

PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

10 de agosto de 2015

ESTUDO DO DESEMPENHO DO ESPECTRÔMETRO THR1000 ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO PROGRAMA OSLO PARA TRAÇADO DE RAIOS

Projeto a ser implementado no *Tokamak* **TCABR** do Laboratório de Física de Plasma do Instituto de Física da **USP**.

Orientador: José Helder F. Severo

Aluno: Felipe Valência de Almeida

Sumário

1	Introdução	2
2	Fundamentação Teórica	3
2.1	Introdução à Óptica Geométrica	3
2.2	Função de Mérito e Otimização de Sistemas Ópticos	4
2.3	Diagrama de Pontos	4
2.4	Análise dos Raios (Ray trace Analysis)	5
2.5	Parcela de Energia Contida (Encircled Energy)	6
2.6	Função Transferência de Modulação (Modulation Transfer Function - MTF)	6
3	Arranjo experimental	6
4	Conclusão	7
5	Cronograma	8

1 Introdução

A espectroscopia é uma das técnicas mais empregadas para o estudo da emissão óptica do plasma. Átomos, moléculas e seus respectivos íons são fontes constantes de radiação. A medição desta radiação em tempo real nos proporciona, além de uma enorme possibilidade de obtenção dos parâmetros deste plasma, a possibilidade estudá-lo de forma não invasiva. A medição da radiação emitida pelo plasma é feita com a ajuda de instrumentos ópticos, que tem a função de separar essa radiação em diferentes comprimentos de onda e de detetores.

Os instrumentos ópticos mais comuns utilizados para separar a radiação em diferentes comprimentos são os filtros ópticos, monocromadores, policromadores, espectrômetros e espectrógrafos, enquanto que os detetores mais comuns usados para medir a radiação são os tubos fotomultiplicadores de elétrons (**PMT**), fotodiodos, matriz linear de detetores e matriz retangular de detetores do tipo **CCD** (charge couped devise) que permite obter a imagem do objeto emissor.

O Laboratório de Física de Plasmas (**LFP**) do **IFUSP** está equipado com um espectrômetro de $1000mm$ de distância focal com configuração Czerny-Turner de fabricação Jobin Yvon e uma câmera **CCD 1024X512** que foi adquirida com recursos **FAPESP** ([proc. 2002/03632-3](#)) e que será utilizada para medir o perfil radial da temperatura iônica no projeto do estudo do perfil de pressão (Estudo do Perfil da Pressão de Plasma no Tokamak **TCABR** e Criação de um Grupo de Óptica) no tokamak **TCABR** ([proc. 2014/13296-8](#)).

Embora seja possível obter uma imagem do plasma com estes equipamentos, essa imagem não é perfeita pois é limitada pelas aberrações produzidas pelos elementos ópticos quando são atravessados pela luz. Essas aberrações acabam tanto reduzindo as características técnicas do aparelho quanto produzindo deformações na imagem que podem levar a uma interpretação errônea dos resultados.

Recentemente, com o apoio da **FAPESP** ([proc. 2014/13296-8](#)) foram adquiridos dois programas de óptica cuja finalidade é permitir a simulação de todo o sistema óptico que será utilizado no diagnóstico do perfil de pressão. Estes softwares (Oslo e tracePro) foram instalados em uma máquina virtual de forma a proporcionar o seu acesso remoto de diferentes terminais localizados em qualquer parte do mundo, permitindo com isto que pesquisadores de diferentes laboratórios

possam desenvolver seus projetos ópticos sem terem que solicitar recursos públicos para compra de softwares. Neste projeto (Estudo do Perfil da Pressão de Plasma no Tokamak **TCABR** e Criação de um Grupo de Óptica) está previsto a criação de um grupo de óptica da qual, inicialmente fazem parte todos os participantes do projeto, no entanto para que possamos dar continuidade a criação do grupo, é necessário treinar pessoas para trabalharem com estes softwares.

O trabalho que será desenvolvido pelo estudante consiste em projetar uma objetiva para coletar a luz emitida pelo plasma e simular a trajetória dos raios de luz no interior do espectrômetro de modo que seja possível prever a distorção da imagem do plasma e a influência da abertura da fenda de entrada na resolução espectral do aparelho.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Introdução à Óptica Geométrica

Uma característica de qualquer sistema óptico é que ele sempre vai produzir uma imagem imperfeita do objeto que está sendo imageado. As imperfeições na imagem são produzidas pelas aberrações ópticas que são geradas pela luz ao atravessar os elementos difrativos. Portanto ao projetar um sistema óptico o desenhista deve sempre tentar minimizar as aberrações e isto se faz com a ajuda de softwares especializados.

Ao projetar um sistema óptico, o projetista utiliza inicialmente a óptica geométrica que é baseada na suposição de que os raios de luz se propagam em meios homogêneos em linha reta. Este modelo permite definir as características geométricas da imagem em função das características físicas e geométricas das lentes. Em seguida, para avaliar a qualidade da imagem, o projetista fará uso da óptica física onde os raios de luz são tratados como onda e são caracterizados pelo seu comprimento de onda.

No limite quando os raios de luz caminham muito próximo do eixo óptico e os ângulos formados por esses raios com o eixo principal são pequenos faz-se uso da óptica paraxial, também chamada de óptica de primeira ordem. Na aproximação paraxial a trajetória dos raios é determinada a partir expressões simples. A aproximação paraxial também é usada para o caso de grandes ângulos pois ela fornece uma estimativa das aberrações do sistema.

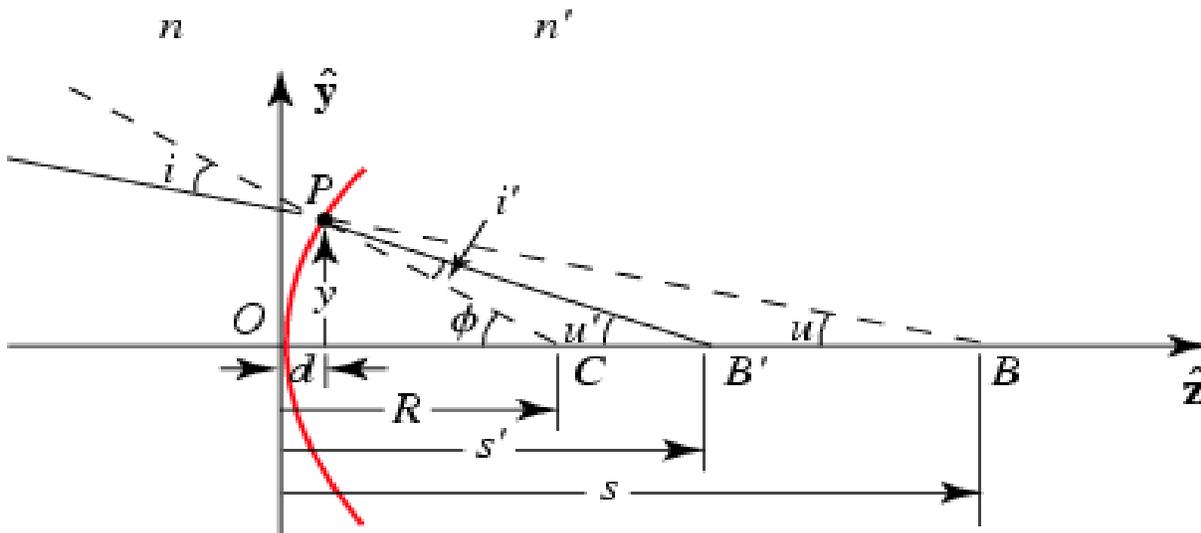


Fig.1 Trajetória de um raio de luz sendo difratado na superfície em vermelho. Na aproximação paraxial $\text{sen}\theta \simeq \theta$, $\text{cos}\theta \simeq 1$ e $\text{tg}\theta \simeq \theta$ onde θ é qualquer ângulo inscrito na figura.

2.2 Função de Mérito e Otimização de Sistemas Ópticos

Se um meio é homogêneo (tem o mesmo índice de refração em todo o espaço) a frente de onda W no espaço objeto é uma esfera. Se no espaço imagem todos os raios se interceptam em um único ponto A' então os raios se mantem homocêntrico na frente de onda W' , onde A' é a imagem ideal da A (fig2a). No entanto, na maioria dos caso isto não ocorre e como resultado a frente de onda no espaço imagem não é esférica e a homocentricidade é violada e essa violação é que recebe o nome de aberração (fig.2b). Numericamente as aberrações são caracterizadas pelo desvio da imagem real A' em relação a imagem ideal A'_0 obtida na aproximação paraxial (fig2b). Este desvio, que as vezes é chamado de defeito, pode ser caracterizado tanto pelo segmento horizontal $\delta s'$, e neste caso ele é chamado de aberração lateral, como pelo segmento vertical ρ , e neste caso ela recebe o nome de transversal (fig3a). A figura 3b mostra um gráfico da aberração transversal, como geralmente é mostrada nos programas de óptica, em função do ângulo u .

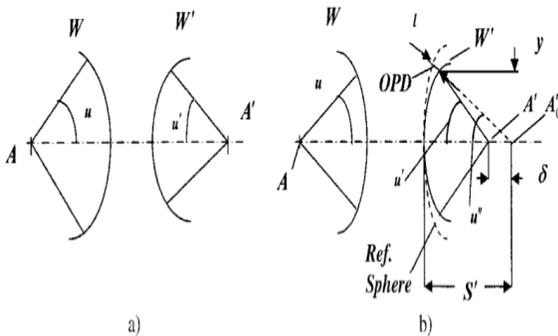


Fig.2 a) Representação da frente de onda para o caso ideal de raios homocêntricos. b) Representação da mesma frente de onda para o caso real. Figura extraída de [1].

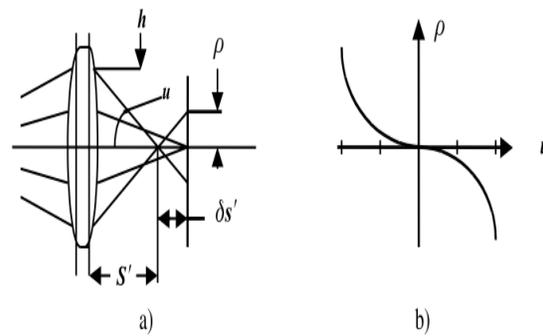


Fig.3 a) Representação da aberração através do desvio lateral e transversal dos raios reais. b) Representação gráfica da aberração transversal em função do ângulo u . Figura extraída de [1].

A função de mérito é uma função que caracteriza o tamanho das aberrações da imagem. Ela é igual a soma dos quadrados dos defeitos. Desta forma quanto menor a função de mérito melhor é a qualidade da imagem. A função mérito pode ser ainda considerada como sendo um espaço de N-dimensões onde N corresponde ao número de variáveis do sistema óptico [2]. Em geral, um programa óptico durante o processo de otimização minimiza a função de mérito.

2.3 Diagrama de Pontos

Os programas para traçado de raios em geral possuem uma função que é chamada de diagrama de pontos que proporciona uma avaliação adequada, para uma checagem rápida da qualidade da imagem [3]. O diagrama de pontos é criado traçando-se raios a partir de um único ponto do objeto e analisando sua intersecção com o plano imagem. Ao analisarmos distribuição dos pontos no plano imagem é possível obter informações sobre os tipos de aberrações presente no sistema e sobre o tamanho da mancha.

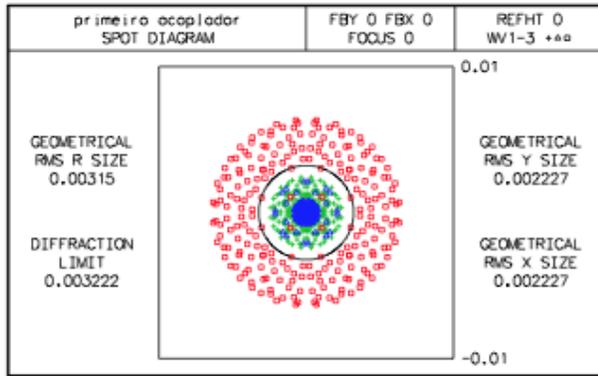


Fig.4 Diagrama de pontos gerado pelo programa Oslo para uma lente do tipo dubleto. Em preto temos representado o disco de Airy.

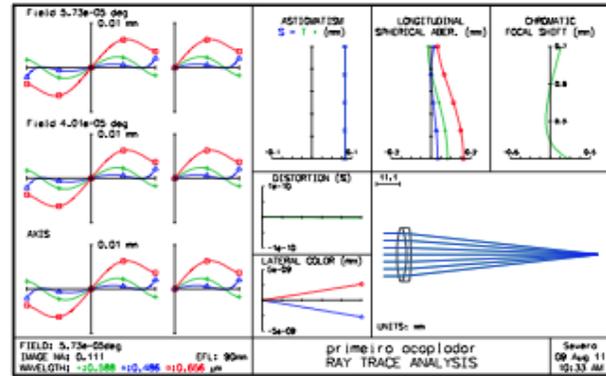


Fig.5 Resultado da análise dos raios gerado pelo programa Oslo para uma lente do tipo dubleto.

Para ilustrar a função diagrama de pontos do programa Oslo mostramos a seguir a figura 4 que foi obtida durante a simulação de uma lente do tipo dubleto. Nesta figura os pontos em vermelho são referentes ao comprimento de onda $\lambda = 656,28nm$, verde $\lambda = 587,56nm$ e azul $\lambda = 486,13nm$. O disco central em preto representa o disco de Airy¹ cujo diâmetro é cerca de $3\mu m$. Pode ser visto, a partir da figura 4, que a lente calculada não está livre de aberração cromática e que a luz vermelha ($\lambda = 656,28nm$) é focalizada fora do disco de Airy.

2.4 Análise dos Raios (Ray trace Analysis)

Outra ferramenta bastante importante utilizada na análise dos sistemas ópticos é o chamado Análise dos Raios. Esta análise é mostrada no programa Oslo através de 6 gráficos que contém informações sobre astigmatismo, aberração longitudinal e deslocamento focal cromático do sistema óptico e que é mostrada na figura 5 acima e que foi obtido durante o projeto do dubleto. Os primeiros gráficos do lado esquerdo ilustram a relação entre as aberrações dos raios e as suas posições radiais na pupila e fornecem ao projetista um diagnóstico rápido dos diferentes tipos de aberrações. O segundo gráfico mais a direita mostra o astigmatismo do sistema óptico que está relacionado com a curvatura de campo da superfície da imagem e que, como a coma, só aparece para pontos fora do eixo óptico. Este gráfico fornece informação sobre a variação do foco paraxial sobre a curvatura de campo para raios tangenciais (denominado de T no gráfico) e raios sagitais (denominado de S no gráfico). O resultado é mostrado para um só comprimento de onda. O terceiro gráfico mostra a aberração esférica longitudinal. O quarto gráfico mostra o deslocamento focal cromático. Esta figura nos fornece informação sobre a região onde as diferentes cores são focalizadas. A escala vertical representa o comprimento de onda enquanto que a escala horizontal indica a posição em relação ao foco. O quinto gráfico nos fornece informação sobre a aberração de distorção e finalmente o sexto gráfico ilustra a diferença entre as altura dos raios azul e vermelho em função da altura da imagem.

¹Devido a natureza ondulatória da luz, um raio ao atravessar uma abertura circular produz um padrão de interferência e conseqüentemente a imagem produzida pela lente não é um ponto perfeito mas sim uma série de anéis concêntricos escuros e claros. Para um sistema livre de aberrações, o disco central claro, que contém cerca de 84% da energia, é conhecido como disco de Airy. O diâmetro do disco é dado por: $d = 0,44\lambda f/D$ onde f é a distância focal da lente e D o seu diâmetro.

2.5 Parcela de Energia Contida (Encircled Energy)

A parcela de energia contida fornece informação de como a energia está distribuída no interior da mancha. A figura 6 abaixo, também gerada a partir do dubleto, mostra a distribuição da energia em função do raio da pupila. Um dos fatores que indica se a qualidade do sistema óptico é boa ou não é o fato da energia crescer rapidamente com aumento do raio. Para sistema com grandes aberrações a energia cresce lentamente com o raio o que indica que o diâmetro da mancha é grande.

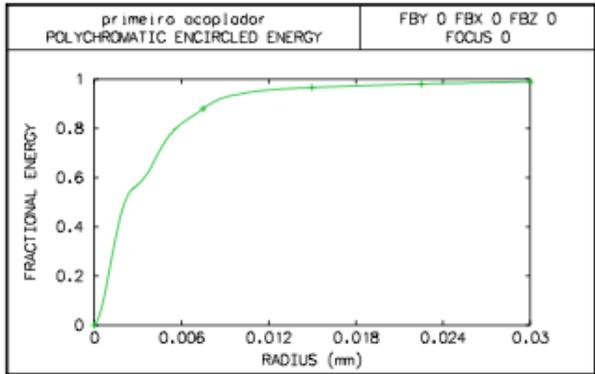


Fig.6 Gráfico gerado pelo Oslo para o projeto de um dubleto para a parcela de energia contida.

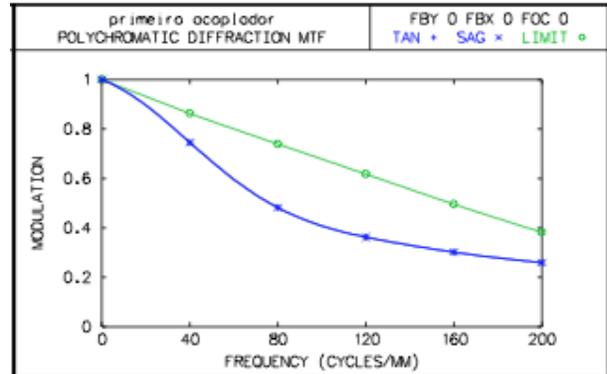


Fig.7 Resultado da análise dos raios gerado pelo programa Oslo para um dubleto.

2.6 Função Transferência de Modulação (Modulation Transfer Function - MTF)

A função transferência de modulação caracteriza a resolução e o desempenho de um sistema óptico. Esta função mede a capacidade do sistema óptico em transferir contraste do objeto para a imagem. A função transferência de modulação do dubleto projetado pode ser vista na figura 7. Nela vemos duas linhas sendo que a superior correspondente ao caso ideal e a inferior a que caracteriza o caso real. Para efeitos práticos, num sistema visual devemos ter um contraste de 50% para 50 linhas por milímetro (lpmm). Neste caso, vemos que o contraste é de 70% em 50 lpmm, que indica que o sistema apresenta boas características ópticas.

3 Arranjo experimental

Para realização deste projeto, será utilizado o espectrômetro do Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP. Este equipamento, cujo modelo é **THR1000**, tem sido usado em muitas experiências espectroscópicas. A figura 8 abaixo mostra uma representação esquemática do arranjo experimental que servirá de base para as simulações a serem realizadas pelo aluno. Este equipamento possui as seguintes características: distância focal de $1000mm$, $f_{valor} = 8,4$ e possui uma configuração do tipo Czerny-Turner. Neste arranjo experimental a luz da coluna de plasma é coletada e direcionada para uma fibra óptica através de um conjunto de lentes (telescope na fig.8) que o bolsista deve projetar com a ajuda do software Oslo. Ao sair das fibras a luz é acoplada na fenda de entrada. Uma vez que a luz penetra no espectrômetro, o aluno deve simular toda a sua trajetória no interior do equipamento, até o **CCD** de modo que seja possível prever as deformações na imagem do plasma devido as aberrações do sistema óptico. Esta simulação nos ajudará

a explorar melhor toda a potencialidade do espectrômetro, por exemplo ela deve mostrar como a largura da fenda de entrada deve influenciar na resolução do equipamento.

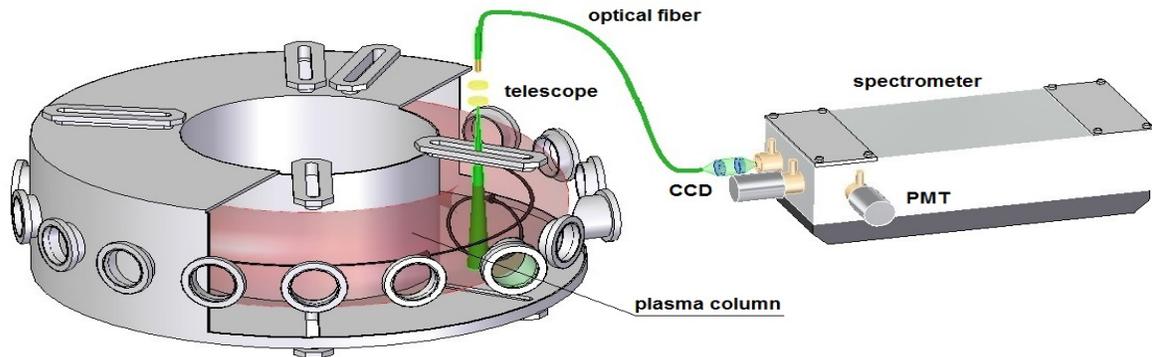


Fig.8 Representação esquemática do arranjo experimental a ser usado no estudo comparativo entre os detetores.

É importante destacar o fato de que a qualidade da reconstrução da imagem da coluna de plasma está diretamente relacionada com a qualidade do sistema óptico que inclui o conjunto de lentes que coletará a luz emitida pelo plasma, as fibras ópticas, cuja função é levar a imagem, sem deformações, do plasma até o detetor **CCD** e do espectrômetro. Neste sentido as simulações que serão realizadas pelo aluno são extremamente importantes e nos permitirão explorar melhor o sistema como um todo.

4 Conclusão

Neste projeto de iniciação científica que está sendo apresentado, o aluno terá que projetar a objetiva responsável pelo acoplamento da luz emitida pelo plasma com o conjunto de 30 fibras ópticas que estão sendo adquiridas com os recursos do projeto sobre o perfil de pressão e que devem transmitir a imagem do plasma até a fenda de entrada do espectrômetro. Terá ainda que simular toda a trajetória dos raios de luz no interior do espectrômetro até o detetor **CCD** instalado na saída. Tanto o projeto da objetiva como a simulação será feito com a ajuda do programa Oslo que atualmente já encontra-se instalado em uma máquina virtual. Este programa, assim como o tracePro foram adquiridos para viabilizar o projeto em andamento ([proc. 2014/13296-8](#)) para construção do diagnóstico do perfil de pressão no tokamak **TCABR** e formação de um grupo de óptica. Neste sentido é importante formarmos o maior número possível de pessoas habilitadas a operar estes softwares.

Com a simulação do traçado de raios no interior do espectrômetro esperar-se melhor explorar todo o potencial do equipamento assim como estudar a influência da abertura da fenda de entrada na resolução espectral do equipamento.

Este projeto visa ainda treinar o aluno a manipular todas as ferramentas necessárias para desenvolver um trabalho de óptica no Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP. Portanto durante a execução deste projeto, o aluno passará por todas as etapas que envolvem um trabalho em óptica que são:

1. **projeto óptico** - aprender a projetar sistemas ópticos utilizando o programa para traçado de raios Oslo.

2. **projeto mecânico** - aprender a projetar suportes mecânicos utilizando os softwares necessários (autocad ou Solid Edge).
3. **tratamento de dados** - aprender a manipular os softwares para tratamento de dados (origin e matlab).

5 Cronograma

A realização do projeto de pesquisa se dará no decorrer de um ano e tem como previsão inicial o seguinte:

- **Segundo semestre de 2015** - neste período está previsto que o aluno estude óptica e aprenda a manusear o programa para traçado de raios Oslo e projete a objetiva para coletar luz da coluna de plasma e focaliza-la nas fibras ópticas. Está previsto também para este período o projeto de um suporte óptico para fixação das lentes focalizadoras.
- **Primeiro semestre de 2016** - neste semestre está previsto a simulação do espectrômetro no Oslo assim como a interpretação dos resultados.

Referências

- [1] Naftaly Menn - **Practical Optics** - Elsevier Academic Press Dissertação de mestrado (2004).
- [2] Scaduto, LCN - **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital** - Dissertação de mestrado (2008).
- [3] **Oslo Optics Software for Layout and Optimization** - User Guide.
- [4] **Oslo Optics Software for Layout and Optimization** - Optics Reference.
- [5] S.C. Zilio - **Desenho e Fabricação Óptica**.