutura não foram dispostos nesta dissertação.

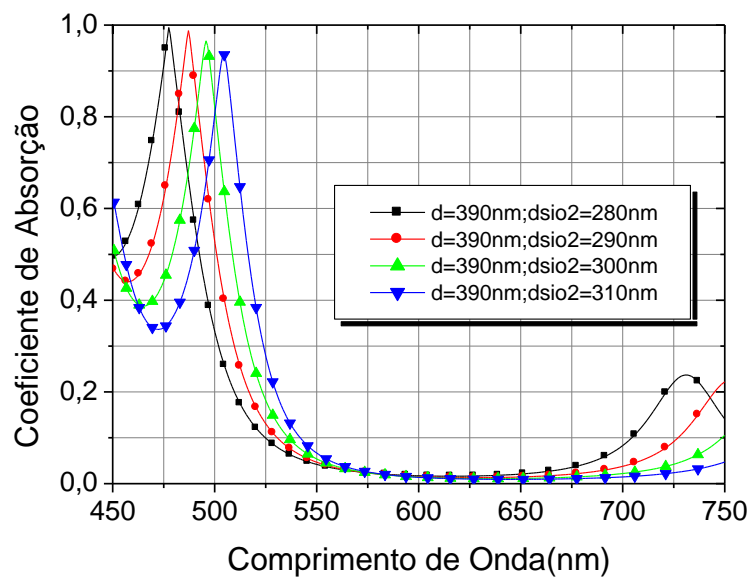


Figura 56 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{Si}=30nm$, $d=390nm$, metal Au, modo TE.

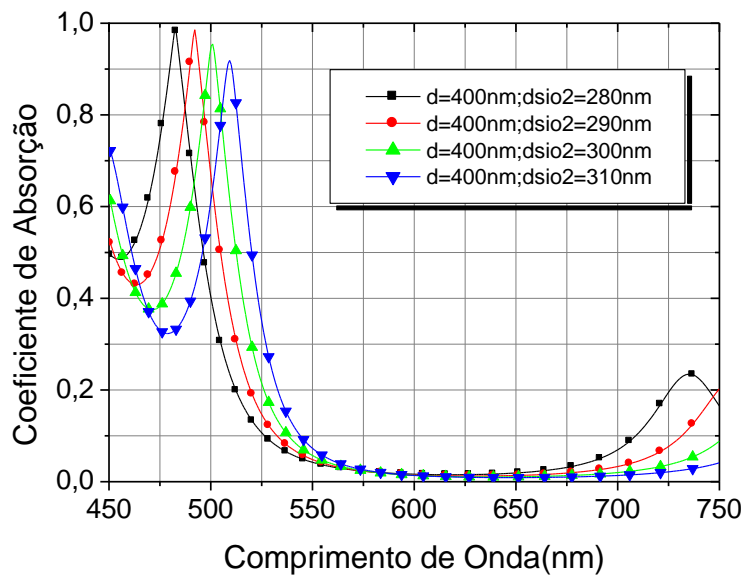


Figura 57 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=400\text{nm}$, metal Au, modo TE.

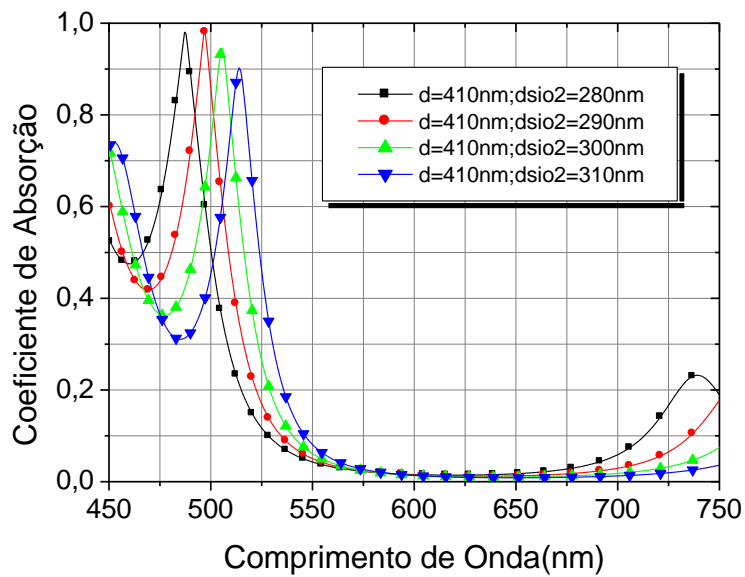


Figura 58 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{\text{Si}}=30\text{nm}$, $d=410\text{nm}$, metal Au, modo TE.

As mesmas estruturas (triangular e trapezoidal) foram analisadas para o modo magnético TM, inicialmente foram mantidos todos os materiais com seus respectivos índices de

refração, o campo incidente foi refletido quase que totalmente para todos os comprimentos de onda analisados na faixa do espectro visível, na tentativa de se obter resultados satisfatórios para o modo TM foram substituídos dois materiais que compunham a grade, o metal e o dielétrico simultaneamente, o metal utilizado foi o Alumínio(Al) e a camada de Sílica foi substituído pela liga ITO, a faixa de variação dos parâmetros geométricos analisados não foram alterados, a Figura 59 representa a análise numérica quando o período é 380nm, percebe-se quatro picos de absorção para cada largura de camada de ITO, tal fato se repete quando é analisado a variação do período Figura 60, Figura 61 e Figura 62, um fato a ser observado é o deslocamento quase que linear desses picos para comprimentos de ondas maiores com o aumento da camada do dielétrico ITO, sugerindo uma forte dependência da ressonância de absorção da grade com os parâmetros geométricos, além dos parâmetros geométricos a forte absorção é devido aos parâmetros físicos dos materiais e da polarização do campo, pois tal estrutura apresentou um comportamento refletor na faixa de 500-625nm quando o Al foi substituído pelo o Au e o dielétrico ITO pela SiO₂(Figura 63).

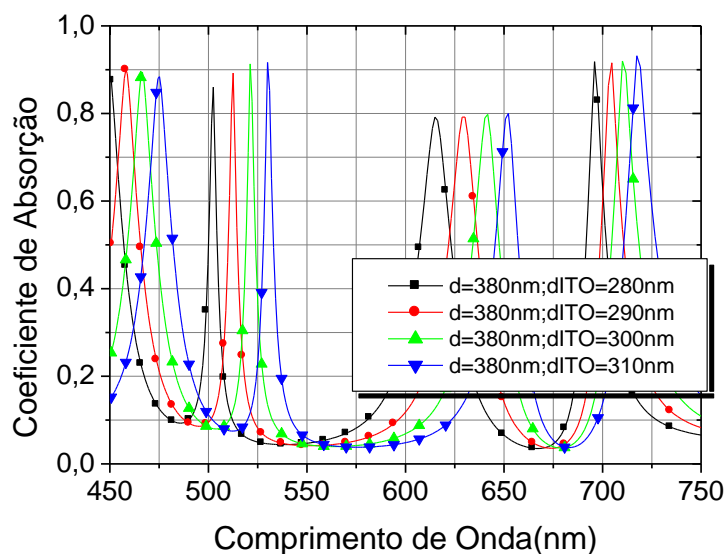


Figura 59 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{Si}=30nm$, $d=380nm$, metal Al, modo TM.

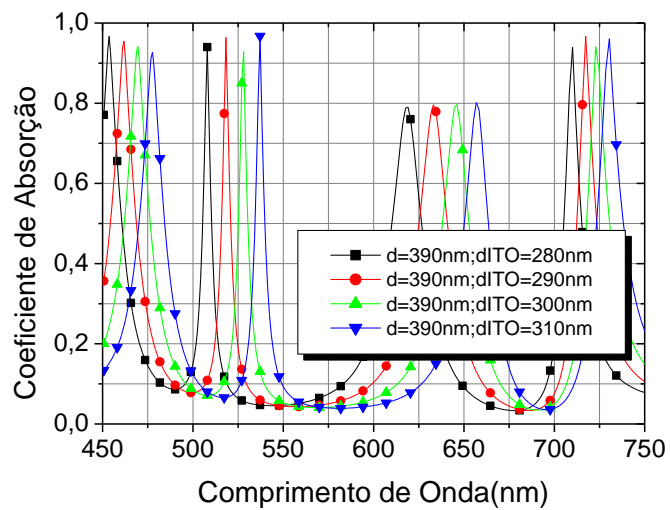


Figura 60 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{s_i} = 30\text{nm}$, $d = 390\text{nm}$, metal Al, modo TM.

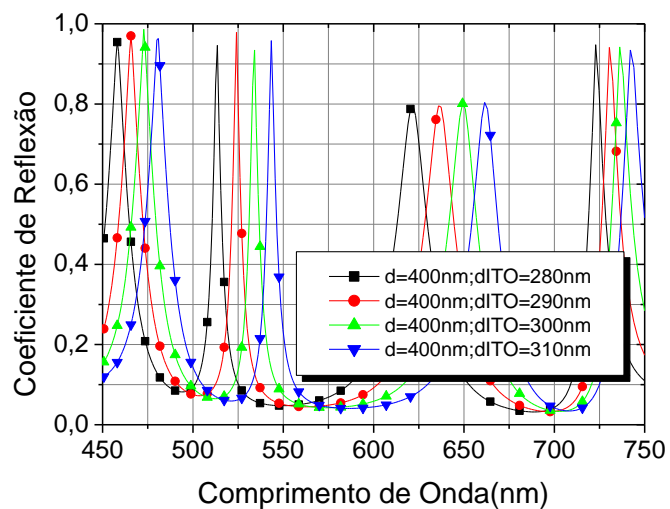


Figura 61 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{s_i} = 30\text{nm}$, $d = 400\text{nm}$, metal Al, modo TM.

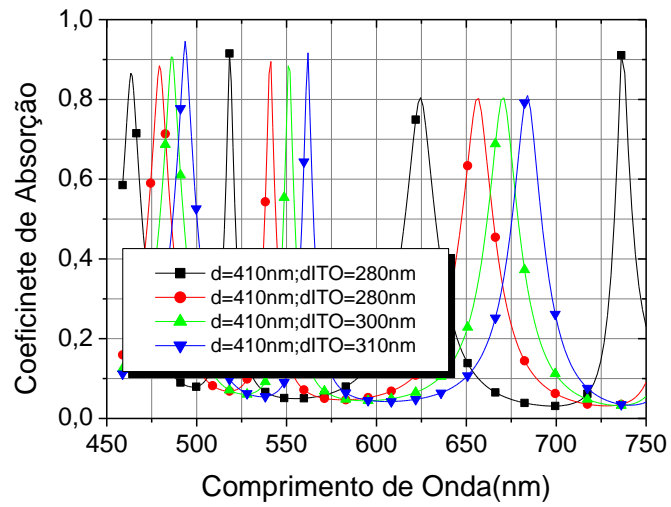


Figura 62- Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{si}=30\text{nm}$, $d=410\text{nm}$, metal Al, modo TM.

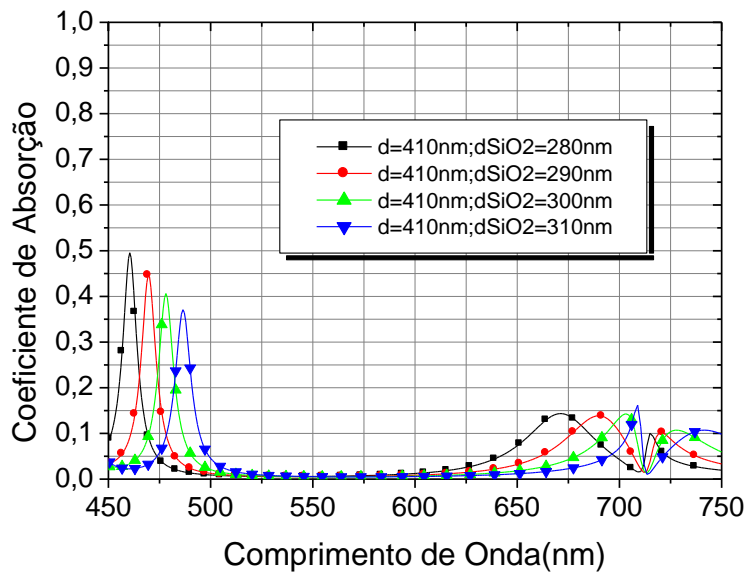


Figura 63 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com geometria composta de um Prisma metálico de base triangular, $d_{si}=30\text{nm}$, $d=410\text{nm}$, metal Au, modo TE.

3.3.2 - Resultados e Discussões na Faixa do Infravermelho (800-2300nm)

Grades nanoestruturadas metálicas com alta absorção na faixa acima do infravermelho tem sido largamente estudada, por ser uma faixa utilizada nas Comunicações Ópticas. Devido a possibilidade de serem utilizados em potenciais aplicações, tais como: detectores de polarização e polarizadores, em [5] foram analisados três modelos de absorvedores na faixa espectral de 700-2300nm, exibindo uma eficiência média de 88% na polarização TM, em [48] foram investigados experimentalmente uma grade absorvedora perfeita em 1600nm, e esta foi utilizada em um sensor de detecção do índice de refração, em [49] foi fabricado um filme de alto desempenho ultrafino em torno do comprimento de onda próximo do infravermelho 1550nm, em [50] foi demonstrado experimentalmente que um conjunto de grades retangulares de ouro pode concentrar fortemente luz incidente no modo TM e tal efeito pode ser utilizado para geração de laser harmônicos ou interruptor de polarização. Recentemente nosso grupo de pesquisa analisou numericamente três modelos [51] de nano absorvedores apodizados, que consistiam em variar o índice de refração através de funções matemáticas, as estruturas propostas tiveram absorção próxima de 100% para vários comprimentos de onda no modo TM no intervalo de 600-1100nm. Na faixa das telecomunicações foram testadas as geometrias descritas na seção 3.1, os resultados não foram satisfatórios, obtendo uma baixa absorção no espectro do infravermelho entre 1000-1600nm, no estudo da absorção quando foi alterado a geometria utilizada para a geometria fractal e utilizado como composição da grade metálica o Ouro(Au) foram obtidas altas taxas de absorção para uma grande largura de banda de comprimentos de ondas no modo TM, a Figura 64 representa a geometria Fractal Sierpinski, nas vizinhanças foi utilizado o Si e o substrato de SiO₂, o período da grade é de 400nm, para todos valores de h foi observado uma absorção maior que 80%, e quando $h=34$ nm o valor da absorção é próximo de 90%, o junção dos metais e dielétricos, bem como os parâmetros geométricos desta estrutura, fazem com que ocorram a absorção da luz em comprimentos de ondas específicos devido a excitação dos plasmons localizados na superfície do metal. Com o objetivo de verificar a sensibilidade da grade com o modo foi feito a mesma simulação para o modo TE Figura 65, a absorção tem uma queda abrupta sendo este quase em sua totalidade refletido.

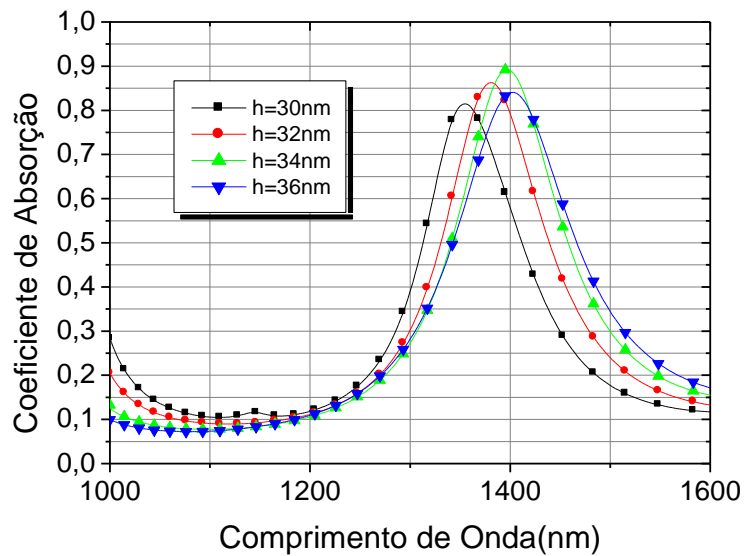


Figura 64 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Sierpinski, modo TM, $d=400\text{nm}$, substrato de SiO_2 e vizinhança Si.

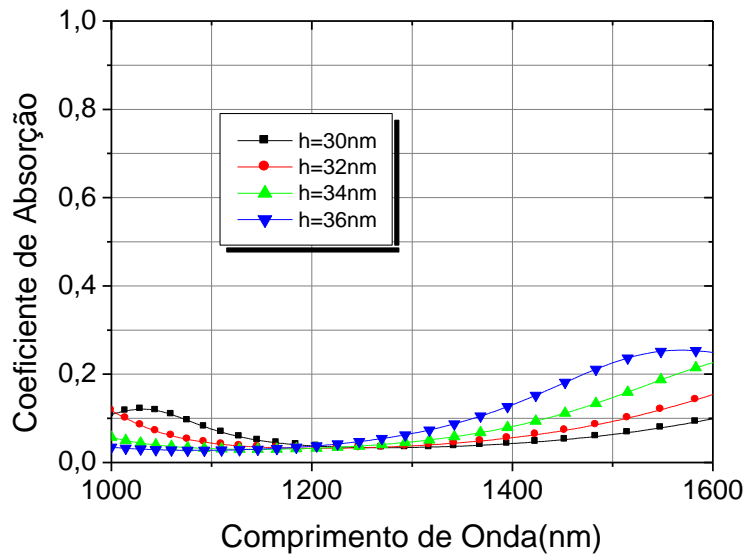


Figura 65 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Sierpinski, modo TE, $d=400\text{nm}$, substrato de SiO_2 e vizinhança Si.

A Figura 66 representa uma grade fractal com geometria Box, no modo TM, com $h=86\text{nm}$, substrato de ITO e vizinhança de Si, é observado dois picos de absorção, o primeiro em torno de 1100nm e o segundo entre 1200 e 1300nm para todos os valores de período analisados, o segundo pico apresenta uma alta absorção, aproximadamente 75%,

é observado também o deslocamento dos picos de absorção para maiores comprimentos de onda com o aumento do período da grade, demonstrando a capacidade desta ser sintonizada para absorver um comprimento de onda específico, outra característica a ser observada é a sensibilidade da polarização, quando esta grade é analisada no modo TE (Figura 67) a absorção é quase que completamente suprimida e o campo incidente é refletido.

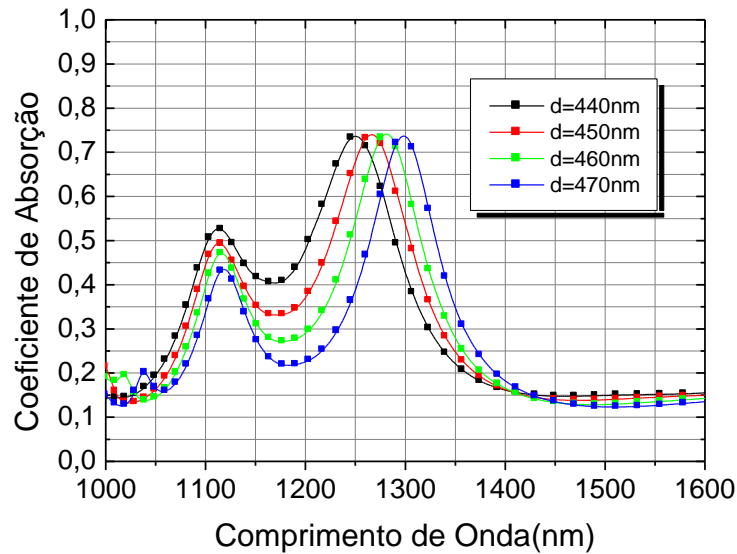


Figura 66- Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Box, modo TM, $h=86\text{nm}$, substrato de ITO e vizinhança de Si.

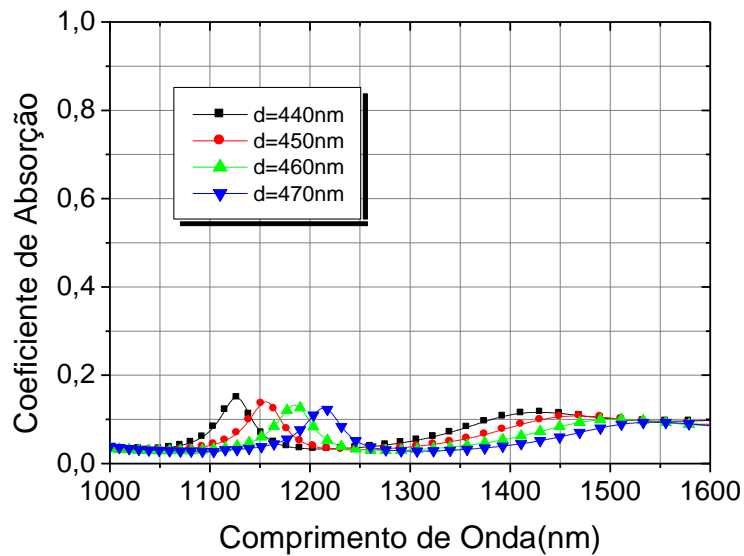


Figura 67 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Box, modo TE, $h=86\text{nm}$, substrato de ITO e vizinhança de Si.

A terceira estrutura analisada é uma grade com geometria fractal Koch, no modo TM, com $d=400\text{nm}$, foi utilizado no substrato o Si e a vizinhança o material ITO(Figura 68), a estrutura analisada apresentou uma alta absorção em torno de 80%, para $h=100\text{nm}$ no comprimento de onda de 1100nm , para os outros valores menores que h o campo incidente é refletido, é perceptível também a queda da absorção quase que exponencialmente com o comprimento de onda para valores de $h < 80\text{nm}$, no modo TE Figura 69 a absorção é quase que suprimida para todos valores de h , atingindo o máximo de 10%, os resultados encontrados estão de acordo com a teoria que prevê a não excitação dos plasmons de superfície(SSPs) no modo TE, para este modo todas as grades absorvedoras analisadas se comportaram como um refletor na faixa espectral analisada. No modo TM as análises comprovaram a teoria, que prevê a excitação das SSPs, quando esta excitação é combinada com a geometria e o contraste de índices do dielétrico o campo tende a ficar confinado na estrutura para determinados comprimentos de onda, a variação dos parâmetros geométricos d e h dos fractais permitem que estes sejam altamente sintonizáveis, afim de se obter o pico de absorção para comprimentos de ondas específicos, na faixa espectral analisada de $1000\text{-}1600\text{nm}$ as geometrias fractais analisadas tiveram uma alta absorção, para comprimentos de ondas maiores a melhor geometria foi a Sierpinski($1350\text{-}1400\text{nm}$), para comprimentos de onda

intermediários(1250-1300nm) a Box e a geometria Koch para comprimentos de onda menores(1000-1100nm), com isso essas três geometrias propostas obtiveram bons resultados na faixa espectral do infravermelho utilizada pelas Comunicações Ópticas, o objetivo futuro deste trabalho é tentar aumentar ainda mais a absorção, com novas geometrias, e determinar expressões matemáticas empíricas que relacione a dependência de $\lambda(d)$ e $\lambda(h)$ para as grades com geometria fractal.

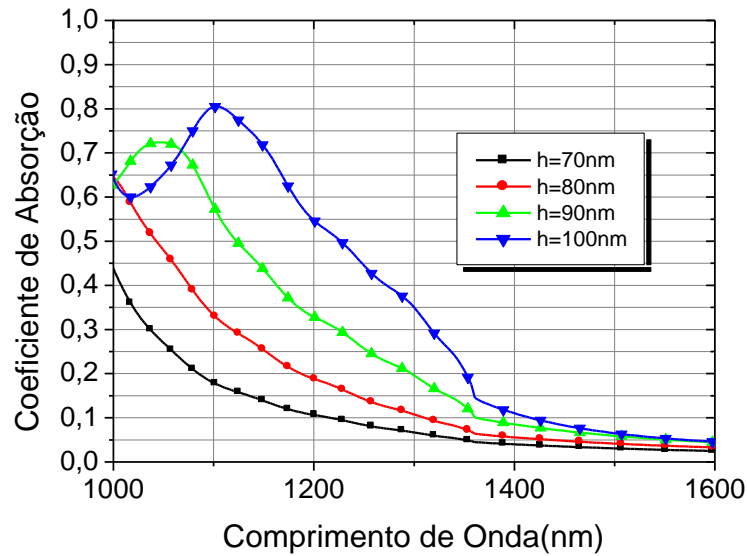


Figura 68- Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Koch, modo TM, $d=400\text{nm}$, substrato Si e vizinhança de ITO.

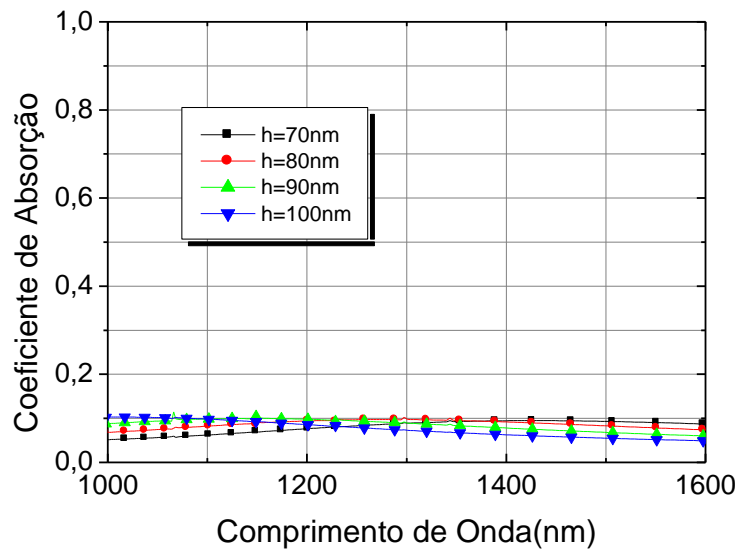


Figura 69 - Comportamento da Absorção de uma Grade de Difração com Geometria Fractal Koch, modo TE, $d=400\text{nm}$, substrato Si e vizinhança de ITO.

IV. CAPÍTULO

4.1 – Conclusão

Nesta dissertação foi analisada e discutida a Reflexão, Transmissão e Absorção em Grades Nanométricas com diversas geometrias e com diferentes materiais constituintes, as características dos Materiais e a Geometria das grades são os fatores predominantes para a obtenção dos altos coeficientes de Reflexão, Transmissão e Absorção, embora a geometria fractal seja amplamente utilizada em pseudocristais fotônicos e dispositivos de microondas, até o presente momento não consta na literatura o uso desta geometria em estruturas periódicas, o uso especial desta geometria associada aos metais e dielétricos fez com que esta tivesse uma alta refletividade próxima de 100% em uma grande largura de comprimentos de onda, funcionando como um espelho refletor de alta qualidade, tal característica faz com que esta estrutura seja explorada em dispositivos ópticos que exige uma alta refletividade, podemos citar dentre estes espelho de Bragg Refletor - DBR, por sua vez algumas das geometrias fractais utilizadas apresentaram ressonâncias localizadas na estrutura do material onde a estrutura era refletiva para quase todo espectro de comprimentos de onda analisado e apenas comprimentos de onda específicos eram transmitidos, foi demonstrado que a alta transmissão era sintonizável com os parâmetros geométricos da estrutura, ou seja, a Transmissão de determinado comprimento de onda poderia ser ajustado com o período ou a constante do Fractal, um dispositivo que apresente tais características pode ser utilizado na confecção de Filtros Ópticos. Para as grades Absorvedoras foram analisadas duas diferentes faixas a Visível(400-700nm) e a do Infravermelho(800-2300nm), além da geometria fractal foi também utilizada a geometria euclidiana(prismas e cilindros), em ambas as faixas foi notória a alta absorção das nanoestruturas associada principalmente a propagação dos Plasmons de Superfície e ao acoplamento dos modos nas cavidades, estas estruturas poderiam ser utilizadas como Seletores de Polarização e Células Fotovoltaicas. As Figuras 70 e 71 mostra um quadro comparativo com alguns dos resultados obtidos nesta Dissertação e os dispostos nas referências, para grades Transmissoras e Absorvedoras, nota-se uma significativa melhora (Figura 30) nos coeficientes de transmissão, para as grades absorvedoras(Figura 31), embora não se tenha expressiva melhora nos coeficientes, a principal contribuição

deste trabalho seria a possibilidade de sintonizar os picos de absorção com os parâmetros geométricos ou físicos que compõe a grade.

Transmissão/Metal	λ (nm)	Modo	Referência
80%/Au	632nm	TE	[39]
97%/Au	1280nm	TE	Dissertação
65%/Au	634nm	TM	[39]
93%/Au	1350nm	TM	Dissertação

Figura 70 – Quadro comparativo relacionando os Coeficientes de Transmissão obtidos numericamente nesta dissertação com os relatados na revisão bibliográfica [35].

Absorção/Metal	λ (nm)	Modo	Referência
98,5%/Au	632.8nm	TE	[39]
99%/Au	500-750nm(sintonizável)	TE	Dissertação
80%/Ag	450nm	TM	[8]
93%/Au	450-520nm(sintonizável)	TM	Dissertação

Figura 71 - Quadro comparativo relacionando os Coeficientes de Absorção obtidos numericamente nesta dissertação com os relatados na revisão bibliográfica [35] e “*Triangular metallic gratings for large absorption enhancement in thin film Si solar cells*”.

A utilização da Geometria Fractal em Grades Periódicas bem como a junção de diferentes camadas de dielétrico associada a metais são as principais contribuições deste trabalho.

4.2 – Sugestões para Futuros Trabalhos

Apesar das Simulações Numéricas para estruturas analisadas apresentarem bons/excelentes resultados, em trabalhos futuros poderiam ser analisadas outras Geometrias Fractais, ou gerações superiores destas, outros materiais metálicos, estruturas periódicas com diferentes metais alternados, dielétricos anisotrópicos, ou seja, que

tivessem como principal característica a variação do índice de refração de acordo com a polarização do campo incidente, bem como a a sensibilidade destas estruturas com a temperatura. Outra sugestão para um futuro trabalho seria a fabricação e o teste destas estruturas.

Referências Bibliográfias

- [1] M. C. Hutley, Diffraction gratings. London ; New York: Academic Press, 1982.
- [2] E. G. Loewen e E. Popov, Diffraction gratings and applications. New York: M. Dekker, 1997.
- [3] P. Boffi, J. Osmond, D. Piccinin, M. C. Ubaldi, e M. Martinelli, "Diffraction of optical communication Gaussian beams by volume gratings: comparison of simulations and experimental results," *Appl Opt*, vol. 43, pp. 3854-65, Jul 1 2004.
- [4] U. Fano e L. Fano, Basic physics of atoms and molecules. New York,: Wiley, 1959.
- [5] L. Meng, D. Zhao, Q. Li, and M. Qiu, "Polarization-sensitive perfect absorbers at near-infrared wavelengths," *Opt Express*, vol. 21 Suppl 1, pp. A111-22, Jan 14 2013.
- [6] V. Karagodsky, F. G. Sedgwick, and C. J. Chang-Hasnain, "Theoretical analysis of subwavelength high contrast grating reflectors," *Opt Express*, vol. 18, pp. 16973-88, Aug 2 2010.
- [7] N. Bonod and E. Popov, "Total light absorption in a wide range of incidence by nanostructured metals without plasmons," *Opt Lett*, vol. 33, pp. 2398-400, Oct 15 2008.
- [8] E. Battal, T. Alper Yogurt, L. Erdal Aygun and A. K. Okyay, " Triangular metallic gratings for large absorption enhancement in thin film Si solar cells " *Opt Lett*, vol. 20, April 23 2012.
- [9] J. Isídio e Esquerre. V. Cosme Rubio-Mercedes, "Características de Propagação de Grades Metálicas Nanométricas," CONNEPI- IFBA, 2013.
- [10] J. A. Monsoriu, Carlos J. Zapata-Rodríguez, E. Silvestre and W. D. Furlan, " Fractal Photonic Crystal Waveguides" Universidad Politécnica de Valencia, E-46022 Valencia, Spain, 2004.
- [11] H. T. Hattori, " FRACTAL-LIKE SQUARE LATTICES OF AIR HOLES" P. in *Electromagnetics Research Letters*, vol. 04, 2008.
- [12] Bo Hou, Hang Xie, Weijia Wen, and Ping Sheng, " Three-dimensional metallic fractals and their photonic crystal characteristics" *PHYSICAL REVIEW B* 77, 125113, 2008.
- [13] Y. Trabelsi and M. Kanzari, " Two-dimensional deterministic photonic band gap structures based on the quasiperiodic sequences at millimeter wave requeencies" *IJEST*, Vol. 3, No. 8 August 2011.
- [14] Yan Li, Yuchun Fenb, Zigang Duan, Songhao Liu, Hanben Niu, " The photonic bands of fractal photonic crystal and its application in filters" *SPIE Vol.* 6025, 2006.
- [15] M. Sadiku, Numerical techniques in electromagnetics, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [16] J. M. Liepa. Jin, "Application of hybrid Finite Element Method to electromagnetic scattering from coated cylinders," In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol., vol. 36, n° 1., pp. pp. 50-54, 1988.
- [17] M. Mori, The finite element method and its applications. New York: Macmillan, 1986.
- [18] D. H. Norrie e G. De Vries, An introduction to finite element analysis. New York: Academic Press, 1978.

- [19] M. M. Afonso, "Métodos híbridos na solução de problemas de espalhamento eletromagnético," Tese defendida no Departamento de Engenharia elétrica da UFMG, Agosto, 2003.
- [20] J. T. Oden e J. N. Reddy, *An introduction to the mathematical theory of finite elements*, Dover ed. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2011.
- [21] C. E. Rúbio M. e. H. E. Hernández Figueroa, "Padé boundary conditions for the finite-element solution of arbitrary planar junctions," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 22, p. 4, Feb, 2004.
- [22] H. E. Hernández. Figueroa. C. E. Rubio Mercedes, V. F. Rodríguez-Esquerre, e M. Davanco, "Finite-element frequency-domain analysis of 2D photonic crystal resonant cavities," *Proceeding of IEEE/LEOS 4th International Conference in Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*, p. 2, Agosto 2004.
- [23] C. E. Rubio Mercedes. H. E. Hernández Figueroa e V. F. Rodríguez-Esquerre, "Análise de Cavidades Ressonantes em Cristais Fotônicos por Elementos Finitos no Domínio da Frequência," 11 SBMO–Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 60 CBMag–Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, São Paulo, Agosto, 2004.
- [24] M. F. Barnsley, *Fractals everywhere*, New ed. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2012.
- [25] K. J. Falconer, *Fractal geometry : mathematical foundations and applications*, 2nd ed. Chichester, England: Wiley, 2003.
- [26] H. Takayasu, *Fractals in the physical sciences*. Manchester ; New York New York, NY, 1990.
- [27] E. T. Arakawa e R. H. Ritchie, "Surface-plasmon resonance effect in grating diffraction," *Phys. Rev.*, p. 4, 1968.
- [28] P. Drude, *The theory of optics*. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2005.
- [29] A. B. Djuricic e D. Rakić, "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," *Appl. Opt.*, vol. 37, p. 14, 1998.
- [30] V. Karagodsky e C. J. Chang-Hasnain, "Physics of near-wavelength high contrast gratings," *Opt Express*, vol. 20, pp. 10888-95, May 7 2012.
- [31] S. Astilean, P. Lalanne, P. Chavel, E. Cambriil, e H. Launois, "High-efficiency subwavelength diffractive element patterned in a high-refractive-index material for 633 nm," *Opt Lett*, vol. 23, pp. 552-4, Apr 1 1998.
- [32] S. Schroter e T. Glaser, "Diffractive optical isolator made of high-efficiency dielectric gratings only," *Appl. Opt.*, vol. 31, p. 9, 2002.
- [33] M. C. Y. Huang e C. F. R. Mateus, "Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, p. 3, 2004.
- [34] C. J. Chang-Hasnain, "High-contrast gratings as a new platform for integrated optoelectronics," *Semicond. Sci. Technol.* 26, vol. 26, 2011.
- [34] M. C. Y. Huang e V. Karagodsky, "Analytical Solution and Design Guideline for Highly Reflective Subwavelength Gratings," *Optical Society of America*, 2007.
- [35] S. Igor. E. V., "Análise de Grades Periódicas com Geometria Fractal," 16 SMBO and 11 CBMag, p. 4, 2014.
- [36] S. S. Choi e M. Lu, "Label free biosensor incorporating a replica-molded, vertically emitting distributed feedback laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, 2008.
- [37] S. Fan, W. Suh, e J. D. Joannopoulos, "Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators," *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, vol. 20, pp. 569-72, Mar 2003.

- [38] Y. Luo, A. I. Fernandez Dominguez, A. Wiener, S. A. Maier, and J. B. Pendry, "Surface plasmons and nonlocality: a simple model," *Phys Rev Lett*, vol. 111, p. 093901, Aug 30 2013.
- [39] F. J. Garcia Vidal, Martin-Moreno, L. e Pendry, J. B. (2005) Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials. *J. Opt. Pure Appl. Opt.* 7, S97–S101
- [40] M. E. Moreno, e F. J. García-Vidal. "Extraordinary optical transmission without plasmons: the s-polarization case". *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.* 8(4), S94,(2006).
- [41] V. A. Yu. Nikitin, e L. Martín-Moreno. "Enhanced optical transmission, beaming and focusing through a subwavelength slit under excitation of dielectric waveguide modes." *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.* 11(12),125702(2009).
- [42] N. M. Guillaumée. Observation of enhanced transmission for spolarized light through a subwavelength slit. *OPTICS EXPRESS*(2010).
- [43] J. García-Vidal. J. B. Pendry e J.A. Porto, "Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits," *Phys. Rev. Lett.* 83, pp. 2845-2848 1999.
- [44] E. W. Koch, "Bulk crystal growth and wafering for PV," *Handbook of Photovoltaic Science*, p. 49, 2005.
- [45] J. Zhu e G. V. Eleftheriades, "Experimental verification of overcoming the diffraction limit with a volumetric Veselago-Pendry transmission-line lens," *Phys Rev Lett*, vol. 101, p. 013902, Jul 4 2008.
- [46] Y. Park, E. Drouard, O. El Daif, X. Letartre, P. Viktorovitch, A. Fave, et al., "Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells," *Opt Express*, vol. 17, pp. 14312-21, Aug 3 2009.
- [47] S. Tomita, T. Yokoyama, H. Yanagi, B. Wood, J. B. Pendry, M. Fujii, et al., "Resonant photon tunneling via surface plasmon polaritons through one-dimensional metal-dielectric metamaterials," *Opt Express*, vol. 16, pp. 9942-50, Jun 23 2008.
- [48] W. L. Barnes, A. Dereux, e T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature*, vol. 424, pp. 824-30, Aug 14 2003.
- [49] N. Liu, M. Mesch, T. Weiss, M. Hentschel, e H. Giessen, "Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor," *Nano Lett*, vol. 10, pp. 2342-8, Jul 14 2010.
- [50] J. W. J. Hao e X. Liu, "High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial," *Appl. Phys. Lett*, vol. 25, 2010.
- [51] S. C. A. Polyakov e S. Dhuey,, "Plasmonic light trapping in nanostructured metal surfaces," *Appl. Phys. Lett*, vol. 20, 2011.
- [52] J. Isídio e V. Esquerre, "Análise Numérica de Nanoabsorvedores Apodizados Sensíveis à Polarização baseados em Grades Metálicas," 11 SBMO–Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica 2014.