

TESE DE DOUTORADO Nº 296

**METODOLOGIA PARA PROJETO DE LENTE INTRAOCULAR TRIFOCAL  
DIFRATIVA MODULADA POR FUNÇÃO COSSENOIDAL**

**Luiz Melk de Carvalho**

DATA DA DEFESA: 16/05/2019

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**METODOLOGIA PARA PROJETO DE LENTE INTRAOCULAR  
TRIFOCAL DIFRATIVA MODULADA POR FUNÇÃO  
COSSENOIDAL**

Luiz Melk de Carvalho

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Davies William de Lima Monteiro

Belo Horizonte - MG

Maio de 2019

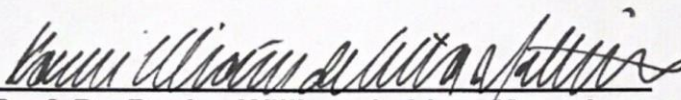
**"Metodologia para Projeto de Lente Intraocular Trifocal  
Difrativa Modulada por Função Cosenoidal"**

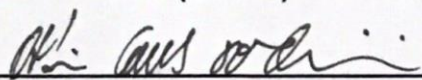
**Luiz Melk de Carvalho**

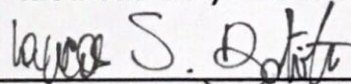
Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

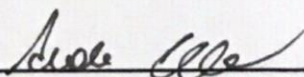
Aprovada em 16 de maio de 2019.

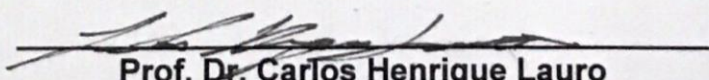
Por:

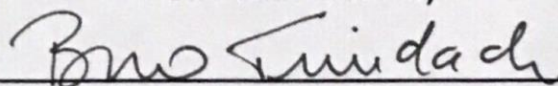
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro  
DEE (UFMG) - Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Otávio Gomes de Oliveira  
Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (Mediphacos Indústrias  
Médicas S/A) - Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Lucas de Souza Batista  
DEE (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Andrea Chiuchiarelli  
DELT (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Henrique Lauro  
Departamento de Engenharia Mecânica (UFSJ - Universidade Federal de  
São João del-Rei)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Bruno Lovaglio Caçado Trindade  
Departamento de Córnea (Instituto de Olhos Ciências Médicas – FELUMA)

## FICHA CATALOGRÁFICA

Carvalho, Luiz Melk de

Metodologia para Projeto de Lente Intraocular Trifocal Difractiva Modulada por Função Cossenoidal /Luiz Melk de Carvalho – Belo Horizonte, 2019.

113 f. : il.color. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Davies William de Lima Monteiro.

Coorientador: Dr. Otávio Gomes de Oliveira

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Engenharia Elétrica, 2019.

1.Lente intraocular; 2. NSGA-II; 3. Lente difractiva; 4. Lente multifocal.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus ...

## RESUMO

Este trabalho apresenta a proposta e o desenvolvimento de uma lente intraocular (LIO) trifocal difrativa com projeto inovador baseado na modulação da altura dos degraus difrativos através de uma função periódica representada pelo módulo da função cossenoidal transladada. Por meio da função de modulação proposta pretende-se, também, estabelecer através de seus parâmetros analíticos (amplitude, frequência e fase) relações com as figuras de mérito que caracterizam a qualidade óptica da lente e, assim, ser capaz de propor projetos cujas características ópticas almejadas sejam semelhantes ou superiores ao de lentes existentes no mercado. O desenvolvimento da LIO multifocal (LIOM) proposta será delineado pela formulação matemática descritiva dos efeitos ópticos refrativos e difrativos da lente; pela modelagem computacional no software OpticStudio para avaliação do desempenho óptico da LIO com base nas normas vigentes (norma ISO 11979 partes 2 e 9); pela otimização do projeto através de algoritmo determinístico (DLS – *Damped Least Square*) e estocástico (NSGA-II – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*); pela avaliação da qualidade óptica da LIO com base em parâmetros quantitativos (eficiência e MTF – *Modulation Transfer Function*); e, finalmente, pela análise dos desvios do processo de fabricação. Pelos resultados de simulação encontrados para uma LIO projetada conforme a ideia proposta, foi possível alcançar um projeto inovador competitivo com os modelos de LIOs trifocais presentes no mercado. A análise de tolerâncias realizada indica ser possível, na média, fabricar o projeto proposto com exatidão suficiente para garantir os resultados ópticos obtidos na simulação. Os resultados de desempenho óptico do protótipo fabricado são comparados com as principais LIOs trifocais presentes no mercado. Apesar deste estudo ser realizado com foco em lentes intraoculares, a estratégia de projeto de lente multifocal aqui proposta pode ser empregada também no projeto de lentes para aplicações diversas.

**Palavras-chave:** Lente intraocular, NSGA-II, Lente difrativa, Lente multifocal.

## ABSTRACT

This paper presents the proposal and development of an innovative diffractive trifocal intraocular lens (IOL) based on the modulation of the diffractive steps height using a periodic function given by the modulus of a shifted cosine function. By means of the proposed modulation function it is also intended to establish a correlation between the analytical parameters of the modulation function (amplitude, frequency and phase) and the figures of merit that characterize the optical quality of the lens and thus to be able to propose a lens design with optical features that are equal or superior to those of lenses present on the market. The multifocal IOL developed in this paper is dictated by: the description of the mathematical formulation of the refractive and diffractive behavior of the lens; the lens optical modelling in the OpticStudio software to evaluate the optical performance of the IOL based on the current standards (ISO standard parts 2 and 9); the optimization of the IOL by the use of a deterministic optimization algorithm (DLS – Damped Least Square algorithm) and a stochastic algorithm (NSGA-II – Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II); the optical performance evaluation considering quantitative evaluation parameters (efficiency and MTF – Modulation Transfer Function); and, finally, the tolerance analysis due to the deviations of the manufacturing process. The simulation results presented for the proposed IOL show that it was possible to achieve an innovative IOL design with competitive performance in relation to the diffractive trifocal IOLs present on the market. The tolerance analysis shows that is possible to manufacture, on average, the proposed design with the accuracy required to guarantee the optical performance shown in the simulation results. The optical performance results of the prototype are compared with the main trifocal IOLs on the market. Although this work is focused on the IOL development, the methodology presented can also be applied to the development of multifocal lenses in a broader spectrum of applications.

**Keywords:** Intraocular lens, NSGA-II, Diffractive lens, Multifocal lens.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - LIO MONOFOCAL: A) ESFÉRICA BICONVEXA E B) VERGÊNCIA DOS RAIOS DA LIO ESFÉRICA. ....	13
FIGURA 2 - VERGÊNCIA DOS RAIOS EM UMA LIO ASFÉRICA. ....	14
FIGURA 3 – A) OBJETO E IMAGEM FORMADA: B) POR UMA LIO ESFÉRICA E C) POR UMA LIO ASFÉRICA.....	14
FIGURA 4 - LIO MULTIFOCAL: A) BIFOCAL E B) TRIFOCAL.....	17
FIGURA 5 – ESQUEMÁTICO DE UM OBJETO DISTANTE SENDO FOCALIZADO NA RETINA POR MEIO DE UMA LIOM BIFOCAL. ....	18
FIGURA 6 – ESQUEMÁTICO DE UM OBJETO PRÓXIMO SENDO FOCALIZADO NA RETINA POR MEIO DE UMA LIOM BIFOCAL. ....	18
FIGURA 7 - LIOM REFRACTIVA. ....	19
FIGURA 8 - PRINCÍPIO DE HUYGENS. ....	20
FIGURA 9 - VERGÊNCIA DAS ORDENS DIFRATIVAS EM UMA LIOM DIFRATIVA.....	21
FIGURA 10 - REGIÃO CENTRAL E REGIÕES ANELARES DE UMA REDE DIFRATIVA COM ÁREAS IGUAIS: $A_1 = A_2 = A_3 = A_N$ . ....	22
FIGURA 11 - PERFIL DE DEGRAUS DE UMA LIOM DIFRATIVA BIFOCAL COM ALTURA CONSTANTE EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE BASE (CURVA BASE).....	23
FIGURA 12 - VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS ORDENS DIFRATIVAS EM FUNÇÃO DA ALTURA DO DEGRAU DA REDE DIFRATIVA (DADOS: $N_{LIO} = 1,507$ , $N_{AQ} = 1,3377$ E $A = 0,5461$ $\mu\text{M}$ ).....	24
FIGURA 13 - PERFIL DE DEGRAUS DE UMA LIOM DIFRATIVA BIFOCAL APODIZADA. ....	25
FIGURA 14 - PERFIL DE DEGRAUS DE UMA LIOM DIFRATIVA TRIFOCAL: $H_2 = H_4$ E $H_1 = H_3 = H_5$ . ..	26
FIGURA 15 - EFICIÊNCIA DAS ORDENS DIFRATIVAS DE UMA LIOM DIFRATIVA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA. ....	27
FIGURA 16 - PROPAGAÇÃO DA LUZ DE UM PONTO $P(X, Y, 0)$ NO PLANO DA ABERTURA ATÉ UM PONTO $P(X, Y, Z)$ NO PLANO DE ANÁLISE. ....	28
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE LUMINOSA DE UMA LIOM BIFOCAL AO LONGO DO EIXO ÓPTICO PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE DEGRAUS DIFRATIVOS. ....	30
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO OBJETO E DA IMAGEM PARA UM SISTEMA ÓPTICO REAL. ....	31
FIGURA 19 – A) OBJETO PADRÃO E B) SUA CURVA DE INTENSIDADE. ....	32
FIGURA 20 - TRANSFERÊNCIA DE CONTRASTE PARA UMA IMAGEM CONSIDERANDO DIFERENTES VALORES DE MTF. ....	33
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA INTENSIDADE DO OBJETO E DA IMAGEM PARA UM SISTEMA LIMITADO POR DIFRAÇÃO. ....	34
FIGURA 22 - CURVA TÍPICA DE MTF DE UM SISTEMA ÓPTICO E SEU LIMITE DE DIFRAÇÃO.....	35
FIGURA 23 - MTF <i>THROUGH FOCUS</i> : A) LIOM BIFOCAL E B) LIOM TRIFOCAL.....	36
FIGURA 24 – EFICIÊNCIA LUMINOSA DE UMA LIO MONOFOCAL. ....	37
FIGURA 25 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE LIOMS BIFOCAIS: A) REFRACTIVA E B) DIFRATIVA.....	38
FIGURA 26 - LIOM DIFRATIVA TECNIS MODELO ZM 900. ....	39
FIGURA 27 - LIOM DIFRATIVA APODIZADA ACRYSOFT RESTOR MODELO SN6AD1.....	40
FIGURA 28 - LIOM AT LISA TRI MODELO 839MP. ....	40
FIGURA 29- POSSÍVEIS MODELOS DIFRATIVOS DA LIOM 839 MP: A) COM SUPERPOSIÇÃO DE DOIS DEGRAUS E B) COM SUPERPOSIÇÃO DE TRÊS DEGRAUS. ....	42
FIGURA 30 - LIOM FINEVISION MODELO MICRO F. ....	43
FIGURA 31 - ESTRUTURA DA REDE DIFRATIVA DA LIOM MICRO F: A) REDE DIFRATIVA BIFOCAL COM ADICIONAL DE +1,75 D, B) REDE DIFRATIVA BIFOCAL COM ADICIONAL DE +3,50 D E C) REDE DIFRATIVA TRIFOCAL RESULTANTE DA SOMA DAS REDES DIFRATIVAS A E B. ....	44

FIGURA 32 - MODELO DE OLHO ESTABELECIDO PELA NORMA ISO 11979.....	46
FIGURA 33 – EXEMPLO DE FRONTEIRA DE PARETO PARA UM PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO COM DUAS FUNÇÕES OBJETIVO.....	48
FIGURA 34 – ETAPAS DE EXECUÇÃO DO ALGORITMO NSGA-II.....	49
FIGURA 35 - ESQUEMÁTICO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM TORNO CNC.....	51
FIGURA 36 - MATÉRIA PRIMA DA LIO (À DIREITA) E BLOCO DE FIXAÇÃO (À ESQUERDA).....	51
FIGURA 37 – CONEXÃO DO BLOCO AO CABEÇOTE E SEU SENTIDO DE ROTAÇÃO.....	51
FIGURA 38 - RAIOS DE PONTA DA FERRAMENTA DE DIAMANTE.....	52
FIGURA 39 – EFEITO DO RAIOS DE PONTA DA FERRAMENTA SOBRE O FORMATO DO DEGRAU DIFRATIVO: A) FERRAMENTA COM RAIOS DE PONTA ELEVADO E B) FERRAMENTA COM RAIOS DE PONTA PEQUENO E C) PARÂMETROS DAS FERRAMENTAS: $R_2 > R_1$ E $\Theta_2 = \Theta_1$ .....	52
FIGURA 40 – FUNÇÃO REPRESENTATIVA DE UMA LIOM DIFRATIVA COM ALTURA DE DEGRAUS CONSTANTE EM RELAÇÃO A SUA CURVA BASE.....	56
FIGURA 41 – FUNÇÃO REPRESENTATIVA DE UMA LIOM DIFRATIVA APODIZADA: A) APODIZAÇÃO LINEAR E B) APODIZAÇÃO POLINOMIAL.....	56
FIGURA 42 – FUNÇÃO REPRESENTATIVA DE UMA LIOM DIFRATIVA TRIFOCAL COM ALTURAS ALTERNADAS.....	57
FIGURA 43 – FUNÇÃO REPRESENTATIVA DA ALTURA DOS DEGRAUS DA LIOM PHYSIOL CONSIDERANDO UMA APODIZAÇÃO POLINOMIAL.....	57
FIGURA 44 – FUNÇÃO PERIÓDICA SUGERIDA INICIALMENTE PARA MODULAR AS ALTURAS DOS DEGRAUS DA REDE DIFRATIVA.....	58
FIGURA 45 – FUNÇÃO PERIÓDICA EMPREGADA PARA MODULAR A ALTURA DOS DEGRAUS DA REDE DIFRATIVA.....	59
FIGURA 46 – REPRESENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE MODULAÇÃO PARA DIFERENTES PARÂMETROS: A) $F = F_1$ , $A = A_1$ E $\Theta = 0$ E B) $F = F_2$ , $A = A_2$ E $\Theta \neq 0$ .....	60
FIGURA 47 – PARÂMETROS A E B DA REDE DIFRATIVA.....	61
FIGURA 48 – PROPAGAÇÃO DOS FEIXES EM UM SISTEMA ÓPTICO SEQUENCIAL MODELADO NO OPTICSTUDIO.....	63
FIGURA 49 – SISTEMA ÓPTICO NÃO SEQUENCIAL MODELADO NO OPTICSTUDIO.....	64
FIGURA 50 – FRONTEIRA DE PARETO ESTIMADA DAS SOLUÇÕES OBTIDAS AO FINAL DA OTIMIZAÇÃO PELO NSGA-II.....	70
FIGURA 51 – CRITÉRIO DE SELEÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA DA FRONTEIRA DE PARETO.....	71
FIGURA 52 - FRONTEIRA DE PARETO ESTIMADA DAS SOLUÇÕES PARA ABERTURA DE 3 MM DE DIÂMETRO OBTIDA PELO NSGA-II.....	75
FIGURA 53 - FRONTEIRA DE PARETO ESTIMADA DAS SOLUÇÕES PARA 4,5 MM DE DIÂMETRO OBTIDA PELO NSGA-II.....	76
FIGURA 54- CURVAS DE MTF PARA 3,0 MM DE ABERTURA.....	77
FIGURA 55 - CURVAS DE MTF PARA 4,5 MM DE ABERTURA.....	78
FIGURA 56 - CURVAS DE MTF PARA 6,0 MM DE ABERTURA.....	78
FIGURA 57 - MTF THROUGH FOCUS PARA ABERTURAS DE 3,0 MM, 4,5 MM E 6,0 MM DE DIÂMETRO.....	79
FIGURA 58- EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA LIO TRIFOCAL EM FUNÇÃO DA ABERTURA.....	80
FIGURA 59 - COMPARATIVA ENTRE AS LIOS AT LISA TRI MODELO 839 MP, FINE VISION MODELO MICRO F E LIO PROPOSTA PARA ABERTURA DE 3,0 MM DE DIÂMETRO.....	81
FIGURA 60 - COMPARATIVA ENTRE AS LIOS AT LISA TRI MODELO 839 MP, FINE VISION MODELO MICRO F E LIO PROPOSTA PARA ABERTURA DE 4,5 MM DE DIÂMETRO.....	81
FIGURA 61 - VARIAÇÃO NO MTF DISTANTE DEVIDO AOS DESVIOS DE FABRICAÇÃO PARA UMA ABERTURA DE 3 MM DE DIÂMETRO E MTF DA LIO SOB INFLUÊNCIA DE MIOPIA.....	84
FIGURA 62 - VARIAÇÃO NO MTF DISTANTE DEVIDO AOS DESVIOS DE FABRICAÇÃO PARA UMA ABERTURA DE 4,5 MM DE DIÂMETRO E MTF DA LIO SOB INFLUÊNCIA DE MIOPIA.....	85

FIGURA 63 - VARIAÇÃO NO MTF PRÓXIMO DEVIDO AOS DESVIOS DE FABRICAÇÃO PARA UMA ABERTURA DE 3,0 MM DE DIÂMETRO E MTF DA LIO SOB INFLUÊNCIA DE HIPERMETROPIA. ....	85
FIGURA 64 - VARIAÇÃO NO MTF PRÓXIMO DEVIDO AOS DESVIOS DE FABRICAÇÃO PARA UMA ABERTURA DE 4,5 MM DE DIÂMETRO E MTF DA LIO SOB INFLUÊNCIA DE HIPERMETROPIA. ....	86
FIGURA 65 - IMAGEM DA SUPERFÍCIE DIFRATIVA DO PROTÓTIPO FABRICADO. ....	87
FIGURA 66 - PERFIL DA REDE DIFRATIVA DA LIO PROPOSTA APÓS REMOÇÃO DA CURVA BASE.....	88
FIGURA 67 – MTF TF DA LIO PROPOSTA E LIOS PRESENTES NO MERCADO PARA 3,0 MM DE ABERTURA. ....	90
FIGURA 68 - MTF TF DA LIO PROPOSTA E LIOS PRESENTES NO MERCADO PARA 4,5 MM DE ABERTURA. ....	90
FIGURA 69 - MTF TF DA LIO PROPOSTA E LIOS PRESENTES NO MERCADO PARA 6,0 MM DE ABERTURA. ....	91
FIGURA 70 - GRÁFICO DOS VALORES DE PICO DE MTF PARA TODOS OS FOCOS E ABERTURAS MEDIDOS.....	92
FIGURA 71 – COMPARATIVO DO MTF TF DA LIO SIMULADA E DO PROTÓTIPO PARA 3,0 MM DE ABERTURA. ....	94
FIGURA 72 - COMPARATIVO DO MTF TF DA LIO SIMULADA E DO PROTÓTIPO PARA 4,5 MM DE ABERTURA. ....	94
FIGURA 73 - COMPARATIVO DO MTF TF DA LIO SIMULADA E DO PROTÓTIPO PARA 6,0 MM DE ABERTURA. ....	95
FIGURA 74 - IMAGENS USAF PARA A LIO PROPOSTA E SN6AD1 EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO FOCAL: ALTA LUMINOSIDADE E ABERTURA DE 3,0 MM. ....	100
FIGURA 75 - IMAGENS USAF PARA A LIO PROPOSTA E SN6AD1 EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO FOCAL: BAIXA LUMINOSIDADE E ABERTURA DE 3,0 MM. ....	101
FIGURA 76 - IMAGENS USAF PARA A LIO PROPOSTA E SN6AD1 EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO FOCAL: ALTA LUMINOSIDADE E ABERTURA DE 4,5 MM. ....	102
FIGURA 77 - IMAGENS USAF PARA A LIO PROPOSTA E SN6AD1 EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO FOCAL: BAIXA LUMINOSIDADE E ABERTURA DE 4,5 MM. ....	103
FIGURA 78 - IMAGENS USAF PARA A LIO PROPOSTA E SN6AD1 EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO FOCAL: ALTA LUMINOSIDADE E ABERTURA DE 6,0 MM. ....	104
FIGURA 79 - IMAGENS USAF PARA A LIO PROPOSTA E SN6AD1 EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO FOCAL: BAIXA LUMINOSIDADE E ABERTURA DE 6,0 MM. ....	105

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>2</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 OBJETIVOS .....	10
1.1.1 Objetivo Geral.....	10
1.1.2 Objetivos Específicos.....	10
1.2 CONTRIBUIÇÕES .....	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	11
<b>2. CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	<b>12</b>
2.2 LENTES INTRAOCULARES .....	12
2.2.1 LIOs monofocais .....	12
2.2.2 LIOs multifocais.....	16
2.3 TÉCNICAS DE MULTIFOCALIDADE .....	19
2.3.1 LIOMs refrativas .....	19
2.3.2 LIOMs difrativas .....	20
2.3.2.1 Efeito da quantidade de degraus difrativos na distribuição de intensidade luminosa das ordens difrativas .....	27
2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LIOs .....	31
2.4.1 PSF e MTF .....	31
2.4.2 MTF <i>through focus</i> .....	35
2.4.3 Eficiência luminosa.....	37
2.5 ESTADO DA TÉCNICA .....	38
2.5.1 LIOM Tecnis ZM900.....	38
2.5.2 LIOM Acrysof Restor SN6AD1 .....	39
2.5.3 LIOM AT LISA TRI 839MP .....	40
2.5.4 LIOM FineVision Micro F.....	42
2.6 NORMALIZAÇÃO DO DESEMPENHO ÓPTICO DE LIOs .....	44
2.7 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E ALGORITMO NSGA-II.....	46
2.8 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LIOs POR TORNEAMENTO .....	50
2.9 ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS DE LIOs .....	53

<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>55</b>
3.1 PESQUISAS PRELIMINARES.....	55
3.1.1 Aspecto inovador da LIOM proposta: modulação da altura dos degraus .....	55
3.1.2 Cálculo da eficiência luminosa da LIOM proposta.....	60
3.2 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE OPTICSTUDIO .....	63
3.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO .....	65
3.4 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS.....	72
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>74</b>
4.1 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E DESEMPENHO ÓPTICO .....	74
4.2 ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS .....	82
4.3 RESULTADOS DE FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO DA LIOM PROPOSTA.....	87
4.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A LIOM DIFRATIVA PROPOSTA.....	106
<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>107</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A catarata provoca a opacificação do cristalino (lente natural do olho), fazendo com que a luz que atravessa o sistema ocular alcance a retina de forma dispersa ou bloqueando grande parte dos raios que chegariam até ela (MING e CONSTABLE, 1995; VRIES, 2011).

Uma das formas comumente empregadas no tratamento de catarata consiste em remover o cristalino opaco e substituí-lo por uma lente artificial denominada lente intraocular (LIO), cuja principal função é restaurar o poder dióptrico do cristalino removido, a fim de garantir que os feixes luminosos sejam focalizados na retina. As primeiras LIOs que surgiram no mercado eram denominadas LIOs monofocais, pois apresentavam uma única distância focal (VRIES, 2011). A dioptria das LIOs monofocais faz com que objetos situados a determinadas distâncias (geralmente objetos distantes, ou seja, a uma distância acima de 6,0 m) sejam focalizados nitidamente na retina. Essa característica faz com que os pacientes submetidos ao implante desse tipo de lente tenham a necessidade do uso de óculos em média e curta distância (como trabalhar com um computador, assistir TV, ou ler um livro, por exemplo). Com o propósito de mitigar a dependência do uso de óculos para pacientes submetidos ao implante de LIOs, surgiram as lentes intraoculares multifocais (LIOMs) (VRIES, 2011).

As LIOMs têm a característica de criar mais de um ponto focal. Tal característica se torna possível através do emprego de superfícies refrativas com diferentes curvaturas ao longo da zona óptica da lente (LIOM refrativa) ou através de fenômenos de difração (LIOM difrativa) pelo emprego de pequenas transições (degraus difrativos) na superfície da lente. As primeiras LIOMs presentes no mercado eram bifocais, ou seja, criavam dois pontos focais simultâneos destinados a focalizar na retina objetos distantes e próximos. Essa abordagem, apesar de garantir boa acuidade visual para atividades de curta e longa distância, apresenta um desempenho insatisfatório para atividades em distâncias intermediárias (GATINEL *et al.*, 2011). Com o intuito de compensar essa limitação das LIOMs bifocais e garantir uma maior independência do uso de óculos em pacientes submetidos ao tratamento de catarata, tem sido desenvolvido nos últimos anos LIOMs trifocais (GATINEL *et al.*, 2011).

As LIOMs trifocais têm a capacidade de criar três pontos focais destinados a assegurar uma boa acuidade visual para distâncias próximas, intermediárias e longas (GATINEL *et al.*, 2011). Nos últimos 10 anos, as LIOMs trifocais têm sido o foco de pesquisa de grandes empresas do ramo de LIOs e, portanto, as tecnologias presentes no mercado se encontram protegidas por patentes (a patente garante a proteção da invenção por um período de até 20

---

anos). Dessa forma, as empresas de lentes intraoculares emergentes no ramo de LIOMs trifocais, cujo o intuito seja de comercializar produtos dessa categoria no mercado têm duas opções: pagar *royalties* aos detentores de patentes para poder comercializar seus modelos de LIOMs trifocais ou desenvolver seu próprio projeto de modo que suas características não infrinjam os requisitos protegidos pelas patentes.

Em média, são realizadas no mundo todo 20 milhões de cirurgias de catarata aproximadamente (LINSTROM, 2015). Desse total, segundo dados apresentados pelo Ministério da Saúde de 2015, 473 mil cirurgias de catarata foram realizadas no Brasil (TRINDADE, 2017). Além disso, tem-se uma projeção para 2021 de que o implante de LIOs *premium* (lentes multifocais e acomodativas) correspondam a 10% do total de implantes no mundo (BARRY, 2016).

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma nova LIO trifocal difrativa cuja altura dos degraus difrativos é modulada por uma função periódica dada pelo módulo da função cossenoidal transladada. O intuito de empregar tal função de modulação é definir parâmetros analíticos (parâmetros que descrevem a função cossenoidal: amplitude, frequência e fase) para a construção da rede difrativa da LIOM proposta e relacionar tais parâmetros com as figuras de mérito que caracterizam a qualidade óptica da lente. Espera-se com essa abordagem encontrar um projeto difrativo inovador em relação ao estado da técnica e com desempenho óptico semelhante ou superior ao que existe no mercado.

Apesar de a proposta apresentada ter foco na área de oftalmologia, os conhecimentos necessários ao desenvolvimento do projeto, otimização e fabricação da LIO são multidisciplinares. Essa multidisciplinaridade faz com que o projeto proposto tenha uma abordagem na área de engenharia elétrica ao tratar de conceitos importantes sobre ondas eletromagnéticas na faixa da luz visível como, por exemplo, difração e interferência. Além disso, ferramentas matemáticas comumente empregadas na área de engenharia elétrica como a transformada de Fourier são utilizadas nas análises de resultados desse trabalho. Já em relação à subárea de sistemas de computação, são empregadas técnicas computacionais de otimização e desenvolvimento de algoritmos para análise dos dados de simulação. Além disso, o objeto estudado tem potencial aplicação em outros setores, podendo ser empregado desde em câmeras a sistemas de comunicação por luz.

---

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de lente intraocular trifocal difrativa inovador em relação às LIOMs presentes no estado da técnica, através do emprego de uma função de modulação, cujos parâmetros serão responsáveis por determinar a altura de cada degrau da rede difrativa.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, a pesquisa abordada nesse trabalho será fundamentada nos seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma análise aprofundada sobre as características das lentes intraoculares multifocais difrativas presentes no estado da técnica com o propósito de levantar quais diferenciais o modelo proposto deve apresentar para ser considerado inovador;
- Realizar pesquisa bibliográfica sobre a modelagem matemática da eficiência de lentes multifocais difrativas, para que se possa levantar um modelo matemático capaz de determinar a eficiência da rede difrativa proposta;
- Analisar as características de modelagem do software OpticStudio para empregá-lo na modelagem computacional do modelo proposto;
- Levantar os critérios normativos de avaliação e caracterização de lentes intraoculares;
- Levantar os desvios do processo de fabricação, que irão impactar na qualidade óptica do projeto durante a validação da análise de tolerâncias do modelo;
- Revisar e definir os métodos de otimização a serem empregados na otimização da lente proposta;
- Estabelecer os parâmetros de otimização e os critérios necessários para escolha da solução dentre o conjunto de soluções da fronteira Pareto estimada;
- Comparar os resultados de qualidade óptica do modelo proposto com os modelos comercializados no mercado;
- Fabricar o protótipo do modelo proposto e comparar a qualidade óptica do protótipo com os modelos comercializados no mercado.

---

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES

Dentre as contribuições presentes nesse trabalho pode-se destacar:

- Apresentação de um modelo inovador de estrutura de degraus difrativos, com base em uma função de modulação, para ampliação de extensão focal em uma lente intraocular;
- Modelagem do cálculo da eficiência de uma rede difrativa com base nos parâmetros matemáticos construtivos da função de modulação;
- Análise do impacto dos desvios de fabricação de um processo baseado em torneamento sobre a qualidade óptica da lente;
- Flexibilização da escolha das características de qualidade óptica de uma lente intraocular, para que o médico possa personalizar o tratamento do paciente de acordo com suas atividades diárias.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O trabalho está dividido em 6 capítulos, abrangendo, também, o presente capítulo introdutório. O capítulo 2 tem o intuito de apresentar os conceitos básicos referentes às lentes intraoculares monofocais e multifocais, técnicas de multifocalidade com base em refração e difração, parâmetros de avaliação de lentes intraoculares, critérios de normatização, processo de fabricação por torneamento, análise de tolerâncias e estado da técnica de lentes multifocais difrativas.

No capítulo 3 descreve-se a análise bibliográfica realizada para identificação e proposição de um modelo de estrutura de degraus difrativos inovador. Apresenta-se a análise matemática realizada para a determinação do cálculo da eficiência da rede difrativa proposta, a descrição do software computacional empregado na modelagem do modelo, o método de otimização empregado e, finalmente, o detalhamento da análise de tolerâncias realizada.

No capítulo 4 é apresentado os resultados referentes aos parâmetros construtivos da lente multifocal proposta, a análise da qualidade óptica da lente por meio das curvas de MTF e MTF TF e a análise do impacto dos desvios de fabricação sobre o desempenho óptico da lente.

O capítulo 5 apresenta uma discussão sobre as contribuições deste trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros sobre o tema proposto.

Finalmente, no capítulo 6 é identificado as referências bibliográficas, que fundamentaram a pesquisa realizada nesta tese.

---

## 2. CONCEITOS E FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo são apresentados tópicos essenciais para se compreender os seguintes itens: o que é uma lente intraocular; quais são as técnicas existentes para se criar multifocalidade; quais os parâmetros e aspectos normativos para se avaliar a qualidade óptica de lentes; como avaliar os desvios de um processo de fabricação de lentes e, finalmente, qual o estado da técnica atual relacionado a lentes intraoculares multifocais. Toda a fundamentação apresentada será relevante para a identificação e comprovação dos aspectos inovativos presentes na lente proposta neste trabalho.

### 2.2 LENTES INTRAOCULARES

A catarata consiste da opacificação do cristalino, que é a lente natural do olho. Tal opacificação geralmente ocorre de forma gradual e é comum surgir em pacientes com idade avançada. Entretanto, outros fatores além da idade podem provocar seu surgimento e/ou agravamento como: utilização de determinadas drogas (esteroides p.e.), doenças metabólicas (diabetes p.e.) entre outros fatores (MING e CONSTABLE, 1995).

A catarata faz com que a luz que atravessa o olho alcance a retina de forma dispersa ou ainda pode bloquear grande parte dos raios luminosos que chegam à retina. Dessa forma, quando a catarata se encontra em estágio avançado a pessoa perde sua capacidade visual e, mundialmente, é a maior causa responsável por cegueira (51%), segundo dados de 2010 da World Health Organization (WHO, 2012).

Atualmente o tratamento da catarata consiste da remoção cirúrgica do cristalino opaco e sua substituição por uma lente artificial denominada lente intraocular (LIO), cujo primeiro modelo foi desenvolvido por Harold Ridley (RIDLEY, 1952). A LIO implantada tem o objetivo de prover o poder dióptrico necessário à correta formação da imagem na retina. As principais características das LIOs comumente encontradas no mercado serão abordadas nos próximos tópicos.

#### 2.2.1 LIOs monofocais

Uma LIO monofocal é caracterizada por apresentar uma única distância focal, responsável por focalizar sobre a retina objetos situados a uma determinada distância (geralmente objetos distantes). Devido à criação de um único ponto focal é comum que um

paciente submetido ao implante de LIO monofocal tenha a necessidade do uso de óculos para leitura e/ou visão intermediária, afinal objetos a tais distâncias não são projetados com boa nitidez sobre a retina. Além desses fatores, é importante ressaltar que tanto sua posição no olho quanto o formato das curvaturas da superfície de uma LIO são fixas, fazendo com que a capacidade de acomodação presente no cristalino seja perdida (SCHWIEGERLING, 2010).

A forma mais básica de uma LIO monofocal consiste em duas superfícies convexas esféricas (lente biconvexa simétrica – Figura 1.A) (RAWER *et al.*, 2005). Entretanto, tal combinação de superfícies faz com que a imagem formada sobre a retina apresente distorções, que recebem o nome de aberração esférica<sup>1</sup>. A aberração esférica, cuja denominação se deve ao fato de a mesma ser observada comumente em lentes com superfícies esféricas, é provocada devido à vergência dos feixes que atravessam a periferia da LIO ser maior que a vergência da sua região central (Figura 1.B) (MALACARA e MALACARA, 2004).

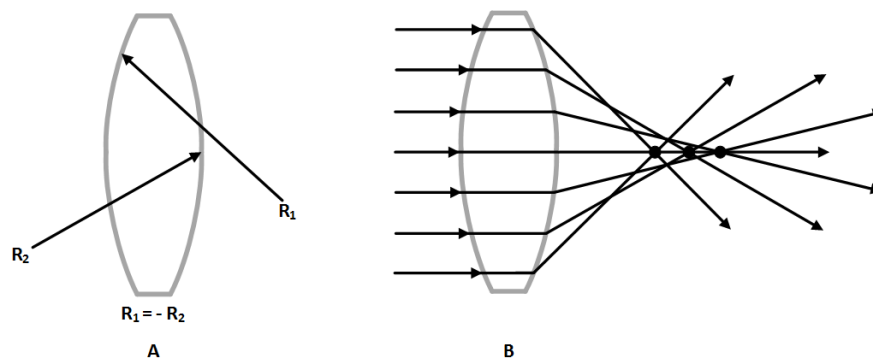


Figura 1 - LIO monofocal: A) esférica biconvexa e B) vergência dos raios da LIO esférica.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

Atualmente os avanços tecnológicos na fabricação de LIOs permite que superfícies não esféricas sejam fabricadas. LIOs com superfícies nesse formato são denominadas LIOs asféricas e são comercialmente denominadas como lentes *premium*, pois permitem a atenuação da aberração esférica de modo a garantir melhor qualidade de imagem em comparação com as LIOs esféricas. Em uma LIO asférica é possível fazer com que os feixes de sua periferia tenham a mesma vergência dos feixes de sua zona central de modo a corrigir toda a aberração esférica

<sup>1</sup> Aberrações são distorções presentes em imagens provocadas por turbulências no meio de propagação dos feixes luminosos ou devido à estrutura óptica ou topologia dos elementos por onde os feixes se propagam. Existem diversos tipos de aberrações: aberração esférica, astigmatismo, coma, entre outros (WEFORD, 1986).

da lente (Figura 2). Além disso, existem aplicações em que as LIOs esféricas são projetadas para deixar um residual de aberração esférica, ou seja, a aberração esférica da LIO não é totalmente corrigida, com o intuito de compensar a aberração esférica proveniente dos outros elementos do sistema óptico (no caso do olho humano, tal abordagem permite a compensação da aberração esférica corneana).

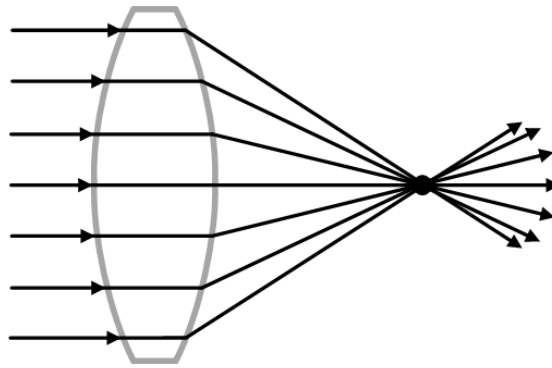


Figura 2 - Vergência dos raios em uma LIO asférica.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

É possível verificar qualitativamente na Figura 3 a qualidade da imagem formada por uma LIO esférica e asférica através de simulação computacional no software OpticStudio<sup>2</sup>. Verifica-se que a presença da aberração esférica (Figura 3.B) provoca uma deterioração na nitidez da imagem.

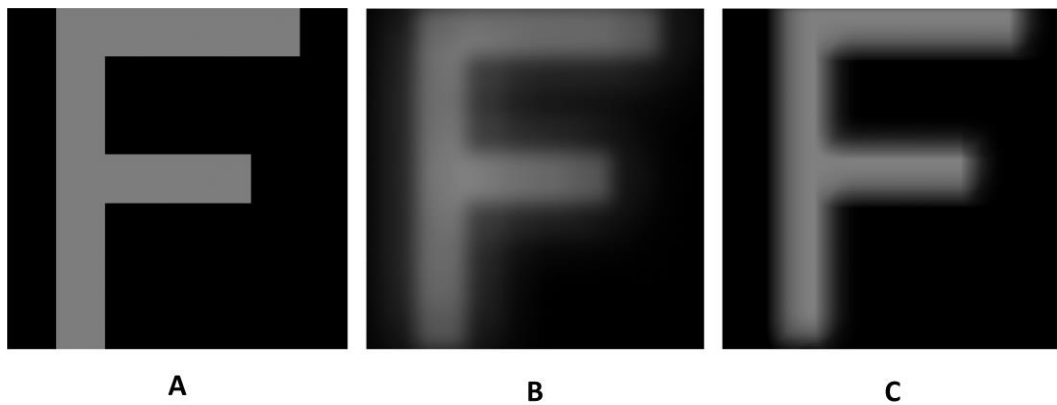


Figura 3 – A) Objeto e Imagem formada: B) por uma LIO esférica e C) por uma LIO asférica.

---

<sup>2</sup> A simulação foi realizada na versão 2018 do software OpticStudio utilizando-se um modelo de olho proposto por Liou e Brennan (LIOU e BRENNAN, 1997). A LIO inserida no modelo apresenta 20 D e o objeto (letra F) estava a uma distância de 6 m do modelo de olho.

Uma superfície esférica é descrita matematicamente pela relação (FREEMAN, 2007):

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (1)$$

sendo  $z$  uma coordenada em função de  $r$ , que representa um ponto na superfície da lente cujo semi-diâmetro encontra-se no plano  $xy$ ,  $c$  é a curvatura da superfície (recíproco do raio de curvatura),  $r$  é a coordenada radial perpendicular ao eixo óptico, representando o semi-diâmetro da lente e  $k$  é a constante cônica, responsável por determinar o grau de asfericidade da lente. De acordo com a variação da constante cônica a superfície esférica assume diferentes formatos:

- se  $k = 0$ , a superfície  $z$  tem formato esférico.
- se  $k < -1$ , a superfície  $z$  tem formato hiperbólico.
- se  $k = -1$ , a superfície  $z$  tem formato parabólico.
- se  $-1 < k < 0$  a superfície  $z$  tem formato elipsoidal.

Com base nos raios de curvatura de uma LIO monofocal ( $R_1$  e  $R_2$ ), seja sua superfície esférica ou esférica, na espessura central ( $t$ ) e no índice de refração de seu material ( $n_{LIO}$ ) é possível determinar o poder dióptrico de uma lente pela relação (DERENIAK e DERENIAK, 2008):

$$\phi = \frac{n_{LIO} - n_{meio}}{R_1} + \frac{n_{meio} - n_{LIO}}{R_2} - \left( \frac{n_{LIO} - n_{meio}}{R_1} \right) \left( \frac{n_{meio} - n_{LIO}}{R_2} \right) \left( \frac{t}{n_{LIO}} \right) \quad (2)$$

em que  $n_{meio}$  é o índice de refração do meio ao redor da LIO.

A equação (2) pode ser simplificada caso a relação  $1/t \gg D$  (diâmetro da lente) seja válida. Tal simplificação é denominada equação dos fabricantes de lentes, sendo expressa matematicamente por (DERENIAK e DERENIAK, 2008):

$$\phi = \frac{n_{LIO} - n_{meio}}{R_1} + \frac{n_{meio} - n_{LIO}}{R_2} \quad (3)$$

As Eq. (2) e Eq. (3) determinam o poder dióptrico da LIO com base em seus parâmetros construtivos, ou seja, sabendo-se qual o poder dióptrico da LIO a ser implantada é possível determinar os parâmetros construtivos dela ( $R_1$ ,  $R_2$ , espessura e material) que irão garantir esse poder dióptrico. Já o poder dióptrico da LIO recomendada ao paciente, que será responsável por restaurar o poder refrativo do cristalino removido durante a cirurgia de catarata, é

determinado com base em exames biométricos pré-operatórios (SAHIN e HAMRAH, 2012). Dessa forma, o poder dióptrico da LIO recomendada dependerá das características biométricas (dimensões) do olho do paciente. As principais informações biométricas do olho do paciente a serem determinadas em tais exames são: o comprimento axial do olho (distância da superfície anterior da córnea até a retina), comprimento da câmara anterior (distância da superfície anterior da córnea até a superfície anterior da LIO) e o poder dióptrico da córnea. Com base nesses parâmetros é possível determinar a dioptria da LIO conforme indicado na Eq. (4)<sup>3</sup> (HOFFER, 1991):

$$\Phi_{\text{paciente}} = \frac{1,336}{(AL - ACD - 0,05)/1000} - \frac{1,336}{\frac{1,336}{K + \phi_{\text{refrativo}}} - \frac{ACD + 0,05}{1000}} \quad (4)$$

em que  $AL$  é o comprimento axial em mm,  $ACD$  (*anterior chamber depth*) é o comprimento da câmara anterior em mm,  $K$  é o poder dióptrico da córnea e  $\phi_{\text{refrativo}}$  é o erro refrativo. O erro refrativo corresponde ao inverso da distância, em metros, do objeto até a córnea do paciente (HOFFER, 1991). Assim, caso o objeto se encontre a uma distância de 3,00 m do paciente, o erro refrativo ( $\phi_{\text{refrativo}}$ ) será de 0,33 D.

### 2.2.2 LIOs multifocais

A LIO multifocal (LIOM), cujo precursor foi o Dr. Kenneth J. Hoffer, surgiu com o intuito de criar mais de um ponto focal e, dessa forma, permitir que os pacientes não tenham a necessidade de utilizar óculos para atividades próximas e/ou intermediárias (HOFFER, 1991). Atualmente existem LIOMs bifocais, que criam dois pontos focais com o intuito de garantir uma boa acuidade visual para perto e longe (Figura 4.A), e LIOMs trifocais (Figura 4.B), que criam três pontos focais, garantindo correção da visão para perto, intermediário e longe (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013). A dioptria da LIOM, que é responsável por criar o foco

---

<sup>3</sup> O fator de 0,05 mm presente na Eq. (4) está relacionado ao plano principal da córnea. Como a córnea possui uma espessura finita seu plano principal se situa à aproximadamente 0,05 mm em relação à superfície anterior da córnea (OLSEN, 2007).

distante, é comumente denominada dioptria base e a diferença entre a dioptria do foco distante e o foco próximo é denominada dioptria adicional.

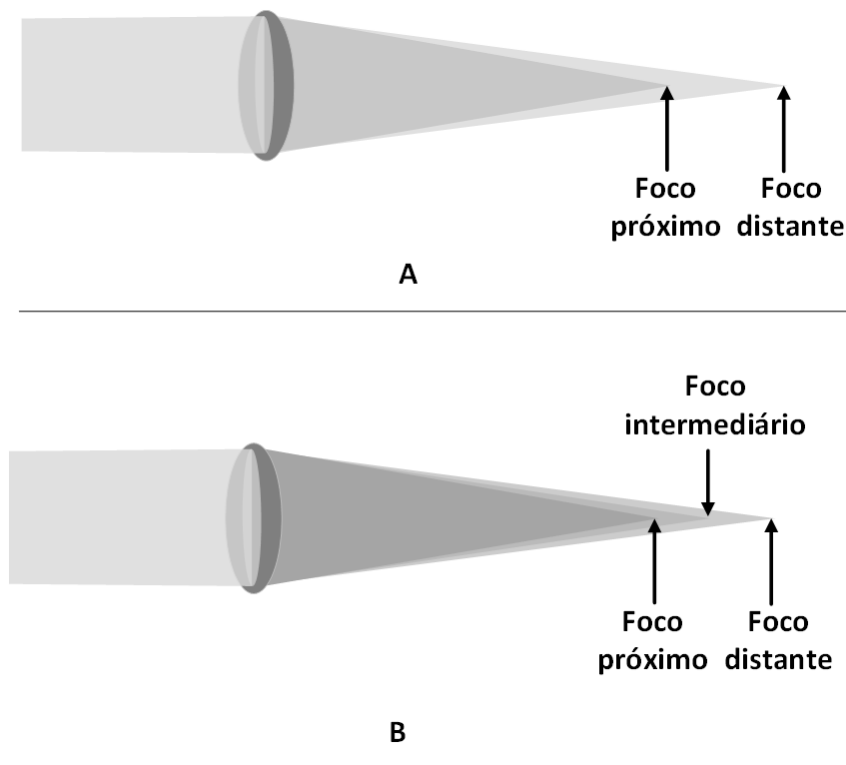


Figura 4 - LIO multifocal: A) bifocal e B) trifocal.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

A presença dos múltiplos pontos focais criados pela LIOM, e todos eles gerando imagens simultâneas na retina de objetos a distâncias diferentes, faz com que imagens simultâneas se sobreponham na retina. Com base nisso, caso um objeto distante esteja sendo focalizado nitidamente na retina, observa-se, simultaneamente, a projeção de imagens embaçadas/desfocadas provenientes dos outros focos (próximo e/ou intermediário) criados pela LIOM, que se formam antes da retina (Figura 5). Tal comportamento da LIO multifocal é denominado visão simultânea e se distingue do comportamento das lentes multifocais de óculos. Nos óculos multifocais, a lente é dividida em segmentos com diferentes poderes dióptricos, destinados à visão distante, próxima e/ou intermediária (HARAN, *et al.*, 2010). Nesta situação a visão é alternada, ou seja, sem a formação de imagens simultâneas na retina.

Na Figura 5, o foco  $f_1$  é o foco próximo e o foco  $f_2$  é o foco distante criado pela LIOM. Pode-se perceber qualitativamente na Figura 5 a imagem em foco na retina (devido ao foco  $f_2$ ) e o impacto da sobreposição da imagem fora de foco referente ao foco próximo (devido ao foco  $f_1$ ).

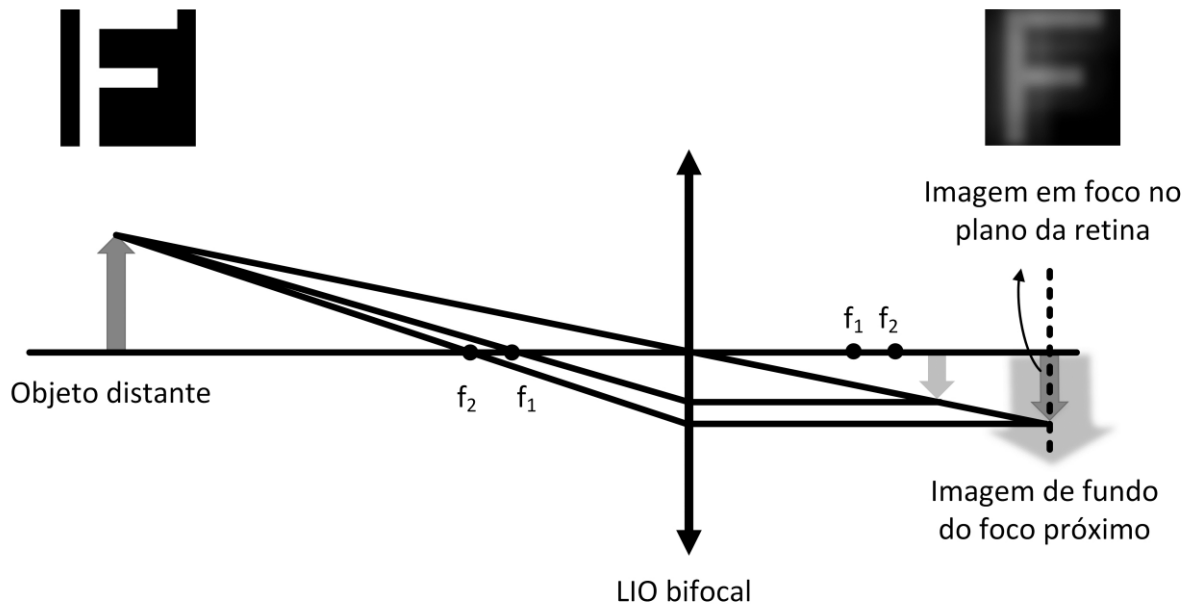


Figura 5 – Esquemático de um objeto distante sendo focalizado na retina por meio de uma LIO bifocal.

O mesmo acontecerá caso o objeto focalizado esteja próximo. Neste caso a imagem do objeto próximo (devido ao foco  $f_1$ ) será focalizada na retina com a superposição da imagem desfocada (devido ao foco  $f_2$ ) criada pelo foco distante, que se forma depois da retina (Figura 6).

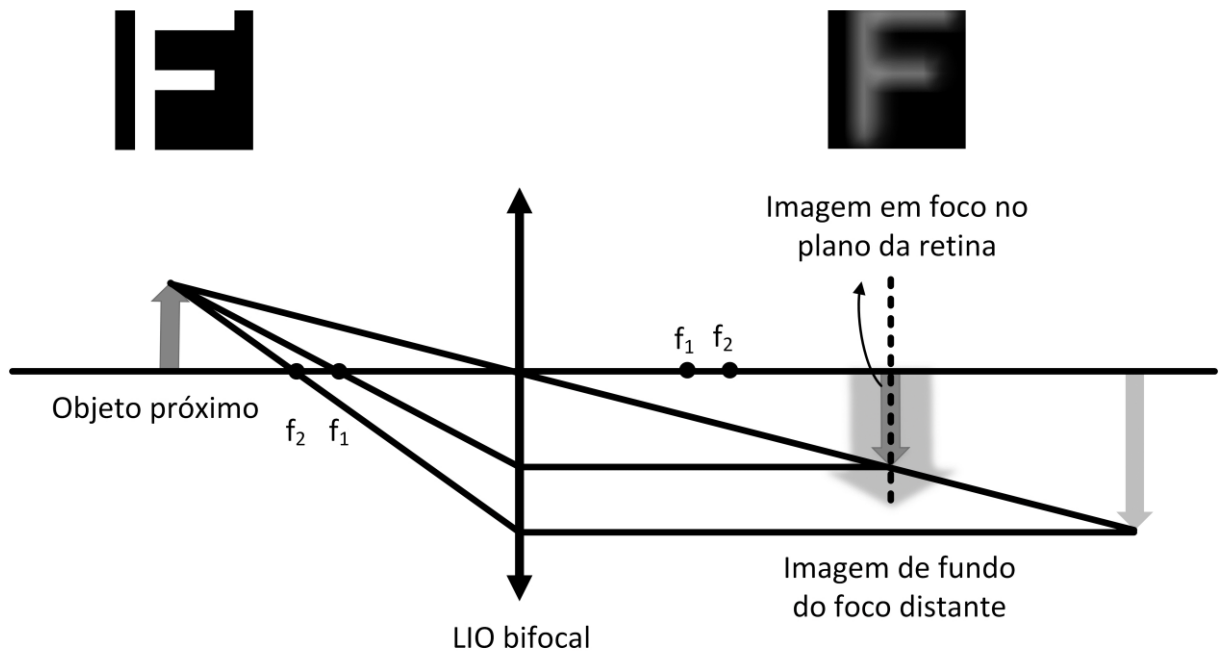


Figura 6 – Esquemático de um objeto próximo sendo focalizado na retina por meio de uma LIO bifocal.

Apesar dessa superposição de imagens provocar uma redução na nitidez da imagem focalizada, deve-se levar em consideração a grande importância da adaptação do cérebro para a correta distinção e identificação da imagem em foco (VRIES, 2011; MONTÉS-MICÓ *et al.*, 2003; MATHEN, 2010). Ainda assim, há um percentual de pacientes, que não consegue se

adaptar a tal tipo de LIO, sendo o principal motivo de rejeição a queixa de visão embaçada após cirurgia. Atrelado a isso, um fator importante relacionado à insatisfação dos pacientes reside na sua alta expectativa quanto à qualidade de visão esperada após o implante (WOODWARD, RANDLEMAN e STULTING, 2009).

Existem atualmente duas categorias principais em que as LIOMs podem ser inseridas e que serão abordadas nos próximos tópicos (MONTÉS-MICÓ *et al.*, 2003):

- **LIOMs refrativas:** conceito baseado na refração da luz que atravessa o material da lente.
- **LIOMs difrativas:** conceito baseado na difração da luz que atravessa uma rede difrativa construída na superfície da lente.

## 2.3 TÉCNICAS DE MULTIFOCALIDADE

### 2.3.1 LIOMs refrativas

As LIOMs refrativas são comumente formadas por zonas anelares circuncêntricas, que apresentam curvaturas diferentes. A diferença de curvatura de cada zona faz com que os feixes luminosos que atravessam essas regiões tenham diferentes vergências, resultando em diferentes pontos focais. O poder dióptrico de cada foco pode ser determinado com base na Eq. (2). A Figura 7 apresenta um modelo de LIOM bifocal apresentando duas regiões com curvaturas diferentes de modo que a região central possui uma vergência destinada à criação de um foco próximo e a região anelar externa com vergência responsável pela criação de um foco distante.

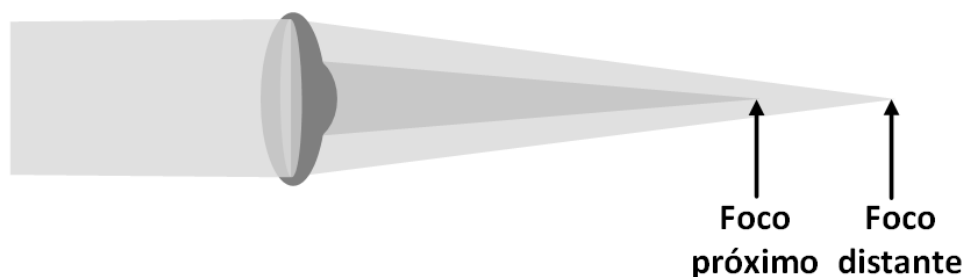


Figura 7 - LIOM refrativa.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

### 2.3.2 LIOMs difrativas

As LIOMs difrativas se baseiam no fenômeno óptico da difração, que consiste na perturbação da frente<sup>4</sup> de onda de um feixe luminoso, quando o mesmo incide ou atravessa um obstáculo com dimensões da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz visível. A propagação da onda sob efeito de difração é qualitativamente descrita por Huygens. De acordo com ele, a frente de onda em propagação se comporta, no ponto de encontro com os obstáculos, como fontes luminosas pontuais, que criam ondas secundárias responsáveis por propagar novas frentes de onda (frentes de onda secundárias – Figura 8). As frentes de onda secundárias sofrerão interferências construtivas e destrutivas durante sua propagação, de modo a alterar o perfil de intensidade observado em determinado plano quando comparado com a propagação do feixe original sem o efeito da difração (O'SHEA *et al.*, 2004).

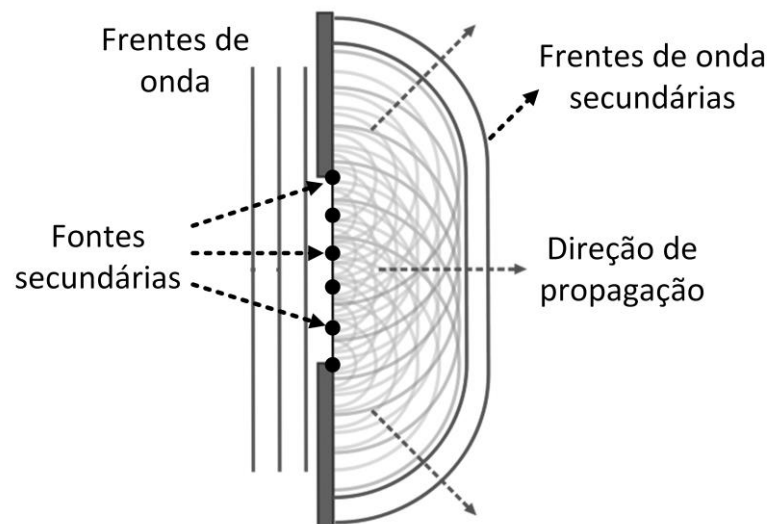


Figura 8 - Princípio de Huygens.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

Em uma LIOM difrativa pequenas transições superficiais (correspondendo aos pontos de fontes secundárias da Figura 8) denominadas degraus difrativos são responsáveis por provocar a difração do feixe incidente (Figura 9). Os degraus difrativos fazem com que o feixe

---

<sup>4</sup> Frente de onda é a região do espaço onde todos os pontos da onda em propagação estão em fase (WEFORD, 1986).

incidente seja subdividido em inúmeros feixes secundários (ordens difrativas), que sofrem interferência construtiva sobre o mesmo ponto focal (PALMER, 2002).

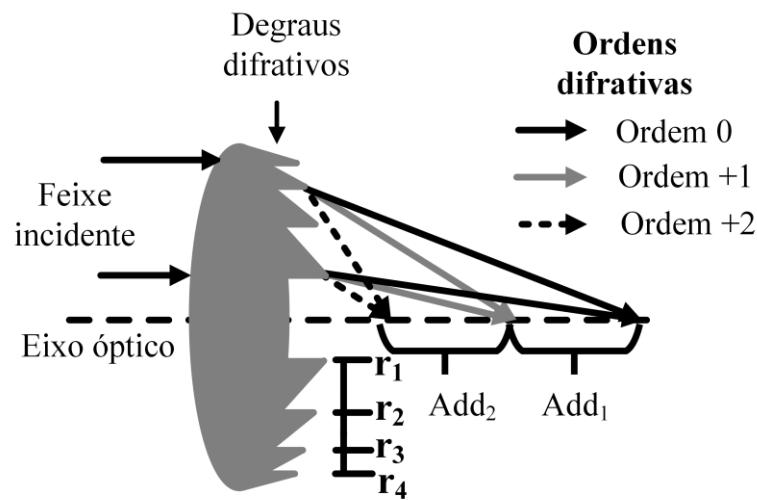


Figura 9 - Vergência das ordens difrativas em uma LIOM difrativa.

A vergência da ordem 0 é determinada pelo poder refrativo da lente (dioptria base) através da Eq. (2). As demais ordens consecutivas apresentam, entre si, vergência adicional constante. Dessa forma, o poder dióptrico adicional entre a ordem 0 e +1 é o mesmo poder adicional entre o da ordem +1 e +2 e assim sucessivamente, ou seja,  $Add_1 = Add_2$  (Figura 9). A posição do ápice de cada um dos degraus difrativos ( $r_1, r_2, r_3 \dots r_n$ ) é responsável por determinar o poder dióptrico adicional entre duas ordens consecutivas através da relação (O'SHEA *et al.*, 2004):

$$r_n = \sqrt{\frac{2n\lambda}{\phi_{add}}} \quad (5)$$

em que  $n$  é o índice do  $n$ -ésimo degrau (partindo do centro da lente até a extremidade),  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz e  $\phi_{add}$  é o poder dióptrico adicional desejado/projetado para as ordens difrativas consecutivas.

O índice  $n$  está diretamente relacionado à quantidade de degraus da LIOM (Figura 9), ou seja,  $r_1$  corresponde à posição do primeiro degrau,  $r_2$  à posição do segundo degrau e assim sucessivamente. A quantidade máxima de degraus presente em uma LIO difrativa irá depender da área da zona óptica disponível e do adicional desejado entre as ordens. Convém destacar que o adicional entre as ordens difrativas consecutivas não muda com o aumento da quantidade de degraus, ou seja, uma vez definido o adicional entre as ordens para, por exemplo, +3 D, esse valor será mantido se a lente possuir 4, 20 ou mais degraus difrativos. Entretanto, a quantidade

de degraus afeta a distribuição de intensidade luminosa de cada ordem difrativa. Este efeito será analisado em detalhes no próximo subtópico desta seção.

Além de definir o adicional dióptrico existente entre as ordens, a Eq. (5) descreve regiões anelares de áreas iguais ( $A = 2\pi\lambda/\phi_{add}$ ) para a rede difrativa da lente. A Figura 10 apresenta a vista de topo de uma LIOM difrativa em que os círculos correspondem às transições/posições dos degraus. A Eq. (5) faz com que a área do disco central ( $A_1$ ) e a área dos anéis delimitados pelos degraus difrativos ( $A_n$ ) sejam a mesma.

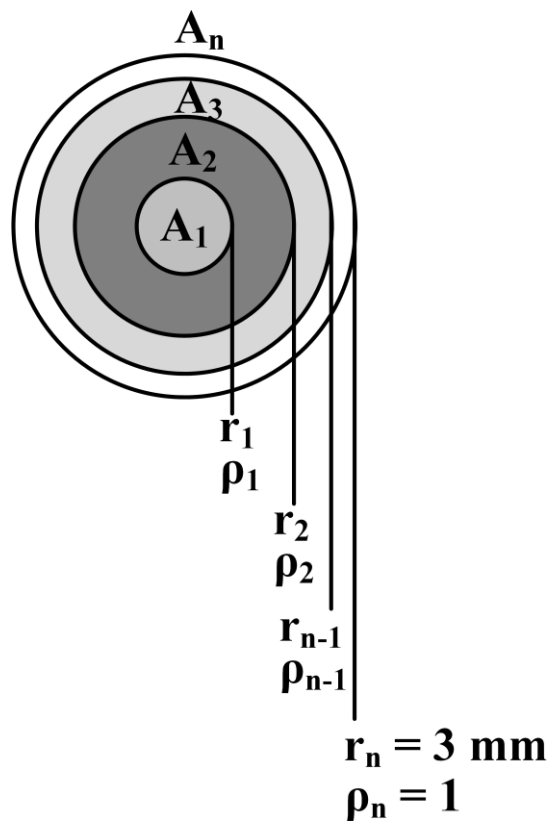


Figura 10 - Região central e regiões anelares de uma rede difrativa com áreas iguais:  $A_1 = A_2 = A_3 = A_n$ .

Outro parâmetro construtivo da rede difrativa extremamente importante para a criação dos múltiplos pontos focais é a altura dos degraus. A altura dos degraus determina a porcentagem de energia luminosa transmitida por cada ordem difrativa em relação à energia incidente, ou seja, é responsável pela eficiência luminosa de cada ordem. A eficiência luminosa

de cada ordem difrativa criada por uma LIOM com formato de degraus triangular<sup>5</sup> e altura uniforme (Figura 11) é dada pelas equações (LENKOVA, 2006):

$$I_0 = \left[ \frac{\text{sen}(\varphi_{max}/2)}{\varphi_{max}/2} \right]^2 \quad (6)$$

$$I_m = \left[ \frac{\text{sen}(\varphi_{max}/2)}{(2\pi m - \varphi_{max})/2} \right]^2 \quad (7)$$

$$\varphi_{max} = 2\pi h_{max}(n_{LIO} - n_{aq})/\lambda \quad (8)$$

em que  $I_0$  é a eficiência da ordem zero,  $I_m$  é a eficiência das m-ésimas ordens,  $h_{max}$  é a altura do degrau,  $n_{LIO}$  é o índice de refração da LIO,  $n_{aq}$  é o índice de refração do meio e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz.

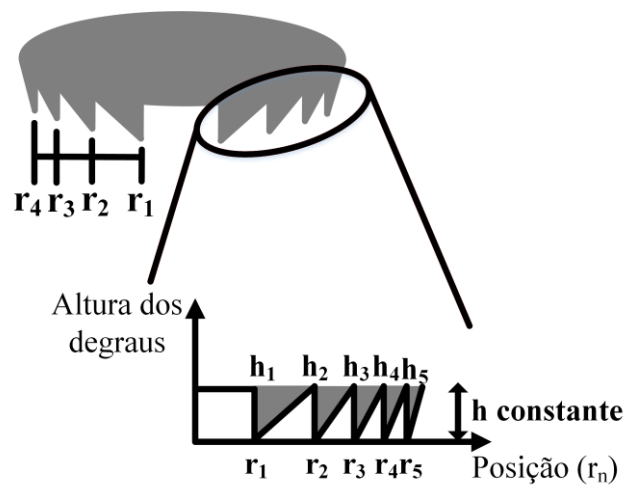


Figura 11 - Perfil de degraus de uma LIOM difrativa bifocal com altura constante em relação à superfície base (curva base).

<sup>5</sup> O formato triangular dos degraus consiste em um triângulo retângulo (Figura 11) de modo que a posição de um dos catetos é determinada por  $r_n$  (Eq. (5)).

A Figura 12 apresenta o gráfico da eficiência luminosa para as ordens 0, +1 e +2 de uma LIOM difrativa em função da variação da altura de seus degraus. Convém destacar que o gráfico da Figura 12 leva em consideração uma LIOM difrativa com altura de degrau uniforme, ou seja, os degraus têm todos a mesma altura. Apesar de o gráfico da Figura 12 apresentar um valor máximo de 3  $\mu\text{m}$  de altura para os degraus, é possível selecionar alturas de degraus acima desse valor caso seja oportuno do ponto de vista fabril.

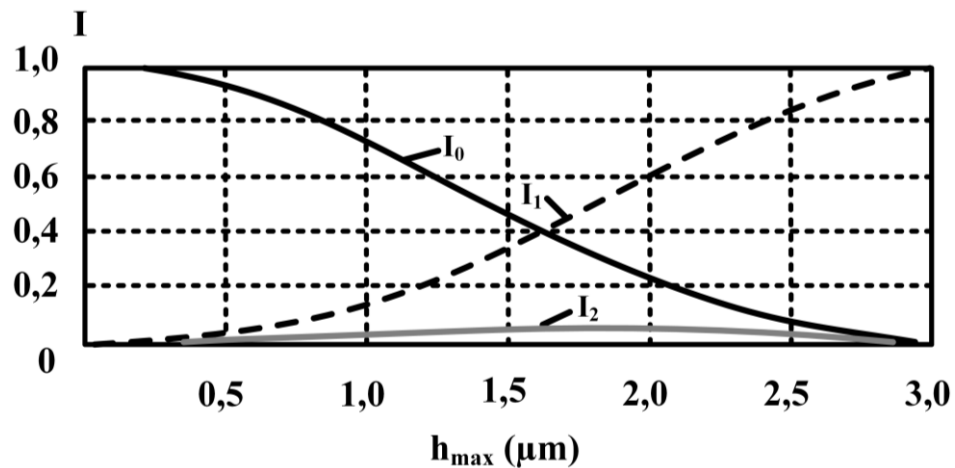


Figura 12 - Variação da eficiência das ordens difrativas em função da altura do degrau da rede difrativa (Dados:  $n_{LIO} = 1,507$ ,  $n_{aq} = 1,3377$  e  $\lambda = 0,5461 \mu\text{m}$ ).

Fonte: Adaptado de: (LENKOVA, 2006).

Pode-se perceber pela Figura 12, que a variação da altura dos degraus provoca uma variação na eficiência de cada ordem. Quando a altura dos degraus assume valor nulo (origem da abscissa - Figura 12), ou seja, não há degraus na lente, nota-se que toda a energia incidente é direcionada para a ordem 0. Tal resultado é esperado, pois uma lente sem degraus se comporta como uma lente refrativa e a ordem 0, conforme discutido anteriormente, apresenta vergência com base no poder refrativo da lente. Além disso, nota-se que existe uma determinada altura (aproximadamente 1,6  $\mu\text{m}$  para a lente com os dados simulados da Figura 12), em que a eficiência da ordem 0 e +1 coincidem (ponto de encontro entre a curva preta contínua e tracejada). É nessa faixa de altura que os degraus das LIOMs bifocais difrativas são especificados, pois grande parte da energia incidente é direcionada para dois focos, enquanto as demais ordens (+2, +3 etc.), que apresentam amplitudes inferiores a 5% de eficiência, não contribuem para a formação de pontos focais úteis à visão.

Apesar de a rede difrativa com altura uniforme ser a estrutura comumente empregada em LIOMs bifocais, essa não é a única estrutura presente nas lentes bifocais do mercado. Existem LIOMs bifocais cujos degraus apresentam uma redução em sua altura à medida que se

aproximam da sua extremidade. Tal técnica é denominada apodização (Figura 13) (DAVISON, 2005).

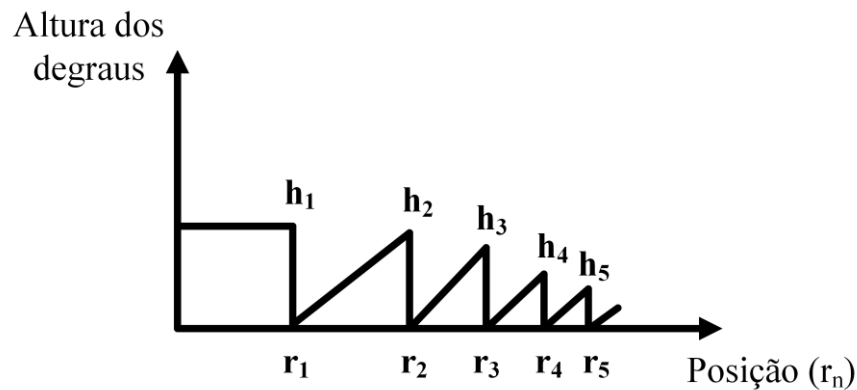


Figura 13 - Perfil de degraus de uma LIO difrativa bifocal apodizada.

Analisando a Figura 12 é possível notar que uma diminuição da altura do degrau faz com que a ordem 0 tenha uma maior eficiência luminosa, enquanto a eficiência da ordem +1 sofre uma redução. Este comportamento se torna mais proeminente à medida que a abertura da lente se torna maior, ou seja, quanto maior a abertura da pupila de um paciente mais energia é direcionada para o foco distante (ordem 0) e menos energia é direcionada ao foco próximo (ordem +1). Com isso, observa-se, para uma lente apodizada, um comportamento dependente da pupila.

A justificativa para tal abordagem se baseia no fato de que atividades próximas (leitura por exemplo) são realizadas em ambientes bem iluminados e nesses ambientes a pupila tem uma abertura pequena (<3 mm de diâmetro), mas em ambientes pouco iluminados (geralmente à noite) a pupila apresenta uma abertura de maior diâmetro (> 3 mm) e nessas situações emprega-se mais a visão relacionada a atividades distantes (DAVISON, 2005). Assim, uma LIO apodizada apresenta comportamento dual: para aberturas de pupila pequena tem-se uma distribuição luminosa equivalente para os focos distante e próximo (caracterizando uma LIO bifocal), mas para aberturas de pupila grande tem-se um comportamento de priorização do foco distante, caracterizando uma LIO monofocal, quando a abertura envolve toda a área óptica da lente.

No que diz respeito às LIOMs difrativas trifocais, sua estrutura de degraus difrativos não apresenta altura de degraus constante, afinal, conforme discutido anteriormente, uma LIO difrativa com degraus uniformes é capaz de criar apenas dois focos com eficiência luminosa significativa. Uma das formas de se implementar trifocalidade com LIOMs difrativas consiste em alternar a altura dos degraus difrativos com base em dois valores constantes e alternados (Figura 14) (SCHWIEGERLING, 2016).

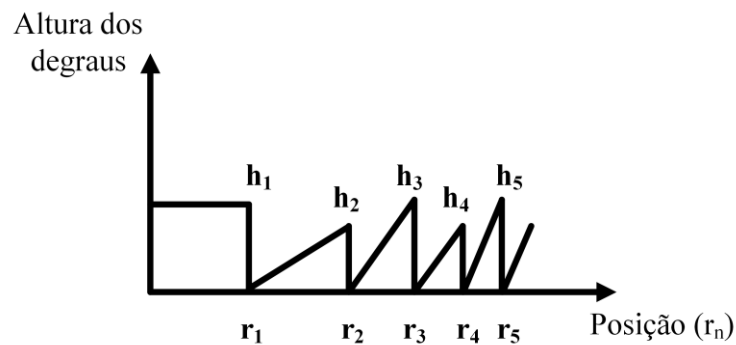


Figura 14 - Perfil de degraus de uma LIOM difrativa trifocal:  $h_2 = h_4$  e  $h_1 = h_3 = h_5$ .

Um ponto importante relacionado ao projeto de LIOMs difrativas e que pode ser observado nas Eq. (6), (7) e (8) está no fato de que uma LIOM difrativa é projetada para um dado comprimento de onda ( $\lambda$ ). Dessa forma, se a LIOM for empregada em uma situação com comprimento de onda ( $\lambda'$ ) distinto do comprimento de onda de projeto ( $\lambda$ ), será observado um comportamento diferente do esperado tanto no comprimento focal da lente quanto na eficiência luminosa destinada a cada ordem difrativa (O'SHEA *et al.*, 2004).

O projeto de uma LIOM difrativa geralmente é realizado para o comprimento de onda da luz verde (546 nm). Dessa forma, o comportamento da LIOM para a luz visível, que apresenta uma faixa espectral entre 380 – 780 nm será diferente (tanto em comprimento focal quanto nas eficiências das ordens) para cada um dos comprimentos de onda dessa faixa. Ainda assim, tal fato não implica em um comportamento ineficaz da LIOM para a luz visível. A lente apenas não apresentará, para os diferentes comprimentos de onda, o mesmo desempenho ótimo do comprimento de onda de projeto.

A Figura 15 apresenta a variação da eficiência das ordens difrativas 0, +1 e +2 de uma LIOM difrativa projetada para um comprimento de onda de 633 nm em função dos comprimentos de onda na faixa da luz visível (O'SHEA *et al.*, 2004). Na Figura 15 toda a energia se concentra na ordem +1 para o comprimento de onda de projeto, ou seja, a lente difrativa se comporta como uma lente monofocal. Entretanto, considerando a faixa da luz visível, nota-se um decréscimo na eficiência da ordem +1 e um aumento da eficiência das ordens 0 e +2. Apesar disso, a ordem +1 permanece sendo a ordem difrativa predominante na faixa de luz visível, ou seja, a ordem difrativa de interesse durante o projeto da LIOM continua sendo priorizada.

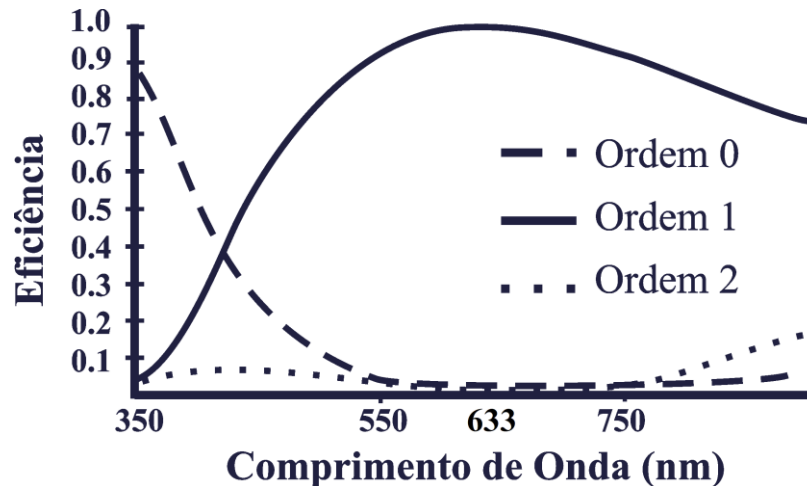


Figura 15 - Eficiência das ordens difrativas de uma LIOM difrativa em função do comprimento de onda.

Fonte: Adaptado de: (O'SHEA *et al.*, 2004).

### 2.3.2.1 Efeito da quantidade de degraus difrativos na distribuição de intensidade luminosa das ordens difrativas

Conforme abordado previamente nesta seção, a quantidade de degraus presentes em uma LIOM difrativa depende da área da zona óptica disponível e do adicional desejado durante o seu projeto. Além disso, a quantidade de degraus responsáveis pela multifocalidade da LIOM afeta diretamente a distribuição de intensidade luminosa das ordens difrativas, principalmente, quando há um número pequeno de degraus difrativos (< 4 degraus) (LENKOVA, 2010). Com o intuito de verificar como a quantidade de degraus pode afetar a distribuição de intensidade luminosa das ordens difrativas, será realizada uma análise matemática baseada na teoria escalar de difração.

Por meio de uma série de considerações aplicáveis a uma larga faixa de modelos ópticos é possível simplificar as equações de Maxwell de modo que a mesma possa ser fragmentada em seis equações escalares sendo três delas referentes às componentes x, y e z do campo elétrico e as outras três componentes referentes ao campo magnético (O'SHEA *et al.*, 2004). Como cada componente do campo elétrico e magnético deve atender a equação de onda, pode-se matematicamente, após solucionar a equação, separar a componente espacial e temporal de cada termo x, y e z. A Eq. (9) apresenta a solução para a componente x do campo elétrico para luz monocromática. As outras componentes seguem o mesmo formato (O'SHEA *et al.*, 2004; IVANOV, 2016).

$$P_x = P_0 \cdot e^{(-ikx)} \quad (9)$$

em que  $P_x$  é a componente espacial do campo elétrico e  $k$  é o número de onda ( $k = 2\pi/\lambda$ ). Como não há variação temporal das componentes dos campos no expoente da Eq. (9), tem-se que a componente temporal do campo pode ser ignorada como simplificação para a análise óptica. Tal consideração se deve ao fato de que em um sistema óptico o principal interesse é analisar o comportamento espacial da propagação da luz (O'SHEA *et al.*, 2004). Dessa forma, a distribuição espacial do campo elétrico satisfaz a equação de Helmholtz (O'SHEA *et al.*, 2004; IVANOV, 2016; BORN e WOLF, 1986):

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (10)$$

Para encontrar a solução da Eq. (10) e determinar a representação de  $P$  em uma forma matematicamente aplicável aos problemas na área de óptica, torna-se necessário definir uma geometria genérica para o problema (O'SHEA *et al.*, 2004). A Figura 16 apresenta o modelo utilizado na simplificação da Eq. (10). Na Figura 16 a luz se propaga na direção positiva da coordenada  $z$  e sofre difração através de uma abertura localizada no plano  $xy$  na origem de  $z$ . A distribuição do campo no plano da abertura é definida como  $P(x,y,0)$  e o campo da propagação sob difração é avaliado em um plano paralelo ao plano da abertura (a uma distância  $Z$ ) e é definido como  $P(X,Y,Z)$ .

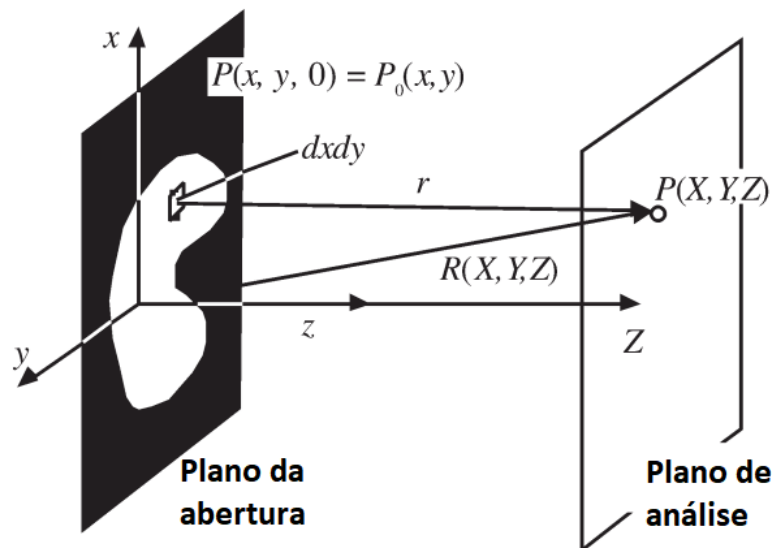


Figura 16 - Propagação da luz de um ponto  $P(x,y,0)$  no plano da abertura até um ponto  $P(X,Y,Z)$  no plano de análise.

Fonte: adaptado de: (O'SHEA *et al.*, 2004).

Como todos os pontos infinitesimais (de área  $dxdy$ ) no interior da abertura contribuem para a formação de cada ponto do campo no plano de avaliação e considerando as premissas: a

abertura é muito maior que o comprimento de onda da luz; a distância entre o plano de avaliação e a abertura (distância  $Z$ ) é significativamente maior que o comprimento de onda da luz, pode-se reduzir a Eq. (10) para a integral da Eq. (11), denominada integral de Rayleigh-Sommerfeld (O'SHEA *et al.*, 2004; BORN e WOLF, 1986; STAMNES e SPJELKAVIK, 1981).

$$U(P) = \frac{1}{2\pi} \iint_{x,y} \frac{e^{-ikr_0}}{r_0} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{e^{ikr}}{r} \right] dx dy \quad (11)$$

em que  $r$  é a distância de um ponto no plano da abertura até um ponto no plano de análise, ou seja,  $r = [(x-X)^2 + (y-Y)^2 + Z^2]^{1/2}$  e  $r_0$  corresponde ao raio da frente de onda no ponto  $P_0$ .

Considerando um sistema óptico difrativo com abertura circular, pode-se, através da aproximação de Kirchhoff para difração, obter uma equação analítica da distribuição de intensidade luminosa no plano de análise a partir da Eq. (11) (LENKOVA, 2010; STAMNES e SPJELKAVIK, 1981; BORN e WOLF, 1986):

$$U_K^2 = \left( \frac{ka^2}{2rf} \right)^2 \left( \frac{\text{sen}(u'/4)}{u'/4} \right)^2 \quad (12)$$

em que  $U_K$  é a amplitude normalizada da distribuição de intensidade sobre o eixo óptico do sistema em um plano situado a uma distância  $r$  da abertura,  $k$  é o número de onda,  $f$  é distância focal do sistema óptico,  $a$  é o raio da abertura e  $u' = k(r/f)^2(r-f)(f/r)$ .

Com o intuito de demonstrar como a quantidade de degraus afeta a distribuição de intensidade sobre o eixo óptico, será apresentado os resultados da aplicação da Eq. (12) a uma LIO bifocal difrativa. Será considerada uma LIOM com poder dióptrico base de 20 D ( $f = 19,50 \text{ mm}^6$ ) e adicional para o foco próximo de +3 D ( $f = 18,68 \text{ mm}^6$ ). O comprimento de onda de projeto será de 546 nm, logo  $k = 2\pi/\lambda = 1,15\text{E}+4 \text{ mm}^{-1}$ . Diante de tais considerações tem-se que, através da Eq. (5), a posição dos quatro primeiros degraus difrativos ( $r_1$  a  $r_4$ ) será, respectivamente, 0,603 mm, 0,853 mm, 1,045 mm e 1,207 mm. A Figura 17 apresenta os resultados da distribuição luminosa de uma LIO bifocal difrativa para os seguintes valores de raio de abertura ( $a$ ): 0,700 mm, 0,900 mm, 1,100 mm e 1,300 mm. Convém notar que a primeira

---

<sup>6</sup> Os valores das distâncias focais foram determinados com base no modelo de olho da ISO (ISO, 1999).

abertura engloba apenas o primeiro degrau difrativo, enquanto que a segunda abertura engloba os dois primeiros degraus e assim sucessivamente até o quarto degrau. Tal abordagem permitirá verificar como se comporta a distribuição da intensidade luminosa de uma LIOM bifocal quando se tem 1, 2, 3 ou 4 degraus difrativos.

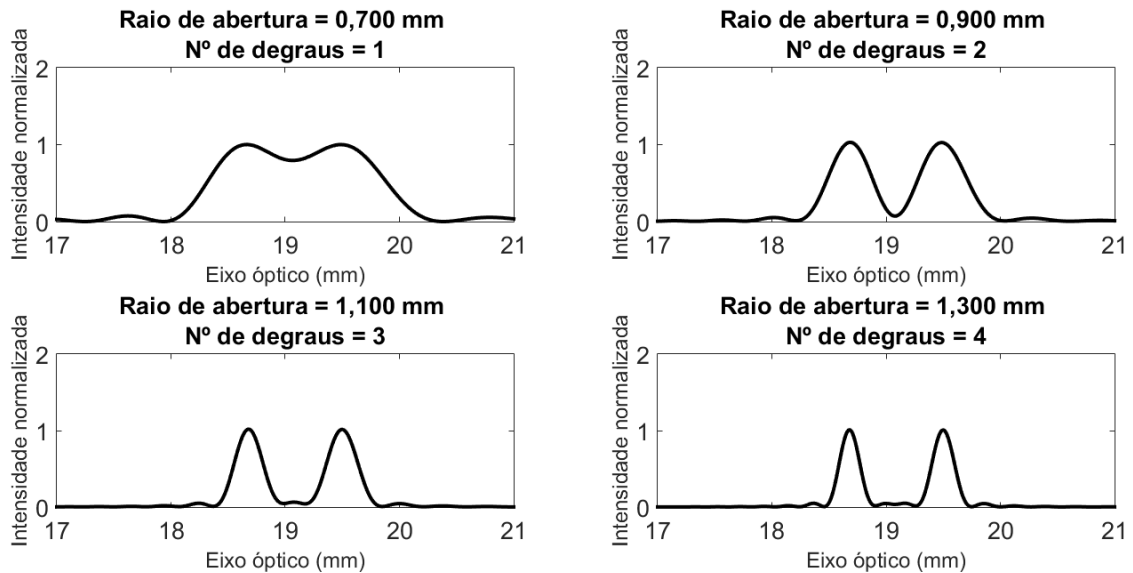


Figura 17 - Distribuição de intensidade luminosa de uma LIOM bifocal ao longo do eixo óptico para diferentes quantidades de degraus difrativos.

Pode-se perceber pela Figura 17, que para apenas um degrau difrativo não há uma separação bem definida do foco distante e próximo devido à largura da intensidade luminosa de cada um deles. Para dois degraus difrativos já se observa uma separação entre os focos, mas a intensidade entre eles não chega a zero (não toca o eixo das abscissas), de modo a não existir uma separação completa entre os focos. O mesmo acontece para três degraus difrativos, ou seja, a intensidade luminosa de cada foco se encontra mais definida (mais estreita), mas não há separação completa dos focos. Já para quatro ou mais degraus difrativos existe uma separação entre os focos criados. Este comportamento demonstra que a quantidade de degraus tem um impacto sobre o efeito bifocal da lente. Fisicamente isso se deve ao fato de que as interferências destrutivas ao longo do eixo óptico apresentam um impacto maior à medida que o número de degraus aumenta. Assim, com o aumento das interferências destrutivas (resultantes do efeito difrativo criado por cada degrau), a intensidade luminosa de cada foco apresenta uma separação bem definida e uma distribuição mais estreita. Ainda assim, existem aplicações como em LIOs com profundidade de foco estendido, que podem tirar proveito dessa característica de aumento da extensão focal provocada pela menor quantidade de degraus difrativos.

## 2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LIOs

### 2.4.1 PSF e MTF

A PSF (*Point Spread Function*) ou função de espalhamento de ponto é a distribuição luminosa no plano de imagem formada por um sistema óptico, quando o objeto é um ponto infinitesimal, ou quando o mesmo está localizado no infinito, ou quando o feixe incidente é colimado (Figura 18). Considerando a representação de um objeto pontual por meio da função impulso tem-se que a PSF é a resposta ao impulso de um sistema óptico. A imagem de um ponto infinitesimal formado por um sistema óptico não é exatamente um ponto. Observa-se no plano de imagem um disco luminoso circunscrito por franjas claras e escuras alternadamente. A dimensão não infinitesimal da imagem do objeto pontual é resultante de efeitos de difração provenientes da abertura finita do sistema óptico (lente) (BOREMAN, 2001).

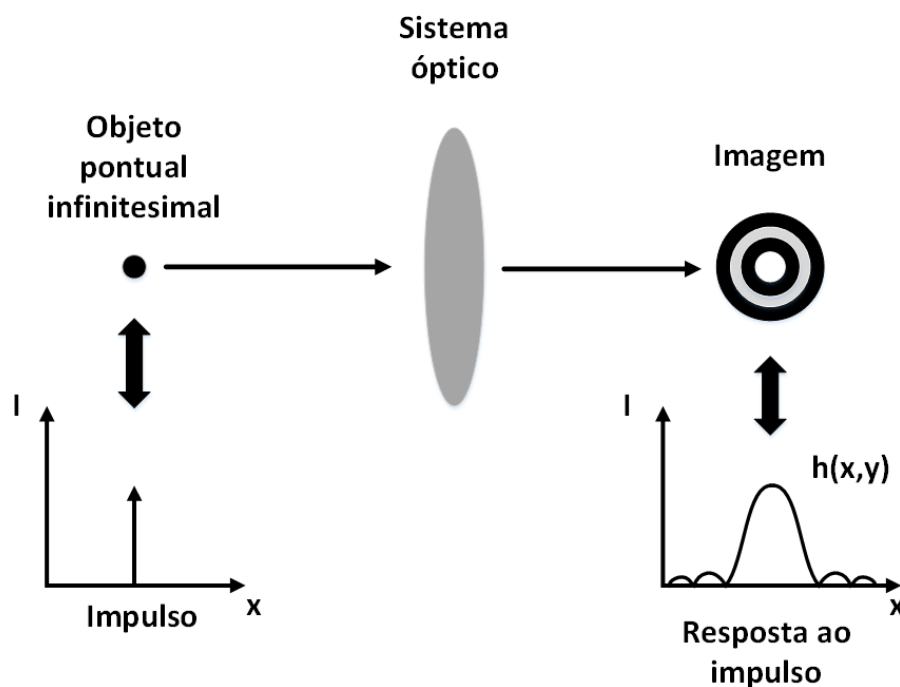


Figura 18 - Distribuição espacial do objeto e da imagem para um sistema óptico real.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

Em geral a PSF é dada em unidades de irradiância ( $W/cm^2$ ). A qualidade de um sistema óptico é avaliada pela PSF de acordo com o tamanho do disco central e de sua amplitude de irradiância. Quanto menor for a largura do disco central de irradiância e maior for sua amplitude, melhor é a qualidade do sistema óptico (melhor a resolução).

Além da PSF, que é uma forma de se avaliar a qualidade de um sistema óptico no domínio espacial, é possível avaliar a qualidade de um sistema óptico no domínio da frequência

por meio do MTF (*Modulation Transfer Function*). O MTF permite avaliar a qualidade do contraste da imagem formada por um sistema óptico. Com o intuito de compreender de forma qualitativa e quantitativa a informação proveniente da curva de MTF, apresenta-se na Figura 19.A um objeto com padrão de cor claro/escuro com intensidade luminosa descrita por uma função senoidal (Figura 19.B).

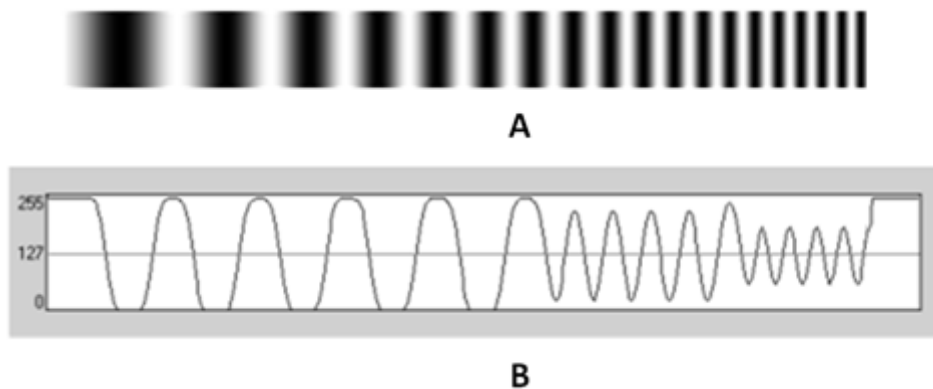


Figura 19 – A) Objeto padrão e B) sua curva de intensidade.

Fonte: Adaptado de: (ATKINS, 2017).

Analisando as franjas do objeto da Figura 19.A, nota-se um estreitamento delas à medida que se deslocam para a direita, ou seja, observa-se um aumento na frequência espacial do objeto. A curva de MTF tem a função de avaliar o quão semelhante será a imagem em relação ao objeto, quanto ao contraste. Dessa forma, se um sistema óptico possuir um MTF de 100% para todas as frequências espaciais do objeto, tem-se uma imagem com a mesma qualidade de contraste do objeto. Tal situação é representada pela primeira linha da Figura 20, em que tanto a imagem quanto o objeto teriam a mesma representação. Entretanto, se um sistema óptico apresentar um MTF inferior e constante para todas as frequências, será observado imagens com as características da Figura 20 (linha 2 em diante), sendo o objeto representado pela primeira linha da Figura 20. Tal resultado indica que o sistema não foi capaz de transferir todo o contraste do objeto para a imagem.

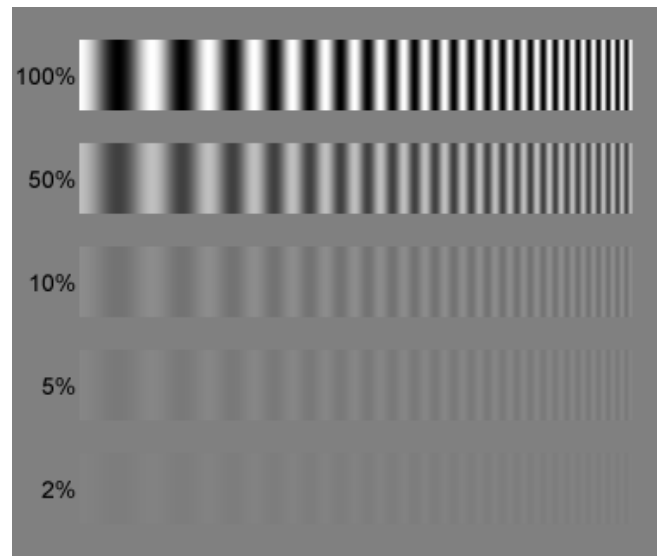


Figura 20 - Transferência de contraste para uma imagem considerando diferentes valores de MTF.

Fonte: (KOREN, 2007).

Apesar do exemplo da Figura 20 indicar resultados para valores de MTF constante, tem-se que na prática o MTF de um sistema óptico não é constante para toda a faixa de frequência espacial do objeto. Fenômenos de difração ocasionados pela abertura finita do sistema óptico fazem com que a curva de MTF tenha um comportamento decrescente com o aumento da frequência espacial (Figura 21.C). Um sistema óptico com curva de MTF dado pela Figura 21.C irá projetar um objeto com distribuição de irradiância representada pela Figura 21.A através de uma imagem cuja distribuição de irradiância é representada pela Figura 21.B. Pela Figura 21 fica claro o impacto do decrescimento da curva de MTF na representação das altas frequências espaciais do objeto, ou seja, quanto maior a frequência espacial do objeto menor será o contraste na imagem para essas frequências.

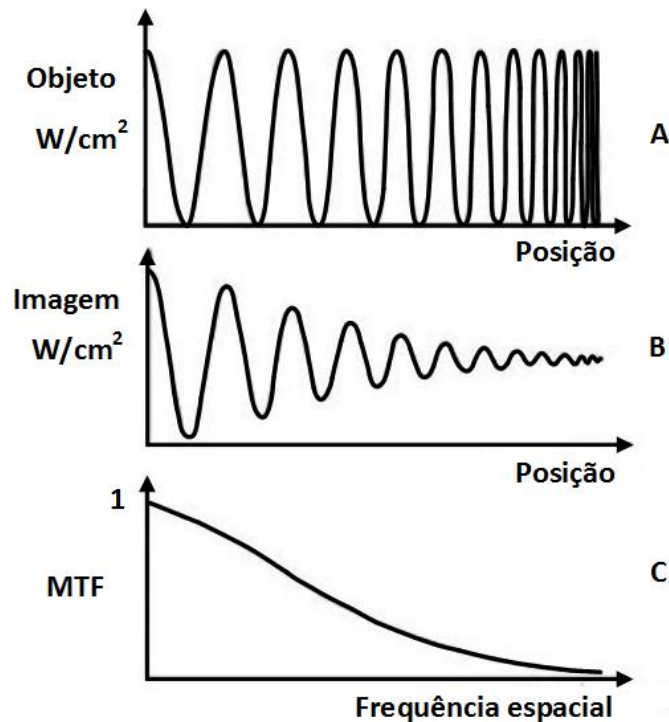


Figura 21 - Distribuição espacial da intensidade do objeto e da imagem para um sistema limitado por difração.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

A Figura 22 apresenta uma curva típica de MTF (curva cinza) de um sistema óptico real sob efeito de aberrações. Através da Figura 22 é possível notar que o eixo das ordenadas do MTF é normalizado em uma unidade, representando o percentual de contraste que é transferido do objeto para a imagem. Já o eixo das abscissas (eixo da frequência espacial) possui unidade de pares de linha por mm (pl/mm), ou seja, corresponde à quantidade de pares de franjas claro/escuro (veja Figura 19) presentes em uma unidade de milímetro, de modo a representar as componentes de frequência espacial presentes no objeto. A curva em preto denominada limite de difração corresponde ao melhor desempenho em termos de contraste, que um sistema óptico pode auferir, ou seja, seu desempenho fica limitado apenas pelos fenômenos de difração provenientes da abertura finita do sistema. O desempenho de um sistema óptico atinge seu limite de difração quando o mesmo se encontra livre de aberrações (uma lente esférica por exemplo - Figura 3.C). Caso contrário, (uma lente esférica por exemplo - Figura 3.B), o sistema apresenta curva de MTF abaixo do limite de difração.

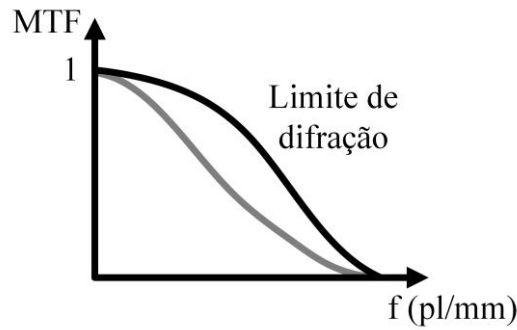


Figura 22 - Curva típica de MTF de um sistema óptico e seu limite de difração.

O limite de difração de um sistema óptico é determinado com base no número- $f$  do sistema e no comprimento de onda da luz utilizada no projeto pela relação (SMITH, 2008):

$$MTF(w) = \frac{2}{\pi} (\phi - \cos\phi \cdot \text{sen } \phi) \quad (13)$$

onde:

$$\phi = \cos^{-1}(\lambda \cdot w \cdot f/\#) \quad (14)$$

e  $w$  é a frequência espacial em pares de linha por milímetro,  $\lambda$  é o comprimento de onda em milímetros e  $f/\#$  é o número- $f$  do sistema. O número- $f$  de um sistema óptico é um valor adimensional dado pela razão entre o seu comprimento focal e o diâmetro de sua abertura (SMITH, 2008).

A curva de MTF de um sistema óptico é encontrada através do módulo da transformada de Fourier bidimensional da PSF pela relação (MALACARA e MALACARA, 2004):

$$MTF(w_x, w_y) = \left| \iint_{\sigma} h(x, y) e^{i(w_x x + w_y y)} dx dy \right| \quad (15)$$

onde  $\sigma$  representa a área da abertura do sistema óptico,  $w_x$  corresponde à frequência espacial referente ao eixo  $x$ ,  $w_y$  corresponde à frequência espacial referente ao eixo  $y$  e  $h(x, y)$  corresponde à PSF do sistema óptico.

#### 2.4.2 MTF *through focus*

O MTF *through focus* (MTF TF) é a medida de MTF de um sistema óptico para uma frequência espacial fixa em função do deslocamento do plano de imagem ao longo do eixo óptico (SON *et al.*, 2017; BAKARAJU *et al.*, 2010). Tal métrica é comumente empregada para avaliar o desempenho de LIOMs ao longo dos seus múltiplos pontos focais. Para determinar o

MTF *through focus* de LIOMs considera-se uma frequência espacial de 50 pl/mm, valor estipulado pela norma ISO 11979-9, e o deslocamento do plano de imagem é, em geral, dado em dioptrias (ISO, 2006b). A Figura 23 apresenta curvas típicas de MTF *through focus* para LIOMs bifocais (Figura 23.A) e trifocais (Figura 23.B). Pode-se notar pela Figura 23, que ao se deslocar o plano de imagem ao longo do eixo óptico obtém-se valores de MTF elevados apenas em algumas posições. Essas posições correspondem aos pontos focais criados pelas LIOMs. No caso da LIOM bifocal (Figura 23.A) observa-se um valor elevado de MTF em 0 D, ou seja, posição correspondente à dioptria base da LIOM (foco distante – responsável por focalizar objetos a uma distância acima de 6,00<sup>7</sup> m do paciente) e em 3,0<sup>8</sup> D, ou seja, posição correspondente à dioptria adicional da LIOM (foco próximo – responsável por focalizar objetos posicionados a uma distância de aproximadamente 0,44<sup>7</sup> m). Para a LIOM trifocal (Figura 23.B) observa-se três picos de MTF: um em 0 D (foco distante – objetos à 6,00<sup>7</sup> m ou mais do paciente), outro em 1,5 D<sup>8</sup> (foco intermediário – objetos à 0,88<sup>7</sup> m do paciente) e um terceiro em 3,0 D<sup>8</sup> (foco próximo – objetos a 0,44<sup>7</sup> m do paciente).

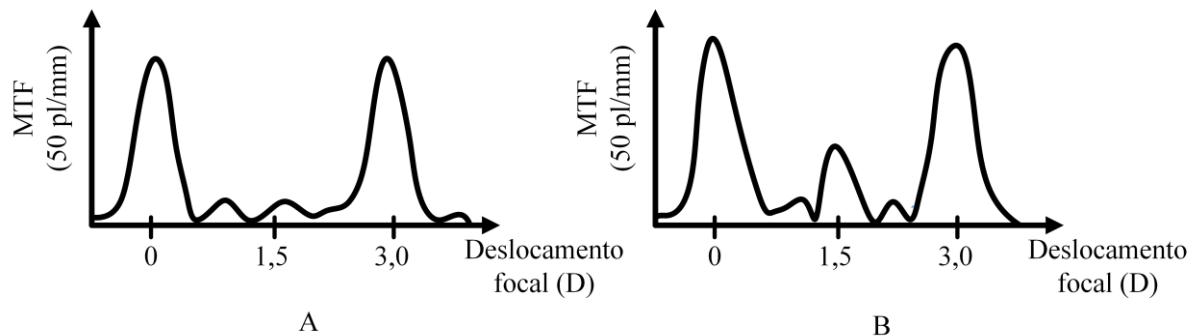


Figura 23 - MTF *through focus*: A) LIOM bifocal e B) LIOM trifocal.

<sup>7</sup> As distâncias mencionadas dependem das dimensões do olho do paciente e do posicionamento da LIO dentro do saco capsular (SAVINI *et al.*, 2016; OLSEN, 2007). Os valores apresentados foram determinados pela Eq. (4) com base em um olho médio cujas dimensões são: comprimento axial ( $AL$ ) = 23,5 mm; comprimento da câmara anterior ( $ACD$  – *Anterior Chamber Depth*) = 4,0 mm e dioptria da córnea ( $K$ ) = 43,5 D (HOFFER, 1991).

<sup>8</sup> Os adicionais estão relacionados com o termo  $\phi_{refrativo}$  da Eq. (4).

### 2.4.3 Eficiência luminosa

A eficiência luminosa de uma LIO está relacionada à quantidade de energia incidente, que é dirigida ao plano de imagem (VEGA, ALBA-BUENO e MILLÁN, 2011; SMITH, 2008). Para LIOs monofocais toda energia incidente é transmitida para o ponto focal desde que sejam desconsiderados os efeitos de dispersão do material da lente e as reflexões superficiais (Figura 24).

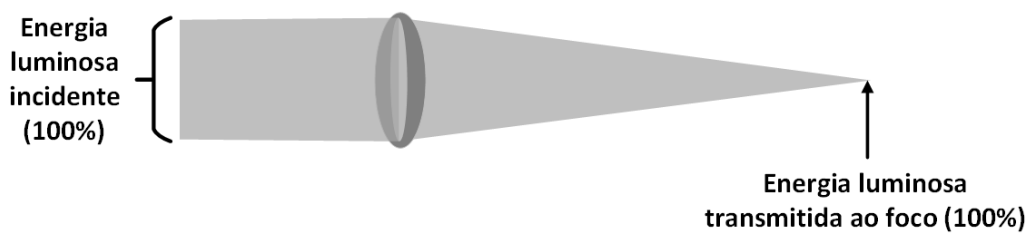


Figura 24 – Eficiência luminosa de uma LIO monofocal.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

Tratando-se de LIOMs a energia luminosa incidente é distribuída nos múltiplos pontos focais criados. Para as LIOMs refrativas a energia luminosa incidente em cada zona refrativa é transmitida integralmente para um único foco (Figura 25.A). Já para LIOMs difrativas a energia luminosa incidente em cada degrau difrativo é subdividida para as diversas ordens difrativas, ou seja, para os múltiplos focos criados (Figura 25.B). É importante ressaltar que, em LIOMs difrativas, nem todas as ordens difrativas irão contribuir para a formação de pontos focais úteis à visão. Dessa forma, a energia destinada a tais ordens difrativas é perdida, efeito inerente a toda LIOM difrativa (O'SHEA *et al.*, 2004). Em LIOs trifocais difrativas, por exemplo, o percentual de energia perdido nestas outras ordens se encontra, em média, na faixa de 15 a 17% (VOSKRESENSKAYA, *et al.*, 2009).

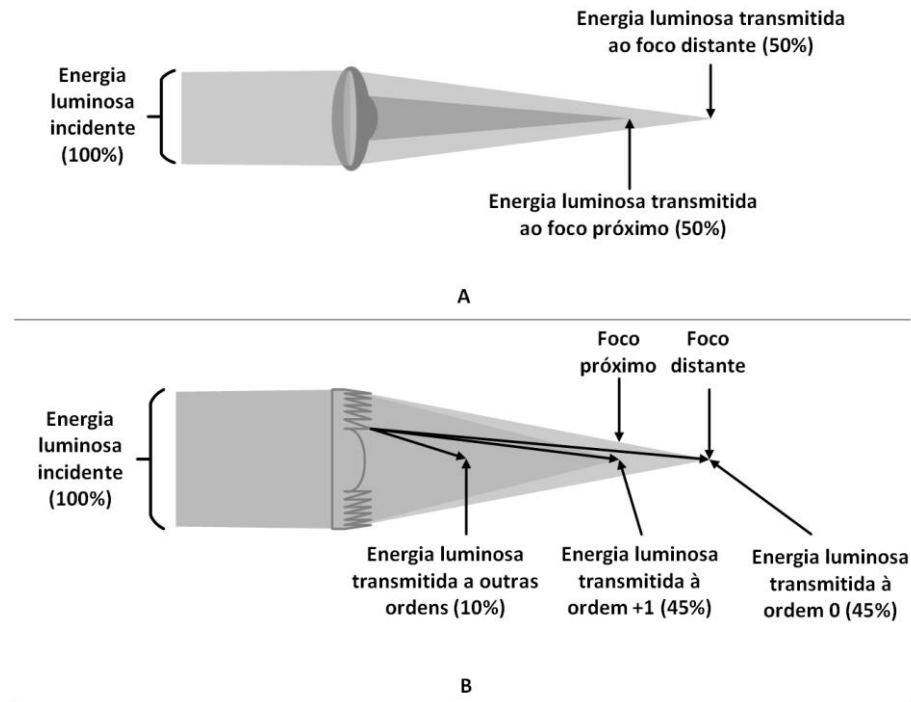


Figura 25 - Eficiência energética de LIOMs bifocais: A) refrativa e B) difrativa.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

## 2.5 ESTADO DA TÉCNICA

Neste tópico será realizada uma análise descritiva das principais LIOMs difrativas bifocais e trifocais presentes no mercado. Será dado destaque ao aspecto construtivo das redes difrativas das LIOMs analisadas como, também, seu desempenho óptico em termos de MTF. Os valores de MTF das lentes presentes no mercado apresentados ao longo deste tópico têm o intuito de auxiliar na avaliação comparativa da qualidade dos valores de MTF da LIOM projetada neste trabalho, afinal, como será descrito no tópico 2.5 deste capítulo, a norma ISO 11979-9 não estabelece valores mínimos de MTF para LIOMs.

### 2.5.1 LIOM Tecnis ZM900

A LIOM difrativa Tecnis modelo ZM900 é uma lente bifocal do fabricante Abbot Medical Optics e apresenta rede difrativa com 32 degraus e altura uniforme similar à LIOM apresentada na Figura 11. Trata-se de uma LIOM biconvexa, sendo a superfície anterior refrativa e a superfície posterior difrativa com área óptica de 6,0 mm de diâmetro (Figura 26).

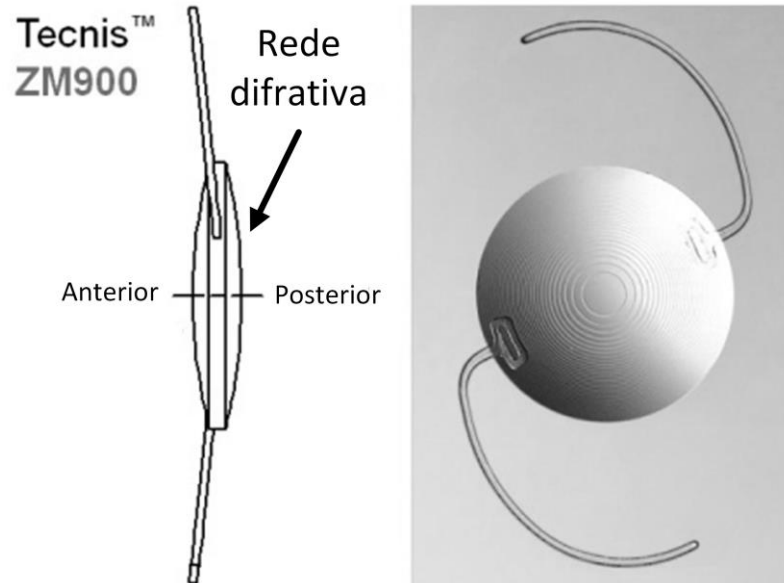


Figura 26 - LIO difrativa Tecnis modelo ZM 900.

Fonte - Adaptado de:(CHANG *et al.*, 2009).

O fato de a estrutura difrativa apresentar altura constante ao longo da zona óptica faz com que a LIO tenha um comportamento independente da abertura da pupila. O adicional existente entre o foco distante e próximo é de + 4,0 D (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013). O Quadro 1 apresenta os valores de MTF dos dois focos criados pela LIO para a frequência espacial de 50 pl/mm e aberturas de 3,0 mm e 4,5 mm de diâmetro (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013).

Quadro 1 - Valores de MTF a 50 pl/mm da LIO Tecnis modelo ZM900.

Abertura	MTF do foco distante	MTF do foco próximo
3,0 mm	0,45	0,30
4,5 mm	0,40	0,30

### 2.5.2 LIO Acrysof Restor SN6AD1

A LIO difrativa Acrysof Restor modelo SN6AD1 é do fabricante Alcon/Novartis e apresenta 9 degraus difrativos ocupando uma zona óptica de 0 a 3,6 mm de diâmetro. O restante da área óptica da LIO (de 3,6 a 6,0 mm de diâmetro) é refrativo (Figura 27). Trata-se de uma LIO bifocal com estrutura de degraus apodizada (semelhante ao apresentado na Figura 13), fazendo com que a mesma tenha um comportamento dependente da pupila (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013).



Figura 27 - LIOM difrativa apodizada Acrysof Restor modelo SN6AD1.

Fonte - Adaptado de: (ARTEMIS, 2018).

O Quadro 2 apresenta os valores de MTF dos dois focos criados pela LIOM para a frequência espacial de 50 pl/mm e aberturas de 3,0 mm e 4,5 mm de diâmetro. É possível notar o efeito da apodização, não só pela diferença de MTF entre o foco distante e próximo, como, também, pela mudança de MTF com a abertura. O adicional entre o foco distante e próximo é de +3,0 D (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013).

Quadro 2 - Valores de MTF a 50 pl/mm da LIOM Acrysof Restor modelo SN6AD1.

Abertura	MTF do foco distante	MTF do foco próximo
3,0 mm	0,42	0,33
4,5 mm	0,55	0,18

### 2.5.3 LIOM AT LISA TRI 839MP

A LIOM difrativa AT LISA TRI modelo 839MP é do fabricante Zeiss e se trata de uma LIOM trifocal (Figura 28). A trifocalidade é criada por meio de uma rede difrativa que ocupa a zona óptica até 4,34 mm de diâmetro. O restante da área óptica (de 4,34 mm até 6,00 mm de diâmetro) continua sendo difrativa (totalizando 29 degraus difrativos (MOJZIS, 2014)), mas tal região cria apenas dois focos (um distante e um próximo). A lente apresenta adicional entre o foco distante e intermediário de +1,66 D e adicional entre o foco distante e próximo de +3,33 D (SON *et al.*, 2017).

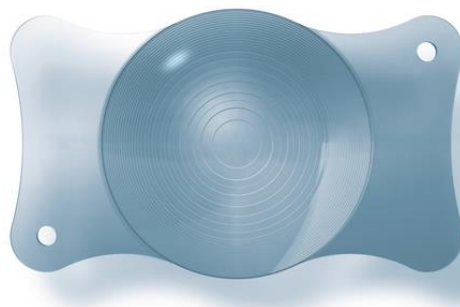


Figura 28 - LIOM AT LISA TRI modelo 839MP.

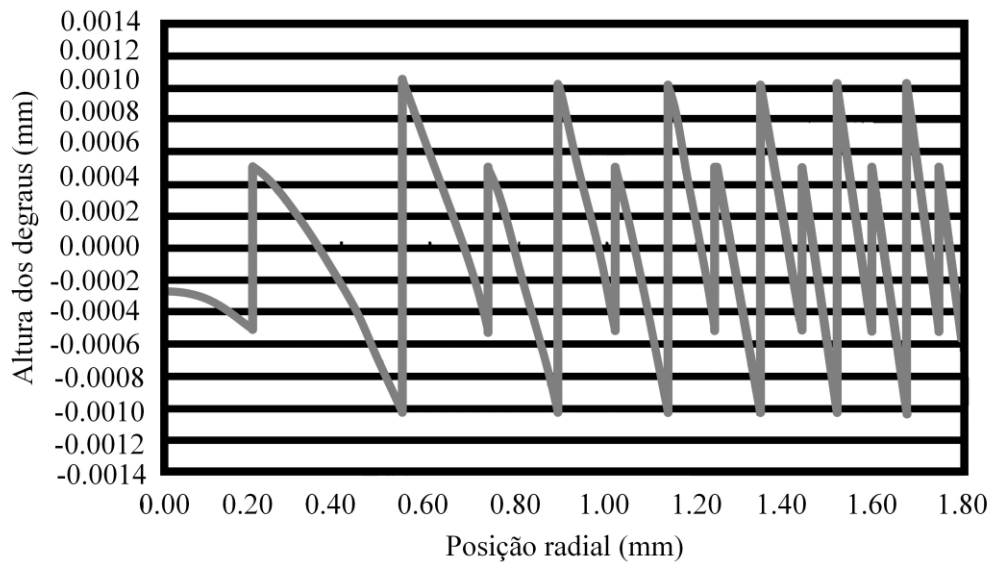
Fonte - (KRETZ *et al.*, 2015).

O Quadro 3 apresenta os valores de MTF dos três focos criados pela LIOM para a frequência espacial de 50 pl/mm e aberturas de 3,0 mm e 4,5 mm de diâmetro (SON *et al.*, 2017). É possível notar pelos valores de MTF uma priorização do foco distante para ambas as aberturas.

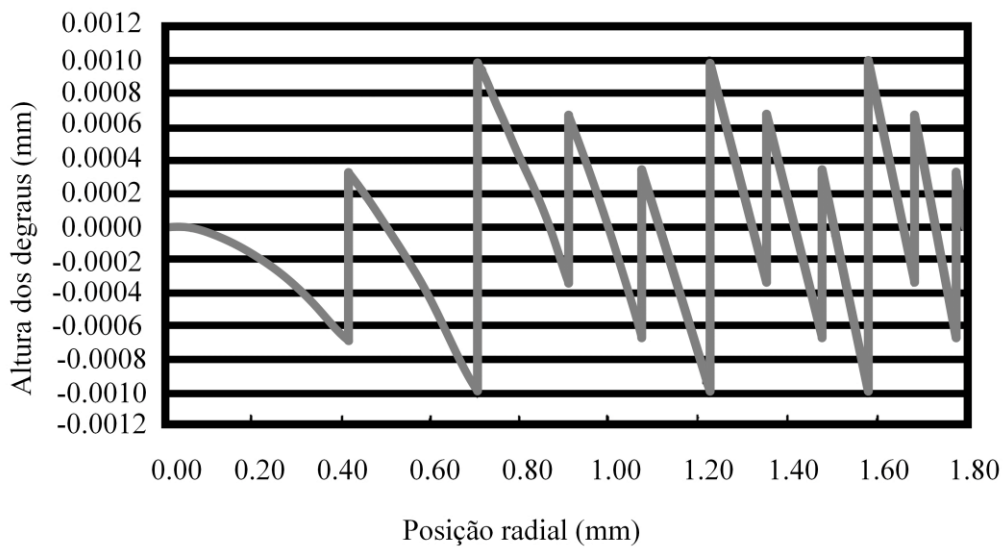
Quadro 3 - Valores de MTF a 50 pl/mm da LIOM AT LISA TRI modelo 839MP.

Abertura	MTF do foco distante	MTF do foco intermediário	MTF do foco próximo
3,0 mm	0,40	0,15	0,18
4,5 mm	0,27	0,10	0,20

Através da patente n° EP 2.377.493 A1 é possível notar que a estrutura difrativa é composta pela superposição periódica de um ou mais degraus (ATSUSHI KASUGAI-SHI AICHI, 2009). A Figura 29 apresenta duas possíveis configurações de rede difrativa patenteada. Na Figura 29.A observa-se, a partir do segundo degrau da LIOM, a superposição de dois degraus difrativos, ou seja, na região óptica da LIOM em que deveria existir apenas um degrau difrativo (tomando como referência a estrutura de uma rede difrativa bifocal com altura constante - Figura 11) a superposição faz com que existam dois degraus difrativos nessa mesma área óptica da LIOM. Na Figura 29.B nota-se a superposição de três degraus difrativos sobre cada degrau da rede, ou seja, no espaço onde deveria existir apenas um degrau difrativo de acordo com uma LIOM bifocal, existem três degraus. Com base nisso, um dos degraus direciona a eficiência luminosa para dois focos principais (distante e próximo por exemplo) e os degraus superpostos direcionam a eficiência luminosa para outros dois pontos focais (distante e intermediário por exemplo), gerando, assim, o efeito trifocal da LIOM.



A



B

Figura 29- Possíveis modelos difrativos da LIOM 839 MP: A) com superposição de dois degraus e B) com superposição de três degraus.

Fonte – Adaptado de: (ATSUSHI KASUGAI-SHI AICHI, 2009).

#### 2.5.4 LIOM FineVision Micro F

A LIOM difrativa FineVision modelo Micro F é do fabricante PhysiOL e apresenta uma superfície difrativa com 26 degraus responsável por criar três focos (Figura 30). Sua região difrativa ocupa toda a zona óptica da LIOM. A lente apresenta um adicional entre o foco distante e intermediário de +1,75 D e um adicional entre o foco distante e próximo de +3,50 D (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013).



Figura 30 - LIOM FineVision modelo Micro F.

Fonte - (PHYSIOL, 2018).

O Quadro 4 apresenta os valores de MTF dos três focos criados pela LIOM para a frequência espacial de 50 pl/mm e aberturas de 3,0 mm e 4,5 mm de diâmetro (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013).

Quadro 4 - Valores de MTF a 50 pl/mm da LIOM FineVision modelo Micro F.

Abertura	MTF do foco distante	MTF do foco intermediário	MTF do foco próximo
3,0 mm	0,35	0,16	0,30
4,5 mm	0,42	0,11	0,21

A estrutura difrativa da LIOM Micro F (Figura 31.C), responsável pela criação dos três pontos focais, consiste na superposição de duas redes difrativas bifocais apodizadas e com diferentes adicionais, de modo que, uma das redes apresenta adicional de +1,75 D (Figura 31.A) e a outra apresenta adicional de +3,50 D (Figura 31.B) (HOUBRECHTS, PAGNOULLE e GATINEL, 2011). Dessa forma, cada rede difrativa bifocal prioriza dois focos: a primeira transmite grande parte da eficiência luminosa para os focos distante e intermediário (Figura 31.A) e a segunda transmite grande parte da eficiência luminosa para os focos distante e próximo (Figura 31.B).

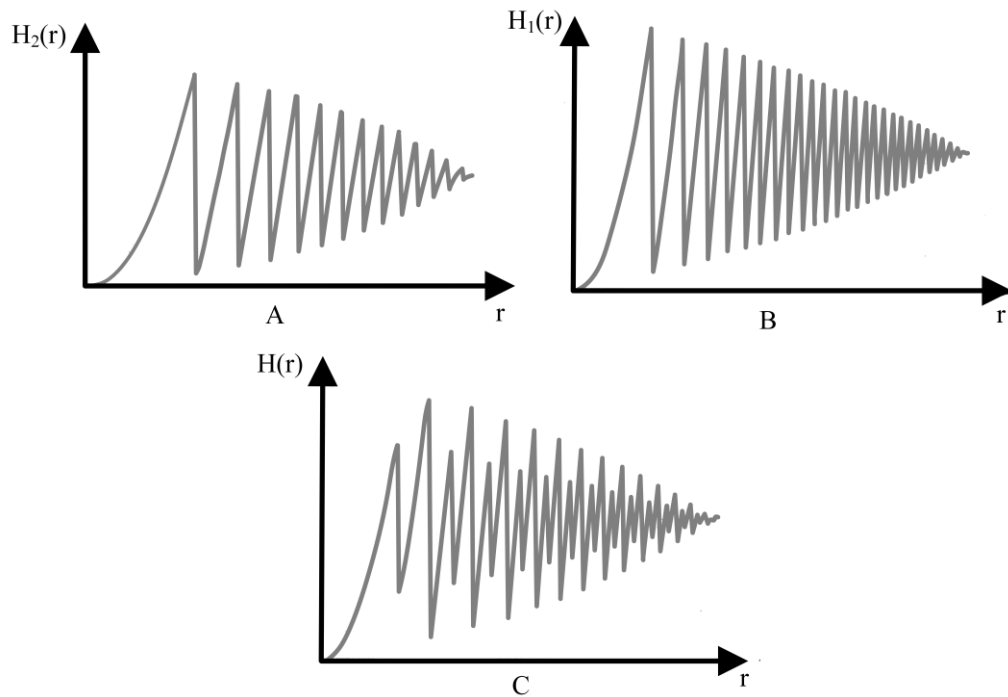


Figura 31 - Estrutura da rede difrativa da LIOM Micro F: A) rede difrativa bifocal com adicional de +1,75 D, B) rede difrativa bifocal com adicional de +3,50 D e C) rede difrativa trifocal resultante da soma das redes difrativas A e B.

Fonte – Adaptado de: (HOUBRECHTS, PAGNOULLE e GATINEL, 2011).

## 2.6 NORMALIZAÇÃO DO DESEMPENHO ÓPTICO DE LIO<sub>S</sub>

A norma ISO 11979 (1999) estabelece os critérios normativos relacionados à qualidade óptica, propriedades mecânicas, padrão para caracterização (dioptria, MTF etc.), biocompatibilidade e procedimentos clínicos de LIOs (ISO, 1999). A nona parte dessa norma (ISO 11979-9 (2006)) trata especificamente de LIOMs e determina os critérios e tolerâncias para avaliação da dioptria base, adicionais e qualidade óptica de LIOMs (ISO, 2006b). As tolerâncias da dioptria base e dos adicionais de uma LIOM são estabelecidas pela norma de acordo com as faixas de dioptria base da lente conforme pode ser observado no Quadro 5 e Quadro 6 respectivamente (ISO, 1999).

Quadro 5 - Limites de tolerância da dioptria base nominal (S) de uma LIOM.

Faixa de dioptria base nominal (D)	Limites de tolerância da dioptria base (D)
$0 \leq S \leq 15$	$\pm 0,3$
$15 < S \leq 25$	$\pm 0,4$
$25 < S \leq 30$	$\pm 0,5$
$30 < S$	$\pm 1,0$

Quadro 6 - Limites de tolerância da dioptria adicional (A) de uma LIOM.

Faixa de dioptria adicional nominal (D)	Limites de tolerância da dioptria adicional (D) Dioptria base < 25 D	Limites de tolerância da dioptria adicional (D) Dioptria base $\geq$ 25 D
$0 < A \leq 2,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$
$2,5 < A \leq 4,5$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$
$4,5 < A$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$

No que diz respeito ao MTF a norma estabelece os seguintes critérios (ISO, 1999; ISO, 2006b):

- Deve-se utilizar luz monocromática com comprimento de onda de  $546 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ .
- Deve ser avaliado em abertura pequena (na faixa de 2 mm à 3 mm de diâmetro) para a dioptria base.
- Deve ser avaliado em abertura pequena (na faixa de 2 mm à 3 mm de diâmetro) para os demais focos adicionais.
- Deve ser avaliado em abertura grande (na faixa de 4 mm à 5 mm de diâmetro) para a dioptria base.
- O menor valor de MTF de uma LIOM, considerando cada ponto focal criado, deve ser tal que garanta uma qualidade visual aceitável e verificável por dados clínicos. Tais dados clínicos são obtidos por meio de testes biométricos da LIOM implantada (descentração da LIO, pressão intraocular etc.) e testes psicofísicos com um grupo de pacientes para analisar a acuidade visual nos múltiplos focos.

Em relação ao MTF TF, a norma estabelece que o mesmo deve ser avaliado para uma frequência espacial de 50 pl/mm em abertura pequena (na faixa de 2 mm à 3 mm de diâmetro) e abertura grande (na faixa de 4 mm à 5 mm de diâmetro). Considera-se um deslocamento focal partindo da dioptria base até o último foco adicional criado pela lente. Tal deslocamento focal (eixo das abscissas) deve ser reportado em unidades de dioptrias (ISO, 2006b).

As avaliações de dioptria, MTF e MTF TF de uma LIOM devem ser realizadas em um modelo de olho proposto pela própria norma conforme indicado na Figura 32 (ISO, 1999).

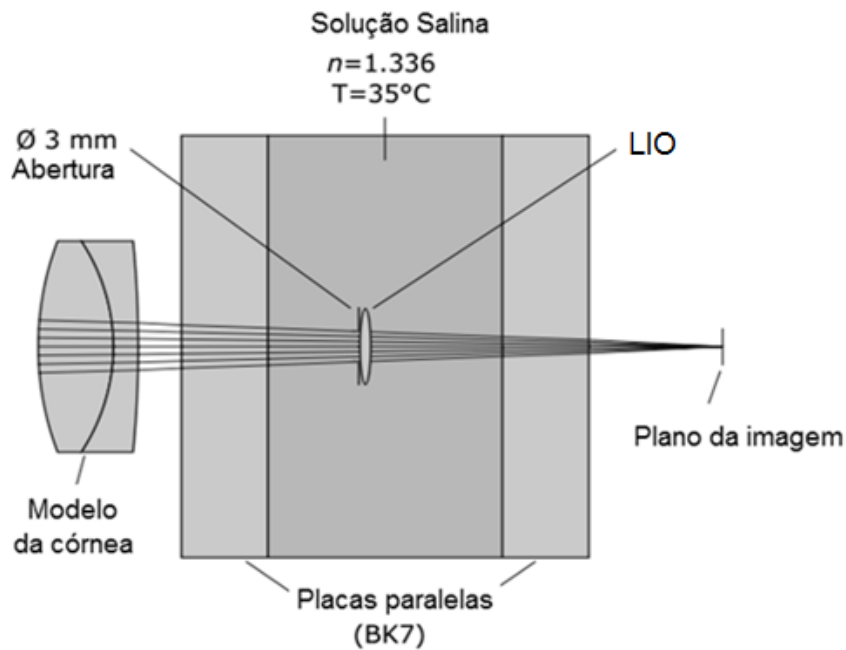


Figura 32 - Modelo de olho estabelecido pela norma ISO 11979.

Fonte: Adaptado de: (ISO, 1999).

## 2.7 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E ALGORITMO NSGA-II

O processo de otimização busca incrementar o desempenho de um sistema projetado em direção ao seu ponto ótimo ou aos seus múltiplos ótimos. Um processo de otimização apresenta uma série de etapas, que são brevemente descritas a seguir (VASILJEVIC, 2002):

- **Definição do problema:** essa etapa consiste na definição das especificações construtivas e de desempenho do projeto. Dependendo da complexidade do problema pode haver inúmeros aspectos a serem atendidos e tais aspectos podem, também, serem conflitantes entre si;
- **Pré-projeto:** define-se as propriedades básicas do modelo. Em relação às lentes intraoculares, consiste na determinação de suas características construtivas básicas: tamanho da zona óptica, técnica refrativa ou difrativa, poder dióptrico etc.;
- **Ponto de partida:** é estabelecido o modelo inicial, que será o ponto de partida do processo de otimização. Nessa etapa tem-se um esboço completo, mas não otimizado, do modelo. Para o caso de LIOs, consiste na definição das curvaturas iniciais da lente, espessura etc.;
- **Otimização:** são definidas as variáveis de otimização a serem manipuladas pelo algoritmo de otimização, as grandezas a serem minimizadas/maximizadas (também

chamadas de funções objetivo ou funções de mérito), funções restritivas e, finalmente, a escolha do método de otimização adequado ao tipo de problema a ser otimizado;

- **Análise final:** é verificado se a solução final escolhida satisfaz todas as condições especificadas para o modelo proposto;
- **Planejamento da fabricação:** uma vez definido os parâmetros construtivos, que atendem as especificações e que maximizam o desempenho do modelo, deve-se analisar o processo de fabricação com o intuito de levantar seus desvios e, assim, realizar uma análise de tolerâncias sobre o desempenho do sistema.

De maneira geral, um problema de otimização, que apresenta uma única função objetivo (mono-objetivo), pode ser definido matematicamente por (VASILJEVIC, 2002):

Minimizar/Maximizar:

$$f(x) \quad (16)$$

Sujeito a:

$$g_i(x) = b_i; i = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$h_j(x) \leq c_j; j = 1, \dots, n \quad (18)$$

em que  $x$  é o vetor das variáveis de otimização,  $f(x)$  é a função objetivo,  $g_i(x)$  e  $h_j(x)$  são funções que representam as restrições do modelo,  $m$  é o número total de restrições de igualdade e  $n$  é o número total de restrições de desigualdade.

Em um problema mono-objetivo busca-se a solução ótima, que irá minimizar/maximizar a função objetivo, entretanto, existem diversos tipos de problemas que apresentam mais de uma função objetivo (multiobjetivo). Um problema de otimização multiobjetivo é definido matematicamente por (DEB, 2001):

Minimizar/Maximizar:

$$f(x) = \{f_1(x), \dots, f_q(x)\} \quad (19)$$

Sujeito a:

$$g_i(x) = b_i; i = 1, \dots, m \quad (20)$$

$$h_j(x) \leq c_j; j = 1, \dots, n \quad (21)$$

em que  $x$  é o vetor das variáveis de otimização,  $f(x)$  é o vetor de funções objetivo,  $q$  é número total de objetivos,  $g_i(x)$  e  $h_j(x)$  são funções que representam as restrições do modelo,  $m$  é o número total de restrições de igualdade e  $n$  é o número total de restrições de desigualdade.

Problemas de otimização multiobjetivo apresentam, no geral, objetivos conflitantes. Dessa forma, não existe uma única solução, que minimize/maximize todos os objetivos do problema, mas um conjunto de soluções denominadas Pareto ótimas (DEB, 2001).

Matematicamente, uma solução  $\hat{x}$  é considerada Pareto ótima, se não existir nenhuma outra solução  $x \in X$  diferente de  $\hat{x}$  em que (DEB, 2001):

$$f(x) \not\leq f(\hat{x}) \text{ para qualquer } x \neq \hat{x} \in X \quad (22)$$

O conjunto das soluções Pareto ótimas define uma fronteira no espaço ( $C$ ) de objetivos denominada fronteira de Pareto (Figura 33). Pela Figura 33 pode-se notar que a solução  $x'$  garante o melhor caso para o objetivo  $f_2$ , mas o pior caso para o objetivo  $f_1$  e, à medida que se desloca para a solução  $x''$  sobre a fronteira de Pareto, nota-se um decréscimo do objetivo  $f_1$ , enquanto o objetivo  $f_2$  aumenta. Para todas as soluções da fronteira de Pareto, não há nenhuma solução que seja melhor que qualquer outra solução da fronteira em ambos os objetivos.

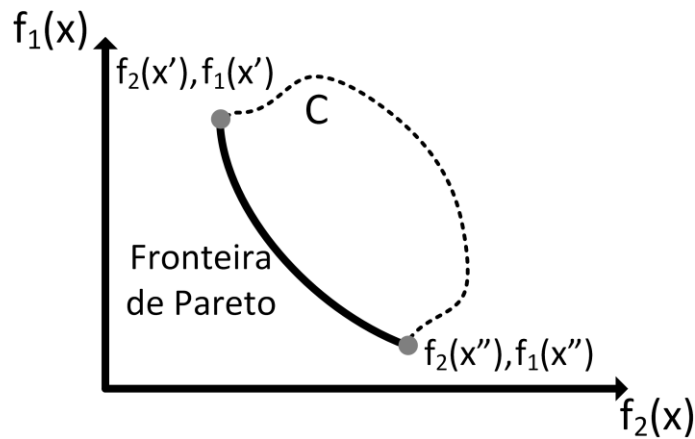


Figura 33 – Exemplo de fronteira de Pareto para um problema de minimização com duas funções objetivo.

Algoritmos de otimização evolutiva são uma classe de algoritmos estocásticos aplicados, comumente, à problemas de otimização multiobjetivo. Tal classe de algoritmos se baseia na evolução de uma população soluções candidatas de projeto, entretanto, não há garantias de otimalidade (DEB, 2001; VASILJEVIC, 2002).

Os algoritmos genéticos são uma subclasse dos algoritmos evolutivos, que se baseiam na simulação do processo genético de evolução natural para buscar as soluções ótimas de um problema multiobjetivo. Em sua estrutura cada solução do problema é considerada um indivíduo. Durante seu processo de otimização um conjunto de indivíduos, que forma uma população de soluções, se submetem a um processo de seleção natural por meio de operadores de cruzamento e mutação com o intuito de gerar as populações futuras. O procedimento de criação de novas populações se repete até que sejam alcançadas as melhores soluções (melhores indivíduos) de acordo com o critério de parada definido (DEB, 2001; VASILJEVIC, 2002).

Nessa seção do trabalho será apresentada uma descrição do algoritmo NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*), por se tratar do algoritmo aplicado à parte de otimização multiobjetivo da lente proposta. O funcionamento do NSGA-II segue basicamente os seguintes passos, conforme ilustrado na Figura 34 (DEB *et al.*, 2002):

1. Uma população de soluções candidatas ( $P_t$ ) de tamanho  $N$  é criada;
2. Por meio de operações de cruzamento e mutação com as soluções de  $P_t$ , uma segunda população ( $Q_t$ ) de tamanho  $N$  é gerada;
3. As soluções das duas populações são classificadas em fronteiras de acordo com sua aptidão através do critério de dominância. Na primeira fronteira se encontram as soluções não dominadas, na segunda fronteira as soluções dominadas pela primeira, mas que dominam as restantes e assim sucessivamente;
4. As soluções das primeiras fronteiras são selecionadas até que se tenha uma população de tamanho  $N$ . Caso alguma fronteira tenha um número de soluções que exceda o tamanho limite  $N$ , emprega-se um processo denominado *crowding distance sorting* para garantir uma boa diversidade de soluções dessa fronteira;
5. Essa nova população de  $N$  soluções candidatas será a população  $P_t$  atual e o processo de 2 a 4 se repete até que o critério de parada seja atingido.

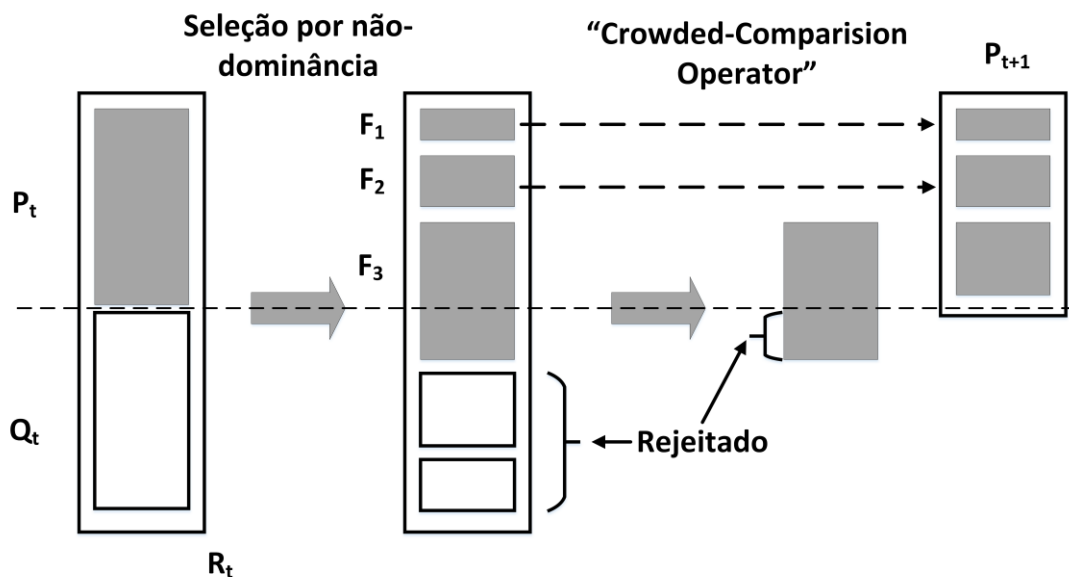


Figura 34 – Etapas de execução do algoritmo NSGA-II.

O algoritmo NSGA-II empregado nesse trabalho apresenta as seguintes características: cruzamento intermediário, mutação com distribuição Gaussiana e seleção por meio de torneio. O cruzamento intermediário permite que duas soluções (pais) da população atual ( $P_t$ ) construam uma solução (filha) para a outra população ( $Q_t$ ), de modo que a solução filha represente um

vetor médio ponderado entre os limites definidos pelas soluções pais. Analiticamente tem-se (LIN, 2011):

$$filho = pai_1 + rand \cdot taxa \cdot (pai_1 - pai_2) \quad (23)$$

em que *rand* determina, a cada iteração, um valor aleatório entre 0 e 1 seguindo uma distribuição uniforme e *taxa* é um valor entre os limites 0 e 2.

O operador de mutação é aplicado a todos os indivíduos da população, sendo definida analiticamente por (LIN, 2011):

$$filho = pai + S \cdot randn \cdot (lim_{sup} - lim_{inf}) \quad (24)$$

em que *randn* é um valor aleatório entre 0 e 1 seguindo uma distribuição normal, *lim<sub>sup</sub>* é o limite superior das variáveis de otimização, *lim<sub>inf</sub>* é o limite inferior das variáveis de otimização e *S* é representada por (LIN, 2011):

$$S = escala \cdot (1 - red \cdot ger_{atual} / ger_{max}) \quad (25)$$

em que *escala* corresponde ao desvio padrão do número aleatório a ser gerado, *ger<sub>atual</sub>* corresponde ao número da geração atual, *ger<sub>max</sub>* é o número máximo de iterações e *red* é um valor entre 0 e 1.

O procedimento de seleção por torneio é empregado para selecionar as soluções, que serão submetidas aos operadores de cruzamento e mutação. Nesse processo de seleção um grupo de soluções é selecionada e elas são classificadas de acordo com sua aptidão. As melhores soluções desse grupo serão, então, submetidos aos operadores de cruzamento e mutação para gerar as soluções da próxima população (DEB, 2001; LIN, 2011; JEBARI e MADIAFI, 2013).

## 2.8 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LIOs POR TORNEAMENTO

O torneamento com ferramenta de corte de diamante é um dos processos destinados à fabricação de LIOs, que é largamente utilizado no mercado. Tal processo se baseia no emprego de tornos CNC (*Computer Numerically Controlled*), que garantem exatidão em escala micrométrica e ótima qualidade superficial durante seu processo de corte do material da lente, evitando a necessidade de polimento após o corte (RHORER e EVANS, 1995). Em uma montagem típica para um torno CNC uma ferramenta de corte move na direção *x* e uma peça (denominada cabeçote) gira em torno do eixo *z* e se move nessa mesma direção (Figura 35).

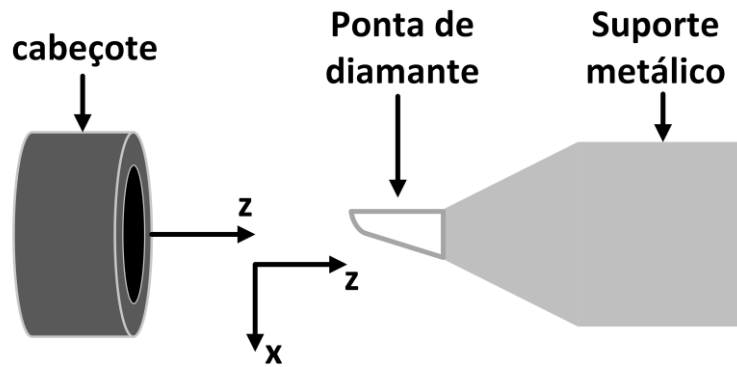


Figura 35 - Esquemático dos principais componentes de um torno CNC.

Durante o processo de fabricação o primeiro passo consiste em fixar a matéria prima da LIO, comumente denominada pastilha, que apresenta um formato cilíndrico, em uma estrutura polimérica denominada bloco (Figura 36).

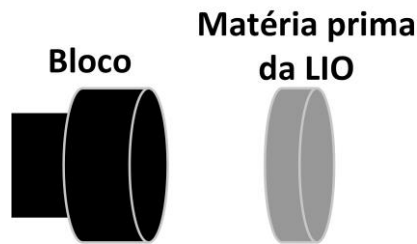


Figura 36 - Matéria prima da LIO (à direita) e bloco de fixação (à esquerda).

O bloco, juntamente com a pastilha, é acoplado no cabeçote que, durante o processo de fabricação, entra em rotação e se movimenta no sentido positivo do eixo  $z$  (em direção à ferramenta de corte), enquanto a ferramenta de corte se move no sentido do eixo  $x$ , ou seja, da borda para o centro da pastilha (Figura 37). Ao entrar em contato com a pastilha, a ponta de diamante da ferramenta remove material da pastilha e, assim, a superfície desejada é formada.

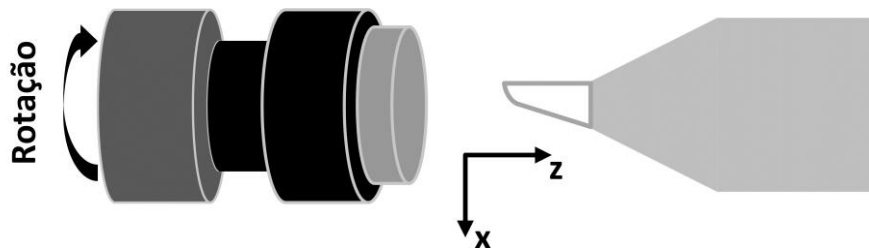


Figura 37 – Conexão do bloco ao cabeçote e seu sentido de rotação.

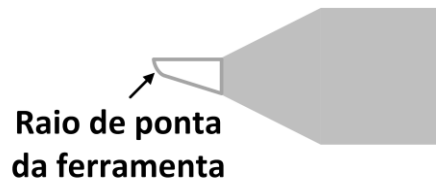


Figura 38 - Raio de ponta da ferramenta de diamante.

Convém destacar que a qualidade dos detalhes presentes na superfície da lente (degraus difrativos, por exemplo) depende da dimensão do raio de ponta da ferramenta (Figura 38). Para a fabricação de LIOMs difrativas deve-se empregar ferramentas com raio de ponta na ordem de dezenas de  $\mu\text{m}$ , afinal as alturas de degraus típicas de LIOMs difrativas se encontram próximas a essa faixa (ordem de unidades de  $\mu\text{m}$ ) (seção 2.2.2 deste capítulo) (LI *et al.*, 2006). A Figura 39 apresenta o efeito de uma ferramenta de raio de ponta grande (0,300 – 0,200 mm de raio) em relação a uma ferramenta de raio de ponta pequeno (0,060 – 0,030 mm de raio) na confecção de um degrau difrativo através do processo de torneamento. Pode-se notar que o emprego de uma ferramenta de raio de ponta grande (Figura 39.A) produz uma altura de degrau efetiva ( $h_f$  – altura fabricada) que é menor que a altura de projeto ( $h_p$ ), pois a dimensão da ferramenta não permite que seja realizada uma cavidade maior na pastilha. Quando se utiliza uma ferramenta de raio de ponta menor observa-se o mesmo efeito (Figura 39.B), ou seja, a altura fabricada é diferente da altura de projeto, mas elas se encontram mais próximas entre si do que em relação à ferramenta de raio maior. Convém destacar, que apesar da diferença entre os raios das ferramentas ( $r_2 > r_1$ ), o ângulo de abertura ( $\theta_2 = \theta_1$ ) é o mesmo para ambas, conforme indicado na Figura 39.C.

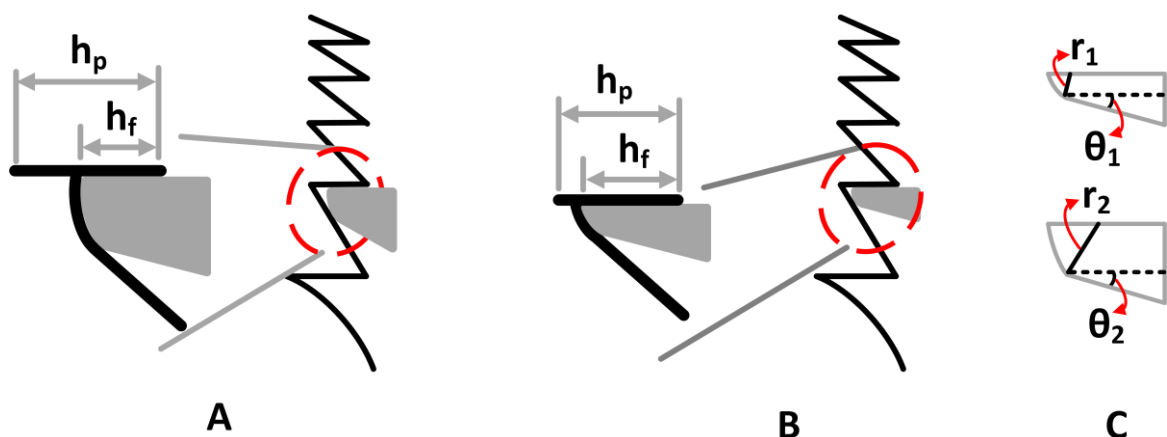


Figura 39 – Efeito do raio de ponta da ferramenta sobre o formato do degrau difrativo: A) ferramenta com raio de ponta elevado e B) ferramenta com raio de raio de ponta pequeno e C) parâmetros das ferramentas:  $r_2 > r_1$  e  $\theta_2 = \theta_1$ .

## 2.9 ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS DE LIOs

No desenvolvimento de um sistema óptico busca-se obter a combinação de parâmetros que proporcionem o melhor desempenho óptico do sistema. Dessa forma, algoritmos de otimização são empregados largamente no projeto de sistemas ópticos com o intuito de determinar qual combinação de parâmetros irá garantir o desempenho ótimo do sistema segundo as métricas estabelecidas (MTF, PSF etc.). Ainda assim, deve-se considerar que o modelo ótimo teórico estabelecido pelo processo de otimização não pode ser fabricado com a máxima perfeição devido aos desvios do processo produtivo. Dessa forma, é de extrema importância determinar os desvios de fabricação, a fim de verificar se o desempenho óptico final do modelo atende, com certa margem de erro, aos requisitos estabelecidos no projeto inicial (SHANNON, 1995).

Na análise de tolerâncias de uma LIO deve-se considerar todos os desvios de fabricação relacionadas aos parâmetros construtivos da lente: curvaturas, cônica, espessura, altura de degraus (para LIOMs difrativas), índice de refração etc. Considerando um processo típico de fabricação de LIOs baseado em tornos CNC é possível encontrar os desvios de fabricação relacionadas ao raio de curvatura, diâmetro e espessura da lente no manual do equipamento. Entretanto, a cônica, que é um parâmetro de grande influência na qualidade óptica da LIO, possui desvio afetado pelos três parâmetros citados anteriormente, ou seja, seu desvio é o resultado da combinação dos desvios dos outros três parâmetros. Em situações como essa é possível determinar o desvio da variável dependente (no caso em questão a cônica) por meio de uma análise de desvios multidimensional de acordo com a Eq. (26) (DRAKE JR, 1999):

$$t_{\zeta} = \sum_{i=1}^n |a_i t_{\xi_i}| \quad (26)$$

em que  $t_{\zeta}$  é o desvio do parâmetro dependente (constante cônica),  $t_{\xi}$  é o desvio dos parâmetros independentes e  $a_i$  é determinada a partir da derivada parcial do parâmetro dependente em função de cada parâmetro independente conforme apresentado na Eq. (27) (DRAKE JR, 1999):

$$a_i = \left. \frac{\partial \zeta}{\partial \xi_i} \right|_{\text{valores nominais}} \quad (27)$$

Uma vez definido a faixa de desvio de cada um dos parâmetros construtivos da LIO é preciso avaliar o impacto da variação de seus parâmetros no desempenho óptico do sistema.

Um método bastante comum para essa análise é o de Monte Carlo (FISCHER, TADIC-GALEB e YODER, 2008; SHANNON, 1995). O método de Monte Carlo é aplicado à análise de desvios através da simulação de diferentes modelos de LIOs considerando uma variação aleatória de cada um de seus parâmetros segundo uma função de distribuição normal de probabilidade (FISCHER, TADIC-GALEB e YODER, 2008).

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a base teórica e técnica que qualificou o aspecto inovador da LIOM proposta neste trabalho. Além disso, são apresentadas as ferramentas de simulação e a metodologia de otimização empregada durante o desenvolvimento do projeto óptico da lente.

#### 3.1 PESQUISAS PRELIMINARES

Neste tópico são analisadas as características das LIOMs difrativas presentes no estado da técnica a fim de delinear quais aspectos construtivos da lente podem ser explorados para alcançar um nível de inovação que atenda os critérios de não obviedade requisitados por uma patente. Será estabelecido, também, qual a formulação necessária para o cálculo da eficiência luminosa da LIOM proposta.

##### 3.1.1 Aspecto inovador da LIOM proposta: modulação da altura dos degraus

Uma análise bibliográfica aprofundada, com base em patentes, livros e artigos, foi realizada com o intuito de verificar qual o estado da técnica de LIOMs difrativas bifocais e trifocais (HOUBRECHTS, PAGNOULLE e GATINEL, 2011; KOBAYASHI, AICHI e ANDO, 2009; COHEN, 2012; SCHWIEGERLING, 2016; SCHWIEGERLING, 2010; O'SHEA *et al.*, 2004; DAVISON, 2005). Nota-se que a estrutura de degraus das LIOMs presentes no estado da técnica apresenta um padrão de alturas, que pode ser descrito por funções matemáticas. Dentre as estruturas já discutidas no capítulo 2 (tópico 2.2.2) pode-se verificar que uma estrutura de degraus difrativos com altura constante segue um padrão que pode ser descrito por uma função degrau unitário (Figura 40).

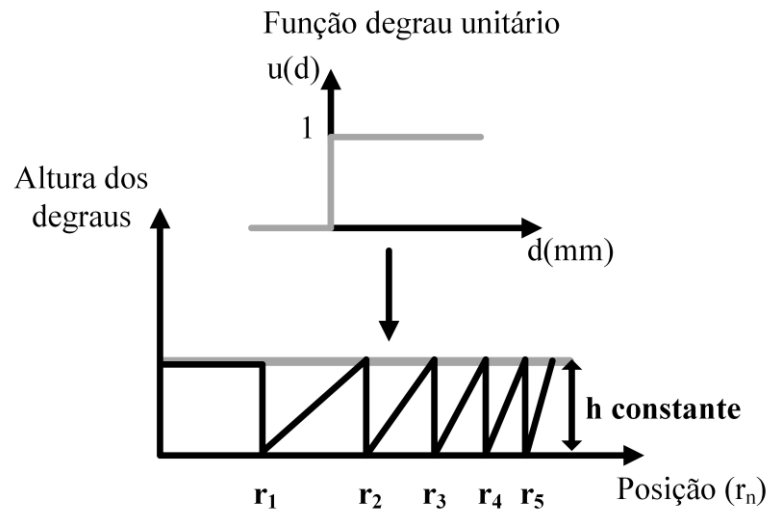


Figura 40 – Função representativa de uma LIOM difrativa com altura de degraus constante em relação a sua curva base.

Por outro lado, uma rede difrativa apodizada pode ser descrita por meio de uma função rampa (caso os degraus apresentem uma redução de altura linear - Figura 41.A) ou polinomial (caso os degraus apresentem uma redução de altura não linear – Figura 41.B).

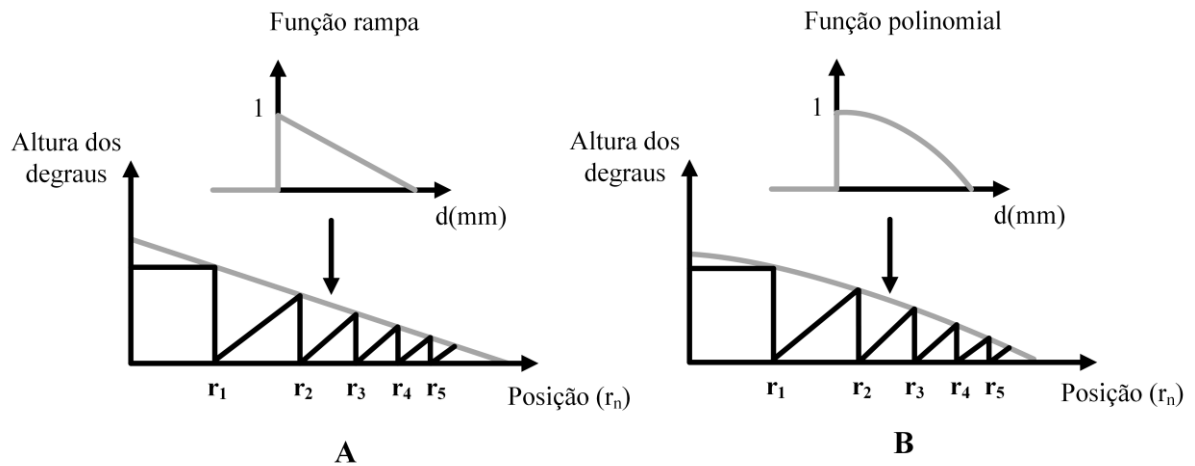


Figura 41 – Função representativa de uma LIOM difrativa apodizada: A) apodização linear e B) apodização polinomial.

Para uma LIOM trifocal com altura de degraus alternando entre dois valores pode-se descrever sua estrutura difrativa por meio de um trem de pulsos de onda quadrada com frequência crescente, ou seja, uma função aperiódica oscilante (Figura 42).

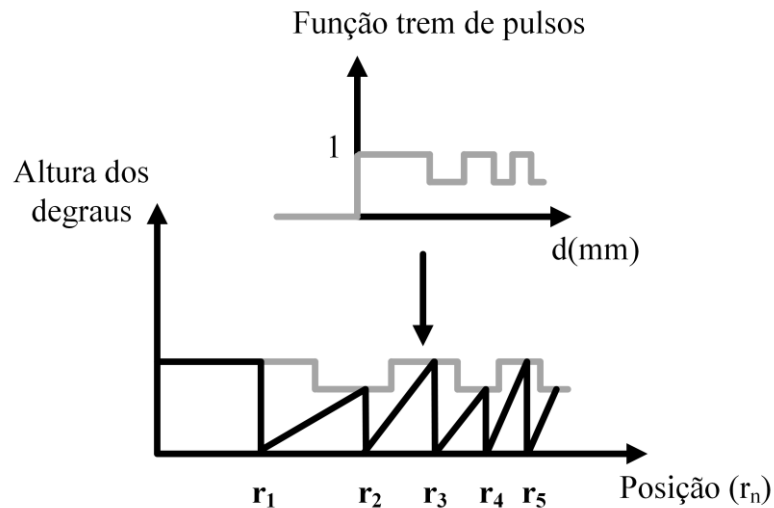


Figura 42 – Função representativa de uma LIOM difrativa trifocal com alturas alternadas.

Em relação às estruturas difrativas das LIOMs presentes no mercado nota-se a combinação das funções descritas previamente. Para a LIOM Fine Vision Micro F (do fabricante PhysiOL), por exemplo, a combinação de duas redes difrativas apodizadas resulta em uma rede de degraus com alturas que se alternam (os degraus ímpares são menores que os degraus pares) e que sofrem redução (apodização) descrita por funções que podem ser lineares ou polinomiais (Figura 43).

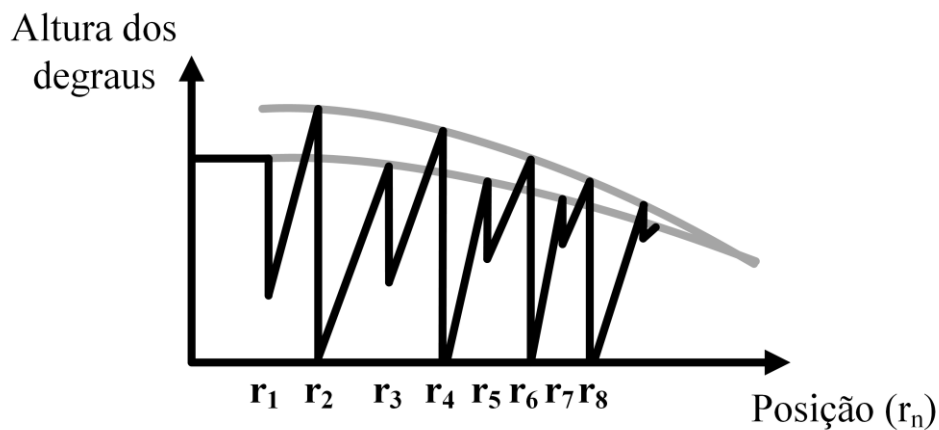


Figura 43 – Função representativa da altura dos degraus da LIOM PhysiOL considerando uma apodização polinomial.

Com base no padrão de estrutura de degraus presente no estado da técnica surgiu a ideia, durante a fase inicial de estudos deste trabalho, de desenvolver uma rede difrativa com alturas de degraus aleatórias sem seguir os padrões presentes no estado da técnica, em que se nota um comportamento alternado das alturas de degraus: degrau maior, seguido de um degrau menor e assim sucessivamente (Figura 29, Figura 42 e Figura 43 por exemplo). Entretanto, para controlar essa aleatoriedade por meio de algum parâmetro analítico propôs-se o emprego de

uma função periódica para modular a altura dos degraus. Além disso, por meio dos parâmetros dessa função analítica torna-se possível avaliar o impacto de sua variação nas figuras de mérito que caracterizam a qualidade óptica da lente. A aleatoriedade das alturas dos degraus é criada pois a aplicação de uma função de modulação periódica sobre as alturas de degraus, que se encontram em posições ( $r_n$ ) aperiódicas, resultará em uma rede difrativa sem alternância de alturas de degraus (Figura 44 e Figura 45). À princípio utilizou-se a função cossenoidal transladada, ou seja, com um termo de fase, para modular a altura dos degraus da rede difrativa (Figura 44). Entretanto, observa-se que para tal função de modulação alguns degraus apresentam alturas muito pequenas ( $< 0.1 \mu\text{m}$ ) quando eles se situam na região de vale da função cossenoidal (degraus posicionados em  $r_3$  e  $r_4$ , por exemplo - Figura 44). Tal dimensão de altura de degrau seria de difícil reprodução considerando um processo produtivo por torneamento, pois a altura do degrau encontra-se na mesma ordem de grandeza do raio da ferramenta (conforme comentado no item 2.6 do capítulo de Fundamentação teórica).

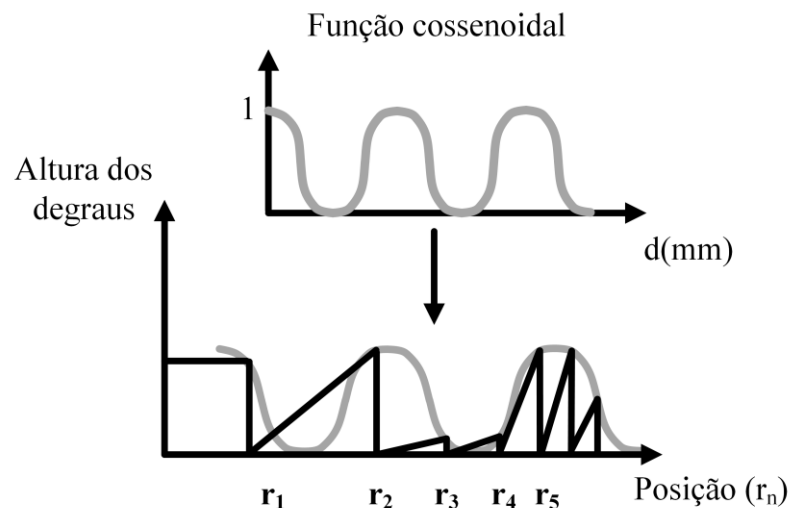


Figura 44 – Função periódica sugerida inicialmente para modular as alturas dos degraus da rede difrativa.

Ainda com o intuito de se utilizar uma função periódica para modular as alturas dos degraus, mas que não apresentasse as limitações observadas no emprego da função cossenoidal, buscou-se, então, utilizar o módulo da função cossenoidal como função de modulação (Figura 45). Como tal abordagem não apresentou degraus difrativos com altura da mesma ordem de grandeza da ferramenta e não há nada semelhante no estado da técnica, optou-se por empregá-la durante todo o desenvolvimento do projeto.

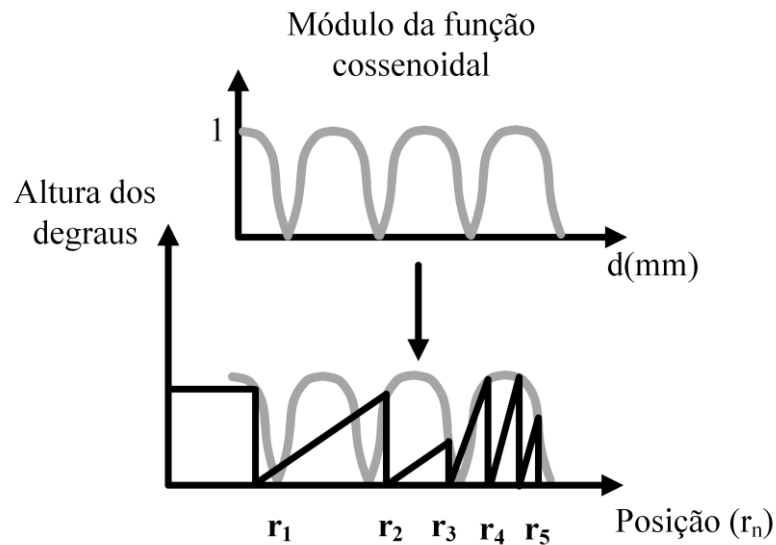


Figura 45 – Função periódica empregada para modular a altura dos degraus da rede difrativa.

Matematicamente, a função  $m(d)$  empregada para a modulação dos degraus é descrita por:

$$m(d) = |A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot d + \theta)| \quad (28)$$

sendo  $A$  a amplitude da função cossenoidal em unidades de  $\mu\text{m}$ ;  $f$  a frequência espacial da função em unidades de  $1/\text{mm}$ ;  $d$  a variável independente da função, que corresponde à posição radial da abertura da lente, ou seja,  $d$  varia de  $0$  à  $3,0 \text{ mm}^9$  e está, também, relacionada à posição  $r_n$  de cada degrau e, finalmente,  $\theta$  é uma constante de fase dada em radianos. A Figura 46 apresenta o impacto de cada termo da Eq. (28) no formato da função de modulação. Para a função descrita na Figura 46.A tem-se uma defasagem nula, ou seja, o deslocamento da função em relação a sua origem é nulo. Além disso, sua frequência espacial ( $f_1$ ) é superior à frequência espacial ( $f_2$ ) da função descrita na Figura 46.B e sua amplitude ( $A_1$ ) é superior à amplitude ( $A_2$ ) dessa segunda função.

<sup>9</sup> A distância  $d$  tem valor máximo dependente do tamanho do raio da zona óptica da LIO. Para a LIO deste trabalho o raio da zona óptica é de  $3,00 \text{ mm}$ .

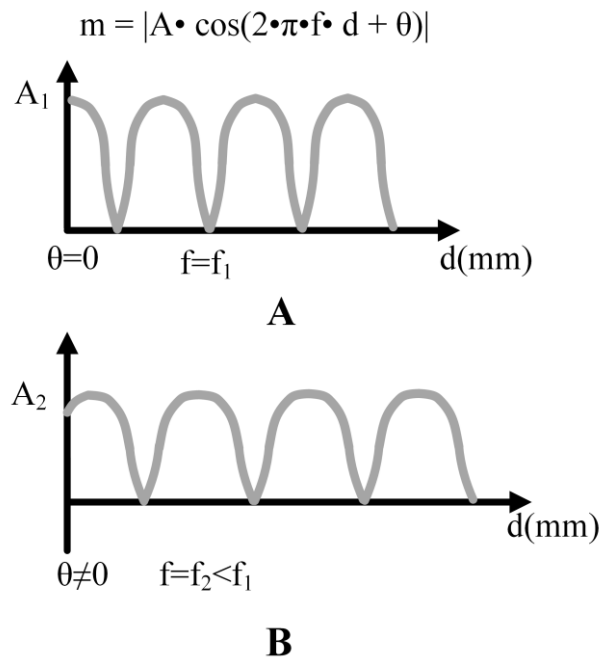


Figura 46 – Representação da função de modulação para diferentes parâmetros: A)  $f = f_1$ ,  $A = A_1$  e  $\theta = 0$  e B)  $f = f_2$ ,  $A = A_2$  e  $\theta \neq 0$ .

### 3.1.2 Cálculo da eficiência luminosa da LIOM proposta

Com o intuito de estabelecer a distribuição de eficiência luminosa das ordens difrativas criadas pela LIOM cujos degraus foram modulados pela função descrita no tópico anterior, buscou-se na literatura algum modelo matemático que pudesse descrever o comportamento de redes difrativas com diferentes alturas de degraus. Algumas referências em artigos e livros tratam da eficiência de redes difrativas, mas se limitam apenas em considerar uma rede difrativa com altura constante de degraus cuja eficiência é determinada pelas Eq. (6) - (8) (LENKOVA, 2006; O'SHEA *et al.*, 2004; LOEWEN e POPOV, 1997; LEVASHOV e VINOGRADOV, 1994; LONDOÑO e CLARK, 1992). Entretanto, um estudo recente estabelece o cálculo da eficiência das ordens difrativas de uma LIOM através da expansão ortogonal da PSF formada pela lente (SCHWIEGERLING, 2016). O artigo estabelece como pré-requisito, que a rede difrativa seja formada por degraus com formato triangular e que as áreas anelares de cada degrau sejam iguais. Ambos os pré-requisitos são atendidos pela LIOM proposta neste trabalho. Dessa forma, o cálculo da eficiência luminosa de uma rede difrativa com qualquer padrão de altura de degrau é dado pelo quadrado do módulo do termo  $b_{00}$  descrito na Eq. (29) (SCHWIEGERLING, 2016):

$$b_{00} = \sum_{n=0}^N (\rho_n^2 - \rho_{n-1}^2) \exp \left[ -i2\pi \left( \beta_n + \frac{\alpha_n}{2} - \frac{W_{20}}{2} (\rho_n^2 + \rho_{n-1}^2) \right) \right] \text{sinc} [W_{20} \cdot (\rho_n^2 - \rho_{n-1}^2) - \alpha_n] \quad (29)$$

em que  $\rho_n$  corresponde à coordenada da posição dos degraus difrativos ( $r_n$ ) normalizada pelo raio da zona óptica da lente ( $r_{max} = 3,0$  mm),  $W_{20}$  é o coeficiente de defoco em unidade de comprimento de onda,  $\alpha_n$  e  $\beta_n$  correspondem ao perfil de fase do n-ésimo degrau (Figura 47) e  $N$  corresponde ao número total de degraus da rede.

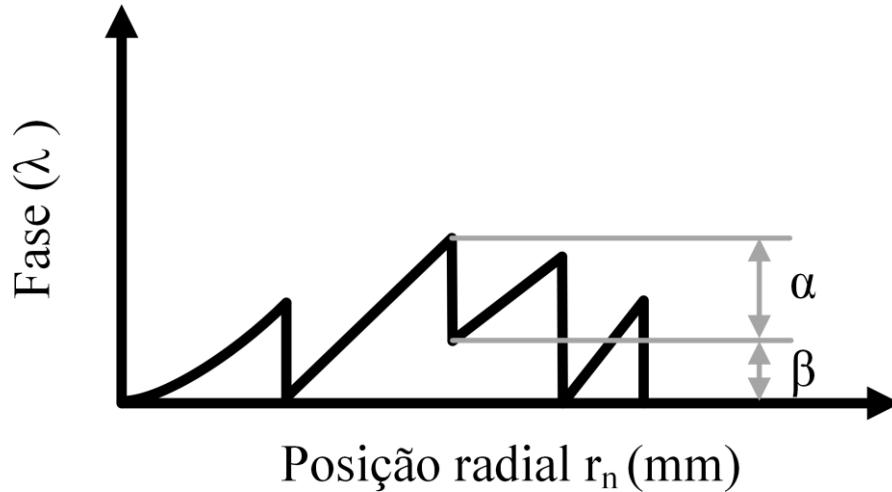


Figura 47 – Parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da rede difrativa.

Como a Eq. (29) se trata de uma formulação geral para o cálculo da eficiência de uma rede difrativa com altura de degraus genérica, torna-se necessário realizar algumas manipulações matemáticas, a fim de que os parâmetros da função de modulação estejam explícitos na equação. Os passos a seguir delinearão as manipulações matemáticas realizadas para se determinar a versão final da equação de cálculo de eficiência para a LIOM proposta neste trabalho.

O coeficiente de defoco pode ser reescrito da seguinte forma (SCHWIEGERLING, 2016):

$$W_{20} = \phi_{base} \cdot \frac{r_{max}^2}{2\lambda} \quad (30)$$

em que  $\phi_{base}$  é o poder dióptrico base da LIOM,  $r_{max}$  é o raio máximo de abertura da região óptica da LIOM (3,0 mm) e  $\lambda$  é o comprimento de onda de projeto (0,546  $\mu$ m).

Como as áreas das zonas difrativas são iguais (Figura 10 do tópico 2.2.2) tem-se que a área normalizada ( $A_{zona}$ ) de cada zona anelar pode ser descrita por:

$$A_{zona} = \frac{A_{disco}}{N^{\circ} \text{ de zonas}} = \frac{\pi \cdot \rho_{max}^2}{N} \quad (31)$$

sendo  $A_{disco}$  a área da zona óptica normalizada (determinada através do raio normalizado  $\rho$ ) e  $N$  é o número de degraus difrativos que a LIOM apresenta ao longo da zona óptica.

Uma forma alternativa de se determinar a área normalizada de uma zona difrativa limitada por posições radiais  $\rho_{n-1}$  e  $\rho_n$  pode ser dada por:

$$A_{zona} = A_{disco\ externo} - A_{disco\ interno} = \pi(\rho_n^2 - \rho_{n-1}^2) \quad (32)$$

Igualando as Eq. (31) e (32) e sabendo que o raio máximo normalizado ( $\rho_{max}$ ) é igual a 1 tem-se:

$$\frac{\pi \cdot 1^2}{N} = \pi(\rho_n^2 - \rho_{n-1}^2) \rightarrow (\rho_n^2 - \rho_{n-1}^2) = \frac{1}{N} \quad (33)$$

Como a posição radial de cada degrau difrativo é dado pela Eq. (5), é possível reescrever o termo  $\rho_n^2$ , que é o quadrado da posição ( $r_n$ ) normalizada das zonas difrativas, como:

$$\rho_n^2 = \left(\frac{r_n}{r_{max}}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{\frac{2n\lambda}{\phi_{add}}}/r_{max}}{r_{max}}\right)^2 = \frac{2n\lambda}{r_{max}^2 \cdot \phi_{add}} \quad (34)$$

Considerando o argumento da função sinc presente na Eq. (29) e reescrito na Eq. (35), tem-se que os termos  $W_{20}$ ,  $\rho_n^2$  e  $\rho_{n-1}^2$  podem ser substituídos pelos termos da Eq. (30) e (34), respectivamente. O resultado simplificado é apresentado na última igualdade da Eq. (35).

$$W_{20}(\rho_n^2 - \rho_{n-1}^2) = \phi_{base} \cdot \frac{r_{max}^2}{2\lambda} \left( \frac{2n\lambda}{r_{max}^2 \cdot \phi_{add}} - \frac{2(n-1)\lambda}{r_{max}^2 \cdot \phi_{add}} \right) = \frac{\phi_{base}}{\phi_{add}} \quad (35)$$

Realizando a mesma análise apresentada na Eq. (35) para o argumento do termo exponencial presente na Eq. (29) chega-se à forma simplificada presente na Eq. (36):

$$\frac{W_{20}}{2}(\rho_n^2 + \rho_{n-1}^2) = \phi_{base} \cdot \frac{r_{max}^2}{4\lambda} \left( \frac{2n\lambda}{r_{max}^2 \cdot \phi_{add}} + \frac{2(n-1)\lambda}{r_{max}^2 \cdot \phi_{add}} \right) = \frac{\phi_{base}}{\phi_{add}} \left( n - \frac{1}{2} \right) \quad (36)$$

Na LIOM proposta neste trabalho o parâmetro  $\beta$  é nulo e o parâmetro  $\alpha$  é modulado pela função de modulação  $m(d)$  (Eq. (28)), ou seja:

$$\alpha_n = |A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot d + \theta)| \cdot (n_{LIO} - n_{meio})/\lambda \quad (37)$$

Substituindo a Eq. (33), Eq. (35), Eq. (36) e Eq. (37) na Eq. (29) encontra-se a equação final para o cálculo do termo  $b_{00}$ , cujo quadrado do seu módulo representa a eficiência luminosa da LIOM proposta neste trabalho (Eq. (38)).

$$b_{00} = \sum_{n=0}^N \frac{1}{N} \exp \left[ -i2\pi \left( \frac{A|\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot r_n + \theta)| \cdot (n_{LIO} - n_{meio})/\lambda - \frac{\Phi_{base}}{\Phi_{add}} \left( n - \frac{1}{2} \right)}{2} \right) \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[ \frac{\Phi_{base}}{\Phi_{add}} - A|\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot r_n + \theta)| \right] \quad (38)$$

### 3.2 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE OPTICSTUDIO

O OpticStudio, comumente conhecido como Zemax (nome de sua versão até 2013), é uma ferramenta computacional de simulação capaz de realizar a modelagem, otimização e caracterização de sistemas ópticos em geral. Essa plataforma apresenta dois módulos principais de simulação denominados modo sequencial e modo não sequencial. No modo sequencial os feixes luminosos se propagam pelo sistema óptico sequencialmente, ou seja, considerando uma propagação luminosa da esquerda para direita, os feixes irão interceptar cada superfície do sistema uma única vez (ALBUQUERQUE, 2006). Este modo é comumente empregado em simulações de sistemas ópticos simples como, por exemplo, uma LIO biconvexa monofocal (Figura 48).

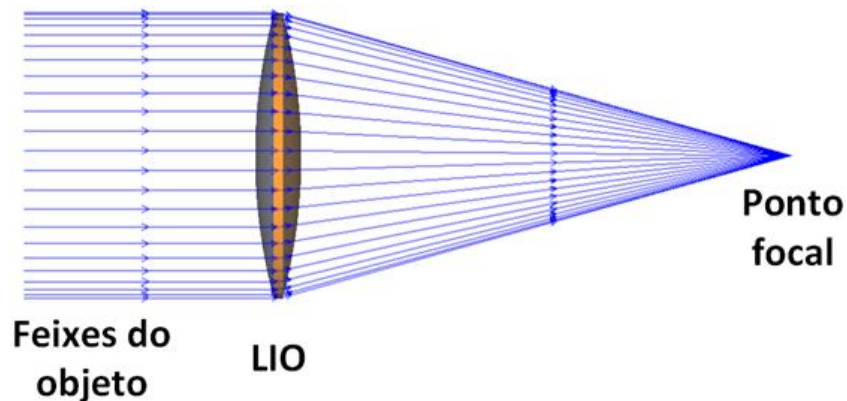


Figura 48 – Propagação dos feixes em um sistema óptico sequencial modelado no OpticStudio.

Fonte: (CARVALHO, 2014).

No outro modo, denominado não sequencial, os feixes luminosos não precisam seguir nenhuma ordem ou sequência, ou seja, podem atingir as superfícies do sistema modelado inúmeras vezes e ao longo de qualquer caminho óptico fisicamente possível (Figura 49). Este modo é, em geral, destinado à elaboração de sistemas ópticos mais complexos em que as características de dispersão e difração dos raios precisam ser avaliadas e controladas como, por

exemplo, interferômetros, LIOs difrativas e sistemas de iluminação especular (farol de carro) (ALBUQUERQUE, 2006).

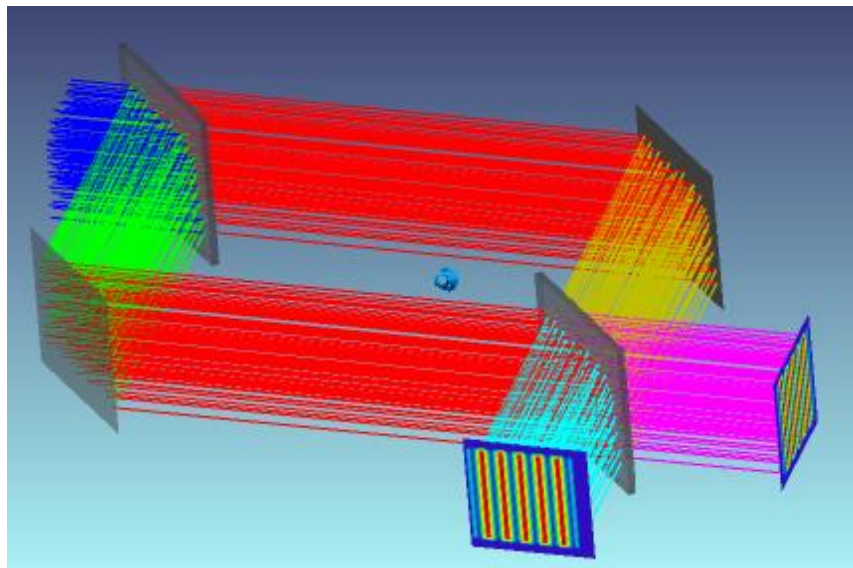


Figura 49 – Sistema óptico não sequencial modelado no OpticStudio.

Fonte: (ARORA, 2014).

O software OpticStudio é mais especializado no modo sequencial, afinal o modo não sequencial passou a integrar o pacote do software após a versão 7.0 em março de 2007 (atualmente o OpticStudio se encontra na versão 18.1 – maio de 2018). Devido a isso, o modo sequencial apresenta ferramentas adequadas para otimização, análise de tolerâncias, análise de aberrações e outra série de recursos, que garantem uma avaliação minuciosa e detalhada dos sistemas ópticos modelados. Em relação, especificamente, às ferramentas de otimização da plataforma em modo sequencial, o OpticStudio emprega o método de Mínimos Quadrados Amortecido<sup>10</sup> (do inglês “*Damped Least Square*” - *DLS*) e o método Ortogonal de Descida<sup>11</sup> (do inglês “*Orthogonal Descent*” - *OD*) na otimização dos sistemas ópticos.

---

<sup>10</sup> O método dos Mínimos Quadrados Amortecido trata-se de uma técnica de otimização de busca local tradicionalmente empregada no projeto de sistemas ópticos. Devido ao fato de ser um método de busca local, esta técnica apresenta a grande desvantagem de que a qualidade do sistema óptico otimizado depende criticamente do ponto inicial de partida do processo de otimização (ONO, KOBAYASHI e YOSHIDA, 1999; VASILJEVIC, 2002).

<sup>11</sup> O método Ortogonal de Descida é comumente empregado na otimização de sistemas de iluminação (LEDs e colimadores p.e.). Este método de otimização não se baseia na derivada numérica da função de mérito do

---

Em relação ao modo não sequencial as ferramentas de análise presentes na plataforma são escassas, permitindo apenas a avaliação da intensidade luminosa dos raios traçados até um plano de imagem. Além disso, os algoritmos de otimização presentes no modo sequencial estão ausentes nesse modo (ALBUQUERQUE, 2006; ZEMAX, 2018). Com base no que foi descrito previamente neste tópico, nota-se que é possível modelar e otimizar LIOs monofocais no modo sequencial do software OpticStudio. Entretanto, para a modelagem de LIOs difrativas torna-se necessário o emprego do modo não sequencial. Como este modo não apresenta ferramentas de análise de MTF e otimização torna-se necessário o emprego de algoritmos elaborados em outras plataformas como: Matlab, C++ etc. Para o emprego desta abordagem o software OpticStudio apresenta uma funcionalidade denominada DDE (*Dynamic Data Exchange*), que permite a comunicação entre o OpticStudio e softwares de terceiros (ZEMAX, 2018). Através dessa funcionalidade é possível analisar e otimizar externamente os sistemas ópticos modelados em modo não sequencial. Dessa forma, o OpticStudio fica encarregado de modelar a estrutura física do sistema óptico e de realizar o traçado dos raios através do sistema modelado, enquanto os softwares externos capturam os resultados (intensidade luminosa dos raios traçados), analisam e retornam as alterações de cada parâmetro, que promoverão a aproximação do ótimo do sistema com base na função de mérito estipulada.

### 3.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO

A otimização da LIOM proposta neste trabalho é realizada em duas etapas. Na primeira etapa é realizada a otimização dos parâmetros responsáveis por determinar o poder dióptrico base da LIOM: raio de curvatura e cônica da superfície anterior, raio de curvatura da superfície posterior e espessura. Tal processo de otimização é realizado utilizando-se o algoritmo de otimização DLS presente no próprio software OpticStudio. A função de mérito empregada

---

problema e sim em um princípio denominado raio de borda (do inglês "*Edge-ray principle*"). Tal princípio estabelece que a propagação do raio luminoso da borda da fonte de luz deve se propagar sob o ângulo máximo do anteparo alvo. A função de mérito do sistema é definida como o desvio RMS entre o ângulo máximo do anteparo e o ângulo do raio que sai da borda da fonte (KUDAEV e SCHREIBER, 2005).

nessa etapa de otimização é baseada na minimização da distância entre a curva MTF do sistema óptico e aquela no seu limite de difração (Eq. (39)).

$$\min_{\Delta MTF} = MTF_{\text{limite}} - MTF_{\text{LIO}} \quad (39)$$

Dessa forma, o processo de otimização inicial é o mesmo aplicado a uma LIO monofocal, afinal não está sendo considerada neste primeiro momento a rede difrativa da lente, que é responsável pela multifocalidade. O processo de otimização dessa primeira etapa do projeto é representado analiticamente por:

Minimizar:

$$\Delta MTF(R_a, k_a, R_p, t) \quad (40)$$

Sujeito a:

$$8 \leq R_a \leq 100 \quad (41)$$

$$-20 \leq k_a \leq 0 \quad (42)$$

$$-29 \leq R_p \leq -6 \quad (43)$$

em que  $R_a$  é o raio de curvatura da superfície anterior da LIO em mm,  $k_a$  é a constante cônica da superfície anterior,  $R_p$  é o raio de curvatura posterior da LIO em mm e  $t$  é a espessura central da LIO em mm. Os limites apresentados para as variáveis de otimização tiveram como base valores típicos encontrados em lentes intraoculares presentes no mercado.

Uma vez definidas as variáveis de otimização dessa primeira etapa e a função de mérito do problema de otimização, torna-se necessário definir os parâmetros construtivos iniciais para o modelo da lente. Os parâmetros iniciais são listados a seguir:

- Índice de refração da LIO: o índice de refração da LIO foi definido como 1,461, que corresponde ao índice de um material polimérico hidrofílico comercializado por um fornecedor especializado em LIOs (MEUNIER, 2017).
- Dioptria base: a dioptria base da LIO foi fixada em 20 D, que corresponde a uma dioptria média comumente empregada em pacientes submetidos à cirurgia de tratamento de catarata.
- Diâmetro da zona óptica da LIO: o diâmetro da zona óptica da LIO foi fixado em 6,0 mm, que corresponde a um tamanho típico de zona óptica de LIOs.
- Raios de curvatura iniciais: para definir um ponto de partida do processo de otimização buscou-se definir os raios de curvatura de uma lente esférica biconvexa simétrica, que seja capaz de atender o critério de dioptria (20 D).

Empregando-se a equação do fabricante de lentes (Eq. (2)) é possível chegar aos seguintes valores para o raio de curvatura anterior ( $R_a$ ) e posterior ( $R_p$ ):

$$R_a = -R_p = 12,460 \text{ mm.}$$

Após a otimização dos parâmetros construtivos responsáveis pela refração da LIOM, ou seja, os parâmetros que farão com que a ordem 0 da rede difrativa tenha uma vergência de 20 D, parte-se para a segunda etapa do processo de otimização. Nessa etapa os parâmetros  $A$ ,  $f$  e  $\theta$  da função de modulação (Eq. (28)) responsáveis por determinar as alturas dos degraus difrativos são otimizados. Assim como na primeira etapa do processo de otimização, torna-se necessário estabelecer um parâmetro inicial essencial para dar início ao processo de otimização da rede difrativa: a quantidade de degraus da LIOM. A quantidade de degraus está relacionada ao adicional, que a LIOM deve apresentar entre o foco distante e próximo (Eq. (5)) e ao tamanho da zona óptica da lente, que estará disponível para a construção da rede difrativa.

Atualmente as LIOMs trifocais presentes no mercado apresentam poder dióptrico adicional entre o foco distante e próximo em torno de +3,0 D em contraste com as primeiras LIOMs, que apresentavam adicional de +4,0 D. Tal tendência se justifica pelo fato de que um adicional de +3,0 D garante um foco intermediário com acuidade superior ao de uma LIOM com adicional de +4,0 D com base em testes clínicos (ALFONSO *et al.*, 2009; KOHNEN *et al.*, 2009; MAXWELL *et al.*, 2009). Dessa forma, será definida uma rede difrativa com adicional de +3,0 D entre os focos distante e próximo e, conseqüentemente, de +1,5 D entre os focos distante e intermediário. Assim, a Eq. (5) será responsável por determinar a posição de cada degrau sobre a zona óptica.

Em relação à extensão da rede difrativa, observa-se no mercado LIOMs difrativas cuja rede ocupa toda a área óptica da lente (como a LIOM Tecnis modelo ZM900, por exemplo (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013)) e existem, também, LIOMs cuja rede difrativa se estende até um dado diâmetro da zona óptica (até 3,6 mm, por exemplo, para a LIOM Acrysof Restor modelo SN6AD1 (GATINEL e HOUBRECHTS, 2013)). Como a LIOM proposta leva em consideração um processo produtivo por torneamento, é relevante limitar o tamanho da rede difrativa para um valor menor que a zona óptica da LIOM, pois à medida que a quantidade de degraus da rede difrativa aumenta, mais estreita se torna a separação entre cada degrau (Eq. (5)). Tal estreitamento entre os degraus faz com que o torno não seja capaz de reproduzir a altura de projeto dos degraus mais extremos, devido à dimensão do raio de ponta da ferramenta. Como a norma ISO 11979-2 considera 4,0 mm - 5,0 mm de diâmetro uma abertura grande para analisar o desempenho óptico de uma LIOM, será considerada para a LIOM proposta neste trabalho uma rede difrativa ocupando um diâmetro de 5,0 mm da zona óptica da lente. O

restante da zona óptica (de 5,0 mm a 6,0 mm) será refrativo e com o poder dióptrico (20 D) determinado pela curva base.

Além disso, a rede difrativa da LIOM proposta será modelada e construída na superfície posterior da lente, ou seja, na superfície que ficará em contato com a capsula do cristalino. Devido a isso, é conveniente destacar que, caso a lente esteja implantada de forma contrária, ou seja, com a rede difrativa direcionada para a córnea, ela apresentará um comportamento óptico diferente em relação aos resultados presentes neste trabalho.

Diante das considerações apresentadas (adicional de +3,0 D e zona difrativa com 5,0 mm de diâmetro) a LIOM proposta possuirá 16 degraus difrativos de acordo com a Eq. (5). Uma vez definidos os parâmetros de otimização e o modelo inicial, deve-se estabelecer a função de mérito destinada à otimização dos degraus difrativos. Será considerado como função de mérito a maximização de três objetivos: as eficiências dos focos distante, próximo e intermediário. A LIO proposta foi projetada como trifocal, pois a energia incidente é redirecionada para esses três focos principais, além da perda de energia em outras ordens inerente à técnica difrativa. Dessa forma, se fosse priorizado um quarto foco (LIO tetrafocal, por exemplo), o percentual de energia direcionado em cada um dos quatro pontos focais não permitiria uma distinção nítida entre os focos, fazendo com que a qualidade da imagem (contraste e nitidez) formada se deteriorasse.

Como se trata de um processo de otimização multiobjetivo, o processo será otimizado por meio do algoritmo genético NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*) por meio de uma *toolbox* do Matlab (versão 2015). O NSGA-II é um algoritmo de otimização evolutivo genético de busca global (DEB *et al.*, 2002). A otimização da rede difrativa através do NSGA-II será realizada em duas regiões diferentes: uma região que se estende do primeiro degrau ( $r_1 = 0,603$  mm) até o sexto degrau ( $r_6 = 1,478$  mm) e outra região, que se estende do sétimo degrau ( $r_7 = 1,596$  mm) até o décimo sexto degrau ( $r_{16} = 2,413$  mm). A segmentação da rede difrativa durante o processo de otimização foi realizada, pois ao se escolher os parâmetros da rede difrativa, que garantirão bons valores de MTF em cada foco para uma abertura de 3,0 mm, não implica, necessariamente, que o MTF em cada foco para uma abertura de 4,5 mm será semelhante. Devido a isso, a segmentação permite que sejam encontrados os parâmetros de otimização da rede difrativa para 3 mm, que serão diferentes dos parâmetros de otimização para a região além de 3 mm de diâmetro, mas que, em conjunto, garantirão bons valores de MTF para ambas as aberturas.

Apesar de a função de mérito ser baseada na eficiência de cada foco, o critério final a ser avaliado para a LIOM otimizada é o MTF a 50 pl/mm de cada foco criado pela lente com

---

base nos critérios de MTF estabelecidos pela norma ISO para LIOs multifocais (ISO, 2006b). Dessa forma, a busca pela solução ótima se dará através de um parâmetro (eficiência), que está diretamente relacionado ao parâmetro final (MTF a 50 pl/mm), pois quanto maior a energia luminosa destinada a um foco, maior será seu MTF. Tal abordagem se deve ao fato de que a determinação do MTF da LIOM para cada foco é computacionalmente custosa, tardando, em média, 15 minutos para finalizar cada traçado de raio<sup>12</sup>.

Como a otimização pelo NSGA-II consiste na busca de um conjunto de soluções ótimas estimadas através de uma população de possibilidades (parâmetros construtivos diferentes) ao longo de várias iterações (gerações), seria necessário um tempo muito longo (meses de simulação) para obter a solução final. Entretanto, ao se considerar como função de mérito a eficiência de cada foco criado pela lente, torna-se possível implementar o cálculo da eficiência da LIOM proposta com base na Eq. (38) no próprio Matlab e realizar todo o processo de otimização nele. Ao final do processo de otimização escolhe-se a solução estimada pelo algoritmo (parâmetros  $A$ ,  $f$  e  $\theta$  da função de modulação da altura dos degraus) através de critérios, que serão estabelecidos a seguir. Os parâmetros  $A$ ,  $f$  e  $\theta$  escolhidos determinarão as alturas dos degraus difrativos e tais alturas serão simuladas no OpticStudio. Após a simulação, obtém-se os dados da intensidade luminosa traçada (PSF de cada foco criado), que serão exportados para o Matlab, com o intuito de se calcular o MTF em cada foco (a rotina elaborada no Matlab implementa a Eq. (15) para o cálculo do MTF). O processo de otimização dessa segunda etapa do projeto é representado analiticamente por:

---

<sup>12</sup> O tempo gasto para realizar o traçado dos raios no modo não sequencial do OpticStudio está diretamente relacionado à configuração do computador empregado na modelagem do sistema óptico. O tempo reportado neste trabalho foi obtido considerando um computador com as seguintes configurações: processador Pentium Intel Core i7-5500U de 2,40 GHz, memória RAM de 16,0 GB e placa de vídeo AMD Radeon R7 M265 com memória dedicada de 2 GB e 800 MHz de velocidade do seu processador.

Maximizar:

$$eff_{LIO}(A, f, \theta) = \{eff_{distante}(A, f, \theta), eff_{intermediário}(A, f, \theta), eff_{próximo}(A, f, \theta)\} \quad (44)$$

Sujeito a:

$$0,5 \leq A \leq 5 \quad (45)$$

$$0 \leq f \leq 2E + 06 \quad (46)$$

$$0 \leq \theta \leq 3\pi \quad (47)$$

em que  $A$  é a amplitude da função de modulação em  $\mu\text{m}$ ,  $f$  é a frequência espacial da função de modulação em  $1/\text{mm}$  e  $\theta$  é a defasagem da função de modulação em radianos.

Ao final do processo de otimização estabelecido pelo NSGA-II um conjunto de soluções Pareto estimadas serão apresentadas como soluções viáveis para a LIOM proposta (Figura 50).

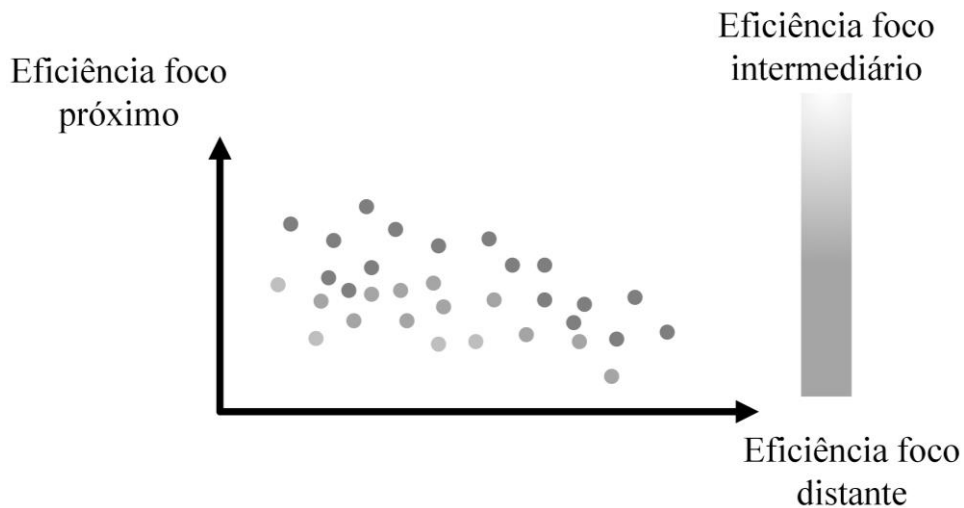


Figura 50 – Fronteira de Pareto estimada das soluções obtidas ao final da otimização pelo NSGA-II.

Para estabelecer o critério de escolha dentre as soluções possíveis fornecidas pelo NSGA-II em sua fronteira de Pareto estimada será considerado o desempenho em relação ao MTF das LIOs presentes no mercado, que foram apresentados na seção 2.4 do capítulo de fundamentação teórica deste trabalho. É possível notar no Quadro 4 (LIOM do fabricante PhysIOL) uma priorização dos focos distante e próximo em relação ao foco intermediário. Além disso, observa-se uma priorização do foco distante à medida que a pupila aumenta devido à apodização. Já no Quadro 3 (LIOM do fabricante Zeiss) observa-se uma independência da pupila, ou seja, não há um aumento do MTF do foco distante em relação ao foco próximo para a pupila de 4,5 mm de diâmetro. Dessa forma, será considerada como base de escolha das soluções presentes na fronteira de Pareto estimada da LIOM proposta neste trabalho a solução, que apresentar uma eficiência para o foco distante e próximo na razão de aproximadamente

uma unidade e uma eficiência residual para o foco intermediário. A escolha de uma eficiência semelhante para os focos distante e próximo é embasada no fato de que se deseja uma acuidade visual equiparável tanto para perto quanto para longe, ou seja, não se busca uma priorização do foco distante. Além disso, deseja-se que tal comportamento seja independente da pupila, a fim de que o paciente consiga ter visão próxima de qualidade em situações de baixa luminosidade como, por exemplo, enxergar o painel de um automóvel à noite. Os critérios estabelecidos serão empregados na escolha da solução tanto para 3,0 mm quanto para 4,5 mm de abertura (Figura 51).

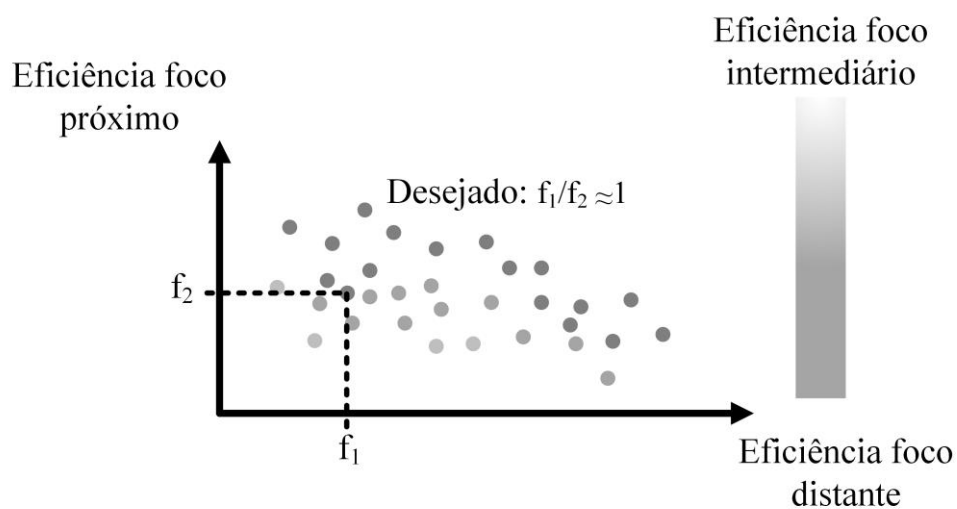


Figura 51 – Critério de seleção da solução ótima da fronteira de Pareto.

Analiticamente, os critérios de escolha das soluções na fronteira de Pareto estimada são definidos pelas relações:

$$0,9 < \frac{eff_{distante}}{eff_{próximo}} < 1,1 \quad (48)$$

$$\max(eff_{distante} + eff_{intermediário} + eff_{próximo}) \quad (49)$$

O Quadro 7 apresenta uma síntese das características do processo de otimização de cada etapa empregada neste trabalho.

Quadro 7 - Parâmetros de configuração do processo de otimização.

	1° etapa	2° etapa
Algoritmo	DLS	NSGA-II
Parâmetros de otimização	Raio de curvatura e cônica anterior, raio de curvatura posterior e espessura	Parâmetros $A, f$ e $\theta$ da função de modulação
Função de mérito	$\min_{\Delta MTF} = MTF_{\text{limite}} - MTF_{\text{LIOM}}$	Eficiência dos focos distante, próximo e intermediário
Plataforma	OpticStudio	Matlab
Tamanho da população	N.A.	30 indivíduos
N° de gerações	N.A.	500 gerações
Parâmetros de cruzamento	N.A.	taxa = 1,2
Parâmetros de mutação	N.A.	red = 0,1 e escala = 0,5

### 3.4 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS

Ao final do processo de otimização descrito no tópico anterior obtém-se os parâmetros construtivos da LIOM, que irão garantir o desempenho óptico trifocal desejado. Entretanto, é preciso verificar como os desvios do processo de fabricação irão impactar no desempenho óptico da lente. Para realizar tal análise é preciso determinar os desvios de cada um dos parâmetros construtivos da LIOM com base nas características do processo de fabricação. O processo de fabricação considerado para a LIOM deste trabalho será baseado em torneamento conforme discutido no tópico 2.6 do capítulo de fundamentação teórica. Os desvios de manufatura referentes à espessura, diâmetro e raios de curvaturas produzidos por tornos CNC podem ser encontradas nos manuais dos seus respectivos fabricantes. Entretanto, como a LIOM proposta neste trabalho apresenta em uma de suas superfícies uma asfericidade (constante cônica  $\neq 0$ ), torna-se necessário encontrar seu desvio com base nos desvios do raio de curvatura, espessura e diâmetro especificadas pelo fabricante do torno. Para encontrar o desvio deste parâmetro será empregada a análise de desvios multidimensional (Eq. (26) e Eq. (27)). O primeiro passo consiste em isolar matematicamente a constante cônica em função dos três parâmetros citados anteriormente (raio de curvatura, espessura e diâmetro) através da Eq. (1). Manipulando a Eq. (1) chega-se à forma isolada da constante cônica (Eq. (50)):

$$k = -\frac{D^2}{4z^2} + \frac{2}{cz} - 1 \quad (50)$$

em que  $D$  é diâmetro da LIO,  $c$  é o raio de curvatura da superfície esférica e  $z$  é a sagita da lente.

Já que a constante cônica é afetada pelos desvios combinados de três parâmetros:  $D$ ,  $c$  e  $z$  é possível reescrever a Eq. (26) da seguinte forma (Eq. (51)):

$$t_k = |a_D t_D| + |a_z t_z| + |a_c t_c| \quad (51)$$

em que  $t_D$ ,  $t_z$  e  $t_c$  são, respectivamente os desvios de fabricação do diâmetro, da sagita e do raio de curvatura. Os parâmetros  $a_D$ ,  $a_z$  e  $a_c$  são determinados através das derivadas parciais conforme apresentado na Eq. (27) e reescrito a seguir (Eq. (52)):

$$a_D = \frac{\partial k}{\partial D}, a_z = \frac{\partial k}{\partial z}, a_c = \frac{\partial k}{\partial c} \quad (52)$$

Com base na Eq. (50) é possível determinar as derivadas parciais da constante cônica com a finalidade de determinar os termos da Eq. (53). Assim, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial D} &= -\frac{D}{2z^2} \\ \frac{\partial k}{\partial z} &= \frac{D^2}{2z^3} - \frac{2}{c \cdot z^2} \\ \frac{\partial k}{\partial c} &= -\frac{2}{c^2 \cdot z} \end{aligned} \quad (53)$$

Dessa forma, com os valores nominais construtivos da superfície esférica ( $D$ ,  $z$  e  $c$ ) e seus respectivos desvios de fabricação ( $a_D$ ,  $a_z$  e  $a_c$ ), torna-se possível, empregando a Eq. (51), Eq. (52) e Eq. (53), determinar o desvio sobre a constante cônica da superfície.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os parâmetros construtivos e os resultados do desempenho óptico provenientes da otimização de uma LIO trifocal com projeto inovador de estrutura de degraus difrativos. A lente em questão apresenta dioptria base de 20,0 D e adicionais de +1,5 D e +3,0 D para os focos intermediário e próximo respectivamente.

### 4.1 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS E DESEMPENHO ÓPTICO

A LIO trifocal difrativa otimizada apresenta 16 degraus difrativos e três focos principais: um foco distante (com dioptria de +20 D), um foco intermediário (com dioptria de +21,5 D) e um foco próximo (com dioptria de +23 D). Os parâmetros construtivos responsáveis pelo poder dióptrico base da LIO foram otimizados por meio do algoritmo DLS presente no software OpticStudio. O índice de refração do material da LIO e os valores obtidos pelo processo de otimização são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Parâmetros construtivos da LIO trifocal difrativa.

Parâmetros da LIO	
Índice do material da LIO	1,461
Espessura central	1,043 mm
Raio de curvatura da face anterior	10,666 mm
Cônica da face anterior	-2,969
Raio de curvatura da face posterior	-14,960 mm

A altura dos degraus difrativos foi modulada por meio de uma função periódica (módulo da função cossenoidal – Eq. (28)) com o intuito de se obter uma concentração de energia luminosa significativa em três pontos focais principais sobre o eixo óptico, que permita uma amplitude de MTF em cada um dos três focos compatível com as LIOMs presentes no mercado. Os parâmetros de amplitude, frequência espacial e fase da função de modulação foram otimizados em duas etapas:

- A primeira etapa consiste na otimização da altura dos degraus difrativos que se encontram na região óptica da LIO que engloba uma abertura de 3 mm de diâmetro (considerado um valor de abertura de pupila pequeno segundo a norma ISO 11979-9) (ISO, 2006b). Nesse processo avalia-se a eficiência luminosa presente em cada ponto focal. Para esta situação obteve-se a fronteira de Pareto aproximada apresentada na

Figura 52. A solução escolhida (indicada na Figura 52) corresponde a uma eficiência para o foco distante de 0,35, uma eficiência para o foco intermediário de 0,10 e uma eficiência para o foco próximo de 0,32. Tal solução apresenta razão entre a eficiência do foco distante e próximo em torno da unidade (1,09). Existem outras soluções ao redor da solução escolhida que, também, apresentam razão entre tais eficiências próxima da unidade, mas a solução escolhida foi a que apresentou, considerando o somatório dos valores das eficiências em cada foco, o melhor resultado.

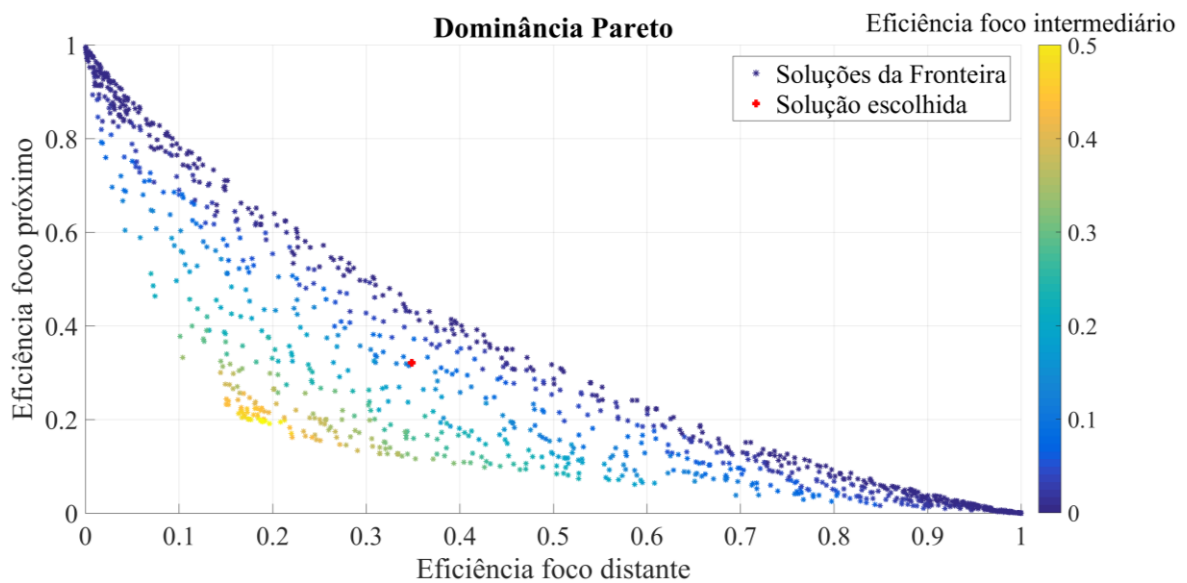


Figura 52 - Fronteira de Pareto estimada das soluções para abertura de 3 mm de diâmetro obtida pelo NSGA-II.

- A segunda etapa consiste na otimização da altura dos degraus da LIO que se encontram na região óptica da LIO após a abertura de 3 mm de diâmetro. Nessa etapa avalia-se a eficiência luminosa presente em cada ponto focal considerando-se uma abertura de 4,5 mm de diâmetro (considerado um valor de abertura de pupila grande segundo a norma ISO 11979-9) (ISO, 2006b). Para esta situação obteve-se a fronteira de Pareto aproximada apresentada na Figura 53. A solução escolhida (indicada na Figura 53) corresponde a uma eficiência para o foco distante de 0,33, uma eficiência para o foco intermediário de 0,10 e uma eficiência para o foco próximo de 0,32. Tal solução apresenta razão entre a eficiência do foco distante e próximo em torno da unidade (1,03).

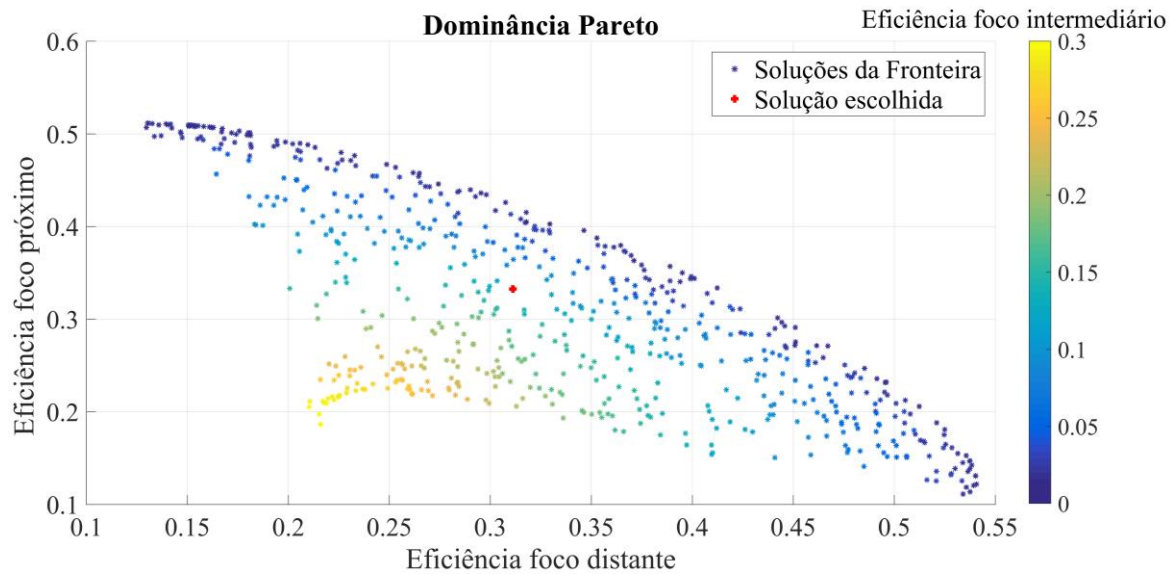


Figura 53 - Fronteira de Pareto estimada das soluções para 4,5 mm de diâmetro obtida pelo NSGA-II.

Os parâmetros de amplitude, frequência e fase da função responsável pela modulação da altura dos degraus difrativos provenientes das soluções escolhidas na Figura 52 e Figura 53 são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 - Parâmetros da função de modulação otimizados.

Diâmetro da abertura	Amplitude ( $\mu\text{m}$ )	Frequência (1/mm)	Fase (rad.)
$\leq 3$ mm	2,859	8,00485701775E+03	6,148
$> 3$ mm	2,862	1,3624447692E+06	6,568

Com base nos parâmetros apresentados no Quadro 9, a altura dos 16 degraus difrativos da LIO trifocal difrativa otimizada é apresentada no Quadro 10<sup>13</sup>.

Quadro 10 - Altura dos degraus difrativos ( $A_n$ ) partindo do centro da LIO ( $A_1$ ) até sua extremidade ( $A_{16}$ ).

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$
2,387 $\mu\text{m}$	2,067 $\mu\text{m}$	2,696 $\mu\text{m}$	1,545 $\mu\text{m}$	2,807 $\mu\text{m}$	1,576 $\mu\text{m}$	2,283 $\mu\text{m}$	1,244 $\mu\text{m}$
$A_9$	$A_{10}$	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$	$A_{15}$	$A_{16}$
2,529 $\mu\text{m}$	1,458 $\mu\text{m}$	2,816 $\mu\text{m}$	2,171 $\mu\text{m}$	2,494 $\mu\text{m}$	2,198 $\mu\text{m}$	2,815 $\mu\text{m}$	0,419 $\mu\text{m}$

<sup>13</sup> Os valores apresentados no Quadro 10 e Quadro 11 podem ser fabricados com a precisão requerida, pois a resolução vertical e horizontal do torno responsável pela fabricação dessa estrutura difrativa é sub-nanométrica (DAC, 2017).

A posição dos degraus difrativos é determinada com base no adicional escolhido para a LIOM (+3,0 D entre o foco próximo e distante) de acordo com a Eq. (5). A posição ( $r_n$ ) de cada um dos degraus difrativos obtidos pela Eq. (5) é apresentada no Quadro 11<sup>13</sup>.

Quadro 11 - Posição dos degraus difrativos da LIO.

$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$
0,603 mm	0,853 mm	1,045 mm	1,207 mm	1,349 mm	1,478 mm	1,596 mm	1,706 mm
$r_9$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$
1,810 mm	1,908 mm	2,001 mm	2,090 mm	2,175 mm	2,257 mm	2,337 mm	2,413 mm

Considerando os parâmetros construtivos apresentados no Quadro 8, Quadro 10 e Quadro 11 foi desenvolvido o modelo óptico da LIOM no software OpticStudio com base no modelo de olho estabelecido pela norma ISO 11979-9. Com o intuito de verificar o desempenho óptico da LIOM foram simuladas as curvas de MTF em cada foco (distante, intermediário e próximo) para três diâmetros de abertura de pupila diferentes: 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm. Além disso, foram simuladas as curvas de MTF *through focus* para as mesmas aberturas e a distribuição da energia luminosa em cada foco em função da abertura da LIOM. A Figura 54, Figura 55 e Figura 56 apresentam as curvas de MTF obtidas para aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm de diâmetro respectivamente.

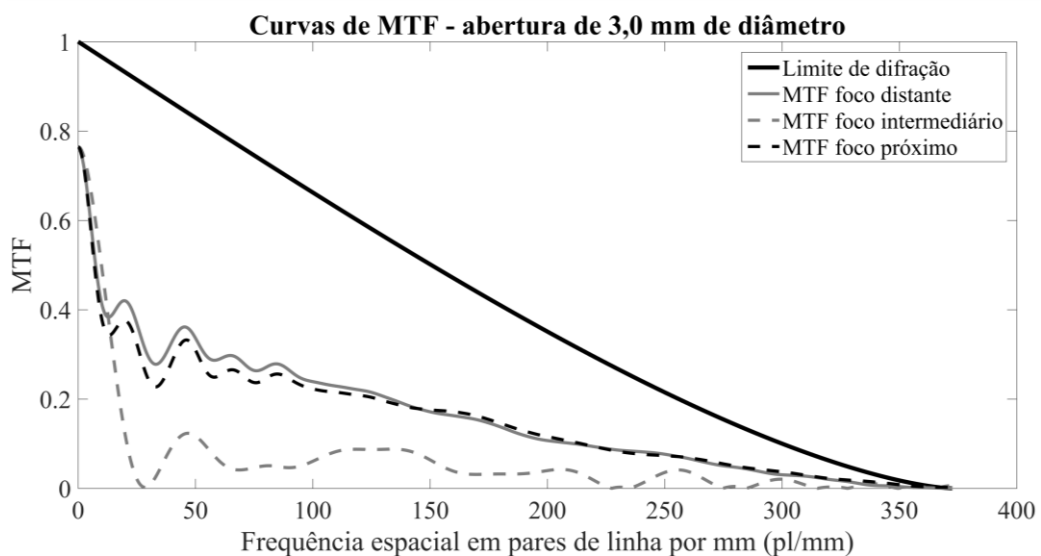


Figura 54- Curvas de MTF para 3,0 mm de abertura.

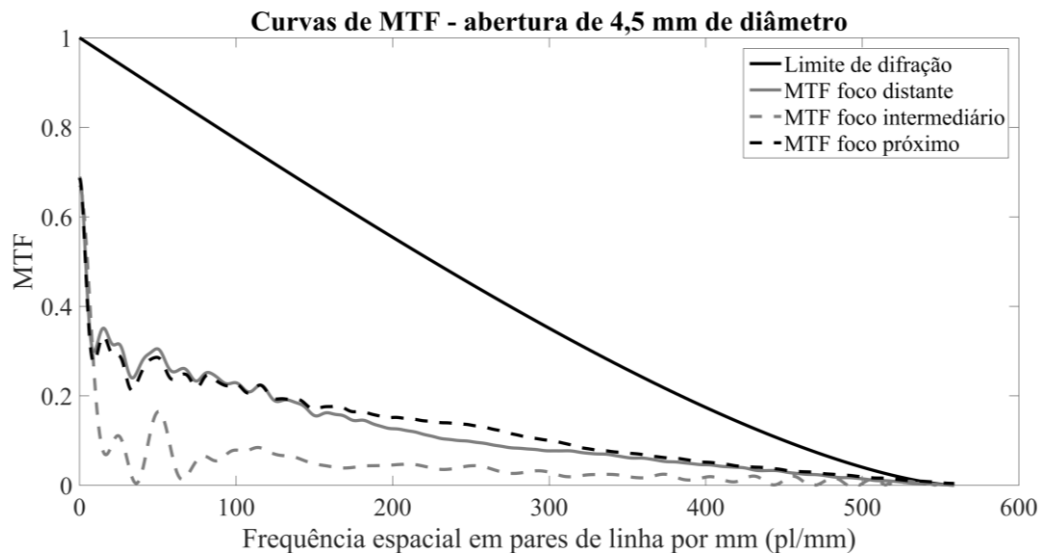


Figura 55 - Curvas de MTF para 4,5 mm de abertura.

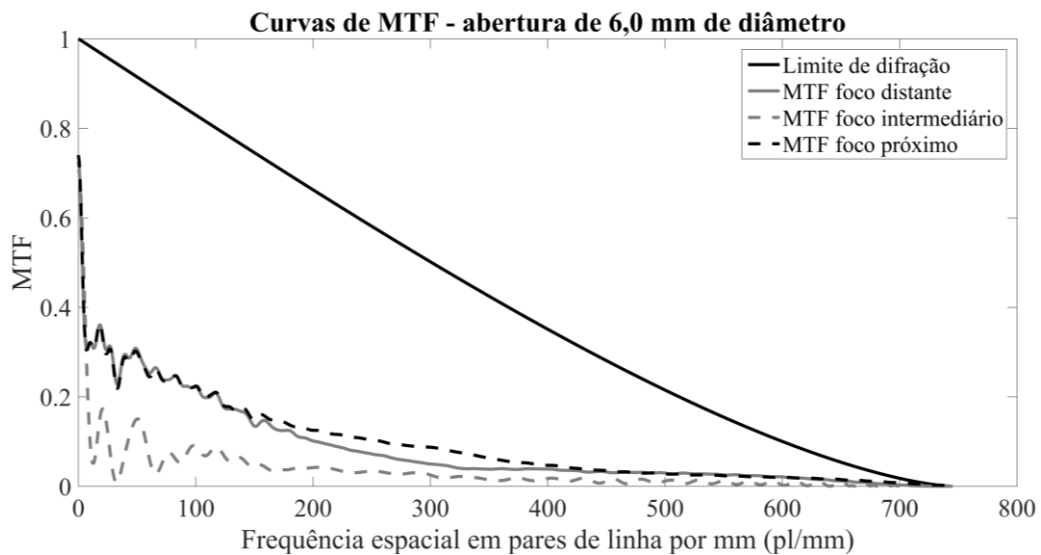


Figura 56 - Curvas de MTF para 6,0 mm de abertura.

Observa-se na Figura 54, Figura 55 e Figura 56, que as curvas de MTF para o foco distante e próximo apresentam um MTF maior que o MTF do foco intermediário, mas apresentam, entre si, um comportamento em que há maior superposição das curvas. Tal comportamento era esperado, afinal buscou-se durante a otimização uma qualidade óptica equivalente para os focos distante e próximo e um desempenho óptico menos significativo para o foco intermediário (tópico 3.3 da metodologia). Além disso, essa semelhança de comportamento das curvas de MTF para as diferentes aberturas demonstra a capacidade da LIOM proposta neste trabalho ser independente da abertura da pupila.

A Figura 57 apresenta o MTF *through focus* da LIOM proposta para as aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm de diâmetro.

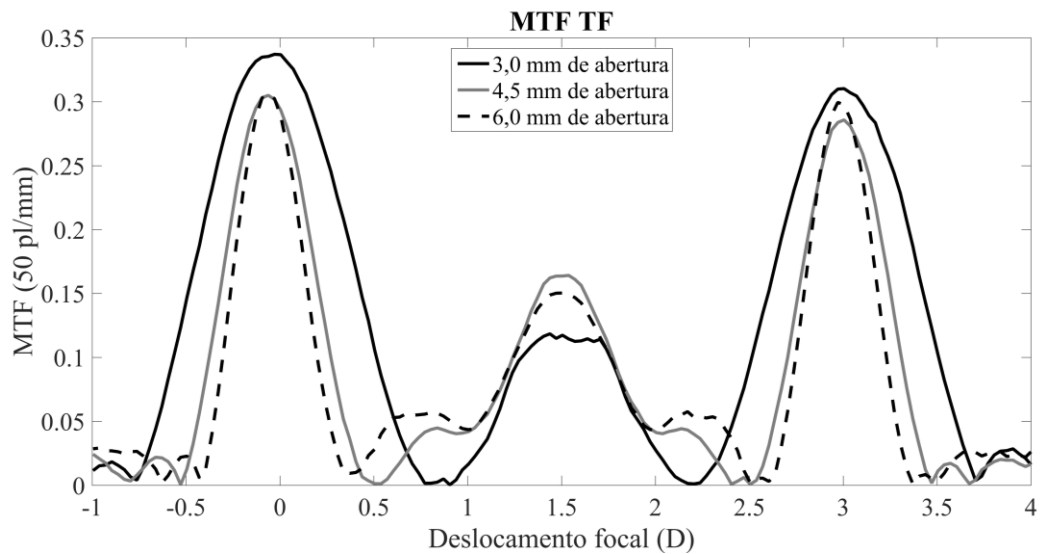


Figura 57 - MTF through focus para aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm de diâmetro.

Pela Figura 57 nota-se o comportamento trifocal da LIOM proposta devido à presença dos três picos de MTF. Em relação ao eixo das abscissas pode-se notar os valores da diopia adicional do foco intermediário (+1,5 D) e do foco próximo (+3,0 D) em relação à diopia base da LIO (0 D). Já em relação ao eixo das ordenadas percebe-se visualmente que o MTF para o foco distante e próximo apresentam valores semelhantes para as três aberturas simuladas e ambos os focos apresentam amplitudes de MTF superiores ao do foco intermediário.

Os valores de MTF de cada ponto focal e para cada uma das aberturas presentes na Figura 57 foram compilados no Quadro 12. Pelos valores apresentados no Quadro 12 nota-se que a razão entre o foco distante e o foco próximo foram: 1,09, 1,07 e 1,02 para as aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm respectivamente, ou seja, todas as razões se encontram próximas da unidade (Quadro 12). Apesar da amplitude do MTF do foco intermediário ser significativamente menor (em torno de 50% menor) que a amplitude dos MTFs dos focos distante e próximo, observa-se um ganho de MTF para esse foco quando se compara ao MTF de uma LIO bifocal na mesma posição focal. Além disso, como já era esperado, é possível notar uma profundidade de foco maior para aberturas menores em relação às aberturas maiores nos focos próximo e distante (ZALEVSKY, 2010). Tal efeito da variação da profundidade de foco com a abertura não é percebido sobre o MTF *through focus* do foco intermediário, pois, além de sua amplitude ser pequena em relação ao foco distante e próximo, a presença dos focos distante e próximo cria uma intensidade luminosa de fundo sobre o foco intermediário (conforme descrito no tópico 2.1.2).

Quadro 12 - Valores de MTF em cada foco para aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm.

Abertura	MTF foco distante	MTF foco intermediário	MTF foco próximo	Razão foco distante/próximo
3,0 mm	0,337	0,117	0,310	1,09
4,5 mm	0,305	0,164	0,286	1,07
6,0 mm	0,306	0,150	0,299	1,02

A Figura 58 apresenta distribuição da energia luminosa em cada ponto focal criado pela LIOM em função da abertura da pupila.

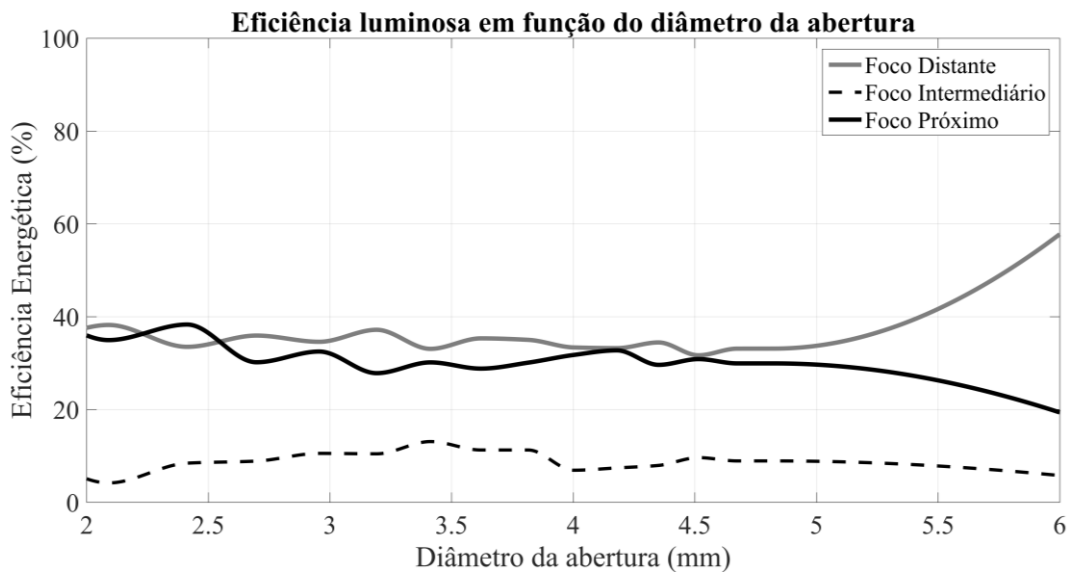


Figura 58- Eficiência energética da LIO trifocal em função da abertura.

Na Figura 58 o gráfico da distribuição luminosa da LIOM se inicia à partir de uma abertura de 2 mm de diâmetro, pois a pupila humana, em geral, não assume valores de abertura inferiores a este patamar (ATCHISON e SMITH, 2002). Observa-se que a distribuição de energia entre os focos distante e próximo segue um comportamento semelhante até uma abertura de, aproximadamente, 4,8 mm de diâmetro, que é a região limítrofe dos degraus difrativos da LIOM. A partir desse valor de abertura a lente apresenta apenas uma região com comportamento refrativo, que transmite toda a energia luminosa dessa região para o foco distante. Devido a isso, nota-se um aumento da eficiência para o foco distante e um decréscimo da eficiência dos outros dois focos (próximo e intermediário) para aberturas maiores que 4,8 mm. O foco intermediário apresenta uma eficiência inferior ao dos outros dois focos comprovando o comportamento do projeto proposto, que busca priorizar os focos distante e próximo, enquanto mantém uma eficiência residual para o foco intermediário.

Com o intuito de aprofundar a avaliação do desempenho óptico da LIOM proposta neste trabalho será realizado um comparativo do desempenho dela com duas LIOMs trifocais difrativas presentes no mercado: AT LISA TRI modelo 839 MP do fabricante Zeiss e Fine

Vision modelo Micro F do fabricante PhysIOL. A lente 839 MP trata-se de uma LIO trifocal difrativa com dioptria adicional de + 3,33 D para o foco próximo e + 1,66 D para o foco intermediário (SON *et al.*, 2017). A lente Micro F é, também, uma LIO trifocal difrativa, mas com um adicional de + 3,5 D para o foco próximo e + 1,75 D para o foco intermediário (GATINEL, 2017). A Figura 59 e Figura 60 apresentam os valores de MTF em cada um dos focos criados pelas LIOMs em comparação, considerando uma frequência espacial de 50 pl/mm e aberturas de 3,0 mm e 4,5 mm de diâmetro respectivamente.

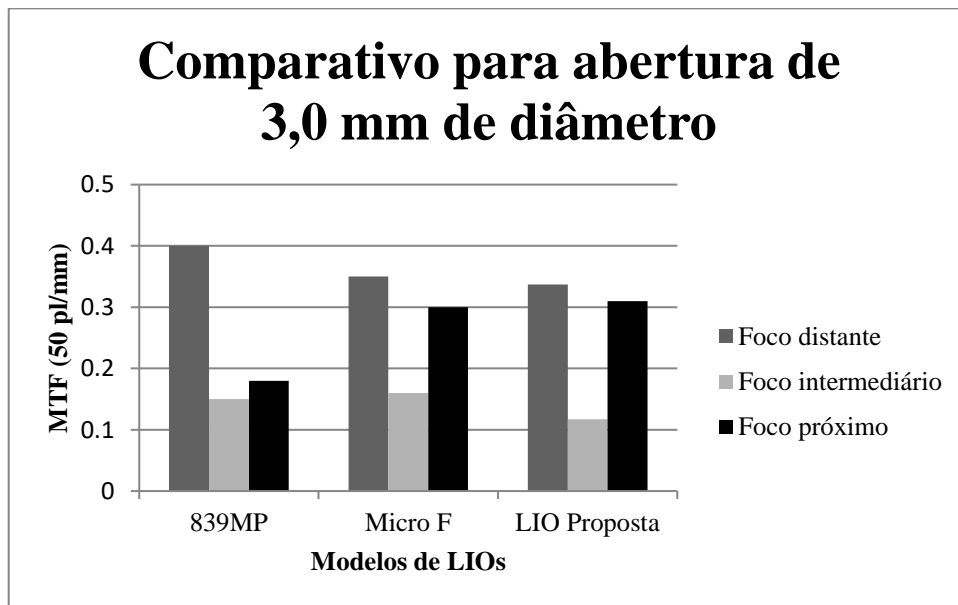


Figura 59 - Comparativa entre as LIOS AT LISA TRI modelo 839 MP, Fine Vision modelo Micro F e LIO proposta para abertura de 3,0 mm de diâmetro.

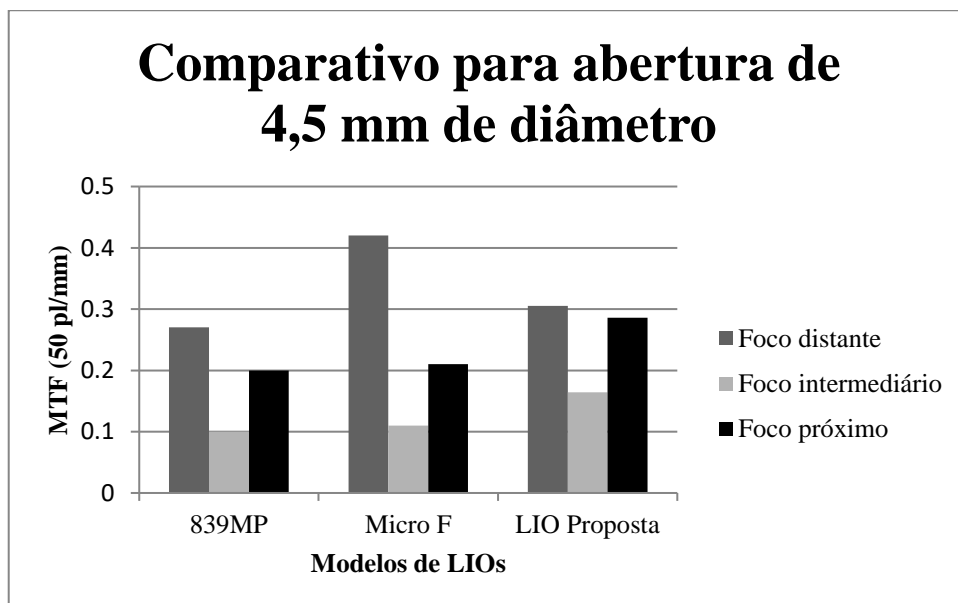


Figura 60 - Comparativa entre as LIOS AT LISA TRI modelo 839 MP, Fine Vision modelo Micro F e LIO proposta para abertura de 4,5 mm de diâmetro.

Pela Figura 59 pode-se notar que a LIOM proposta apresenta um MTF para o foco intermediário e distante inferior aos MTFs das outras duas LIOMs presentes no mercado. Entretanto, nota-se um MTF para o foco próximo superior ao das LIOMs em comparação. Tal resultado está diretamente relacionado ao propósito do projeto de cada LIOM, afinal buscou-se para a LIOM proposta um desempenho óptico equivalente para os focos distante e próximo, enquanto observa-se para as LIOs comercializadas uma priorização do foco distante em relação ao foco próximo.

Na Figura 60 nota-se um melhor desempenho da LIOM proposta em todos os focos em relação à lente 839 MP e um desempenho superior ao da lente Micro F para os focos intermediário e próximo. Observa-se uma semelhança entre as amplitudes de MTF para a LIOM proposta para ambas as aberturas consideradas, fato que indica a independência da pupila da lente. Já para a lente Fine Vision nota-se uma priorização ainda maior do foco distante com o aumento da abertura, fato resultante da apodização dos degraus da LIOM. A lente 839 MP apresentou uma redução dos seus valores de MTF para a abertura de 4,5 mm em relação ao seu desempenho para a abertura de 3,0 mm.

Em linhas gerais verifica-se que a LIOM proposta apresenta um desempenho óptico compatível com o desempenho de LIOMs trifocais presentes no mercado e em alguns casos (principalmente para a abertura de 4,5 mm de diâmetro) a LIO proposta apresentou um desempenho superior aos reportados pelas lentes comercializadas para os focos intermediário e próximo.

#### 4.2 ANÁLISE DE TOLERÂNCIAS

Os parâmetros construtivos resultantes do processo de otimização apresentados no Quadro 8, Quadro 10 e Quadro 11 referem-se ao projeto de uma LIO trifocal, que atende às especificações de qualidade óptica requeridas durante o processo de idealização e modelagem computacional. Entretanto, tais parâmetros não podem ser atendidos com máxima exatidão devido aos desvios do processo de manufatura da LIOM. Com o intuito de verificar o impacto do processo de fabricação no desempenho óptico final da LIOM é realizada uma análise de tolerâncias. Primeiramente é preciso determinar os desvios dos parâmetros construtivos da LIOM com base nas variações/desvios do processo produtivo. Será considerado neste trabalho um processo de fabricação de LIOMs baseado em tornos CNC. Dessa forma, considerando um modelo de torno comercialmente disponível no mercado apresenta-se no Quadro 13 seus desvios de fabricação (DAC, 2017).

Quadro 13 – Faixa de desvios nas dimensões de uma LIO fabricada por um torno CNC comercial.

<b>Raio de curvatura</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Sag</b>
$\pm 2,5 \mu\text{m}$	$\pm 5,0 \mu\text{m}$	$\pm 2,5 \mu\text{m}$

Com o intuito de encontrar o desvio da constante cônica, que está associado aos desvios apresentados no Quadro 13 pela relação matemática da Eq. (1) torna-se necessário o emprego da análise multidimensional de desvios dada pela Eq. (51) (tópico 3.4 da metodologia). Com base nos valores presentes no Quadro 13 e nas Eq. (51) à (53), obtém-se o valor do desvio da constante cônica da face anterior da LIO:  $\pm 1,836$ . Finalmente, considera-se o desvio relacionado à altura dos degraus difrativos, que terá impacto na eficiência luminosa de cada ponto focal da LIOM. Tal desvio foi definido na faixa de  $\pm 0,273 \mu\text{m}$  ( $\pm \lambda/2$ ) com base em valores típicos referentes à qualidade superficial de lentes presentes no mercado (FISCHER, TADIC-GALEB e YODER, 2008).

Uma vez determinado o intervalo de variação dos parâmetros construtivos da LIOM foi realizado a análise de tolerâncias com base no método de Monte Carlo, que consistiu na simulação de 100 modelos de LIOMs. Cada LIOM simulada apresenta uma variação combinada e aleatória seguindo uma distribuição normal de seus parâmetros construtivos com base nas faixas de desvios determinados previamente. As curvas de MTF de cada LIOM foram obtidas para as aberturas de 3,0 mm e 4,5 mm (aberturas recomendadas pela norma ISO 11979-9) (ISO, 2006b). Com o intuito de verificar o impacto clínico dos desvios de fabricação introduziu-se dois tipos de erros refrativos (miopia e hipermetropia) no modelo computacional da LIOM a título de comparação. Tal análise tem o objetivo de verificar se os desvios do processo de fabricação da LIOM implicarão, para o paciente submetido ao implante da lente, na necessidade de alguma correção visual por meio de óculos. A correção visual somente será necessária se o MTF da LIOM sob análise de tolerâncias decrescer para níveis semelhantes ou inferiores aos dos valores de MTF da LIOM sob efeito dos erros refrativos simulados, que serão considerados com base em dois valores: 0,25 D e 0,50 D. Caso a variação do MTF devido aos desvios de fabricação seja inferior à variação do MTF provocada pelo menor erro refrativo (0,25 D), tem-se que o processo de fabricação da LIO é robusto o suficiente para garantir uma qualidade óptica adequada ao paciente. Como a miopia compromete a visão distante dos pacientes e a hipermetropia compromete a visão próxima, cada uma delas será empregada para a avaliação do efeito do desvio no MTF dos focos distante e próximo respectivamente. No modelo computacional tal análise é modelada por meio de um deslocamento no plano focal de 0,25 D e 0,50 D em relação aos focos distante e próximo. Sendo que, para simular a miopia, o plano da imagem, que se encontra na posição da dioptria base (20 D), é deslocado para à esquerda

(em direção à córnea) e para simular a hipermetropia o plano de imagem, que se encontra na posição do adicional do foco próximo (23 D), é deslocado para à direita (se afastando da córnea).

A Figura 61 e Figura 62 apresentam a variação de MTF causado pelos desvios de fabricação (área hachurada em cinza) para o foco distante, a média da variação das curvas de MTF (curva sólida em preto), o MTF da LIO teórica otimizada (curva sólida em cinza) e os MTFs da LIOM teórica sob influência de miopia com magnitude de 0,25 D e 0,50 D (curvas tracejadas em cinza e preto, respectivamente).

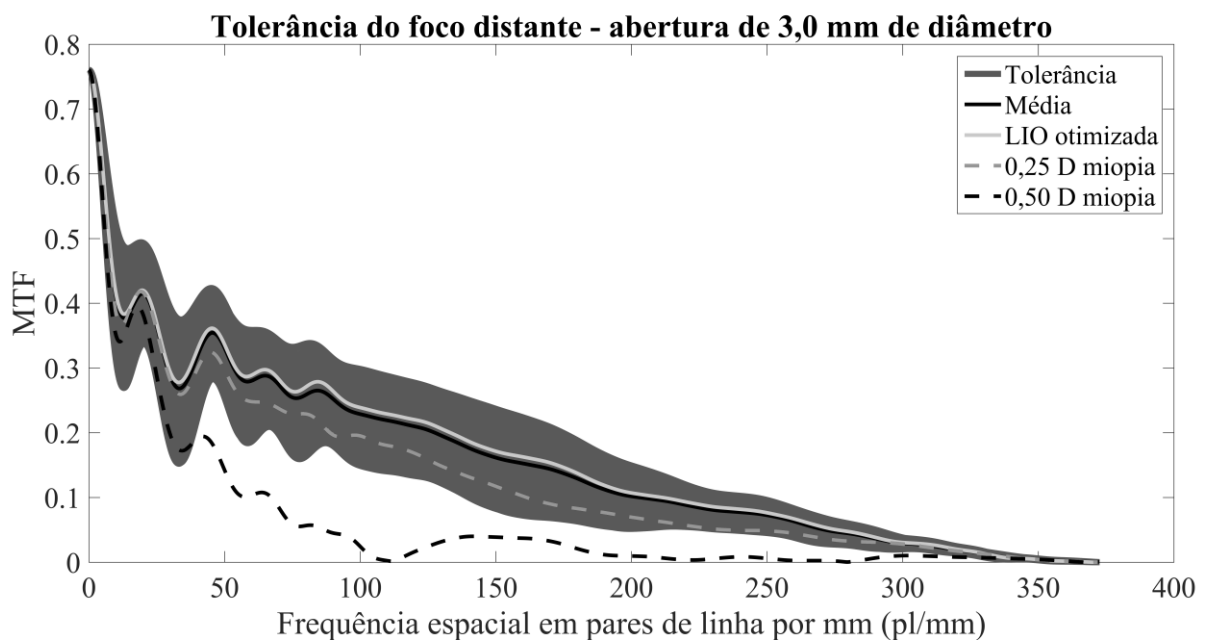


Figura 61 - Variação no MTF distante devido aos desvios de fabricação para uma abertura de 3 mm de diâmetro e MTF da LIO sob influência de miopia.

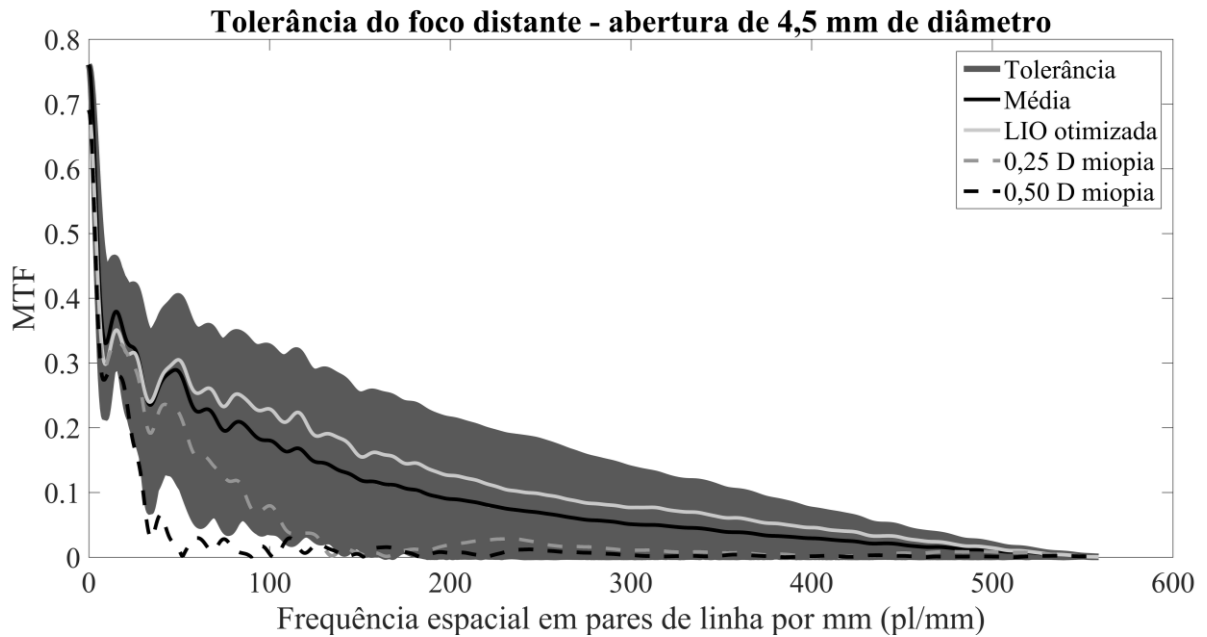


Figura 62 - Variação no MTF distante devido aos desvios de fabricação para uma abertura de 4,5 mm de diâmetro e MTF da LIO sob influência de miopia.

A Figura 63 e Figura 64 apresentam a variação de MTF causada pelos desvios de fabricação (área hachurada em cinza) para o foco próximo, a média da variação das curvas de MTF (curva sólida em preto), o MTF da LIOM teórica otimizada (curva sólida em cinza) e os MTFs da LIOM teórica sob influência de hipermetropia com magnitude de 0,25 D e 0,50 D (curvas tracejadas em cinza e preto, respectivamente).

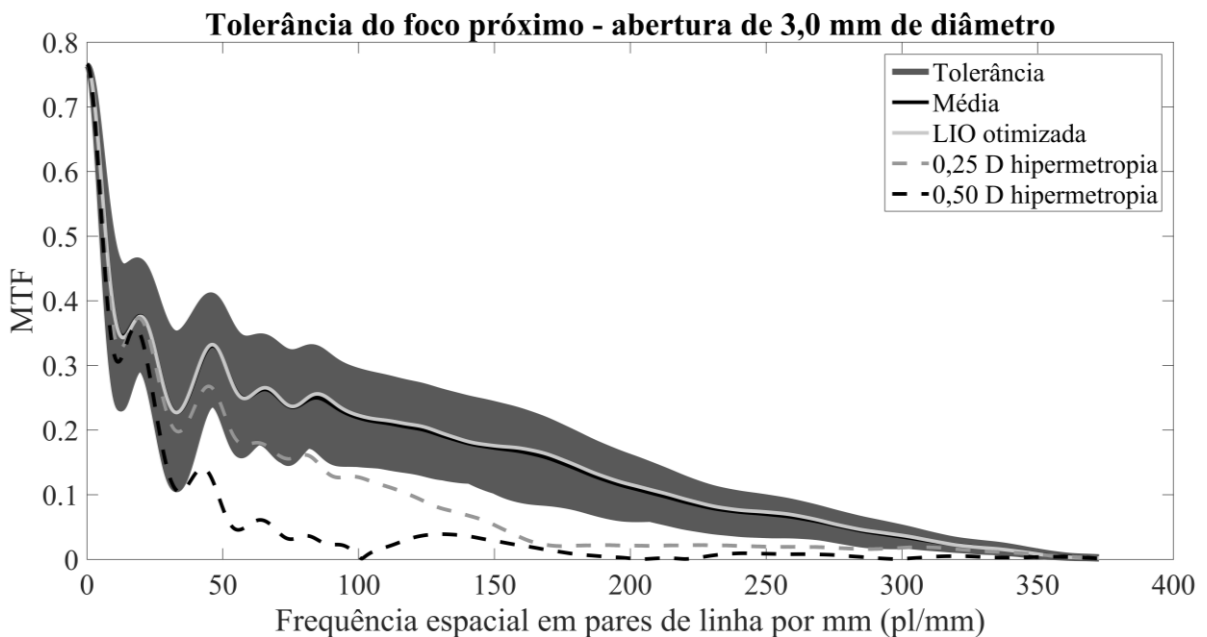


Figura 63 - Variação no MTF próximo devido aos desvios de fabricação para uma abertura de 3,0 mm de diâmetro e MTF da LIO sob influência de hipermetropia.

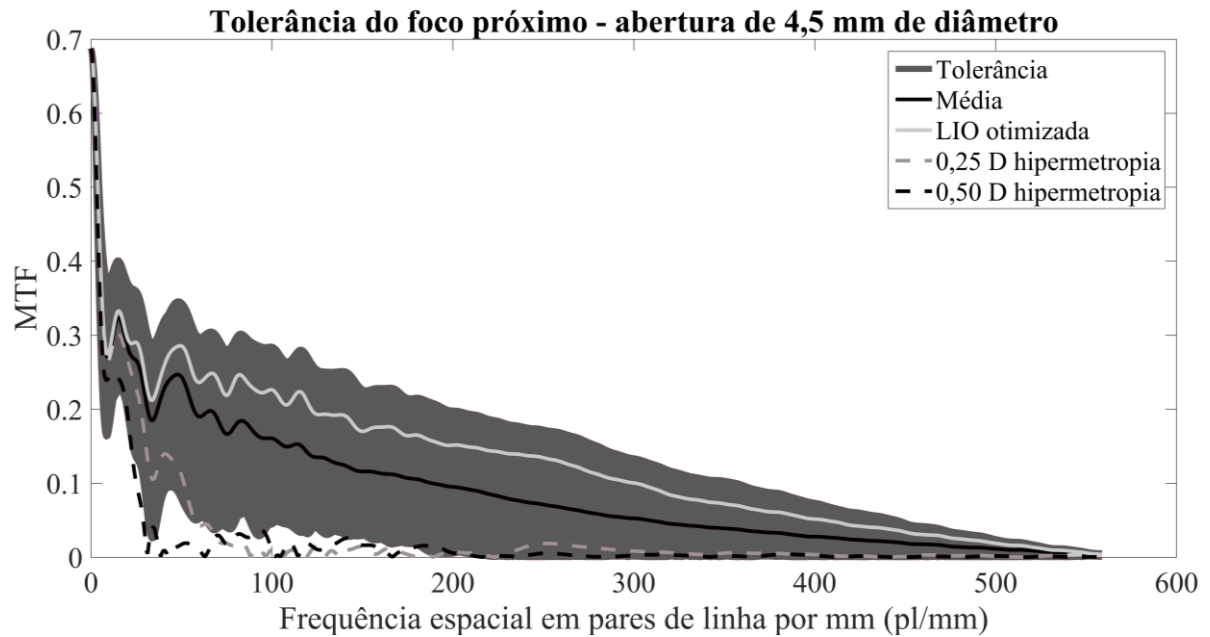


Figura 64 - Variação no MTF próximo devido aos desvios de fabricação para uma abertura de 4,5 mm de diâmetro e MTF da LIO sob influência de hipermetropia.

Analisando a Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64 nota-se que os desvios de fabricação provocam variações significativas na curva de MTF da LIOM em relação a sua curva de MTF teórica (curva em preto) e tais variações se tornam maiores com o aumento da abertura da pupila. Além disso, observa-se que quanto maior for a amplitude do erro refrativo (seja miopia ou hipermetropia) pior se torna o MTF do foco em questão. Ainda em relação às curvas de MTF referentes à análise de tolerâncias, observa-se que a média dos MTFs (curva sólida em preto) está bem próxima do valor teórico para uma abertura de 3,0 mm e se encontra abaixo da curva teórica para uma abertura de 4,5 mm, o que indica uma degradação do MTF com o aumento da abertura da pupila. Entretanto, verifica-se que a média dos MTFs para ambas as aberturas (3,0 mm e 4,5 mm) e ambos os focos (distante e próximo) se encontra acima da curva de MTF para ambos os erros refrativos (miopia e hipermetropia) de 0,25 D. Tal resultado indica que o impacto dos desvios de fabricação sobre as LIOMs com esse desempenho não afetaria clinicamente um paciente, pois 0,25 D é a menor fração de correção visual prescrita para óculos. Ainda assim, em menor proporção, verifica-se que, em seu pior caso, os desvios de fabricação resultam em LIOMs com curvas de MTF próximas das curvas de MTF dos erros refrativos simulados. Para tais LIOMs haveria a necessidade de correção refrativa por meio de óculos cujo valor máximo de correção seria de 0,5 D.

### 4.3 RESULTADOS DE FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO DA LIOM PROPOSTA

O protótipo da LIO proposta, almejando uma dioptria base de 20 D e dioptrias adicionais de 1,5 D e 3,0 D, foi fabricado (Figura 65) em um torno do fabricante DAC International modelo ALM (DAC, 2017) e seu desempenho óptico foi avaliado através do instrumento de medição OptiSpheric IOL R&D do fabricante Trioptics (TRIOPTICS, 2018). O equipamento OptiSpheric permite a avaliação da qualidade óptica de LIOs monofocais e multifocais de acordo com o modelo de olho proposto pela norma ISO 11979 (ISO, 1999). No total, foram fabricadas quatro LIOs e os resultados se referem à última LIO fabricada, pois, dentre as demais, foi a lente que apresentou resultados mais próximos dos valores de projeto. A fabricação foi realizada logo após os ajustes da ferramenta de corte e foi utilizado um único torno.

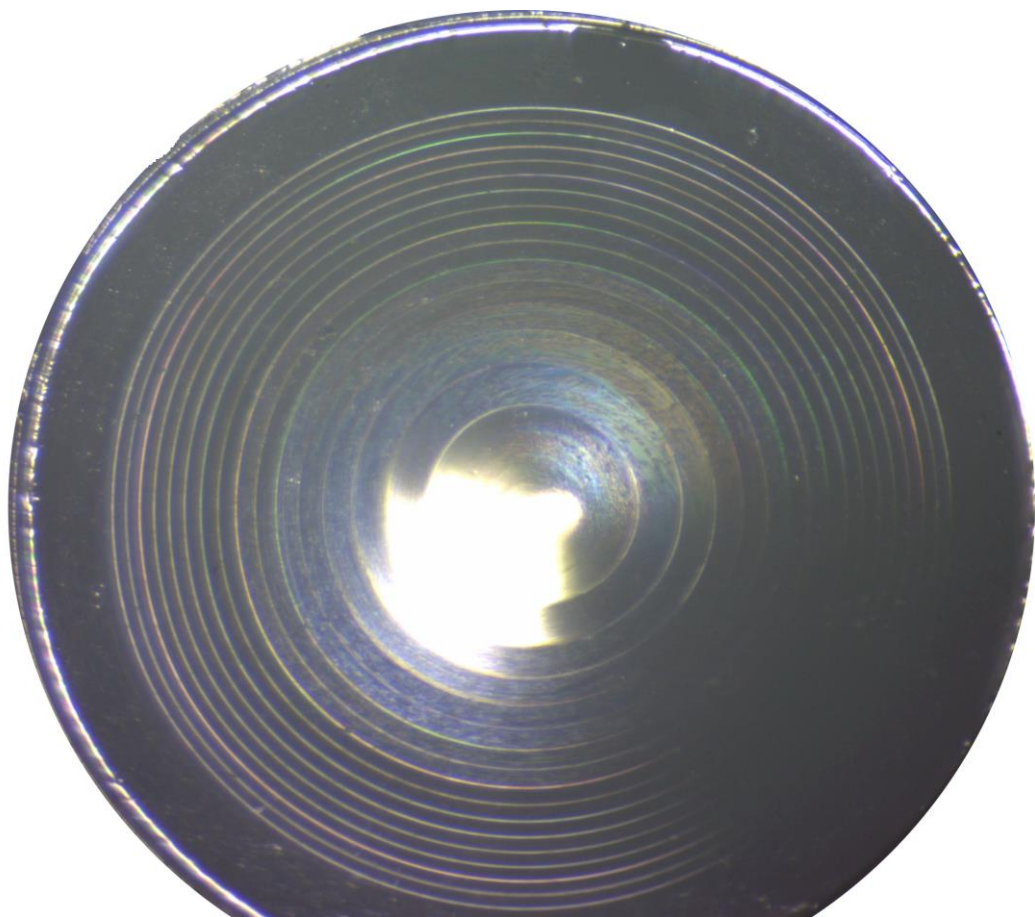


Figura 65 - Imagem da superfície difrativa do protótipo fabricado.

A capacidade do torno em fabricar os degraus difrativos com a exatidão necessária em relação às alturas de projeto foi avaliada através de perfilometria de contato. Para isso, a superfície difrativa da LIO proposta foi fabricada, também, em material PMMA

(polimetilmetacrilato), pois a matéria prima do protótipo é hidrofílica e, portanto, a ponta de contato do perfilômetro iria perfurar tal material. O perfilômetro empregado é do fabricante Taylor Hobson e seu modelo é o Intra 2 (HOBSON, 2016). A ponta de contato do perfilômetro possui um raio de 2  $\mu\text{m}$  e uma resolução vertical de 16 nm (HOBSON, 2016). A Figura 66 apresenta o resultado da perfilometria após a remoção da curva base ( $R = -14,96 \text{ mm}$ ). Qualitativamente, é possível notar que os degraus seguem o mesmo padrão de projeto apresentado no Quadro 10, ou seja, a altura do primeiro degrau é maior que a do segundo, que também é menor que a do terceiro, enfim, segue a mesma ordem do projeto. O Quadro 14 apresenta os valores medidos da perfilometria dos 6 primeiros degraus e estes são comparados com os degraus de projeto (transcritos na segunda linha do Quadro 14). É possível notar pelo Quadro 14, que os valores de projeto se encontram próximos do que foi fabricado (erro máximo  $< 3\%$ ). Tal resultado comprova a exatidão do torno em reproduzir os degraus difrativos de projeto. Além disso, essa estreita faixa de variação entre os valores de projeto e perfilometria corresponderão a uma variação mais estreita de curvas de MTF para o protótipo em relação às curvas de tolerâncias simuladas (Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64).

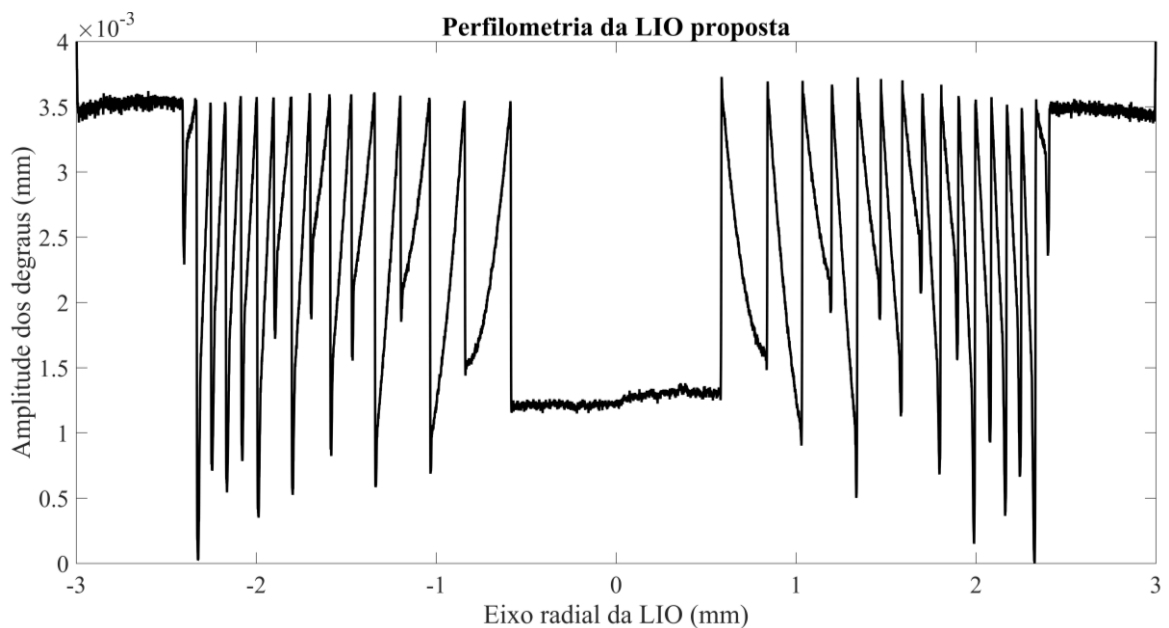


Figura 66 - Perfil da rede difrativa da LIO proposta após remoção da curva base.

Quadro 14 – Altura dos 6 primeiros degraus da rede difrativa medidos a partir da perfilometria.

Degraus	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>
Projeto	2,387 $\mu\text{m}$	2,067 $\mu\text{m}$	2,696 $\mu\text{m}$	1,545 $\mu\text{m}$	2,807 $\mu\text{m}$	1,576 $\mu\text{m}$
Medido	2,398 $\mu\text{m}$	2,121 $\mu\text{m}$	2,647 $\mu\text{m}$	1,590 $\mu\text{m}$	2,815 $\mu\text{m}$	1,577 $\mu\text{m}$
Variação	0,46%	2,61%	1,82%	2,91%	0,29%	0,063%

Com o intuito de avaliar comparativamente o desempenho óptico da LIO proposta com as principais lentes presentes no mercado foram realizadas, também, medições das seguintes LIOs:

- LIO bifocal difrativa apodizada Acrysoft Restor modelo SN6AD1 (14,5 D dioptria base e +3 D adicional) do fabricante Alcon/Novartis;
- LIO trifocal difrativa apodizada FineVision modelo Micro F (15,0 D dioptria base e +1,75 D/+3,5 D adicionais) do fabricante PhysIOL;
- LIO trifocal difrativa AT LISA TRI modelo 839 MP (20,0 D dioptria base e +1,66 D/+3,33 D adicionais) do fabricante Zeiss;
- LIO trifocal difrativa PanOptix Acrysoft IQ modelo TFNT00 (20,0 D dioptria base e +2,2 D/+3,2 D adicionais) do fabricante Alcon/Novartis.

Os valores medidos de dioptria e adicionais do protótipo da LIO proposta, em conjunto com os desvios percentuais em relação ao projeto, são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 – Medidas da dioptria base e dos adicionais da LIO proposta e seus respectivos desvios percentuais.

Dioptria base	Desvio Dioptria base	Dioptria adicional foco intermediário	Desvio adicional intermediário	Dioptria adicional foco próximo	Desvio adicional próximo
20,053 D	0,265%	+1,599 D	6,600%	+3,006 D	0,200%

Pode-se notar pelo Quadro 15, que os valores de dioptria medidos encontram-se próximos dos valores teóricos: 20 D, +1,5D e +3,0 D. Tais resultados evidenciam a precisão do torno em relação ao formato das curvas da LIO (que afetam diretamente o poder dióptrico base) e em relação às posições  $r_n$  das transições dos degraus difrativos (que afetam diretamente o poder dióptrico adicional). Além disso, a diferença entre os valores teórico e medido encontra-se dentro da faixa de tolerâncias estabelecida pela norma ISO 11979-9, que é de  $\pm 0,4$  D para a dioptria base,  $\pm 0,3$  D para o foco intermediário e  $\pm 0,4$  D para o foco próximo (ISO, 2006b).

As curvas de MTF *through focus* medidas para a LIO proposta juntamente com as lentes comercializadas citadas anteriormente estão apresentadas na Figura 67, Figura 68 e Figura 69 para as aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm de diâmetro respectivamente.

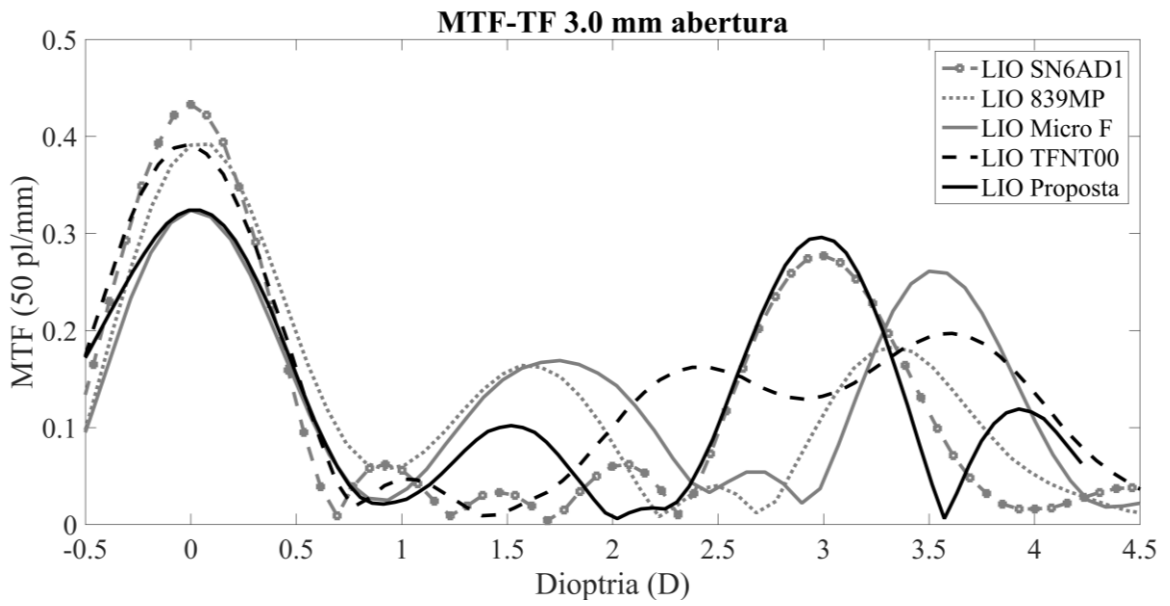


Figura 67 – MTF TF da LIO proposta e LIOs presentes no mercado para 3,0 mm de abertura.

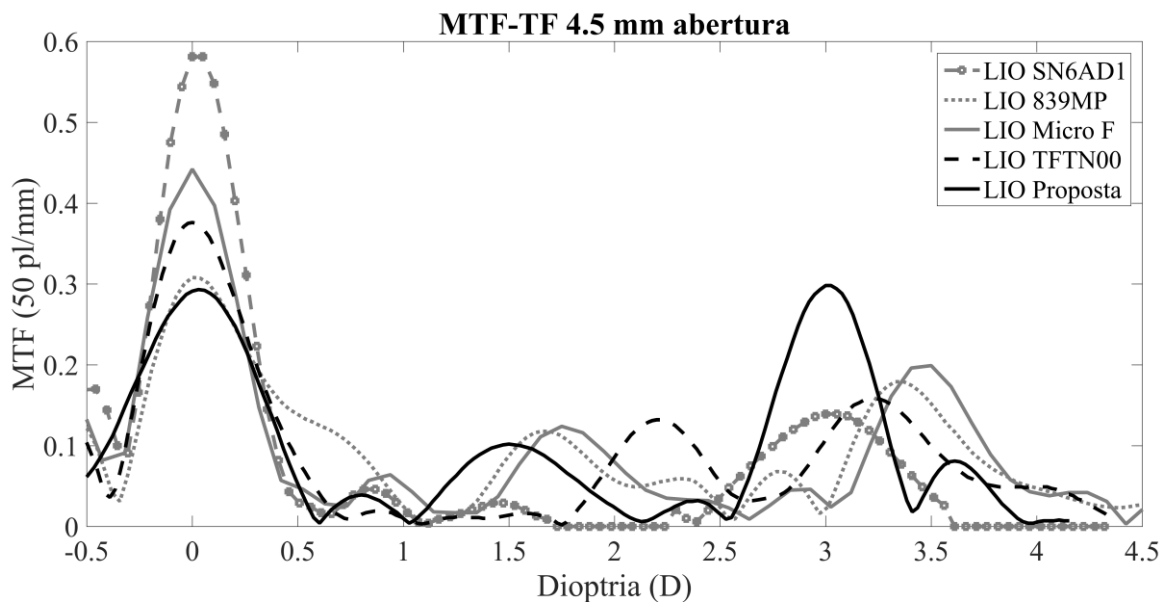


Figura 68 - MTF TF da LIO proposta e LIOs presentes no mercado para 4,5 mm de abertura.

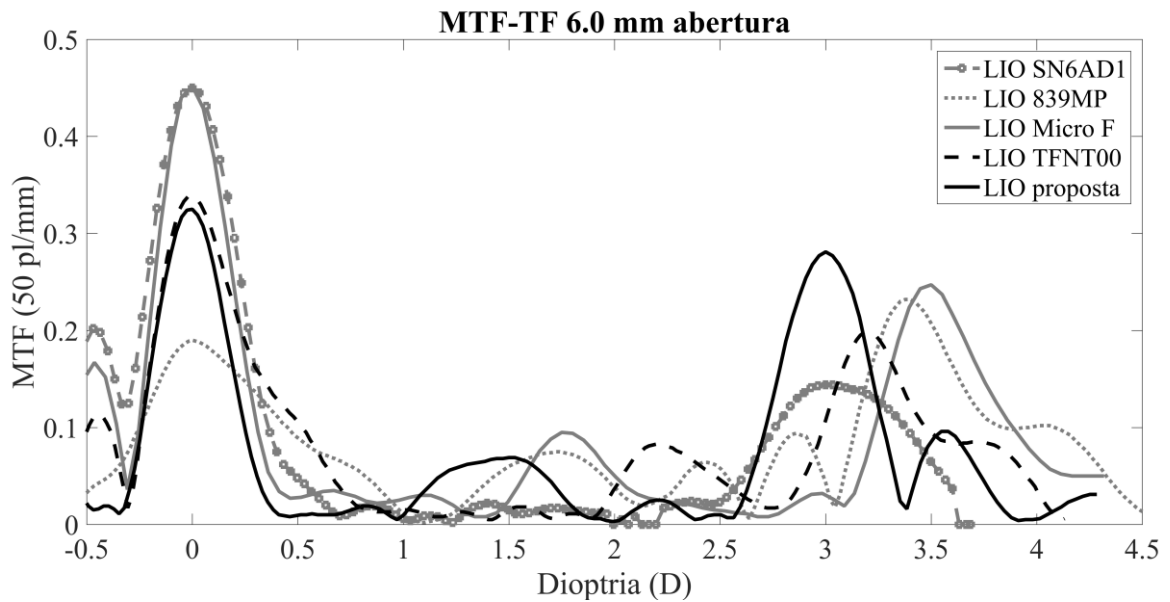


Figura 69 - MTF TF da LIO proposta e LIOs presentes no mercado para 6,0 mm de abertura.

Os valores de pico do MTF *through focus* para cada um dos focos principais criados pelas LIOs representadas na Figura 67, Figura 68 e Figura 69 encontram-se no Quadro 16 e estão representados graficamente na Figura 70. Ao lado de cada valor de MTF do Quadro 16 se encontra o poder dióptrico em que o pico do MTF foi medido.

Quadro 16 – Valores de pico do MTF TF para a LIO proposta e LIOs presentes no mercado e suas respectivas posições focais.

Abertura 3,0 mm	SN6AD1	839MP	Micro F	TFNT00	LIO Proposta
Foco distante	0,433/ 14,50 D	0,392/ 20,00 D	0,324/ 15,00 D	0,392/ 20,00 D	0,324/ 20,00D
Foco intermediário	N.A.	0,164/ 21,66 D	0,169/ 16,75 D	0,162/ 22,20 D	0,102/ 21,50 D
Foco próximo	0,277/ 17,50 D	0,183/ 23,33 D	0,261/ 18,50 D	0,197/ 23,20 D	0,296/ 23,00 D
Abertura 4,5 mm	SN6AD1	839MP	Micro F	TFNT00	LIO Proposta
Foco distante	0,581/ 14,50 D	0,308/ 20,00 D	0,442/ 15,00 D	0,376/ 20,00 D	0,293/ 20,00 D
Foco intermediário	N.A.	0,118/ 21,66 D	0,124/ 16,75 D	0,132/ 22,20 D	0,102/ 21,50 D
Foco próximo	0,139/ 17,50 D	0,179/ 23,33 D	0,199/ 18,50 D	0,158/ 23,20 D	0,298/ 23,00 D
Abertura 6,0 mm	SN6AD1	839MP	Micro F	TFNT00	LIO Proposta
Foco distante	0,450/ 14,50 D	0,190/ 20,00 D	0,452/ 15,00 D	0,339/ 20,00 D	0,325/ 20,00 D
Foco intermediário	N.A.	0,075/ 21,66 D	0,095/ 16,75 D	0,083/ 22,20 D	0,069/ 21,50 D
Foco próximo	0,144/ 17,50 D	0,232/ 23,33 D	0,247/ 18,50 D	0,199/ 23,20 D	0,281/ 23,00 D

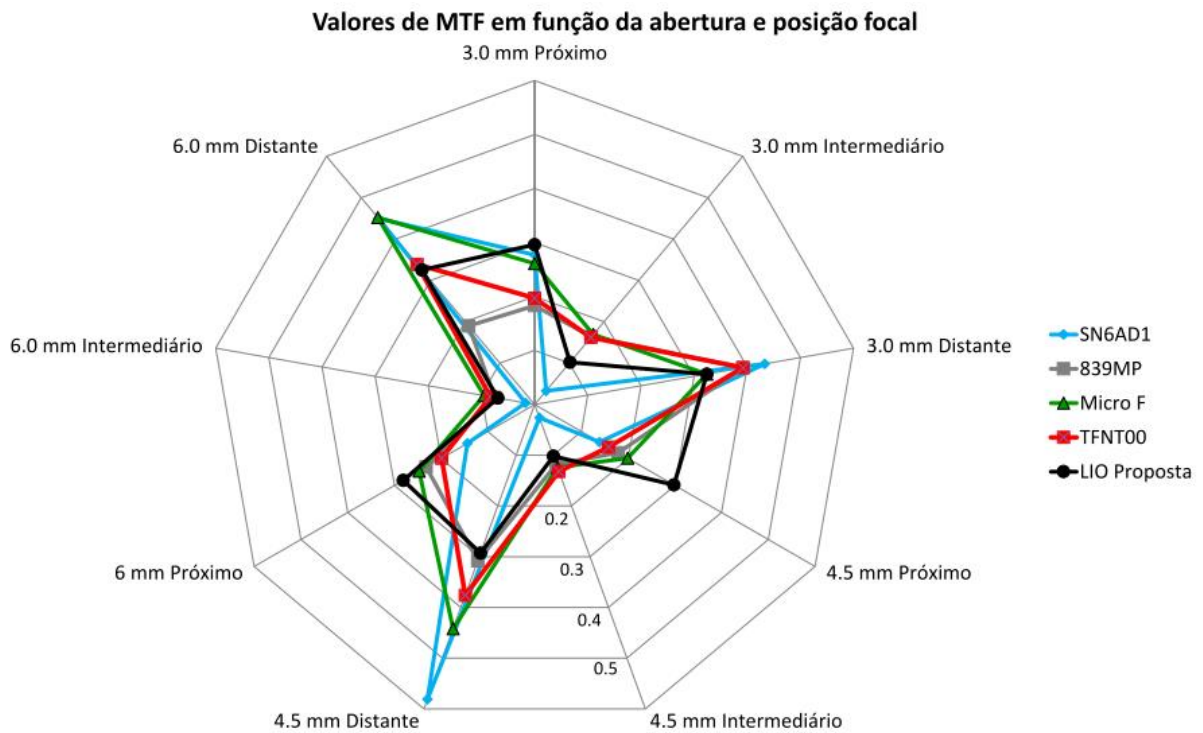


Figura 70 - Gráfico dos valores de pico de MTF para todos os focos e aberturas medidos.

Pelo Quadro 16 e Figura 70 é possível notar quantitativamente através dos valores de pico do MTF TF, que a LIO proposta apresentou, conforme esperado pelo projeto e pelos resultados simulados, uma razão entre os focos distante e próximo em torno da unidade para todas as aberturas medidas. Tal comportamento demonstra a independência da LIO proposta em relação à abertura da pupila. Além disso, nota-se que para 3 mm de abertura os valores de MTF medidos estão próximos dos valores simulados (Figura 57), mas à medida que a abertura da pupila aumenta a diferença entre os valores medidos e simulados se torna maior. Tal comportamento era esperado, pois através da análise de tolerâncias pode-se perceber que o aumento da abertura implica em uma maior variação na curva de MTF em relação a sua curva de MTF de projeto.

Para 3,0 mm de abertura pode-se notar que a LIO proposta apresentou o menor valor de MTF para o foco distante e intermediário em relação a quase todas as lentes comercializadas (com exceção da LIOM Micro F para o foco distante), mas apresentou o maior valor de MTF para o foco próximo. Entretanto, para 4,5 mm de abertura o MTF do foco intermediário da LIO proposta se aproxima dos valores encontrados para as lentes comercializadas (mas ainda assim é inferior aos das LIOs comercializadas trifocais), o foco distante continua com um valor inferior e o foco próximo apresenta um desempenho superior ao das lentes presentes no mercado. Já para 6,0 mm de abertura o MTF do foco distante é inferior ao MTF de 3 das 4 LIOs

comercializadas (SN6AD1, TFNT00 e Micro F), o MTF do foco intermediário é inferior ao MTF das LIOs comercializadas trifocais e o MTF do foco próximo é superior ao de todas as LIOs presentes no mercado. Convém destacar que a LIO proposta apresentou valores de MTF a 6,0 mm de abertura superior ao da LIO 839 MP para os focos distante e próximo e um MTF para o foco intermediário ligeiramente inferior (menor que 8%).

O fato do MTF do foco distante da LIO proposta ser inferior ao das lentes comercializadas com rede difrativa apodizada (SN6AD1 e Micro F) para 4,5 mm e 6,0 mm de abertura era esperado, pois tais lentes buscam priorizar o MTF do foco distante em detrimento do MTF do foco próximo à medida que a abertura da pupila aumenta. É devido a este mesmo motivo que o MTF do foco próximo da LIO proposta foi superior ao das LIOs presentes no mercado para tais aberturas. Além disso, é possível notar nos gráficos de MTF *through focus* (Figura 67, Figura 68 e Figura 69) um pico de MTF da mesma ordem de amplitude do MTF do foco intermediário após o adicional de +3 D (entre +3 D e +4 D). Suspeita-se que a presença de tal pico de MTF seja resultante de artefatos presentes na medição, afinal não é possível notar este pico de MTF nos gráficos de simulação do modelo da lente. A possibilidade de ser um foco criado pelas outras ordens difrativas da lente também pode ser descartada, pois somente seria factível se o pico de MTF ocorresse em um adicional equidistante dos outros focos devido à equação do adicional. Além disso, é possível observar tais artefatos nas outras medições das LIOs comercializadas.

Em relação às curvas de MTF TF da LIO proposta simulada e do protótipo fabricado é apresentado na Figura 71, Figura 72 e Figura 73 um comparativo para as aberturas de 3,0 mm, 4,5 mm e 6,0 mm. É possível observar que os valores de MTF TF para 3,0 mm de abertura se encontram próximos devido à exatidão garantida pelo torno e devido, também, à menor abertura. Entretanto, assim como foi destacado anteriormente e visualizado nas simulações de análise de tolerâncias, à medida que a abertura aumenta, maior se torna o desvio entre as curvas de projeto e aquelas do protótipo fabricado.

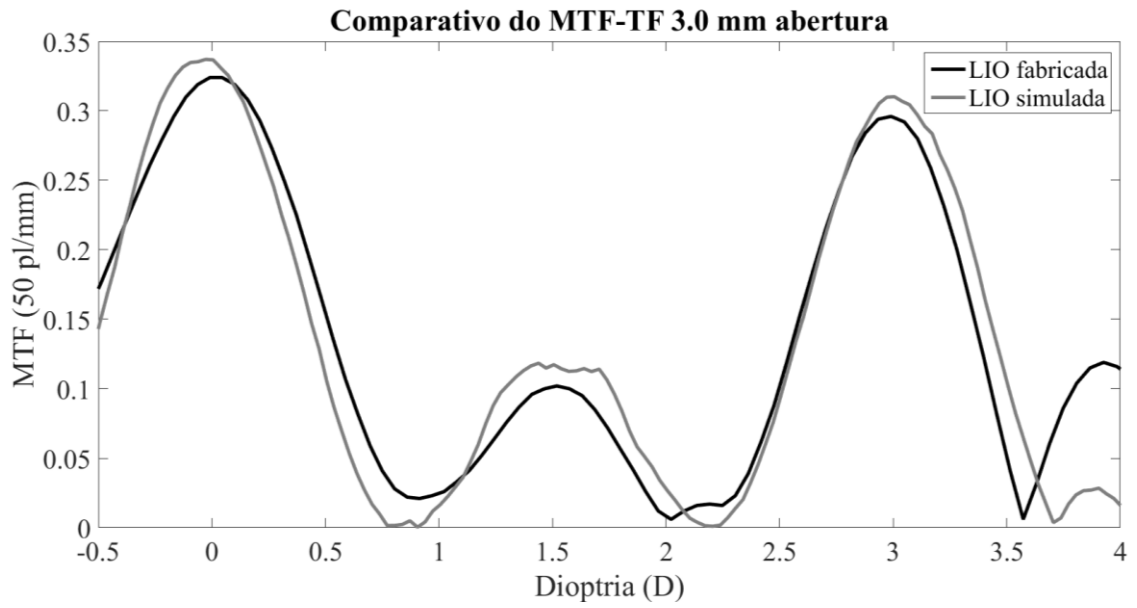


Figura 71 – Comparativo do MTF TF da LIO simulada e do protótipo para 3,0 mm de abertura.

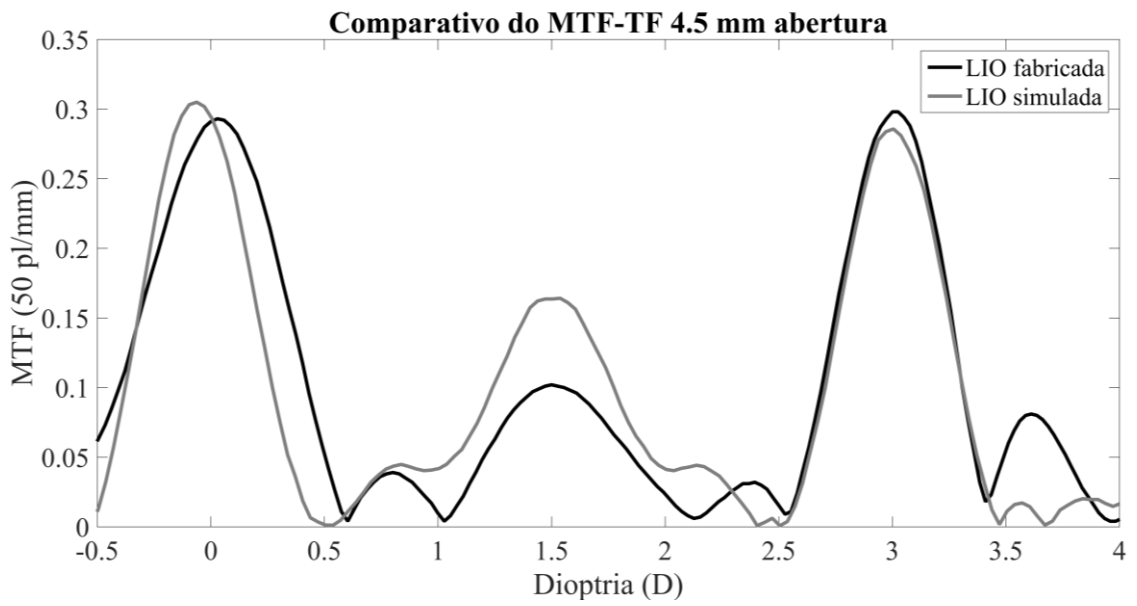


Figura 72 - Comparativo do MTF TF da LIO simulada e do protótipo para 4,5 mm de abertura.

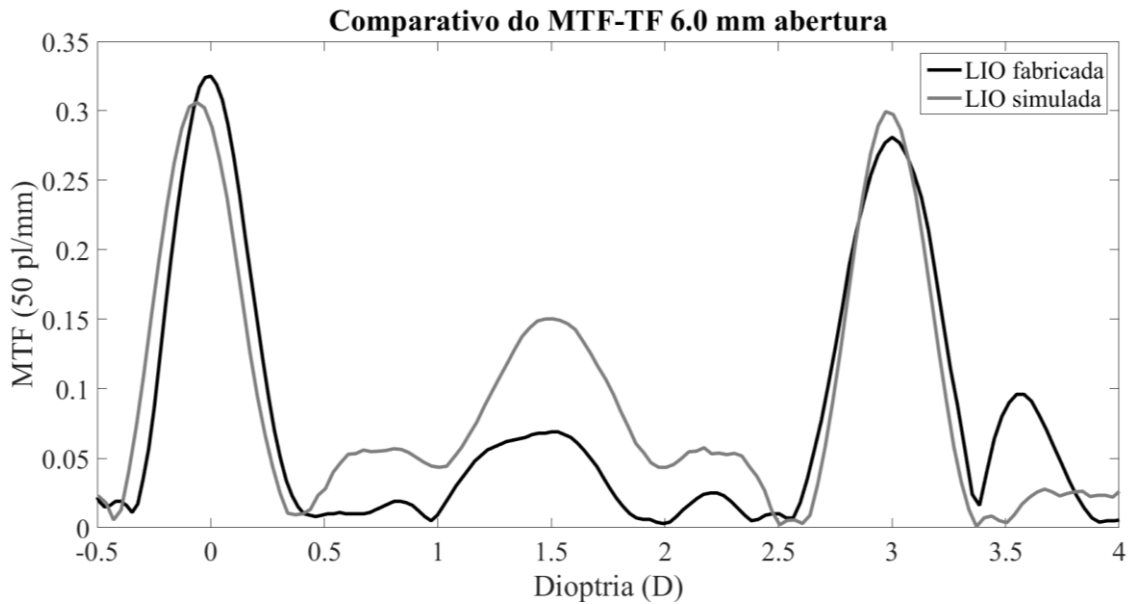
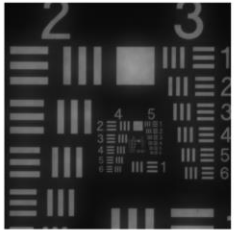
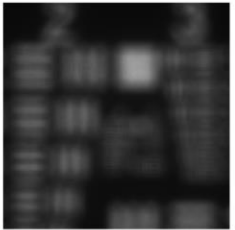
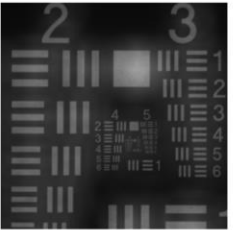
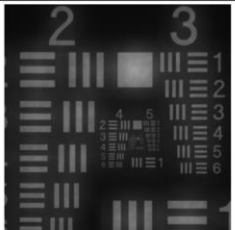
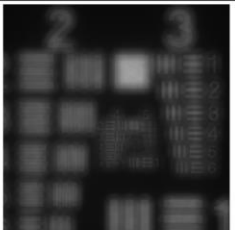
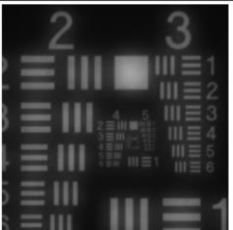
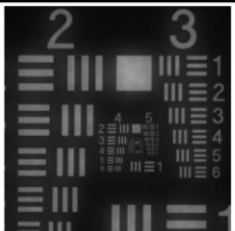
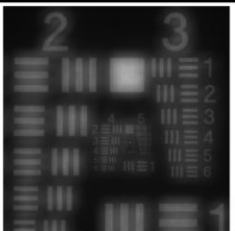
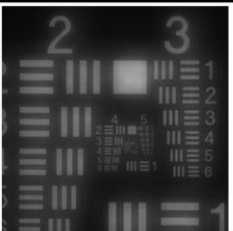
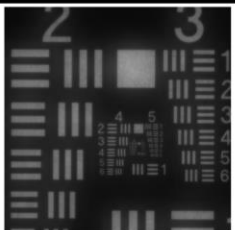
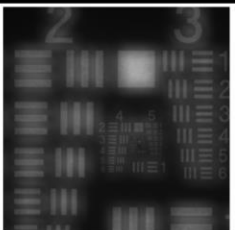
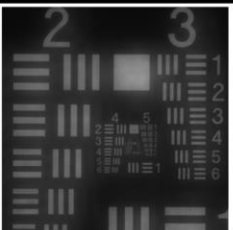
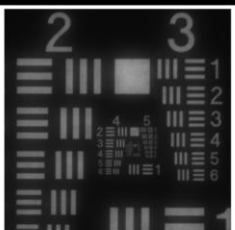
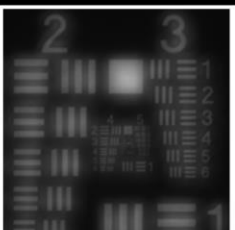
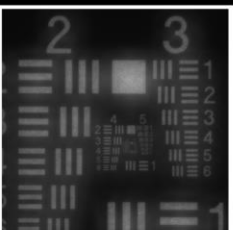


Figura 73 - Comparativo do MTF TF da LIO simulada e do protótipo para 6,0 mm de abertura.

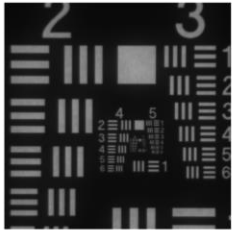
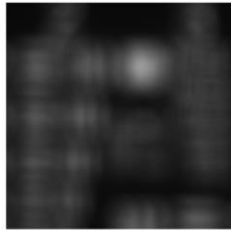
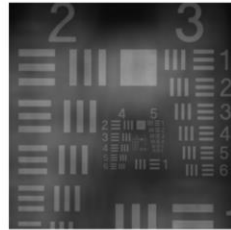
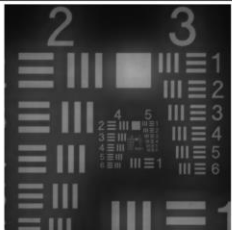
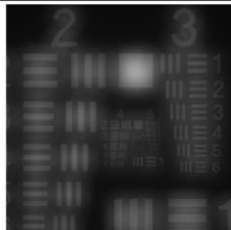
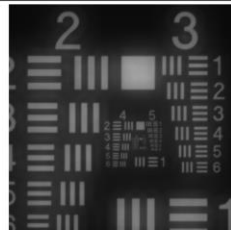
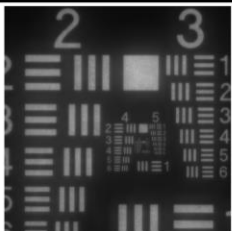
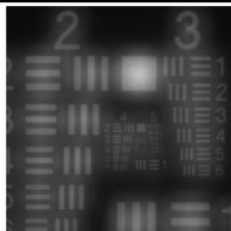
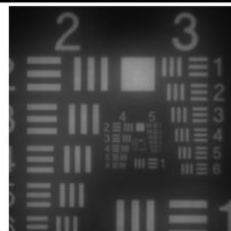
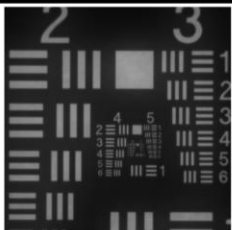
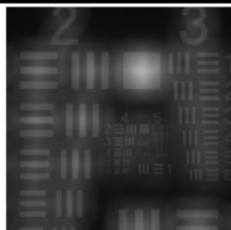
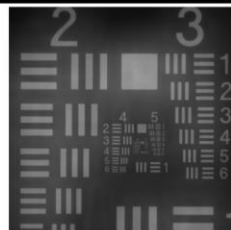
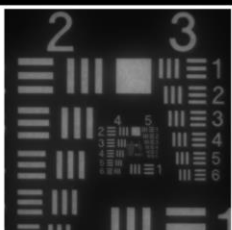
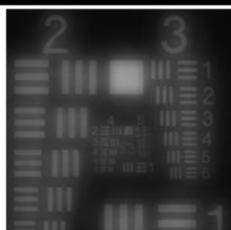
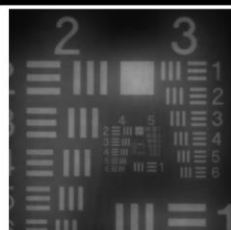
As diferenças observadas nos valores de MTF de cada foco criado pela LIO proposta e as LIOs comercializadas permitem avaliar comparativamente o desempenho de cada LIO em cada um dos focos criados. Entretanto, tal informação não apresenta elementos que permitam ao usuário a percepção do impacto dessas diferenças em sua visão. Devido a isso, foram realizadas medições das imagens formadas por cada LIO em seus focos principais (distante, intermediário e próximo), a fim de se avaliar qualitativamente as diferenças de desempenho óptico.

O Quadro 17, Quadro 18 e Quadro 19 apresentam as imagens formadas em cada foco criado pela LIO proposta e das LIOs comercializadas a partir de um objeto padrão (imagem USAF (PYSEROPTICS, 2019)).

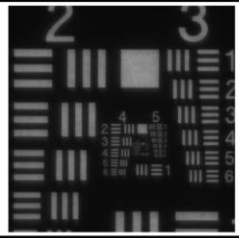
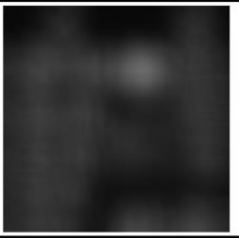
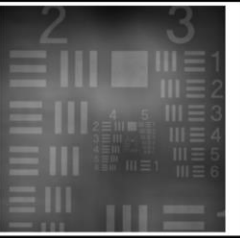
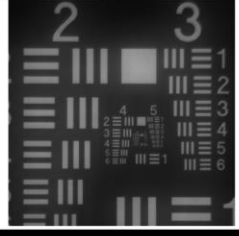
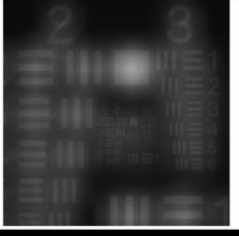
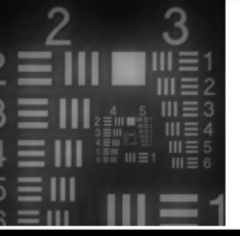
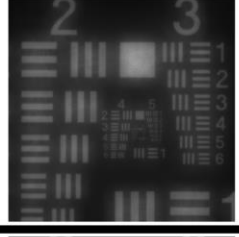
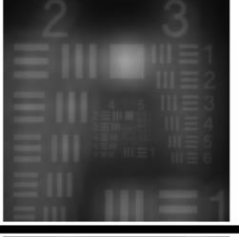
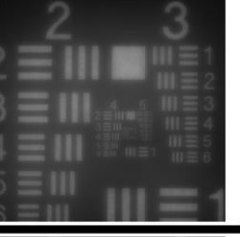
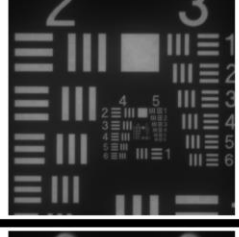
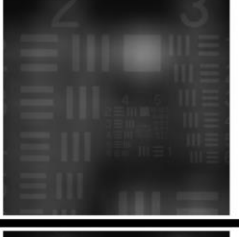
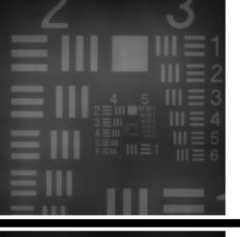
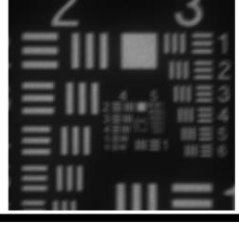
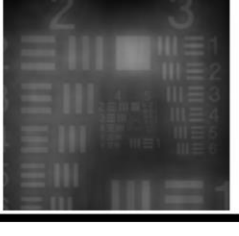
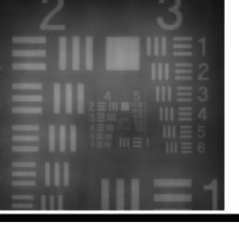
Quadro 17 - Imagens USAF para a LIO proposta e LIOs presentes no mercado em 3,0 mm de abertura.

Modelo	Dioptria e adicionais	Foco distante	Foco intermediário	Foco próximo
SN6AD1 (bifocal)	14.50 + 3.00 D			
Proposto	20.00 + 1.50 + 3.00 D			
839MP	20.00 + 1.66 + 3.33 D			
Micro F	15.00 + 1.75 + 3.50 D			
TFNT00	20.00 + 2.20 + 3.20 D			

Quadro 18 - Imagens USAF para a LIO proposta e LIOs presentes no mercado em 4,5 mm de abertura.

Modelo	Dioptria e adicionais	Foco distante	Foco intermediário	Foco próximo
SN6AD1 (bifocal)	14.50 + 3.00 D			
Proposto	20.00 + 1.50 + 3.00 D			
839MP	20.00 + 1.66 + 3.33 D			
Micro F	15.00 + 1.75 + 3.50 D			
TFNT00	20.00 + 2.20 + 3.20 D			

Quadro 19 - Imagens USAF para a LIO proposta e LIOs presentes no mercado em 6,0 mm de abertura.

Modelo	Dioptria e adicionais	Foco distante	Foco intermediário	Foco próximo
SN6AD1 (bifocal)	14.50 + 3.00 D			
Proposto	20.00 + 1.50 + 3.00 D			
839MP	20.00 + 1.66 + 3.33 D			
Micro F	15.00 + 1.75 + 3.50 D			
TFNT00	20.00 + 2.20 + 3.20 D			

Pelas imagens apresentadas no Quadro 17, Quadro 18 e Quadro 19 é possível notar qualitativamente a vantagem de uma LIO trifocal em relação a uma LIO bifocal no plano do foco intermediário para as diferentes aberturas.

Para a abertura de 3,0 mm a diferença de qualidade entre as imagens dos focos distante e próximos das LIOs medidas é bastante tênue. A qualidade da imagem do foco distante da LIO

---

proposta é ligeiramente inferior ao das LIOs comercializadas, enquanto a qualidade da imagem do foco próximo é ligeiramente superior. Entretanto, nota-se que a LIO proposta apresenta uma qualidade de imagem do foco intermediário inferior à imagem das LIOs trifocais presentes no mercado, ou seja, a diferença de amplitude do MTF observada no Quadro 16 para o foco intermediário foi significativa.

Para a abertura de 4,5 mm nota-se que as imagens do foco intermediário das LIOs trifocais são semelhantes. Entretanto, a qualidade da imagem do foco próximo da LIO proposta é superior ao das LIOs comercializadas. Já a qualidade da imagem do foco distante da LIO proposta não apresenta uma diferença tão significativa em relação às lentes presentes no mercado. Tal resultado indica que há um ganho para a qualidade da imagem do foco próximo sem uma redução proporcional na qualidade da imagem do foco distante para a LIO proposta para essa abertura.

Para a abertura de 6,0 mm as diferenças entre as qualidades das imagens são mais significativas. Nota-se que a imagem do foco intermediário é semelhante entre as LIOs trifocais, mas a qualidade do foco próximo é significativamente melhor para a LIO proposta em relação às lentes comercializadas. Já para o foco distante as LIOs Micro F e TFNT00 apresentam uma qualidade de imagem superior ao da LIO proposta, mas, ainda assim, seu desempenho foi superior em relação à LIO 839 MP para este foco.

Com o intuito de aprofundar a análise qualitativa da imagem formada pela LIO proposta será apresentada na Figura 74, Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78 e Figura 79 as imagens USAF da LIO para diferentes posições do plano de imagem (com o intuito de avaliar a profundidade de foco criada por cada lente) e sob duas condições de iluminação diferentes: alta e baixa intensidade luminosa<sup>14</sup>. Será considerada uma análise comparativa com a LIO SN6AD1, que, apesar de ser bifocal, é um *benchmark* comumente empregado na literatura para avaliar

---

<sup>14</sup> Não é possível determinar os valores de intensidade luminosa empregada nessa análise, pois o equipamento Trioptics não fornece o valor de tal grandeza ao usuário (TRIOPTICS, 2018). Existe apenas uma barra de intensidade na interface do software, que indica visualmente se a luminosidade saturou ou não o sensor de imagem da câmera do equipamento. Dessa forma, para realizar esse teste elevou-se a intensidade da fonte de luz do equipamento até que se estivesse próximo da saturação da câmera e, em seguida, reduziu-se a intensidade da fonte de luz para um limiar próximo ao limite de detecção da câmera.

LIOs multifocais (DAVISON, 2005; SOUZA *et al.*, 2006; VINGOLO *et al.*, 2007; ALFONSO *et al.*, 2010) e o poder dióptrico adicional entre o foco distante e próximo é o mesmo da LIO proposta.

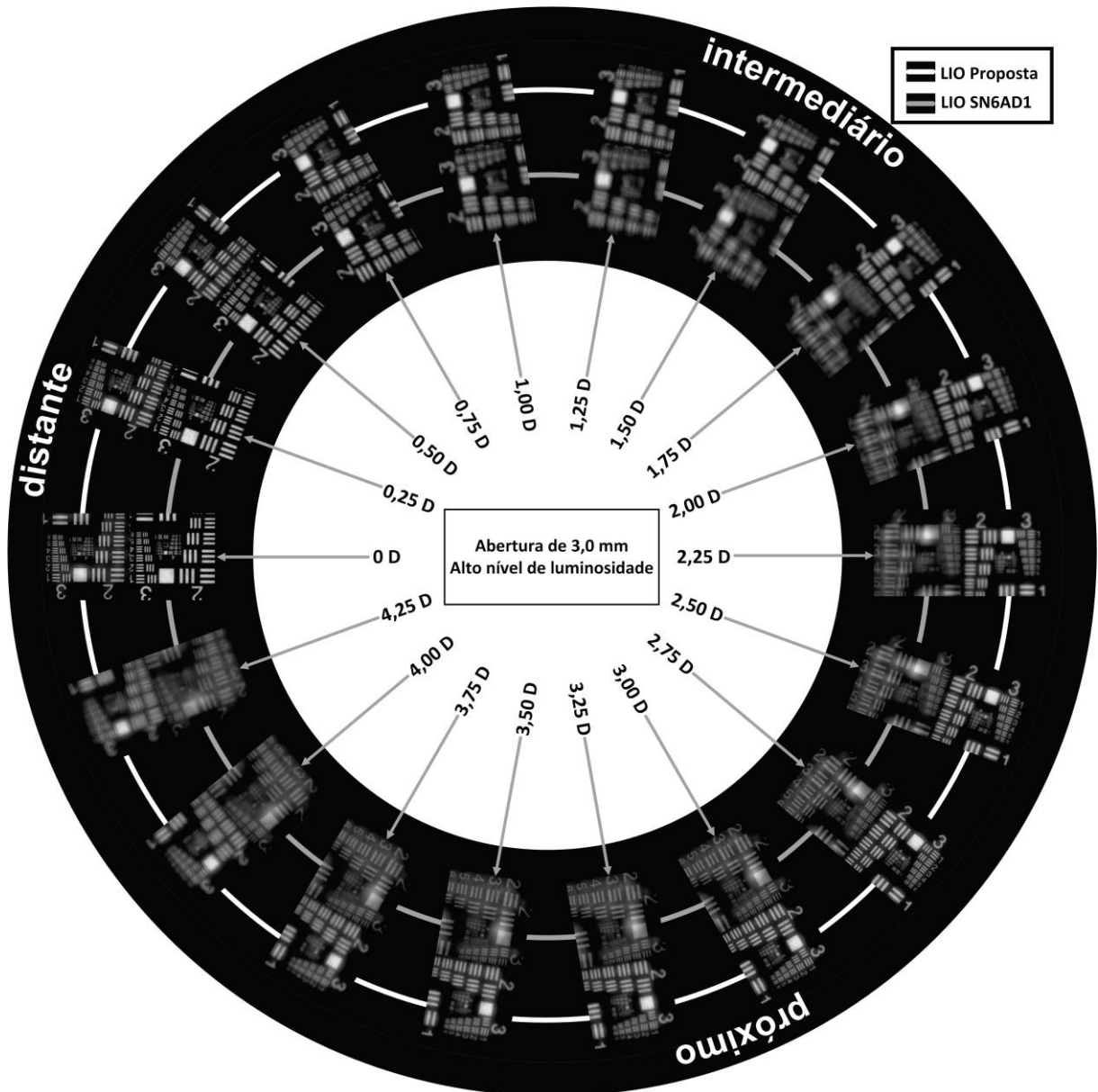


Figura 74 - Imagens USAF para a LIO proposta e SN6AD1 em função do deslocamento focal: alta luminosidade e abertura de 3,0 mm.

É possível notar para 3 mm de abertura e alto nível de luminosidade que a LIO SN6AD1 apresenta um melhor contraste para o foco distante em relação à LIO proposta, mas seu contraste para o foco próximo é inferior ao da LIO proposta. Além disso, nota-se que a profundidade de foco do foco distante de ambas as LIOs são semelhantes, ou seja, ambas apresentam uma boa nitidez das imagens na faixa de 0 D até 0,50 D, enquanto a LIO proposta apresenta uma profundidade de foco com qualidade superior ao da LIO SN6AD1 na faixa de

3 D até 3,50 D aproximadamente. Entretanto, como a LIO proposta é trifocal nota-se uma nitidez de qualidade superior para o foco intermediário (1,50 D) em relação à mesma posição focal para a LIO SN6AD1.

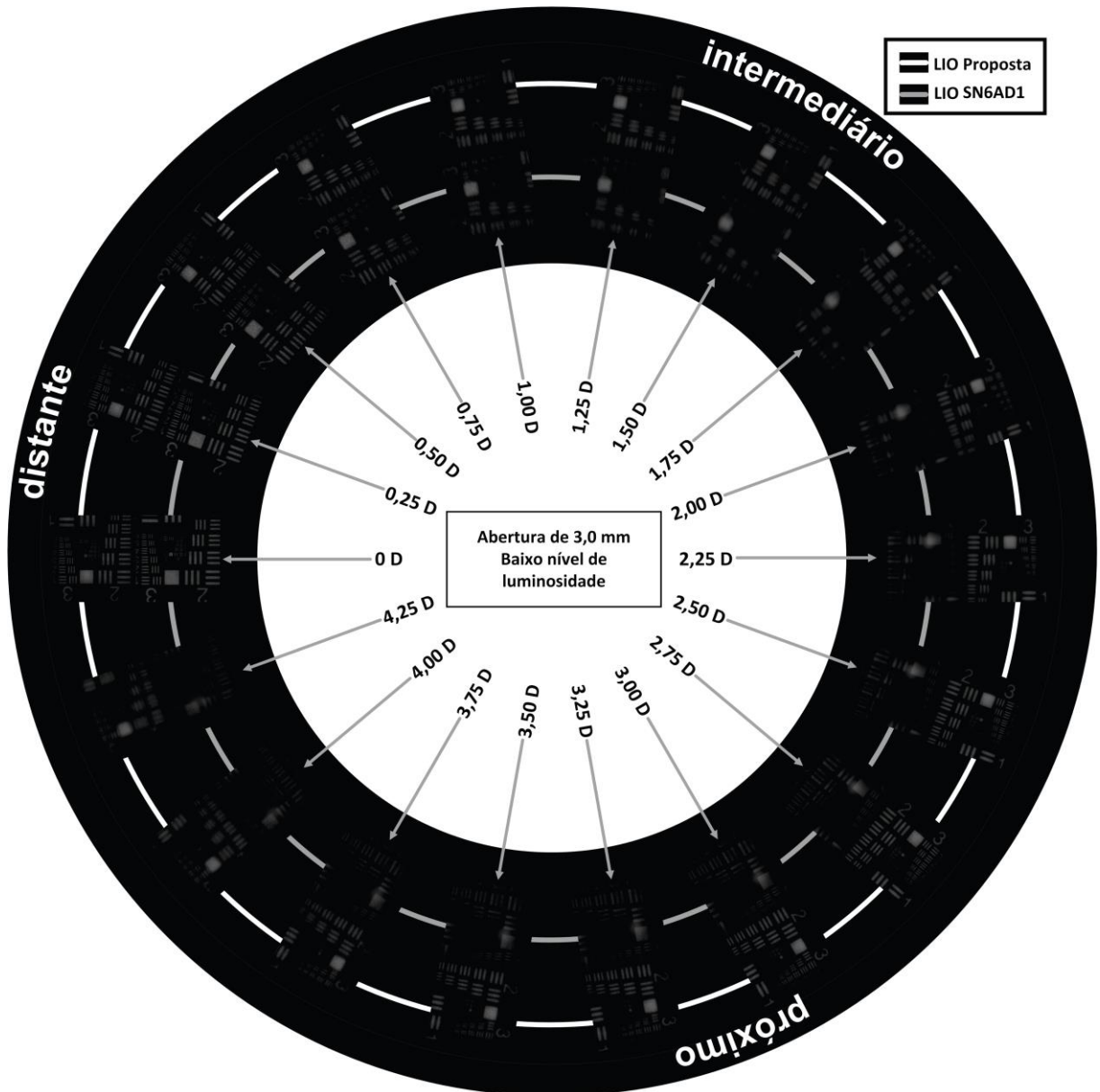


Figura 75 - Imagens USAF para a LIO proposta e SN6AD1 em função do deslocamento focal: baixa luminosidade e abertura de 3,0 mm.

Considerando a mesma abertura de 3,0 mm, mas uma situação de baixa luminosidade, nota-se uma qualidade de imagem semelhante para as duas LIOs em relação ao foco distante (0 D). Entretanto, para o foco próximo observa-se que a LIO proposta apresenta um contraste superior em relação à LIO SN6AD1 e sua profundidade de foco, também, é superior, ou seja, nota-se uma boa nitidez de imagem na faixa de 2,75 D até 3,25 D para a LIO proposta, enquanto a SN6AD1 tem desempenho muito inferior.

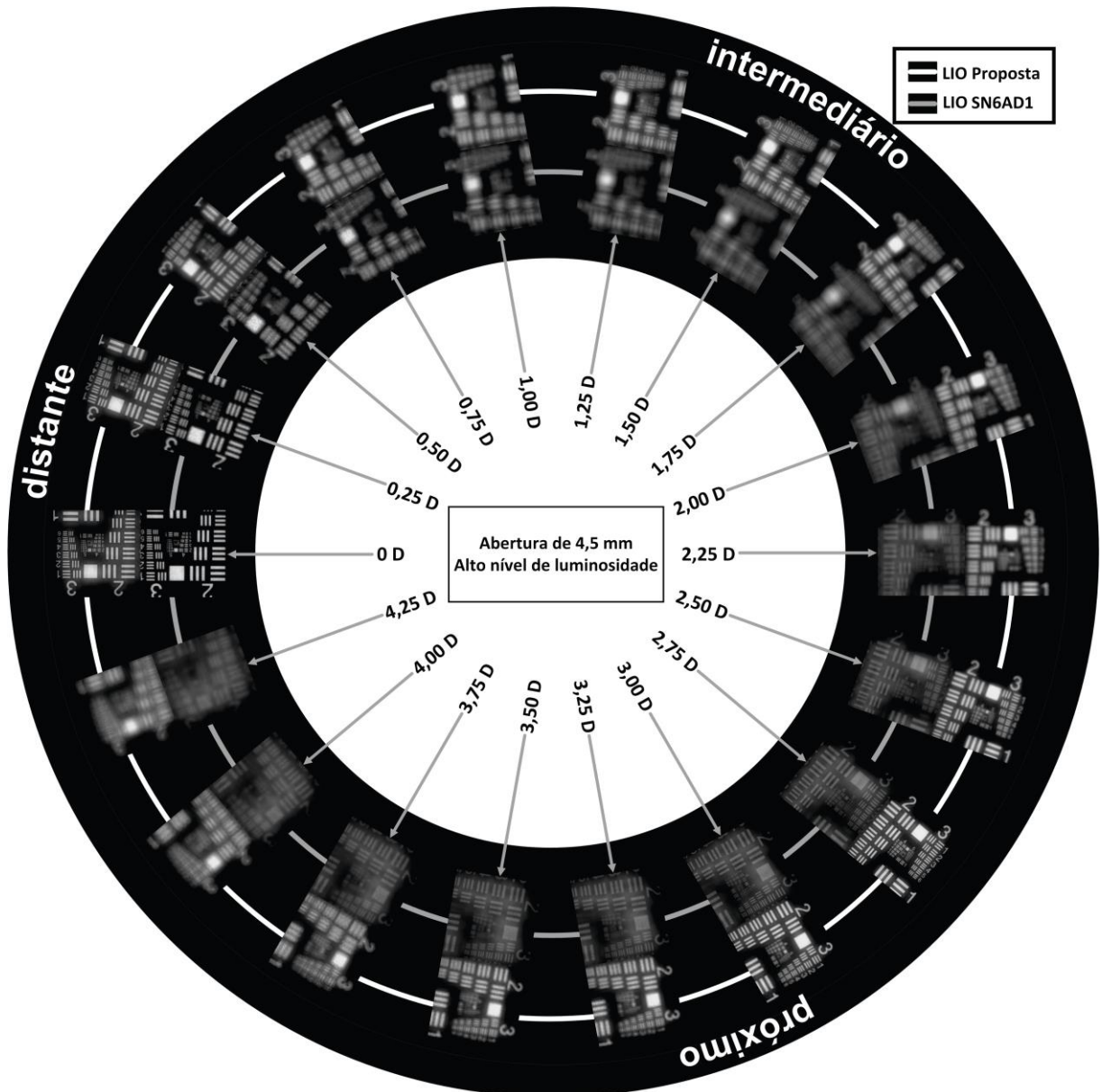


Figura 76 - Imagens USAF para a LIO proposta e SN6AD1 em função do deslocamento focal: alta luminosidade e abertura de 4,5 mm.

Para 4,5 mm de abertura e alto nível de luminosidade nota-se um melhor contraste na LIO SN6AD1 para o foco distante em relação à LIO proposta. Entretanto, a profundidade de foco da LIO proposta é superior ao da SN6AD1, pois nota-se, por exemplo, uma nitidez de imagem em 0,50 D para a lente proposta superior ao da SN6AD1. Além disso, como a LIO SN6AD1 é apodizada, pode-se perceber uma degradação da imagem do foco próximo em relação à LIO proposta.

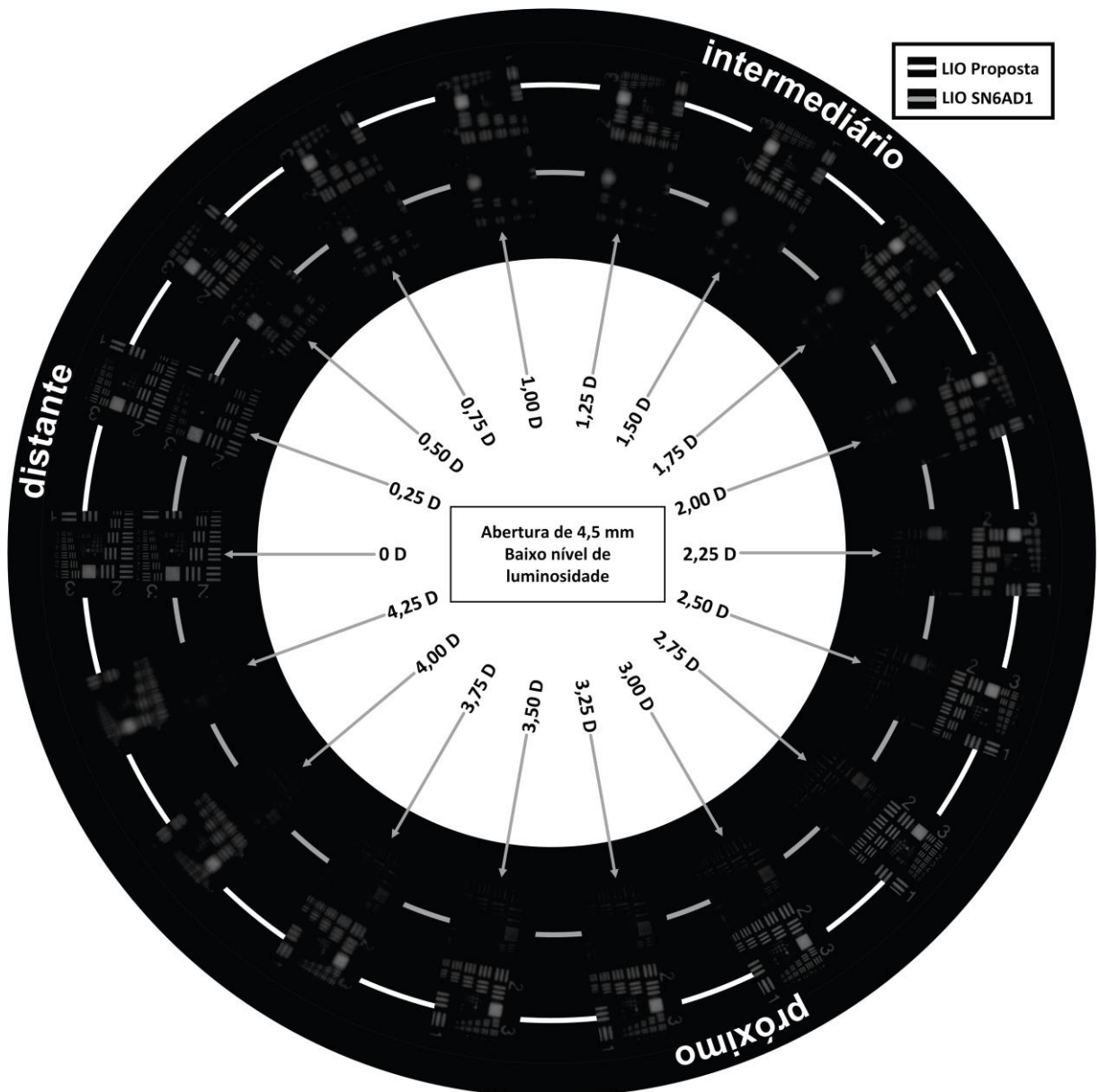


Figura 77 - Imagens USAF para a LIO proposta e SN6AD1 em função do deslocamento focal: baixa luminosidade e abertura de 4,5 mm.

Para uma situação de baixa luminosidade e 4,5 mm de abertura há uma deterioração ainda maior da qualidade da imagem da LIO SN6AD1 ao se deslocar do foco distante (0 D) em direção ao foco próximo (3 D). A LIO SN6AD1 apresenta comparativamente uma imagem com melhor nitidez para o foco distante em relação à LIO proposta, entretanto, a LIO proposta apresenta uma melhor profundidade de foco garantindo uma imagem no foco intermediário e próximo com qualidade de detalhes significativamente superior ao da LIO SN6AD1.

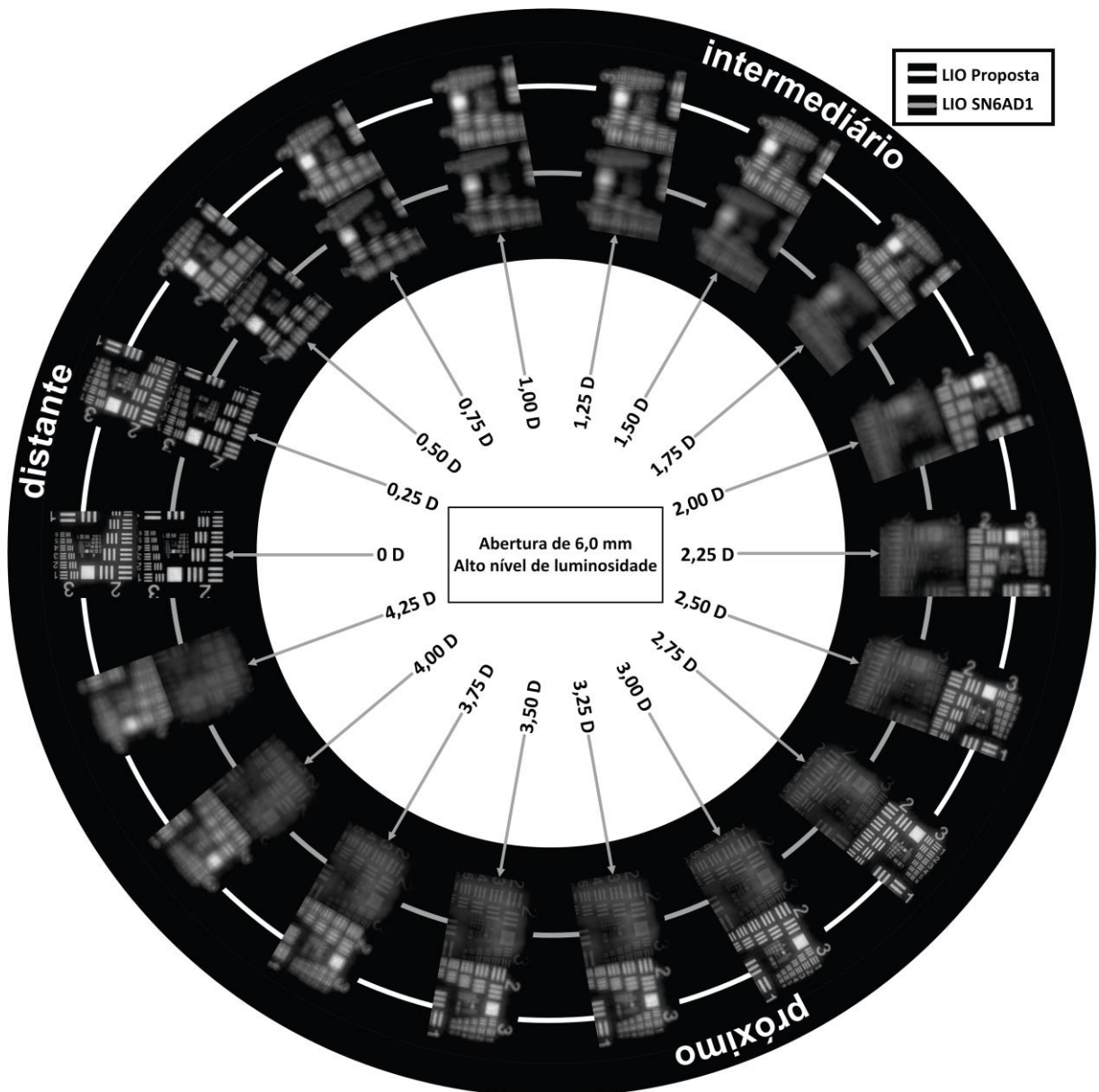


Figura 78 - Imagens USAF para a LIO proposta e SN6AD1 em função do deslocamento focal: alta luminosidade e abertura de 6,0 mm.

Para uma abertura de 6,0 mm e alto nível de luminosidade observa-se uma qualidade de imagem superior para a LIO SN6AD1 em relação à LIO proposta para o foco distante, mas sua apodização faz com que a LIO se comporte basicamente como uma LIO monofocal. A LIO proposta apresentou uma profundidade de foco superior ao da LIO SN6AD1 para os focos intermediário e próximo.

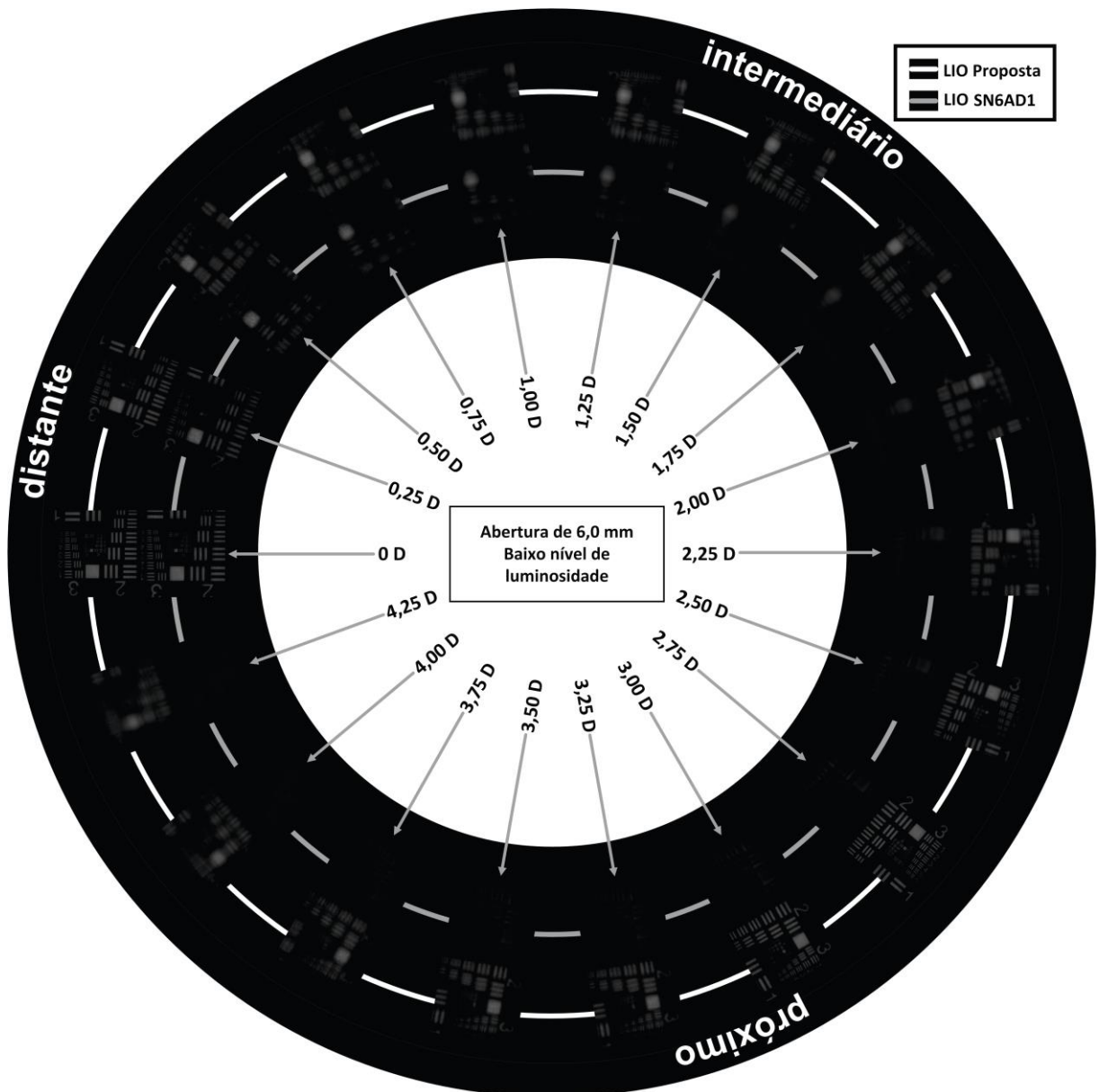


Figura 79 - Imagens USAF para a LIO proposta e SN6AD1 em função do deslocamento focal: baixa luminosidade e abertura de 6,0 mm.

Considerando uma situação de baixa luminosidade e abertura de 6 mm nota-se uma diferença ainda maior em relação à qualidade das imagens de cada LIO. A LIO SN6AD1 apresenta uma qualidade imagem para o foco distante compatível com a imagem da LIO proposta no mesmo foco (0 D), mas a LIO proposta permite uma extensão focal maior ao apresentar uma qualidade de imagem superior ao da LIO SN6AD1 nos focos intermediário e próximo.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A LIOM DIFRATIVA PROPOSTA

Os resultados de simulação referentes ao desempenho óptico da LIOM proposta são competitivos em relação aos modelos de LIOMs trifocais presentes no mercado e apresentadas neste trabalho. Além disso, a análise de tolerâncias indica ser possível, na média, fabricar o modelo proposto com exatidão suficiente para garantir uma boa qualidade visual ao paciente sem que seja necessária uma correção refrativa.

Os resultados de medição referentes à dioptria base e adicionais do protótipo da LIO proposta demonstram que o torno empregado apresenta a precisão necessária para o torneamento das curvas base da lente e das posições  $r_n$  dos degraus difrativos. Em relação ao desempenho óptico nota-se que o protótipo manteve o comportamento balizado pelos critérios de simulação, que era de estabelecer uma razão para o MTF dos focos distante e próximo em torno da unidade para todas as aberturas (independência da pupila). Em relação às medidas de MTF, pode-se notar que a diferença entre o MTF do foco intermediário para uma abertura de 3 mm da LIO proposta em relação àqueles das lentes comercializadas foi significativa ao se observar a qualidade da imagem USAF das medições. Já as imagens dos focos distante e próximo não apresentaram diferenças tão significativas comparativamente para a mesma abertura. Para as outras aberturas (4,5 mm e 6,0 mm) nota-se uma qualidade de imagem para o foco intermediário sem diferenças significativas entre a LIO proposta e as LIOs presentes no mercado. Entretanto, para os focos distante e próximo nota-se que a LIO proposta apresenta uma qualidade de imagem para o foco próximo superior à das LIOs comercializadas e uma qualidade de imagem para o foco distante inferior.

Em linhas gerais é possível notar pelas imagens USAF que, para situações de baixa luminosidade, a LIO proposta apresenta uma profundidade de foco superior ao da LIO SN6AD1, principalmente para aberturas maiores. Tal comportamento permitiria ao paciente uma melhor acuidade visual para enxergar o painel do carro ao dirigir em um dia nublado ou à noite, por exemplo. Já para situações de alta luminosidade, nota-se um comportamento superior da LIO SN6AD1 para o foco distante em relação à LIO proposta, mas nota-se uma maior profundidade de foco superior da LIO proposta em relação à LIO SN6AD1.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a ideia e o desenvolvimento de uma lente intraocular trifocal difrativa com projeto inovador baseado na modulação da altura de seus degraus difrativos por meio de uma função representada pelo módulo da função cossenoidal transladada. O objetivo principal da pesquisa foi alcançar um modelo de LIO com características ópticas semelhantes, mas, preferencialmente, superiores às de lentes consolidadas no mercado e cuja relação dos parâmetros de projeto com figuras de mérito de interesse possam ser compreendidas.

Os resultados obtidos por meio de simulações computacionais indicam que o modelo encontrado foi capaz de apresentar valores de MTF compatíveis aos de LIOs trifocais presentes no mercado. Além disso, pela análise de tolerâncias realizada, verificou-se ser possível fabricar, na média, o projeto proposto com a exatidão necessária para garantir a qualidade óptica verificada nas simulações.

Os resultados de fabricação relacionados à dioptria base, dioptria adicional e valores de MTF demonstraram que foi possível fabricar um protótipo com a precisão esperada pelos resultados obtidos nas simulações, atendendo aos critérios de qualidade estabelecidos para manufatura de lentes intraoculares. Os valores de perfilometria indicam, também, que a exatidão do torno empregado na fabricação do protótipo é suficiente para a reprodução das alturas de degraus de projeto. Tal exatidão garante uma estreita variação entre o MTF de projeto e o MTF do protótipo, conforme pode ser verificado ao se comparar os MTF TF na Figura 71, na Figura 72 e na Figura 73, para três aberturas diferentes da pupila.

Com a metodologia apresentada neste trabalho, torna-se possível desenvolver uma grande variedade de LIOs com características diferentes de distribuição de eficiência para cada foco, escolhendo-se outras soluções dentre as apresentadas no gráfico da fronteira de Pareto estimada (Figura 52 e Figura 53). Tais soluções irão possibilitar diferentes perfis de MTF para os focos distante, intermediário e próximo, ou seja, cada uma das soluções apresentadas na fronteira de Pareto estimada corresponde a uma LIOM com características diferentes de desempenho óptico.

Em síntese a proposta de projeto de lente intraocular apresentada neste trabalho atende aos requisitos almejados e aos critérios de ineditismo, atividade inventiva e aplicação industrial, necessários à abertura de uma patente. Também, o conceito multifocal da lente proposta não se resume apenas à aplicação na área oftalmológica. Tal abordagem pode se estender a outras áreas do conhecimento de engenharia elétrica como: lente para câmeras de monitoramento e segurança, lente para marcações multiníveis a laser, microscópios, entre outros.

Contudo é possível sugerir algumas atividades para trabalhos futuros que poderiam enriquecer o conteúdo abordado neste trabalho. Diante disso segue-se algumas sugestões:

- Fazer uma análise policromática para avaliar o desempenho da eficiência luminosa e aberração cromática da LIO proposta;
- Verificar a existência de uma possível relação matemática analítica entre os parâmetros construtivos da função de modulação proposta (amplitude, frequência e fase) e o MTF;
- Verificar o emprego de uma função de modulação cossenoidal sem o módulo, mas com uma componente contínua (*offset*) para garantir um modelo mais compatível com a resolução do processo de fabricação em relação à altura dos degraus difrativos;
- Buscar uma nova solução na fronteira de Pareto estimada para a abertura de 3 mm de diâmetro que garanta uma maior eficiência para o foco intermediário. Espera-se encontrar alguma solução que tenha uma qualidade de imagem mais compatível ou até mesmo superior à das LIOs presentes no mercado para essa distância, sem que ocorra uma queda tão significativa de qualidade para os focos distante e próximo.

## 6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, B. F. C. D. **Uma visão geral do Zemax: Um programa de modelagem e simulação de sistemas ópticos**. INPE. São José dos Campos, p. 27. 2006.

ALFONSO, J. F. et al. Visual function after implantation of an aspheric bifocal intraocular lens. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 2009. p. 8.

ALFONSO, J. F. et al. Contrast Sensitivity Comparison Between Acrysof Restor and Acri.LISA Aspheric Intraocular Lenses. **Journal of Refractive Surgery**, New York, July 2010. p. 7.

ARORA, A. Zemax Customer Portal. **Zemax**, 2014. Disponível em: <<https://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-non-sequential-mode-in-zemax>>. Acesso em: 27 Outubro 2018.

ARTEMIS, C. K. Centro Klinik. **Artemis**, 2018. Disponível em: <<https://www.centroclinic.de/bifokale-multifokallinse/>>. Acesso em: 21 Outubro 2018.

ATCHISON, D.; SMITH, G. **Optics of the Human Eye**. Second. ed. Edinburgh: Elsevier Science, 2002.

ATKINS, B. Modulation Transfer Function (MTF) and Subjective Quality Factor (SQF). **BobAtkins A Singular Focus on Photography**, 2017. Disponível em: <<http://www.bobatkins.com/photography/technical/mtf/mtf1.html>>. Acesso em: 27 Outubro 2018.

ATSUSHI KASUGAI-SHI AICHI, K. **Method for manufacturing aphakic intraocular lens**. EP2377493, 06 January 2009.

BAKARAJU, R. C. et al. Depth-of-focus and its association with the spherical aberration sign. A ray-tracing analysis. **Journal of Optometry**, March 2010. p. 9.

BARRY, P. Annual Global IOL Procedures Expected to Top 30 Million by 2021. **Journal of Cataract and Refractive Surgery Today Europe**, June 2016. p. 4.

BOREMAN, G. D. **Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems**. Washington: SPIE Press, 2001.

BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics**. 6. ed. New York: Pergamon Press Inc., 1986.

CARVALHO, L. M. D. Metodologia de otimização de lentes intraoculares monofocais e multifocais modeladas computacionalmente em modo não sequencial com base em algoritmo genético. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)**, Universidade Federal de Minas

---

Gerais, n. Belo Horizonte, Belo Horizonte Universidade Federal de Minas Gerais 2014. Escola de Engenharia.

CHANG, M. et al. Clinical Outcome of Diffractive Multifocal Aspheric Intraocular Lens. **Journal of Korean Ophthalmol Society**, Korea, 17 April 2009. p. 12.

COHEN, A. L. **Trifocal IOL using diffraction**. US8678583, 06 September 2012.

DAC. DAC International. **DAC Intl**, 15 ago. 2017. Disponível em: <<http://www.dac-intl.com/products/diamond-turning-equipment/2-axis-alm-lens-lathe-series-iv/>>. Acesso em: 21 Fevereiro 2017.

DAVISON, J. A. Deciphering diffraction: How the Restor's apodized, refractive, diffractive optic works. **Cataract and Refractive Surgery Today**, June 2005. p. 5.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. New York: John Wiley and Sons, 2001.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on evolutionary computation**, April 2002. p. 16.

DERENIAK, E. L.; DERENIAK, T. D. **Geometrical and Trigonometric Optics**. 1. ed. Arizona: Cambridge University Press, 2008.

DRAKE JR, P. **Dimensioning and Tolerancing Handbook**. New York: McGraw-Hill Education, 1999.

FISCHER, R. E.; TADIC-GALEB, B.; YODER, P. R. **Optical System Design**. 2. ed. New York: SPIE Press, 2008.

FREEMAN, D. E. L. **Optimisation of Aspheric IOLs**. Kidger Optics Associates. [S.l.], p. p. 13. 2007.

GATINEL, D. Dr. Damien Gatinel. **Trifocal IOL cataract implant**, 23 March 2017. Disponível em: <<https://www.gatinel.com/en/recherche-formation/trifocal-implant-cataract-iol/>>. Acesso em: 11 dezembro 2018.

GATINEL, D. et al. Design and qualification of a diffractive trifocal optical profile for intraocular lenses. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 2 May 2011. p. 8.

GATINEL, D.; HOUBRECHTS, Y. Comparison of bifocal and trifocal diffractive and refractive intraocular lenses using an optical bench. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 3 January 2013. p. 7.

HARAN, M. J. et al. Effect on falls of providing single lens distance vision glasses to multifocal glasses wearers: visible randomised controlled trial. **British Medical Journal**, 11 April 2010. p. 7.

HOBSON, T. Taylor Hobson news. **Taylor Hobson**, 2016. Disponível em: <<https://www.taylor-hobson.com/pressreleases/news/2016/june/news-form-talysurf-intra-lowcost>>. Acesso em: 29 Março 2019.

HOFFER, K. J. Lens power calculation for multifocal IOLs. In: MAXWELL, W. A. **Current concepts of multifocal intraocular lenses**. New York: Slack Inc, 1991. Cap. 1, p. 193-208.

HOFFER, K. J. Personal History in Bifocal Intraocular Lenses. In: MAXWELL, A.; NORDAN, L. T. **Current Concepts of Multifocal Intraocular Lenses**. 1st. ed. Thorofare: Slack Inc., 1991. Cap. 12, p. 127-132.

HOUBRECHTS, Y. A. J.; PAGNOULLE, C. R. M. A.; GATINEL, D. **Intraocular Lens**. US 2012/0283825, 25 January 2011.

ISO, I. -. **ISO 11979-2 - Ophthalmic implants - Intraocular lenses - Part 2: Optical properties and test methods**. First edition. 1999.

ISO, I. -. **ISO 11979-9 - Ophthalmic implants - Intraocular lenses - Part 9: Multifocal intraocular lenses**. First edition. 2006b.

JEBARI, K.; MADIIFI, M. Selection Methods for Genetic Algorithms. **International Journal of Emerging Sciences**, 2013. p. 12.

KOBAYASHI, A. K.-S. A.; AICHI, H. K.-S.; ANDO, I. K.-S. A. **Method for manufacturing aphakic intraocular lens**. EP2377493, 06 January 2009.

KOHNEN, T. et al. Visual function after bilateral implantation of apodized diffractive aspheric multifocal intraocular lenses with a +3.0 D addition. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 2009. p. 8.

KOREN, N. Introduction to Modulation Transfer Function. **Understanding Image Sharpness**, 2007. Disponível em: <<http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF.html>>. Acesso em: 27 Outubro 2018.

KRETZ, F. T. A. et al. Binocular function to increase visual outcome in patients implanted with a diffractive trifocal intraocular lens. **BMC Ophthalmology**, Germany, 18 February 2015. p. 15.

KUDAIEV, S.; SCHREIBER, P. **Automated optimization of non-imaging optics for luminaires**. Optical Design and Engineering II. Jena: SPIE Press. 2005. p. 9.

LENKOVA, G. A. Methods for investigating optical characteristics of bifocal diffractive-refractive intraocular lenses. **Optical Information Technologies, elements, and Systems**, 23 June 2006. p. 12.

LENKOVA, G. A. Effect of the eye pupil diameter and the phase shift in the diffraction structure on bifocal properties of diffractive-refractive intraocular lenses. **Optical Information Technologies**, Novosibirsk, 19 January 2010. p. 10.

LEVASHOV, V. E.; VINOGRADOV, A. V. Analytical theory of zone plate efficiency. **The American Physical Society**, 49, 1994. p. 6.

LIN, S. A NSGA-II Program in Matlab v1.4. **Matlab**, 26 Julho 2011. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31166-ngpm-a-nsga-ii-program-in-matlab-v1-4>>. Acesso em: 16 Novembro 2018.

LINSTROM, R. Thoughts on Cataract Surgery: 2015. **Review of Ophthalmology**, 09 March 2015.

LIU, H.-L.; BRENNAN, N. A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling. **Journal of the Optical Society of America A**, 1997. p. 11.

LOEWEN, E. G.; POPOV, E. **Diffraction gratings and applications**. New York: Marcel Dekker Inc., 1997.

LONDOÑO, C.; CLARK, P. P. Modeling diffraction efficiency effects when designing hybrid diffractive lens systems. **Applied Optics**, 31, 1992. p. 4.

MALACARA, D.; MALACARA, Z. **Handbook of Optical Design**. 2. ed. León: Marcel Dekker, Inc., 2004.

MATHEN, M. M. Multifocal IOL - An Overview. **Kerala Journal of Ophthalmology**, March 2010. p. 6.

MAXWELL, W. A. et al. Functional outcomes after bilateral implantation of apodized diffractive aspheric acrylic intraocular lenses with a +3.0 or +4.0 diopter addition power. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 2009. p. 8.

MEUNIER, P. O&O mdc. **O&O mdc Ltd.**, 29 jun. 2017. Disponível em: <<http://oomdc.com/oomdc-IOL-Polymers-Hydrophilic.html>>. Acesso em: 11 Dezembro 2018.

MING, A. L. S.; CONSTABLE, I. J. **Color Atlas of Ophthalmology**. New York: World Science, 1995.

MOJZIS, P. **Improved visual rehabilitation after cataract surgery**. XXXII Congress of ESCRS. London: [s.n.]. 2014. p. 1.

MONTÉS-MICÓ, R. et al. Visual Performance with Multifocal Intraocular Lenses: Mesopic Contrast Sensitivity under Distance and Near Conditions. **American Academy of Ophthalmology**, 21 May 2003. p. 12.

OLSEN, T. Calculation of intraocular lens power: a review. **Acta Ophthalmologica Scandinavica**, Aarhus, 2007. p. 14.

---

ONO, I.; KOBAYASHI, S.; YOSHIDA, K. Optimal Lens Design by Real-Coded Genetic Algorithms Using UNDX. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Tokushima, 30 March 1999. p. 15.

O'SHEA, D. C. et al. **Diffraction Optics: Design, Fabrication, and Test**. Washington: SPIE Press, v. TT62, 2004.

PALMER, C. **Diffraction Grating Handbook**. New York: Thermo RGL, 2002.

PHYSIOL. PhysIOL. **PhysIOL Advanced Optical Solutions**, 2018. Disponível em: <<https://www.physiol.eu/en-US/Products/Intraocular-lenses>>. Acesso em: 21 outubro 2018.

PYSEROPTICS. Pyser Optics Resolution Charts. **Pyser Optics**, 2019. Disponível em: <[http://www.pyseroptics.com/wp-content/uploads/2017/07/1330\\_Resolution\\_Charts\\_Brochure.pdf](http://www.pyseroptics.com/wp-content/uploads/2017/07/1330_Resolution_Charts_Brochure.pdf)>. Acesso em: 30 Janeiro 2019.

RAWER, R. et al. Imaging quality of intraocular lenses. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, Berlim, 25 January 2005. p. 14.

RHORER, R. L.; EVANS, C. J. Fabrication of Optics by Diamond Turning. In: BASS, M. **Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques and Design**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, v. I, 1995. Cap. 41, p. 1606.

RIDLEY, H. Intra-Ocular Acrylic Lenses - A Recent Development in the Surgery of Cataract. **Br J Ophthalmol.**, Mar. 1952. p. 113-122.

SAHIN, A.; HAMRAH, P. Clinically relevant biometry. **Current Opinion in Ophthalmology**, Boston, January 2012. p. 11.

SAVINI, G. et al. Influence of the effective lens position as predicted by axial length and keratometry on the near add power of multifocal intraocular lenses. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, January 2016. p. 6.

SCHWIEGERLING, J. Intraocular Lenses. In: BASS, M. **Handbook of Optics: Vision and Vision Optics**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Professional, v. III, 2010. Cap. 21, p. 28.

SCHWIEGERLING, J. Diffraction efficiency and aberrations of diffractive elements obtained from orthogonal expansion of the point spread function. **Optical modeling and performance predictions**, 27 September 2016. p. 8.

SHANNON, R. R. Tolerancing Techniques. In: BASS, M. **Handbook of Optics**. New York: MCGraw-Hill Inc., 1995. p. 1606.

SMITH, W. J. **Modern Optical Engineering**. 4. ed. [S.l.]: SPIE Press, 2008.

SON, H. S. et al. In vitro optical quality measurements of three intraocular lens models having identical platform. **MBC Ophthalmology**, 29 June 2017. p. 9.

SOUZA, C. E. et al. Visual Performance of Acrysof Restor Apodized Diffractive IOL: a prospective comparative trial. **American Journal of Ophthalmology**, New York, May 2006. p. 6.

STAMNES, J. J.; SPJELKAVIK, B. Focusing at small angular apertures in the Debye and Kirchhoff approximations. **Optics Communications**, Oslo, 02 June 1981. p. 5.

TRINDADE, B. L. C. Desempenho óptico de lentes intraoculares: influência das alterações de posicionamento e do poder dióptrico. **Tese de doutorado (Doutorado em Ciências Aplicadas à Cirurgia e Oftalmologia)**, Belo Horizonte Universidade Federal de Minas Gerais 2017. Faculdade de Medicina.

TRIOPTICS. Trioptics IOL R&D. **Trioptics**, 2018. Disponível em: <<https://www.trioptics.com/products/optical-test-instruments/optisphericr/optisphericr-iol-rd/technical-data/>>. Acesso em: 14 Janeiro 2019.

VASILJEVIC, D. **Classical and Evolutionary Algorithms in the Optimization of Optical Systems**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.

VEGA, F.; ALBA-BUENO, F.; MILLÁN, M. S. Energy distribution between distance and near images in apodized diffractive multifocal intraocular lenses. **Investigative Ophthalmology & Visual Science**, 52, 2011. p. 7.

VINGOLO, E. M. et al. Visual acuity and contrast sensitivity: Acrysof Restor apodized diffractive versus Acrysof SA60AT monofocal intraocular lenses. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, New York, July 2007. p. 4.

VOSKRESENSKAYA, A. et al. Initial results of trifocal diffractive IOL implantation. **107th Congress of the German Society of Ophthalmology**, Leipzig, September 2009. p. 8.

VRIES, N. E. D. **Multifocal Intraocular Lenses in Cataract Surgery**. Pers Maastricht University. Maastricht, p. 119. 2011.

WEFORD, W. T. **Aberrations of Optical Systems**. Philadelphia: [s.n.], 1986.

WHO. **Global Data on Visual Impairments 2010**. World Health Organization. Geneva: WHO Press. 2012. p. 17.

WOODWARD, M. A.; RANDLEMAN, J. B.; STULTING, R. D. Dissatisfaction after multifocal intraocular lens implantation. **Journal of Cataract and Refractive Surgery**, 2009. p. 6.

ZALEVSKY, Z. Extended depth of focus imaging: a review. **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers**, Israel, 14 January 2010. p. 11.

ZEMAX. **Zemax- OpticStudio User's Guide**. p. 766, 2018.

