

Trabalho de Conclusão de Curso

UFCG 2010.1



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Implementação e otimização de um **Velocímetro Laser Doppler** em óptica integrada

Ana Júlia Rodrigues Fernandes de Oliveira

Data da Apresentação:	05/04/2010
Área:	Telecomunicações
Professor Orientador:	José Evertom Pombo de Farias

Ana Júlia Rodrigues Fernandes de Oliveira

Implementação e otimização de um **Velocímetro Laser Doppler** em óptica integrada

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Campina Grande, Paraíba
Abril de 2009

O482i Oliveira, Ana Júlia Rodrigues Fernandes de.
Implementação o otimização de um velocímetro laser doppler em óptica integrada. / Ana Júlia Rodrigues Fernandes de Oliveira. - Campina Grande - PB: [s.n], 2010.

45f.

Orientador: Professor Dr. José Ewerton Pombo de Farias.

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia; (Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

1. Velocímetro Laser Doppler. 2. Óptica integrada em vidro. 3. Vidro - dispositivos ópticos. 4. Optoeletrônica. 5. Litografia. 6. Troca de íons. 7. Enterragem. 8. Junção Y. 9. Transições adiabáticas I. Farias, José Ewerton Pombo de. II. Título.

CDU:621.3(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

Trabalho de Conclusão de Curso: Implementação e otimização de um **Velocímetro Laser Doppler** em óptica integrada

Data de Aprovação: __/ __/ __

BANCA EXAMINADORA:

José Ewertom Pombo de Farias
Universidade Federal de Campina Grande
Professor Orientador

Professor Convidado
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Campina Grande – PB,
Abril de 2010

Trabalho de Conclusão de Curso

UFCG 2010.1

Palavras chaves: Óptica integrada, velocímetro laser, guia de onda e troca iônica.

Resumo:

O objetivo do estágio é de fazer a otimização da função de recepção do velocímetro laser Doppler. Para isto, foi realizada na primeira parte do projeto a fabricação do velocímetro na sala branca. Após esta, foi realizada a troca iônica e a enterragem. Com o velocímetro fabricado, foi realizada a caracterização do mesmo. A segunda etapa do foi à fabricação de um guia de onda reto para substituir a fibra ótica que era colada para fazer a recepção do velocímetro. A primeira etapa foi realizada com sucesso, e na segunda etapa foi desenvolvido um programa em linguagem de programação C para calcular todos os parâmetros necessários para utilizar o guia de onda reto como receptor.

Key words : Integrated optical, laser velocimetre, waveguide, ionic exchange

Abstract

The goal of this training course is to make the optimization of the function of reception of the velocimeter laser Doppler. As that it was carried out during the first part of the training course the manufacture of the velocimeter in the dean room, and after the ionic exchange and the enterrage. With the manufactured velocimeter, it was carried out the characterization. The second phase of the training course it was the study and the manufacture of a right guide to replace the fiber optic before has was placed directly above the plate of the velocimeter. The first stage it was finalized successfully, and for the second phase un software in language C was developed to calculate all the parameters necessary to use the wave guide like a receiver.

Sumário

Apresentação da empresa.....	01
Objetivo.....	02
Introdução.....	03

Capítulo 1

Óptica Integrada em vidro

1.1 Introdução.....	06
1.2 Propagação da luz.....	06
1.3 A estrutura dos vidros.....	07
1.4 Processo de Fabricação.....	08
1.4.1 Litografia.....	08
1.4.2 Troca de íons.....	09
1.4.3 Enterragem.....	11

Capítulo 2

Estrutura Emissora

2.1 Introdução.....	12
2.2 Volume de Medidas.....	12
2.3 Elementos componentes do velocímetro.....	13
2.3.1 Junção Y.....	13
2.3.2 Transições Adiabáticas.....	14
2.3.3 Espelho.....	14

Capítulo 3

Estrutura Receptora

3.1 Introdução.....	15
3.2 Abertura numérica.....	15
3.3 Ângulo sólido.....	16

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Introdução.....	17
4.2 Primeira Etapa.....	17
4.3 Segunda Etapa.....	22

Conclusão.....	31
-----------------------	-----------

Bibliografia.....	32
--------------------------	-----------

Anexos:

1 - Código do programa.....	33
2 - Cálculo para achar tangente máxima.....	38
3 - Leis de Flick.....	39

Apresentação da empresa

A empresa A2 photonics sensors é especialista em micro captores e instrumentos de medidas lasers-ópticos dedicados a caracterização de escoamento de líquidos, de gás e micropartículas. Os principais produtos são as mono-sondas ópticas para o escoamento de bolhas, as mono sondas ópticas para o escoamento de gases, as mono sondas ópticas para sprays e o velocímetro a laser Doppler.

A inovação da A2 PHOTONICS SENSORS é a realização e integração dos sistemas de medidas, com elementos ópticos sensíveis, miniaturizados com uma ótima performance, e concedidos em micro tecnologia em vidro.

A empresa coloca em pratica as soluções em óptica integrada no substrato de vidro ou fibra ópticas usinadas e lhes implementam com os meios de tecnologia mais avançado possível. (sala branca, bancos ópticos, lasers...)

A A2 photonics sensors está localizada no instituto de microeletronica eletromagnetismo e fotônica e no Laboratorio de hiperfrequencias e de caracterização (IMEP LAHC), que forma uma unidade mista de pesquisas com mais de 180 pessoas cobrindo um domínio muito largo (materiais, tecnologias, componentes, circuitos e sistemas) que permite efetuar muitas pesquisas interdisciplinares . Para a fabricação de componentes, O IMEP dispoe de 6000m² dentre os 450m² de sala branca existentes no prédio (700m² incluindo as circulações). A sala branca é bem equipada com equipamentos para fazer o depósito de camadas por evaporação, a litografia, etc.



Figura 1 : Depósito de camadas finas (esquerda) e Litografia, gravura e química (direita)

Existem também outros meios de tecnologia que envolve o processo de fabricação de componentes, como os fornos e os equipamentos de polimento.



Figura 2 : Fornos para a troca de íons e enterragem (esquerda) e corte e polimento (direita)

Objetivos

Os primeiros protótipos do velocímetro, que é o objeto de estudo, demonstraram falhas no seu sistema. O problema acontecia porque o velocímetro, que tem em sua composição espelhos côncavos para fazer os raios modificarem a direção e se juntarem após dispersarem durante o caminho, aparecia sempre deformado e por isso não formava franjas de interferências nítidas. A deformação deste espelho pode ser vista na figura 3.

Uma fase de otimização de cada uma das etapas de fabricação do componente foi lançada para descobrir em que etapa de fabricação estava surgindo esta deformação no espelho. Um novo design da máscara foi definido e fabricado, tendo então a necessidade de fazer a fabricação e caracterização dos novos velocímetros. O trabalho tem o objetivo de caracterizar as diferentes funções ópticas necessárias para o velocímetro, e depois testá-lo e conectá-lo.

Durante o trabalho será realizado de maneira acompanhada todas as etapas de fabricação e caracterização do velocímetro, Isto quer dizer:

- Fabricação de dispositivo em óptica integrada no vidro;
- Caracterização óptica do dispositivo;
- Realização de um programa para calcular os parâmetros ótimos de recepção do velocímetro.

Estas atividades foram divididas em duas etapas, a primeira ligada à estrutura de emissão, na qual será realizada a fabricação e caracterização de um lote de velocímetros com a nova máscara e a segunda uma otimização da estrutura de recepção, onde serão previstos os cálculos para a mesma e fabricada uma estrutura.

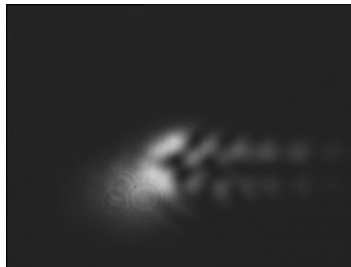


Figura 3 - Espelho esquerdo do velocímetro com deformação

Introdução

O estágio foi realizado com um velocímetro laser Doppler fabricado em óptica integrada. Ele é chamado de velocímetro laser Doppler, porque é baseado no efeito Doppler, que exprime a modificação aparente da frequência emitida por uma fonte móvel que percorre um observador imóvel, ou ao contrário. No caso do velocímetro temos uma partícula que vamos medir a velocidade (que é a fonte móvel), e uma fibra ou um guia de onda atuando como a estrutura receptora do velocímetro que vai receber a reflexão desta partícula (é a fonte fixa).

O velocímetro é composto basicamente de uma estrutura de emissão e uma de recepção. A emissão é uma estrutura que vai produzir um volume de medida, ou seja, franjas de interferências causadas pelos dois raios que saem do velocímetro, e que quando uma micropartícula passa neste volume de medidas, este irá refletir. Reflexão esta será vista pela estrutura de recepção (que é uma fibra óptica ou um guia reto) e analisada. A partir desta reflexão, nós podemos fazer tratamentos de sinais com os quais conseguimos calcular a velocidade da micro partícula. Existem velocímetros com e sem espelhos, na figura 2 temos os velocímetros como estão na máscara:

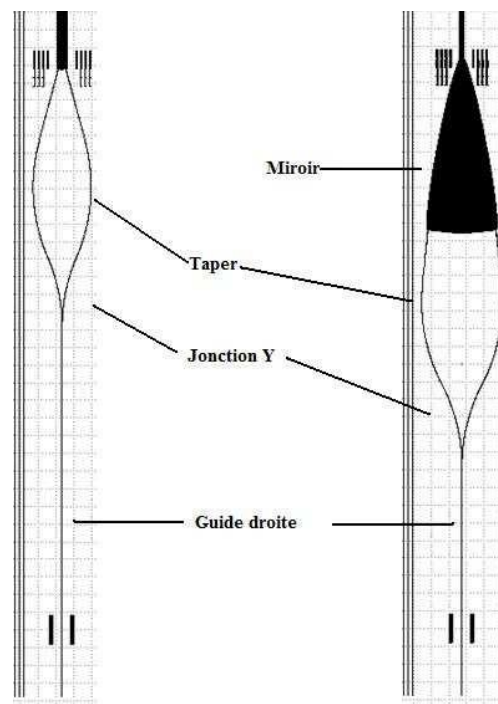


Figura 4 - Esquema do velocímetro

No início do guia reto, injeta-se o laser, e a luz segue o caminho reto. A luz tem um micrometro no começo. Quando ela chega à junção Y, ela vai passar por uma transição adiabática, aonde o perfil de energia se enlanguesce até dois micrometros, e depois ela vai ser dividida em dois feixes iguais cada um contendo um micrometro cada. Após esta separação, cada feixe segue um caminho até chegar a um taper que vão os enlarguecer até 20 micrometros. Se tivermos o velocímetro sem espelho, as luzes vão sair e se encontrar em um ponto aonde formarão franjas de interferência, que é o volume de medidas. A figura abaixo

representa graficamente como é à saída dos raios em um velocímetro sem espelho.

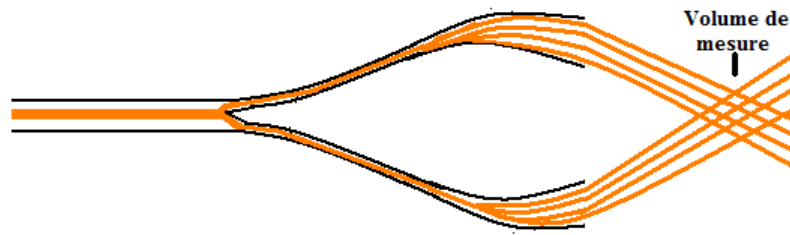


Figura 5 – Raios percorrendo o velocímetro

Se tivermos um velocímetro com espelho, após sair do taper, os raios vão chegar a um espelho parabólico côncavo, onde vão sofrer dois efeitos:

- Os raios vão mudar a direção
- Todos os raios que vinham divergindo vão se juntar

Depois disto, em um lugar do espaço os raios vão se cruzar e vão formar as franjas de interferência mais compactas e definidas.

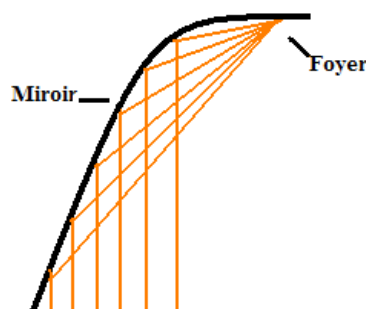


Figura 6 – Saída do taper para velocímetros com espelho

Para fabricar a estrutura de emissão, é necessário passar por processos que começam na sala branca, com a limpeza, litografia, e depois, fora da sala branca é realizada a troca de íons, a enterragem, o corte e o polimento.

Depois da caracterização, são analisados os volumes de medidas, a interfranja, os modos do laser, e se a luz está sendo guiada corretamente durante todo o velocímetro. Se tudo se passa bem, nós podemos dizer que a estrutura emissora está pronta. Então registramos os dados e passamos para a fabricação da estrutura receptora.

A estrutura receptora pode ser uma fibra óptica diretamente colada em cima da estrutura emissora, ou então um guia reto, que também é objeto de estudo do estágio.

Na elaboração da estrutura receptora, é necessário fazer cálculos para saber se é necessário colá-la inclinada para fazê-la ver o volume, ou para pegar o máximo possível da reflexão da partícula, ou se colá-la reta já é suficiente para ter uma boa medida.

Durante a primeira etapa do trabalho será realizada a fabricação e caracterização da nova placa. Na segunda etapa do estágio será feito um estudo dos parâmetros de recepção, e uma otimização desta estrutura.

No primeiro capítulo do relatório temos uma introdução do que é óptica integrada e de como é fabricado um dispositivo nesta tecnologia.

No segundo capítulo são descritas as funções utilizadas na estrutura emissora, e como esta estrutura funciona.

No terceiro capítulo são abordados e demonstrados os parâmetros utilizados para projetar a estrutura receptora. No quarto e último capítulo são apresentados e comentados os resultados das duas etapas do trabalho.

Capítulo 1 - Óptica integrada em vidro

1.1 – Introdução

A integração de dispositivos ópticos em uma placa de vidro, vem se configurando como uma área de pesquisa de grande interesse e de rápido desenvolvimento, devido principalmente às inúmeras vantagens que esta nova tecnologia pode trazer para o campo das telecomunicações, sensoriamento, entre outros.

O vidro utilizado em óptica integrada no vidro é basicamente um vidro no qual é realizado uma troca de íons em determinados locais previamente planejados para realizar funções ópticas. Estas funções integradas no vidro parecem ser como uma das tecnologias mais prometedoras para o desenvolvimento do campo optoelectronico. Isso acontece devido à potencialidade do material de vidro, a facilidade e a flexibilidade do processo da fabricação, o custo dos dispositivos e principalmente os elevados desempenhos destes componentes.

Para se realizar um dispositivo em óptica integrada, existem basicamente oito passos que devem ser rigorosamente seguidos. Estes passos estão resumidamente representados na figura abaixo, e no desenvolvimento do relatório cada passo será detalhadamente discutido.

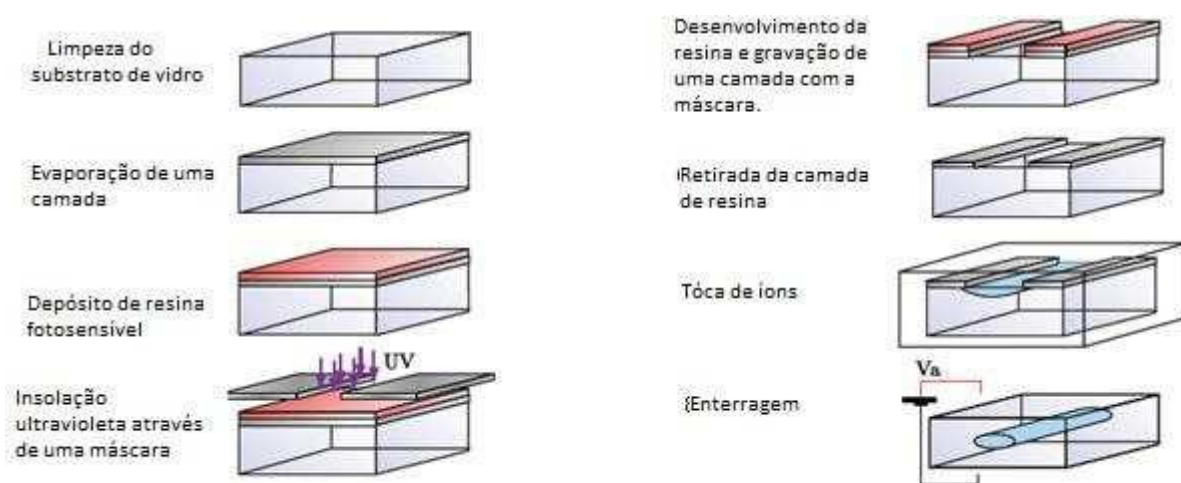


Figura 7 – Esquema de fabricação em óptica integrada

1.2 - Propagação da luz

Se um raio luminoso se propaga no meio mais refringente ele chegará à superfície do meio menos refringente e terá uma reflexão. Dependendo do ângulo que ele vai ter a reflexão podemos dizer que ele teve uma reflexão total interna e vai continuar refletindo durante todo o caminho. O ângulo que ele deve refletir para ter este tipo de reflexão é chamado de ângulo crítico e é definido por:

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

(1)

Aonde n_1 é o índice do meio 1, e n_2 é o índice de refração do meio 2.

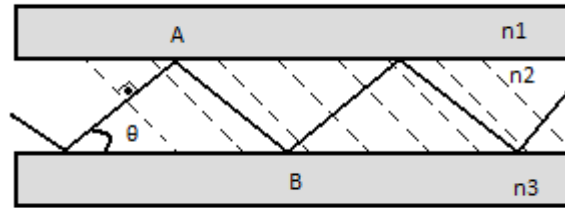


Figura 8 – Esquema da propagação de uma onda plana em um guia de onda.

Olhando a figura, se n_1 é o meio menos refringente que o meio dois (n_2) e tem o ângulo θ inferior ao seu ângulo crítico, o raio não vai poder sair do meio dois, e com isto teremos a guiagem dos raios.

Considerando uma onda que tem reflexão total interna, tem-se que esta onda tem frentes de onda, e estas frentes de onda tem também uma reflexão. A frente de onda resultante no ponto D é a soma da frente de onda se deslocado de C para D. Como temos uma onda plana no guia, A e B vão ter a mesma frente de onda, com uma diferença de fase de 2π . É necessário que :

$$(2) \quad |K| \overline{AB} + \varphi_A + \varphi_B = |K| \overline{CD} + 2m\pi$$

Onde m é um inteiro, e \overline{AB} é a largura do segmento entre os pontos A e B. Teremos o mesmo para C e D.

Os termos φ_A e φ_B são as defasagens que vem do coeficiente de Fresnel. Desenvolvendo a equação, teremos:

$$(3) \quad d k_0 \sqrt{n_2^2 + N_{eff}^2} - \arctan \left[\left(\frac{n_2}{n_1} \right)^p \frac{N_{eff}^2 - n_3^2}{n_2^2 - N_{eff}^2} \right] - \arctan \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^p \frac{N_{eff}^2 - n_3^2}{n_2^2 - N_{eff}^2} \right] - 2m\pi = 0$$

Onde d é a espessura do meio 2, k_0 é o numero de ondas no vácuo, p é 0 para uma polarização TE e 2 por uma polarização TM, e N_{eff} é o índice efetivo que é definido por:

$$(4) \quad N_{eff} = n_2 + \cos\theta = \frac{\beta}{k_0}$$

onde β é a constante de propagação de um modo no guia.

A gente pode ver que a equação de dispersão depende dos índices efetivos, da largura do guia, da largura de onda, e do numero de modos (m).

1.3 - A estrutura dos vidros

De maneira geral, um vidro é obtido fazendo esfriar uma mistura de líquidos a uma velocidade elevada de maneira a evitar problemas de cristalização e assim obter um solido amorfo. O vidro é um material amorfo, isto que dizer não cristalino. Desta forma, ele apresenta uma desordem estrutural importante. O vidro pode mesmo ser visto como uma rede

tridimensional, parecida com a de um cristal, mas no qual a ordem estrutural a curta distancia é conservada.

Por causa da sua estrutura amorfa, o vidro é submetido a um pouco de estrangimentos estequiométricos. Desta forma, um vidro pode incluir em si mesmo uma grande variedade de elementos e apresentar uma composição muito complexa. Para a óptica integrada é mais interessante utilizar os vidros de óxidos, mais especificadamente os semicondutores e o Niobato de Lítio (LiNbO_3). Os óxidos formadores deste vidro podem ser classificados em três categorias de acordo com a regra estrutural que cada um tem durante a vitrificação (formação do vidro). Os formadores de rede, os não formadores de rede e os intermediários. Os critérios estruturais desta classificação tomam em conta o numero de coordenação (numero de átomos de oxigênio que o cátion está ligado) e as força de ligação. Assim os óxidos são classificados nestas três categorias que seguem:

Os formadores de rede: tem ligações muito fortes, com energia bem alta, formando um vidro mesmo se não tem outras componentes. O caso mais freqüente é do silício (SiO_2), mas existe também B_2O_3 , As_2O_3 , GeO_2 ou P_2O_5 .

Os óxidos intermediários: tem ligações fortes também, mas a energia destas ligações são menos elevadas que a dos formadores de rede. Estas ligações não podem formar um vidro sozinho, mas podem contribuir a sua formação juntamente com os óxidos precedentes. Os exemplos mais clássicos são Al_2O_3 , PbO , ZnO , CdO et TiO_2 .

Os modificadores de rede: tem ligações fracas com o oxigênio, e modificam a estrutura do vidro quebrando algumas ligações na rede estabelecida pelos óxidos formadores. Geralmente se encontram na forma iônica e estes íons são geralmente móveis no interior do esqueleto formado pelas outras espécies químicas. Exemplos são: Na_2O , CaO et K_2O .

Como os elementos modificadores de rede são os que se encontram na forma iônica na matriz, e eles têm energia de ligação fraquíssimas com o oxigênio, temos a possibilidade de fazer a troca de íons com o vidro (o esquentando e assim fornecendo energia necessária para quebras as ligações deste íons e os deixar móveis, sem modificar a matriz solida formada pelos outros componentes químicos).

1.4 – Processos de Fabricação

1.4.1 – Litografia

Para realizar um circuito integrado óptico, é necessário confinar a luz em duas dimensões. Para isto é necessário então realizar a troca de íons em determinadas partes do vidro, partes estas que são gravadas durante o processo de fotolitografia utilizando uma camada impermeável a troca com aberturas nas zonas de troca.

Este procedimento tem por objetivo transferir um motivo para um vidro é composto de cinco etapas, e é realizado no interior de uma sala branca.

A primeira etapa e a limpeza, esta etapa consiste em limpar os substratos de vidro com sabão. E necessário limpar com um sabão especial e depois deixá-los dentro de água desionizada. Após esta etapa os substratos estão limpos e prontos para a próxima etapa.

Na segunda etapa, é depositada uma camada de alumínio (porque nos vamos fazer uma troca de íons com potássio). Para fazer esta camada ser depositada, nos fazemos as placas serem esquentadas durante muito tempo, assim temos a evaporação da água e uma camada finíssima de alumínio (200nm em média) é depositada em cima das mesmas.

A terceira etapa consiste em depositar uma camada de resina sobre o substrato. Este material é sensível aos raios ultravioletas e vai permitir, através de uma máscara gravar os motivos nos mesmos. A camada de resina utilizada é em média de 0,5 micrometros de espessura.

A quarta etapa é para fazer uma insolação ultravioleta através de uma máscara. A resina é exposta aos raios ultravioletas através de uma máscara mãe contendo os motivos do velocímetro.

Na quinta etapa a resina que foi exposta aos raios ultravioletas é dissolvida em uma solução, procedimento que chamamos de desenvolvimento. Após o desenvolvimento, o substrato é colocado dentro de outra solução química que vai fazer a gravação dos motivos na placa. A sexta etapa consiste em retirar a resina restante na superfície.

1.4.2 - Troca de íons

Esta etapa se passa de acordo com a Lei de Arrhenius que enuncia que uma reação química precisa de um amortecimento. É necessária certa quantidade de energia para preparar os componentes que vão reagir. Em particular é necessário que eles entrem em colisão com uma boa orientação, e que esta colisão permita um enfraquecimento das ligações químicas que devem se romper para formar o produto.

Em consequência, existe uma lei que tem um parâmetro independente da temperatura, a energia de ativação:

$$\mu = \mu_0 * e^{-\frac{E}{RT}} \quad (5)$$

Onde μ_0 é a constante de proporcionalidade, E é a energia de ativação, e R é a constante universal dos gases perfeitos. Esta equação significa que se nós elevarmos a temperatura, em consequência a mobilidade dos íons vai aumentar também.

Colocando o vidro em presença de íons (em contato com uma fonte de íons), nós vamos fazer difundir os íons modificadores de rede em direção ao interior do vidro. Isto vai dar uma dupla difusão porque existem os íons que vão entrar e íons que vão sair: este fenômeno se chama troca iônica.

Considerando a dupla iônica A^{+}, B^{+} , onde os íons A^{+} estão presentes no interior do vidro, e os íons B^{+} são fornecidos por um banho de nitrato, temos que fisicamente, a difusão de uma quantidade ocorre quando há um desequilíbrio espacial desta quantidade, isto quer dizer que quando tem um elemento químico mais concentrado num meio do que em outro, a natureza tende a restabelecer o equilíbrio. Matematicamente há duas relações que descrevem este fenômeno :

- O balanço de massa ;
- A lei de concentração de Flick.

Se pegarmos como hipótese os íons A^{+}, B^{+} , a superfície é tratada escrevendo a interação entre os íons A^{+} e B^{+} sob forma de reação de equilíbrio termodinâmica: $A_{vidro}^{+} + B_{banho}^{+} \leftrightarrow A_{banho}^{+} + B_{vidro}^{+}$ que é caracterizada pela constante de reação K , definida pelas concentrações de equilíbrio:

$$K = \frac{A_{banho}^+ + B_{vidro}^+}{A_{vidro}^+ + B_{banho}^+}$$

(6)

No início supõe-se que não há íons B^+ , dentro do vidro, e como isto a concentração iónica na superfície é constante e chamada de c_0 .

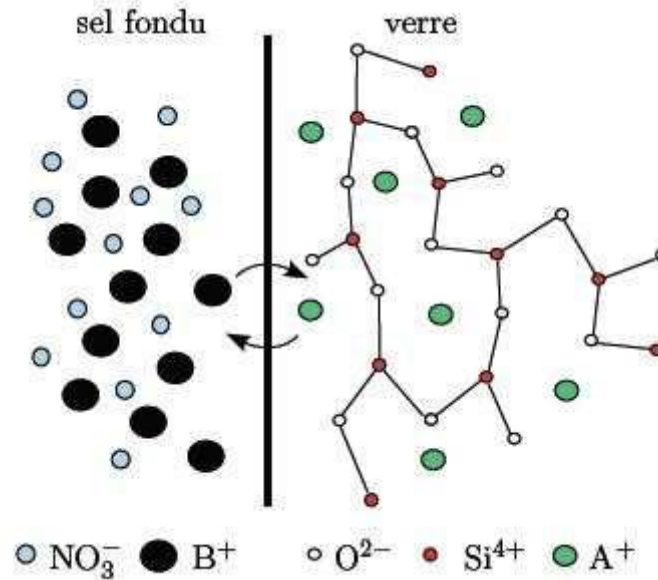


Figura 9 – Esquema do processo de troca de íons

A definição da concentração normalizada do banho em íons B^+ ,

$$x = \frac{[B_{banho}^+]}{[A_{banho}^+] + [B_{banho}^+]}$$

(7)

que permite de religar a taxa de substituição de íons B^+ , à constante de equilíbrio:

$$c_{surf} = \frac{Kx}{1 + x(K-1)}$$

(8)

Supõe-se que a cinética de difusão não perturba o equilíbrio na superfície e que a condição de equilíbrio é estabelecida num tempo suficientemente rápido para ser considerada negligenciável durante a troca. Com isto calculamos a concentração na superfície a partir da concentração do banho x .

Com relação a primeira lei de Fick, nós podemos descrever os fluxos de íons como :

$$\begin{cases} \vec{J}_A = -D_A * \vec{\nabla} * C_A \\ \vec{J}_B = -D_B * \vec{\nabla} * C_B \end{cases}$$

(9)

Onde \vec{J}_A e \vec{J}_B são os fluxos dos íons A e B, c_A e c_B são suas concentrações no interior do vidro, e D_A e D_B são suas difusões.

A segunda lei exprime a conservação do fluxo :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{\nabla} J_B$$

(10)

E com algumas manipulações nós acharemos uma equação linear de difusão do calor dada por :

$$c(x) = c_{surf} * erfc\left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_B * t}}\right)$$

(11)

Onde $erfc$ é :

$$erfc(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^{-\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha \quad (12)$$

O termo $2 * \sqrt{D_B * t}$ onde t é a duração total da troca, chamado de largura efetiva da difusão, e representa a profundidade que um guia de onda deverá ter para que seu núcleo contenha a mesma quantidade de íons que o de um guia difundido [6].

Existe um modelo empírico (desenvolvido por Fantone) único que determina a variação de índice com a concentração de íons antes da troca.

$$\Delta n = \frac{1}{v} * \frac{C_{i_1}(x, t=0)}{C_{i_2}(x, t=0)} * \left(\Delta R - \frac{R_0}{V_0} * \Delta V \right) \quad (13)$$

Onde V_0 é o volume do vidro por mol de átomos de oxigênio, R_0 é a refração por mol de átomos de oxigênio, e ΔV e ΔH são as variações de V_0 e de R_0 resultante da troca.

A partir desta teoria é realizada a troca de íons, e altera-se o índice do vidro, fazendo a luz ser guiada. A variação de índice em um vidro explica-se pelo fato dos novos íons não terem a mesma polarização eletrônica, e que não ocupam o mesmo volume que os antigos.

1.4.3 - Enterragem

As perdas devido a defeitos na superfície do vidro (por exemplo riscos, poeiras, e imperfeições criadas pela troca de íons) podem ser reduzido fortemente, e às vezes até eliminadas se enterrarmos os guias, além do mais podem assim ser protegidos da umidade do ar.

A técnica utilizada para realizar esta etapa consiste à aplicar um campo elétrico na placa de vidro e fazer os íons migrar para a parte interna do mesmo. Esta técnica consiste em fazer passar corrente no vidro (imerso em uma mistura de sais derretida), que vai criar um campo elétrico e fazer a migração de íons. O tempo que se faz passar a corrente depende da altura que se quer enterrar.

Capítulo 2 – Estrutura emissora

2.1 – Introdução

Nós chamamos de estrutura emissora, a estrutura que vai criar o volume de medidas onde a partícula na qual queremos descobrir a velocidade vai passar e vai criar uma reflexão que será vista pelo receptor. É a partir desta reflexão que será possível encontrar a velocidade.

2.2 - Volume de Medida

Se nós fizermos cruzar dois feixes de luz em certo lugar do espaço, estes vão criar um volume de medidas (no lugar exato do cruzamento dos feixes). Quando a partícula passa neste volume de medidas, ela refletirá uma quando por causa do primeiro feixe, e outra onda por causa do segundo feixe. Sobre o detector chegará:

$$E = E_1 e^{i(\phi_1 - \omega_1 t)} + E_2 e^{i(\phi_2 - \omega_2 t)} \quad (14)$$

Onde ω_1 e ω_2 são as frequências dos raios, e ϕ_1 e ϕ_2 são suas defasagens.

A mudança de frequência, que chamamos de frequência Doppler é a diferença entre a frequência da primeira onda e a frequência da segunda onda. Assim, encontramos:

$$\omega_D = \omega_2 - \omega_1 = \frac{2 + \pi + \alpha}{\lambda_D} * v_D * (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (15)$$

É interessante ver que a orientação do detector não influencia sobre o valor de ω_D . As orientações dos dois feixes incidentes determinam a componente da velocidade que é medida. Assim o detector pode ser colocado em qualquer lugar sem que altere o resultado, e a altura do detector não adiciona nenhuma incerteza sobre a determinação da velocidade, em contrapartida, o contraste dos sinais será afetado pela abertura do receptor. Quando uma partícula passa nas interfranjas formadas pela interferência, ele vai produzir um sinal Doppler com o comportamento visto na figura. O envelope deste sinal está ligado a distribuição de energia do raio laser. Para conhecer a resposta real, é necessário observar o tamanho da partícula e a distribuição de energia dos raios lasers.

Ele é constituído de duas componentes, a baixa frequência, que é ligada ao tempo de passagem da partícula no volume de medidas, e a alta frequência que é a frequência Doppler contendo a informação sobre a velocidade da partícula.

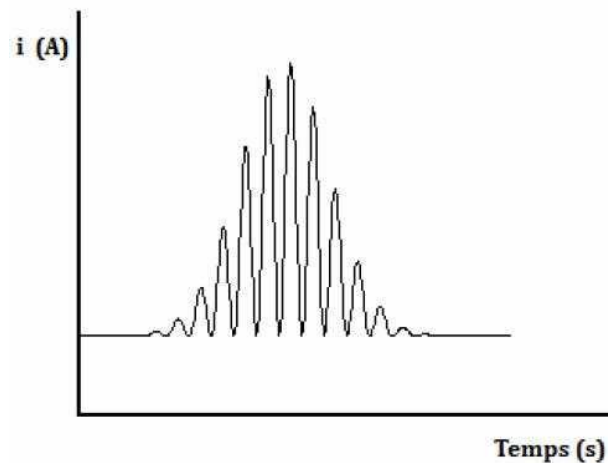


Figura 10 – Esquema do sinal Doppler produzido por uma partícula quando esta passa no volume de medidas

2.3 - Elementos componentes do Velocímetro

O objeto de estudo do estágio é o velocímetro, e para fazê-lo é necessário algumas funções ópticas sejam gravada na placa de vidro. Estas funções serão apresentadas a seguir.

2.3.1 - Junção Y

A primeira estrutura encontrada pela luz a ser injetada no velocímetro é um guia reto. Logo após percorrer este guia reto, a luz chega numa estrutura que chama-se junção Y. é esta estrutura que faz a separação em dois feixes. Esta estrutura é simétrica, e o guia-de entrada e de saída são monomodos.

O funcionamento se dá da seguinte maneira: o perfil de intensidade da energia luminosa na entrada é lentamente alargado por uma transição adiabática. Na saída da zona de transição adiabática, toda a energia é transferida ao modo fundamental da estrutura que agora tem duas saídas idênticas e com a mesma fase. A estrutura não apresentará perdas significantes se o ângulo θ_Y é menor ou igual a 1. O ângulo θ_Y é dado por:

$$\theta_Y = \arccos \left[1 - \frac{d^2}{2 + R_{\text{curv}}^2} \right] \quad (16)$$

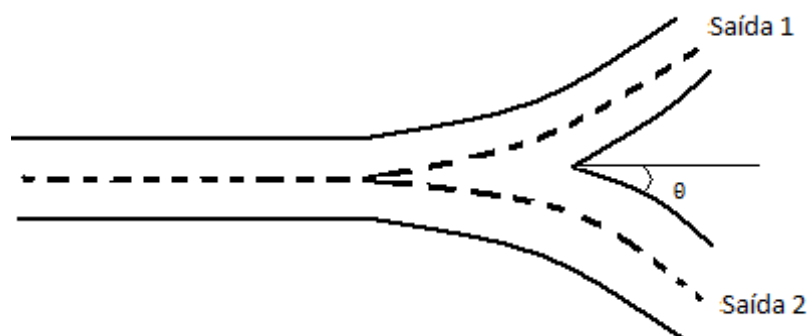


Figura 11 – Esquema da Junção Y

Onde d é a largura dos guias.

2.3.2 - Transições adiabáticas

Após a luz sair da junção Y, os raios separadamente percorrem outro guia reto, e então encontra uma estrutura que tem a função de fazer o seu alargamento. A sua presença no velocímetro é indispensável porque faz a luz não muito não divergir mas mesmo assim enlarguecer.

A divergência do feixe gaussiano é dada:

$$\theta_d = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (17)$$

Onde W_0 é o West, ou seja, a largura mínima do raio, e é dada por:

$$W_0 = \left(\frac{\lambda z_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Onde z_0 é o que chamamos de distancia de Rayleigh e tem o valor de $\sqrt{2} \cdot W_0^2$.

Se temos no velocímetro uma divergência, vai produzir uma interfranja variante, e assim é necessário aumentar a dimensão dos feixes para diminuir a sua divergência, para isto utilizamos as transições adiabáticas. Este alargamento excita apenas o modo fundamental.

2.2.3 - Espelho

Os espelhos esféricos são constituídos de uma superfície lisa e polida com formato esférico. Se a parte refletora for interna à superfície, o espelho recebe o nome de espelho côncavo; se for externa, é denominado convexo.

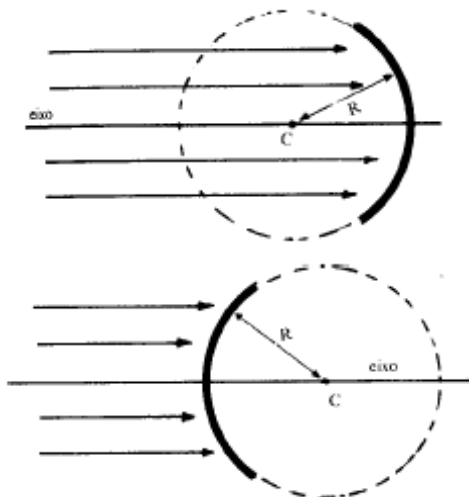


Figura 12 – Representação dos espelhos concavos e convexos

Para obter a modificação de direção dos raios e também a reintegração dos raios que vinham divergindo, utilizamos um espelho côncavo. Nos velocímetros é utilizado para cada saída do taper um espelho côncavo para fazer os raios que saem do taper convergir em um só ponto no espaço.

Capítulo 3 - Estrutura receptora

3.1 Introdução

No velocímetro a recepção pode ser realizada por um guia reto colocado em cima da placa na qual vai estar o velocímetro.

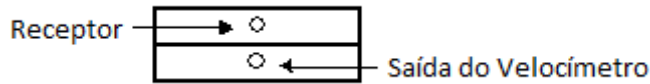


Figura 13 – Esquema da vista frontal do velocímetro

Deste jeito, a partícula que vai refletir quando passar no volume de medidas criará um cone de energia, no qual a base é composta de uma circunferência que vai ser vista pelo receptor.

Para ver bem o volume de medida, há parâmetros importantes a serem considerados. O cone que vai formado dependa diretamente da abertura numérica. Se o cone formado pelo receptor não pode ver o volume de medida, não vai poder medir a velocidade, e assim é necessário inclinar para fazê-lo ver.

3.2 – Abertura Numérica

Para saber a abertura numérica de uma fibra óptica é fácil porque há nas especificações dadas pelos fabricantes, mas para saber a abertura numérica de um guia de onda é ligeiramente mais complicado porque depende dos parâmetros de fabricação (troca de íons, enterragem...). Devido a isto é realizado um estudo para descobrir a abertura numérica de um guia de onda.

Tem-se que uma fibra tem o ângulo de aceitação local (ou abertura numérica local) definido por

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \theta_{max} \quad (19)$$

Onde n_1 é o índice do núcleo, e n_2 é o índice da casca.

Levando em conta a uniformidade axial da fibra, os raios guiados no núcleo emergem pela face de saída em um cone cuja metade do ângulo é igual ao ângulo de aceitação. Pode-se por conseguinte determinar abertura numérica de uma fibra medindo o seno da metade do ângulo do cone de radiação geralmente observado na saída da fibra.

A técnica de medida para descobrir a abertura numérica da fibra óptica consiste em deslocar o ponto de focalização de um feixe luminoso através de uma objetiva de microscópio sobre a face de entrada da fibra óptica.

A medida da potência em saída da fibra em função da posição do ponto de focalização permite descobrir o perfil de índice do coeür. Esta medida trata-se de medir a dimensão da projeção luminosa (imagem do diâmetro do coeür) obtida pelo microscópio, após deslocar ligeiramente a fibra e ver outra vez a projeção. Com isto teremos um triângulo que tem como ângulo a abertura numérica.

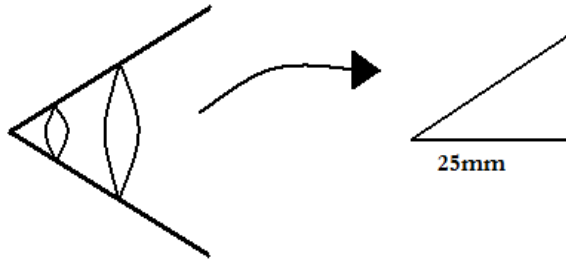


Figura 14 – Esquema do triangulo formado para a experiencia de abertura numérica

O valor da abertura numérica que permite descobrir a diferença de índice (núcleo, casca) é:

$$\Delta n = \frac{ON^2}{2 \cdot n_1} \quad (20)$$

$$n_2 = \Delta n - n_1 \quad (21)$$

As perdas na saída da fibra são essencialmente devido à injeção que não é perfeita (reflexão de Fresnel, conectores). As medidas de potencia na entrada e na saída da fibra permitem descobrir estas perdas.

3.3 - Angulo sólido

Tratando-se de uma superfície esférica há necessidade de se definir ângulo sólido (w). É a relação entre a área (A) do setor desejado e o quadrado do raio (r). O ângulo sólido é medido em esterorradiano. $w = A / r^2$.

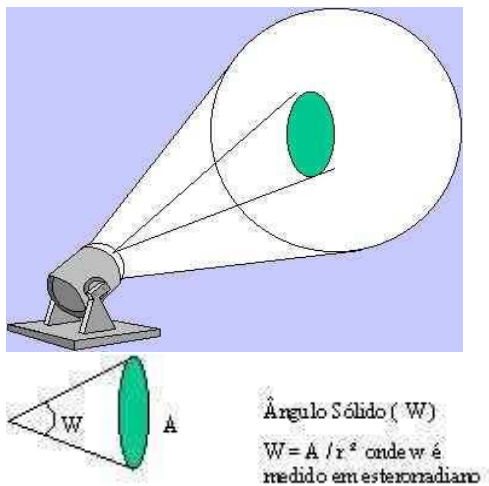


Figura 15 – Representação do angulo sólido

A gente não pode calcular o angulo sólido sem considerar a abertura numérica, um depende diretamente do outro para a aplicação que queremos. Mesmo se os raios atinjam uma área considerável na esfera de recepção, se estes raios não chegam com uma inclinação adequada (angulo menor do que a abertura numérica), o receptor não vai conseguir receber os raios.

Capítulo 4 – Resultados Experimentais

4.1 – Introdução

Neste capítulo será demonstrado e comentado em detalhes como o trabalho foi desenvolvido. O trabalho foi dividido em duas partes, a primeira para fabricar e caracteriza o velocímetro, e a segunda para realizar um estudo sobre a estrutura de recepção.

4.2 - Primeira parte do estágio

A primeira etapa do estágio foi composta da fabricação e caracterização diversas vezes dos velocímetros realizados com a nova mascara.

A nova máscara tem um esquema como abaixo:

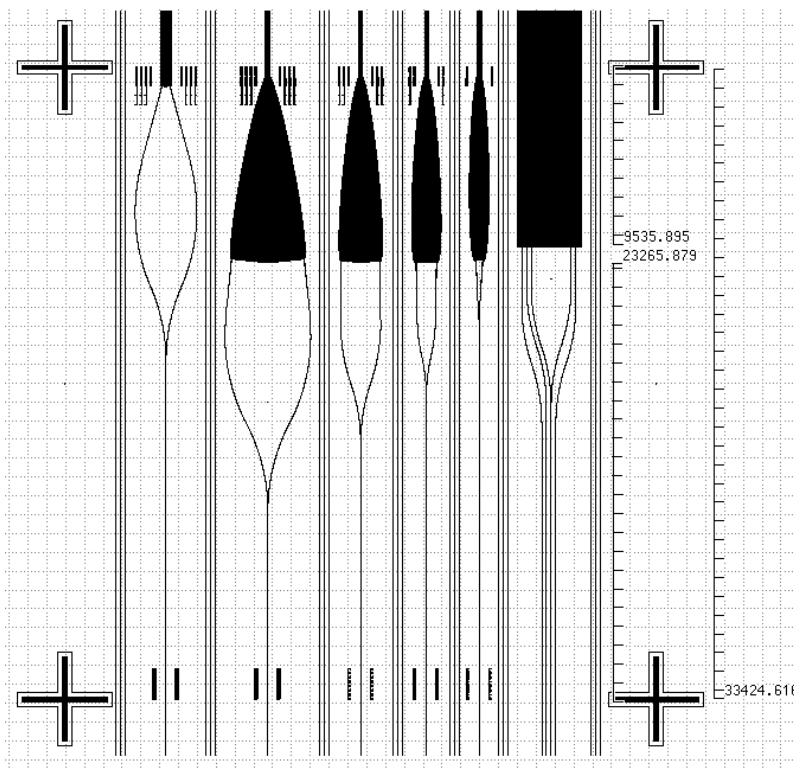


Figura 16 – Máscara utilizada para fabricação do velocímetro

Definimos o primeiro velocímetro da esquerda para direita de velocímetro A, e assim por diante até o último velocímetro chamado de velocímetro E. Os resultados experimentais, ou seja a caracterização, de cada velocímetro foi realizada. A seguir encontra-se uma síntese desta caracterização.

Calibração

Para saber a real medida da distancias analisadas no computador, foi realizada uma calibração na qual plotamos no computador o gráfico de energia de uma estrutura na qual sabíamos a real distancia, e assim descobrimos qual a distancia equivalente a um pixel para fazer as relações com os gráficos de energia das interfranjas dos velocímetros. A calibração tem a saída mostrada na figura e o gráfico de energia na figura

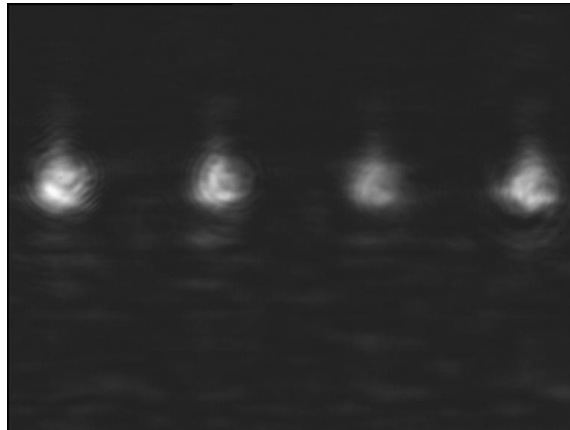


Figura 17 – Saída da calibração

Gráfico de energia da calibração

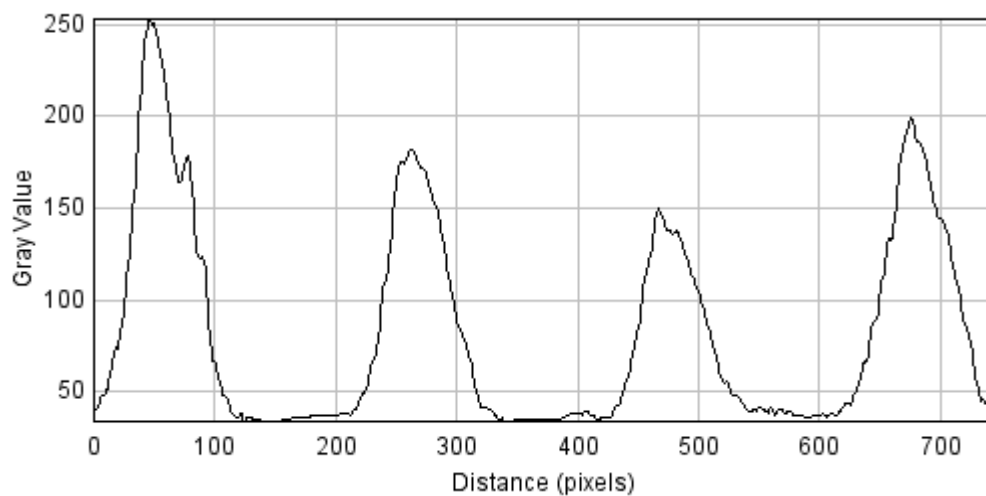


Figura 18 – Gráfico de energia d calibração com W=210 pixels

De um pico ao outro temos 210 pixels, e sabemos que a real distancia entre uma mancha e outra é 20 μm , então para descobrir as reais distancias interfranjas, foi necessário fazer uma simples regra de três observando o gráfico de energia das interfranjas.

Testes com o velocímetro A

Este velocímetro não tem espelhos, e nós podemos ver nas saídas suas imperfeições. A saída esquerda é muito mais forte do que a saída direita, em media 53% e observando o gráfico de energia do volume de medidas, a gente pode concluir que este velocímetro tem 1.05 μm .

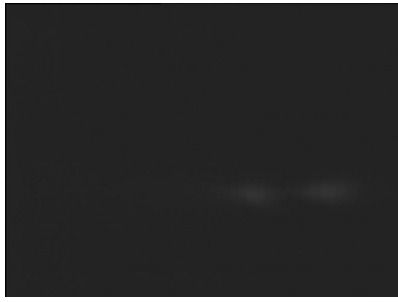


Figura 19 - Saída direita do Velocímetro A

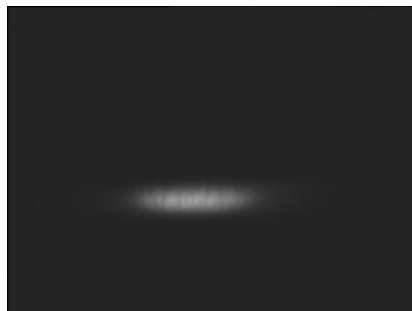


Figura 20 - Saída esquerda do velocímetro A

O volume de medidas foi encontrado a 0.574mm

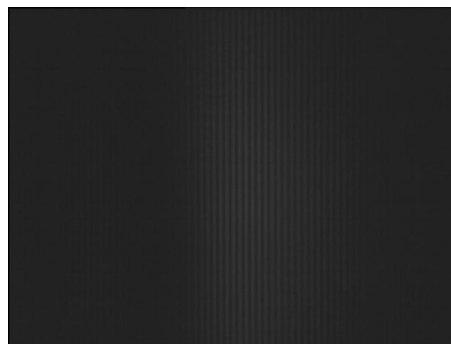


Figura 21 - Volume de medidas do velocímetro A

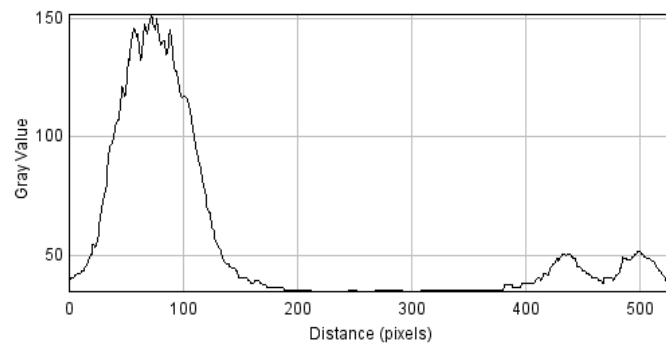


Figura 22 - Gráfico de energia das saídas do velocímetro A

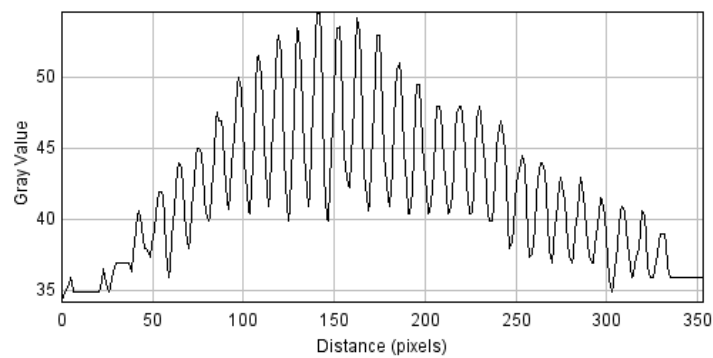


Figura 23 - Gráfico de energia do volume de medidas do velocímetro A

Velocímetro C

Este velocímetro tem em casa saída um taper e em cada saída do taper um espelho côncavo. Observando o gráfico de energia, nós podemos ver que a saída direita é 30% mais forte que a saída da esquerda, e nós podemos observar também que ela é quase uma gaussiana sem defeitos. Observando o gráfico de energia do volume de medidas, e fazendo a relação com a calibração, nós vimos que este é um velocímetro com distancias interfranjas de $1\mu\text{m}$.



Figura 24 - Saída esquerda do Velocímetro C

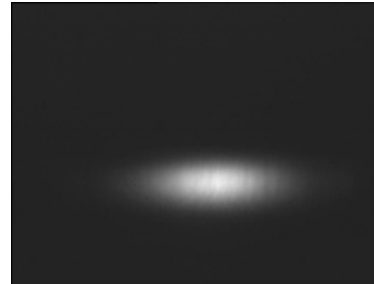


Figura 25 - Saída direita do Velocímetro C

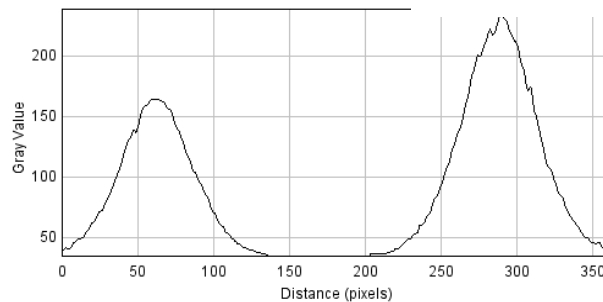


Figura 26 – Gráfico de energia das saídas do velocímetro C

O volume de medidas foi encontrado a 0.529mm

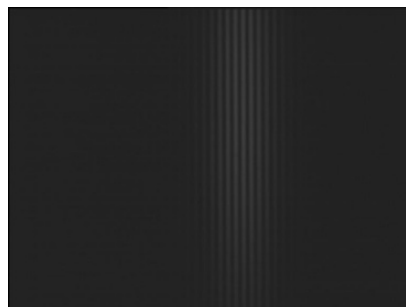


Figura 27 – Gráfico do volume de medidas do velocímetro C

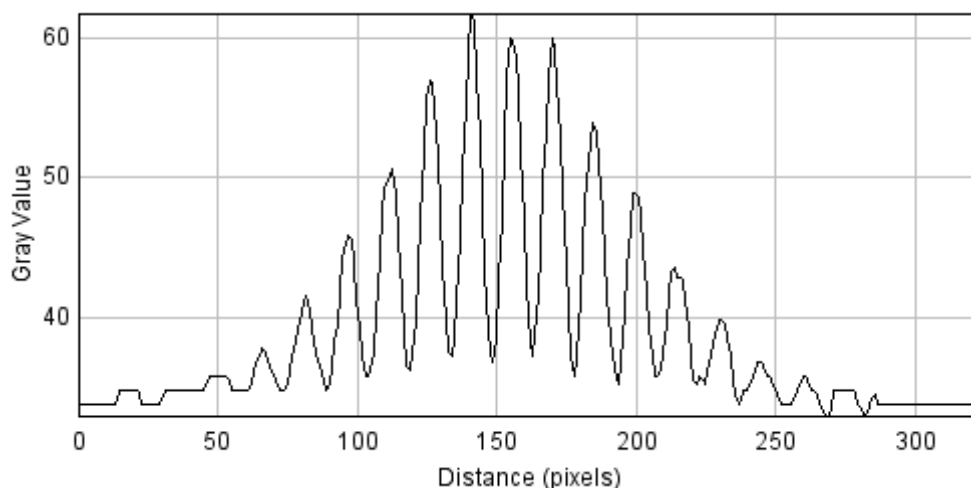


Figura 28 – Gráfico de energia do volume de medidas do velocímetro C

O resultado da caracterização dos outros velocímetros está resumido na tabela a seguir.

Velocímetro	Volume de medida	Distancia Interfranja	Espelho	Comentário
A	0,574mm	1,05 μm	Não	Saída esquerda 53% mais forte
B	0,526mm	1,00 μm	Sim	
C	0,529mm	1,00 μm	Sim	Saída direita 30% mais forte
D	0,550mm	2,00 μm	Sim	
E	0,653mm	1,05 μm	Sim	Saída direita com imperfeições e esquerda 46% mais forte

A conclusão desta caracterização, após feita a fabricação, o corte e o polimento, é que nós encontramos os mesmos defeitos das placas fabricadas anteriormente, ou seja, os defeitos com relação ao espelho. A próxima etapa é de achar em que etapa está o erro, se este é um erro de fabricação ou um erro da máscara, modificar aonde foi encontrado o erro e em seguida e fazer novos testes.

Foi modificado o tempo de enterragem, e quando foram realizados os novos testes, o defeito que aparecia no espelho, apresentado nestas caracterizações, desapareceu. Isto rendeu interfranjas mais definidas e sem defeitos.

4.3 - Segunda parte do estágio

Para a segunda etapa que foi a otimização do receptor, foi realizado um programa em linguagem de programação C para calcular os parâmetros do receptor. Nesta secção serão apresentados os cálculos utilizados para o resultado final do programa.

Primeiramente para fazer o cálculo do angulo solido do receptor, foi realizado os seguintes cálculos:

Temos que a abertura numérica é definida por:

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \theta_{\text{max}} \quad (22)$$

Onde n_1 é o índice do guia, e n_2 é o índice do vidro.

E a energia:

$$W = \iint \frac{1}{|OP|} \vec{n} \cdot \vec{p} \, dS \quad (23)$$

Onde \vec{n} é a normal unitária a superfície S:

$$\text{A distância } |OP| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \text{ e } \frac{\vec{1}}{|OP|} = \frac{\vec{1}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (24)$$

Fazendo a divergência, teremos:

$$-\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{1}}{|OP|} = -\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \vec{k} \right] \quad (25)$$

Que multiplicando pela normal unitária a superfície

$$-\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{1}}{|OP|} \vec{n} \cdot \vec{p} = -\frac{z}{[(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}]} \quad (26)$$

E então, resolvendo a equação da energia :

$$w = \iint_S \frac{z}{[(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}]} \, dS \quad (27)$$

S é a superfície de intersecção entre a circunferência formada pela base do cone de reflexão formado pela partícula que vai ser medida e a circunferência formada na saída do guia que servirá como recepção.

Se tivermos o raio do receptor localizado no centro de um eixo de coordenadas, e deslocamos a circunferência formada pela base do cone emissor, teremos:

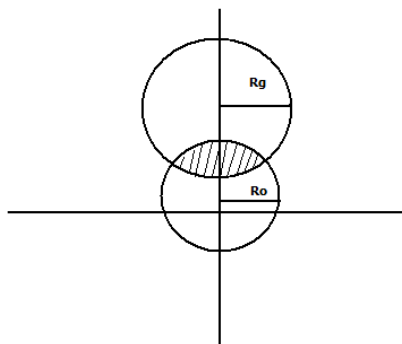


Figura 29 – Esquema da intersecção das circunferências

R_g → Raio da base do cone formado pela partícula emissora

R_o → Raio do receptor

Considerando z como d que é a distancia entre a partícula e o receptor,

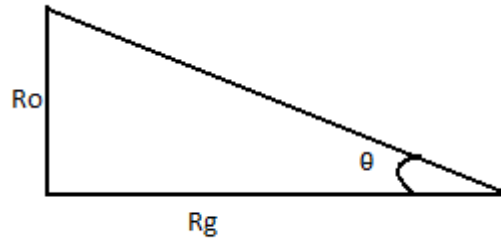


Figura 30 – Triângulo formado entre o receptor, emissor e a partícula

temos:

$$\tan \theta_{\text{max}} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d} \quad (28)$$

$$\theta_{\text{max}} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_D} \quad (29)$$

$$\cos \theta_{\text{max}} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\text{max}}} \quad (30)$$

$$\cos \theta_{\text{max}} = \frac{\sqrt{n_{\text{ext}}^2 - \text{ON}^2}}{n_{\text{ext}}} \quad (31)$$

E para colocar em função da abertura numérica e do índice :

$$\tan \theta_{\text{max}} = \frac{\sin \theta_{\text{max}}}{\cos \theta_{\text{max}}} = \frac{\text{ON}}{n_{\text{ext}}} * \frac{\text{ON}}{\sqrt{n_{\text{ext}}^2 - \text{ON}^2}} = \frac{\text{ON}}{\sqrt{n_{\text{ext}}^2 - \text{ON}^2}} \quad (32)$$

Como $d * \tan \theta_{\text{max}} = R_0$, temos que o raio que o receptor verá é de

$$R_0 = d * \frac{\text{ON}}{\sqrt{n_{\text{ext}}^2 - \text{ON}^2}} \quad (33)$$

A partir da equação da projeção no receptor:

$$x^2 + y^2 = R_0^2 \quad (34)$$

E da equação da circunferência formada pela partícula que vamos medir a velocidade:

$$(x - h)^2 + y^2 = R_G^2 \quad (35)$$

onde h = altura do velocímetro + altura da colagem + altura da enterragem

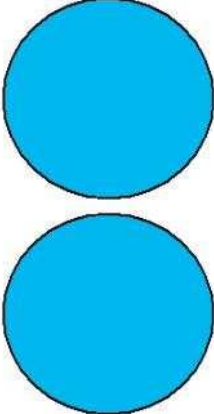
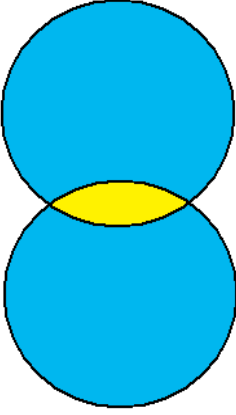
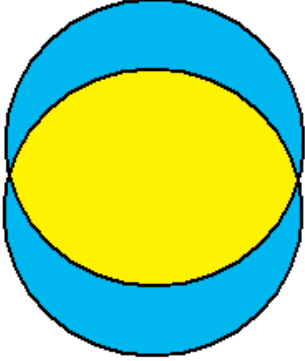
Temos as intersecções das circunferências:

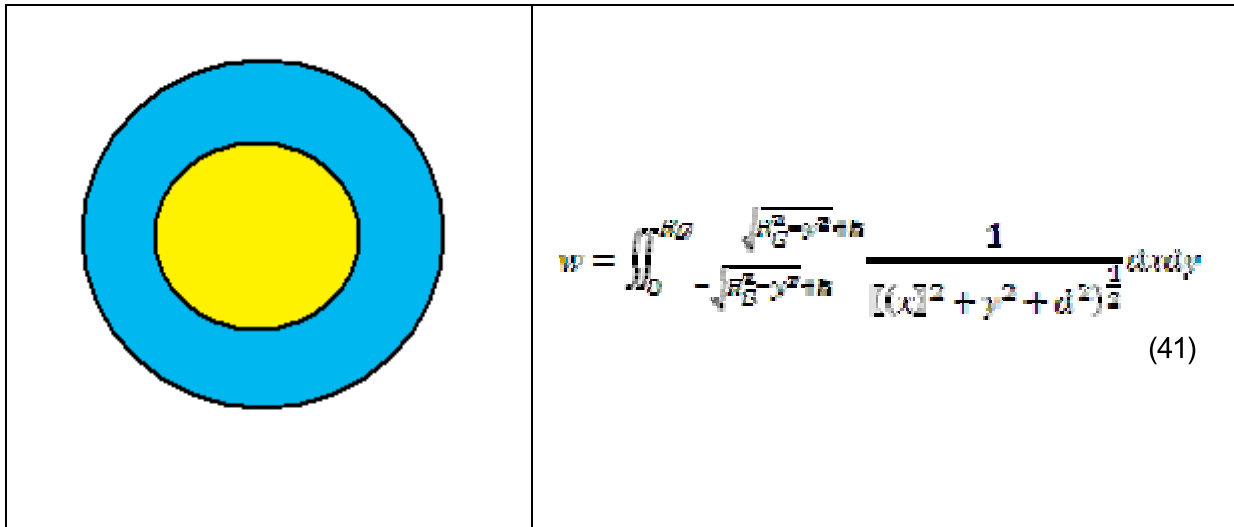
$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R_0^2 \\ y^2 = R_G^2 - x^2 - h^2 + 2xh \end{cases} \quad (36)$$

$$X_{\text{int}} = \frac{R_0^2 + h^2 - R_G^2}{2h} \quad (37)$$

$$Y_{\text{int}} = \pm \sqrt{R_0^2 - X_{\text{int}}^2} \quad (38)$$

A gente tem quatro situações de intersecções possíveis:

	<p>A saída do guia não vê a partícula, conseqüentemente não tem Potência associada.</p>
	$W = \iint_{-y_{lim}}^{y_{lim}} \frac{\sqrt{a^2 - y^2}}{\sqrt{a^2 - y^2 + b^2}} \frac{1}{(x^2 + y^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy \quad (39)$
	$w = \int_{-a}^{+a} \frac{\sqrt{a^2 - y^2}}{\sqrt{a^2 - y^2 + b^2}} \frac{1}{(x^2 + y^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy + 2 \int_{-b}^{+b} \frac{\sqrt{a^2 - y^2}}{\sqrt{a^2 - y^2 + b^2}} \frac{1}{(x^2 + y^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy \quad (40)$



Experiência para descobrir a abertura numérica

Foi realizada a experiência para descobrir a abertura numérica do guia reto fabricado para a estrutura de recepção.

Com a ajuda do banco de medidas, a gente vai distanciar certa distancia conhecida (25mm) e vamos observar a saída. Com estes valores é possível montamos o triângulo anteriormente demonstrado e assim é possível descobrir a abertura numérica.

Com uma calibração, foi observado que 116 pixels correspondem a 10 mm. Deste jeito temos:

116 pixels ----- 10mm

76 pixels ----- h

$$h = \frac{760}{116} = 6,5 \text{ mm}$$

$$\tan \theta = \frac{6,5}{25} = 0,26$$

$$\theta = 14,57^\circ$$

$$NA = \sin \theta = 0,251$$

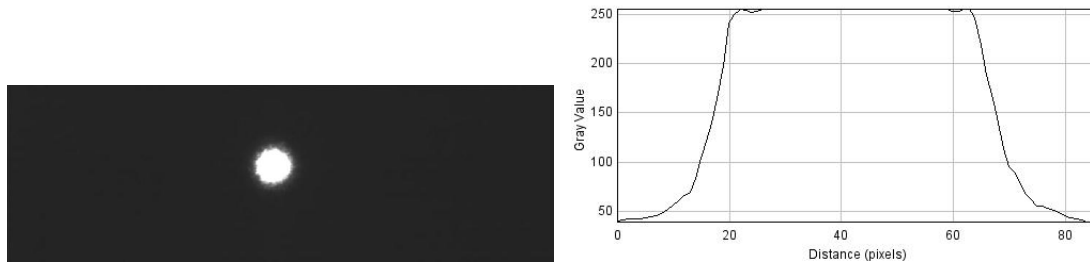


Figura 31 - Saída no ponto considerado como origem e o seu gráfico de energia

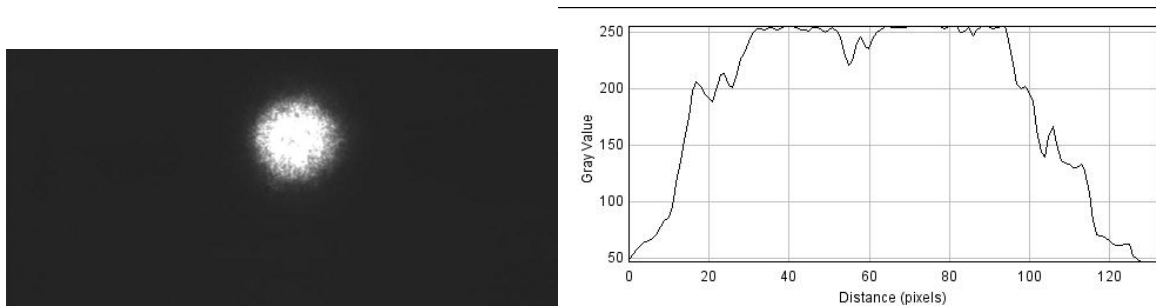


Figura 32 – Saída 25 mm após o ponto de origem e seu gráfico de energia

Inclinação

Quando o receptor não vê o volume de medidas, é necessário inclinar para mudar o campo de recepção (a circunferência do receptor). Para descobrir o quanto é necessário inclinar, é realizado cálculos como é demonstrado abaixo:

$$n_1 \sin \theta_c = n_{ext} \sin \theta_0 \quad (42)$$

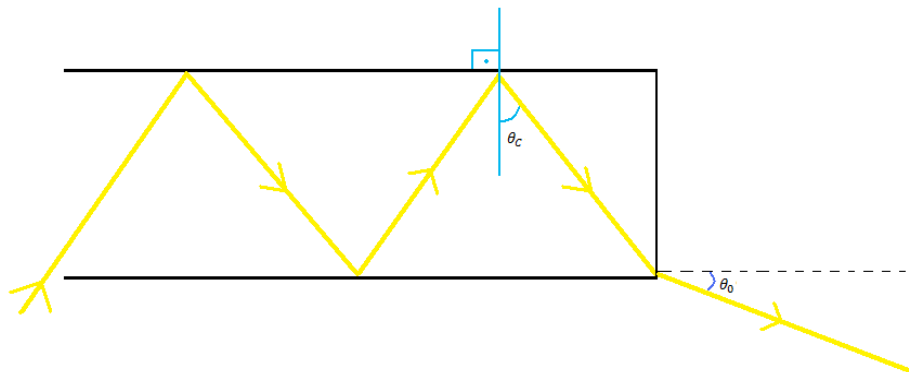


Figura 33 – Esquema do caminho seguido pelos raios no velocímetro

Se quisermos inclinar o guia para obter um ângulo diferente, é necessário fazer:

$$n_1 \sin \theta = n_{ext} \sin \theta_p \quad (43)$$

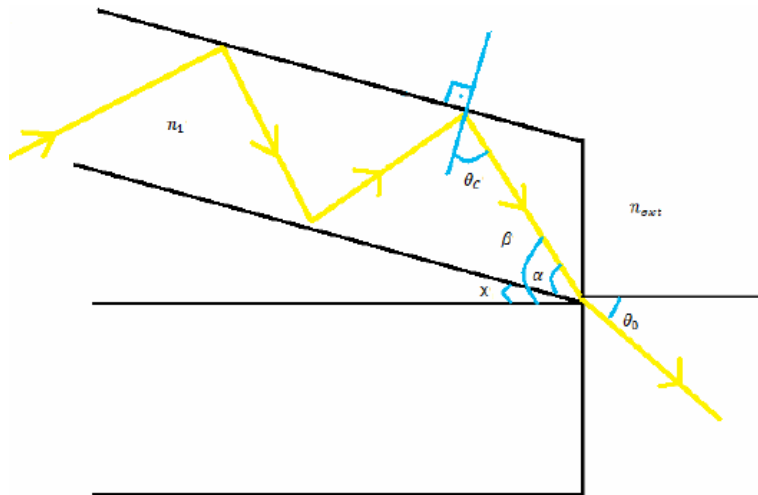


Figura 34 –Esquema do caminho seguido pelos raios no velocímetro com uma inclinação

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_{ext}}{n_2}\right) + \sin\theta_c \quad (44)$$

$$\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) + \theta_x + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \pi \quad (45)$$

$$\theta_x - \alpha = \theta_c \quad (46)$$

$$\theta_c = \theta_x - \alpha \quad (47)$$

Área de intersecção entre as circunferência de recepção e emissão

Para calcular a área que faz a intersecção entre a base do cone formado pela partícula na qual vamos medir a velocidade e a circunferência formada pela saída do guia reto que vai receber a reflexão, foi realizado o seguinte calculo:

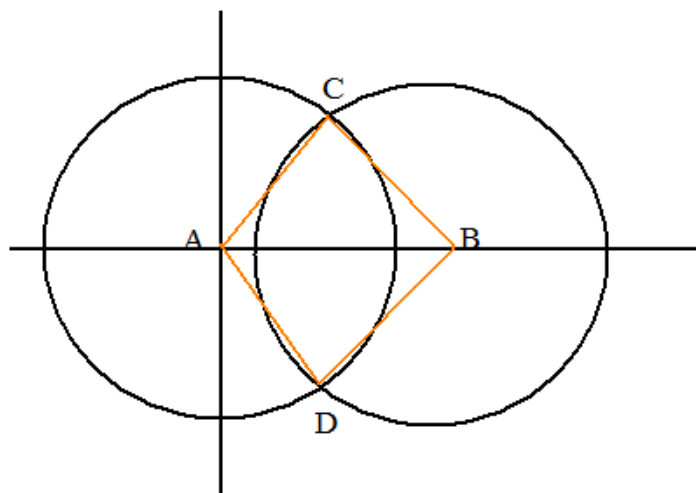


Figura 35 – Esquema utilizado para cálculo da área de intersecção

Se a gente considera $A = (X_0, Y_0)$ e $B = (X_1, Y_1)$,

$$\text{A distância entre A e B é } AB = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \quad (48)$$

Para calcular os ângulos CAD e CBD, nós vamos utilizar a lei dos cossenos:

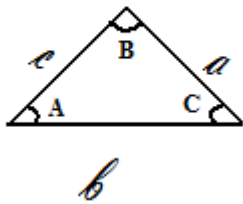


Figura 36 – Triângulo para utilização da lei dos co-senos

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 * b * c * \cos(A) \quad (49)$$

E assim teremos:

$$r_0^2 = r_1^2 + d^2 - 2 * r_1 * d * \cos(CBA) \quad (50)$$

$$\cos(CBA) = \frac{r_1^2 + d^2 - r_0^2}{2 * r_1 * d} \quad (51)$$

Assim acharemos CBA e CBD pois $CBD=2*(CBA)$

Agora para achar a área de intersecção entre as duas circunferências é necessário calcular a área da secção circular e depois retirar a área do triângulo BCD. Da mesma maneira que nós vamos fazer com a área da secção circular ACD e retirar a área do triângulo ACD. Então, teremos:

$$AREA = (0,5 * (CBD) * r_1^2) - (0,5 * r_1^2 * \sin(CBD)) + (0,5 * (CAD) * r_0^2) - (0,5 * r_0^2 * \sin(CAD)) \quad (52)$$

Com todos estes parâmetros, foi elaborado um programa onde o utilizador entra com os dados dos índices efetivos, a altura entre o receptor e a partícula, a distancia do emissor até o volume de medidas e o raio do receptor, e depois ele vai ter os dados necessário para projetar a estrutura receptora.

```

*****
Logiciel pour decouvrir les parametres de reception
*****
*****Valeurs de distance en micrometres*****

Valeur du indice du verre:1.5
Valeur du indice du guide:1.56
Hauteur entre le recepteur et la particule:12
Distance du volume de mesure:80
Rayon du recepteur:100
    
```

Figura 37 – Entrada dos dados no programa

Se o guia pode ver a circunferência do cone de reflexão da partícula, ele vai dar os dados necessários para prever o guia.

```

L'angle critique est 74.071609
L ouverture numerique est 0.428485
L angle d acceptance est 25.376270
La distance du volume est 80.000000
Le recepteur peut voir le volume
La distance que la reception commence a voir est 42.174061 est plus petite que 8
Le rayon du cone du recepteur est 37.938011
Et l area d intersection est 720.000000
On a 2.292264 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur

```

Figura 38 – Saída dos dados quando existe a interseção

Se o guia não pode ver a circunferência do cone de reflexão criado pela partícula, o programa dirá que é necessário inclinar o guia, e vai mostrar os ângulos de inclinação e a área de intersecção criada por cada inclinação, assim o pesquisador vai adaptar as suas necessidades.

```

Logiciel pour decouvrir les parametres de reception
*****
*****Valeurs de distance en micrometres*****
Valeur du indice du verre:1.5
Valeur du indice du guide:1.56
Hauteur entre le recepteur et la particule:12
Distance du volume de mesure:20
Rayon du recepteur:100
L'angle critique est 74.071609
L ouverture numerique est 0.428485
L angle d acceptance est 25.376270
La distance du volume est 20.000000
La distance que la reception commence a voir est 25.304438 et initialement le volume est a 20.000000
Le recepteur ne vois pas le volume, il faut incliner le guide
Le rayon du cone du emetteur initialement est 9.484503
Le recepteur va commencer a voir le emetteur quand il est incline 30.969599 degress jusqu a 74.071609
Le rayon du cone visa par le recepteur est 18.891970 avec l ouverture numerique de43.376270
Il fault incliner 29.653793
Pour une ouverture de 43.376270 on a une area d intersection de:
raio cone 100.000000 raio receptor 18.891970:50.750000
On a 0.161573 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur
Le rayon du cone visa par le recepteur est 19.563507 avec l ouverture numerique de44.376270
Il fault incliner 30.735371
Pour une ouverture de 44.376270 on a une area d intersection de:
raio cone 100.000000 raio receptor 19.563507:63.250000
On a 0.201369 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur
Le rayon du cone visa par le recepteur est 20.258373 avec l ouverture numerique de45.376270
Il fault incliner 31.820164
Pour une ouverture de 45.376270 on a une area d intersection de:
raio cone 100.000000 raio receptor 20.258373:77.250000
On a 0.245941 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur
Le rayon du cone visa par le recepteur est 20.978245 avec l ouverture numerique de46.376270
Il fault incliner 32.908413
Pour une ouverture de 46.376270 on a une area d intersection de:
raio cone 100.000000 raio receptor 20.978245:92.375000
On a 0.294094 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur
Le rayon du cone visa par le recepteur est 21.724964 avec l ouverture numerique de47.376270
Il fault incliner 34.000431
Pour une ouverture de 47.376270 on a une area d intersection de:
raio cone 100.000000 raio receptor 21.724964:109.125000
On a 0.347421 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur

```

Figura 39 – Saída dos dados quando é necessária a inclinação

Se o guia de recepção é muito menor do que a circunferência do cone de emissão, teremos:


```

*****
Logiciel pour decouvrir les parametres de reception
*****

*****Valeurs de distance en micrometres*****

Valeur du indice du verre:1.5
Valeur du indice du guide:1.56
Hauteur entre le recepteur et la particule:20
Distance du volume de mesure:10000
Rayon du recepteur:100
L'angle critique est 74.071609
L ouverture numerique est 0.428485
L angle d acceptance est 25.376270
La distance du volume est 10000.000000
Le rayon du cone du emetteur est 4742.251465 superpose le receptor
La distance que la reception commence a voir est 0
Il voit tout et l area eh 31410.000000
On a 0.044466 per cent de l area du cone qui est recupere pour le recepteur

```

Figura 40 – Saída de dados quando a emissão é menor que a recepção

Se for ao contrário, teremos:

```

*****
Logiciel pour decouvrir les parametres de reception
*****

*****Valeurs de distance en micrometres*****

Valeur du indice du verre:1.5
Valeur du indice du guide:1.56
Hauteur entre le recepteur et la particule:20
Distance du volume de mesure:80
Rayon du recepteur:100000
L'angle critique est 74.071609
L ouverture numerique est 0.428485
L angle d acceptance est 25.376270
La distance du volume est 80.000000
Le recepteur peut voir le volume
La distance que la reception commence a voir est 42.174061 est plus petite que 80.00
Le rayon du cone du recepteur est 37.938011
l area d intersection est beaucoup petite par rapport au recepteur_

```

Figura 41 – Saída de dados quando a emissão é maior que a recepção

E se a partícula passa muito próxima da superfície do velocímetro, não é possível observar a reflexão da mesma, então não é possível calcular a velocidade, e o resultado dado é:

```

*****
Logiciel pour decouvrir les parametres de reception
*****

*****Valeurs de distance en micrometres*****

Valeur du indice du verre:1.5
Valeur du indice du guide:1.56
Hauteur entre le recepteur et la particule:20
Distance du volume de mesure:3
Rayon du recepteur:150
L'angle critique est 74.071609
L ouverture numerique est 0.428485
L angle d acceptance est 25.376270
La distance du volume est 3.000000
La distance que la reception commence a voir est 42.174061 et initialement le volume est a 3.00
Le volume est tres proche de la parois. on ne peut pas incliner a cause de l angle critique

```

Figura 42 – Saída de dados quando a partícula passa muito próxima ao velocímetro

Conclusão

Durante a primeira etapa do trabalho foi feita a fabricação com a nova máscara do velocímetro, e em seguida foi feita a caracterização da mesma utilizando os parâmetros já conhecidos de fabricação. O defeito do espelho continuou a aparecer, e então foi determinado de fazer a fabricação e alterar o tempo enterragem, aumentando-o. Os defeitos desapareceram e as franjas de interferência apareceu clara, resolvendo o problema que tinha com o espelho.

Durante a segunda etapa foi realizado um estudo para otimizar a recepção do velocímetro, e para isto foi estudado os parâmetros da recepção, como abertura numérica, ângulo de aceitação, etc. Com o resultado deste estudo foi desenvolvido um programa em linguagem de programação C de modo que o usuário digita os dados da estrutura de emissão como a distância entre o receptor e o volume e os índices eficazes do guia e o vidro, e os valores dados pelo programa são necessários para projetar a estrutura de recepção. Ainda na segunda etapa foi realizada uma estrutura receptora com o guia previsto pelo programa, mas não houve tempo de ser realizada a caracterização e o packaging pois os primeiros guias produzidos apresentaram erros, e não houve tempo de concluir o segundo lote de fabricação.

Mesmo o tempo sendo curto para realizar testes com os valores de recepção previstos pelo programa, tem uma grande probabilidade de que estes valores conduzem para um bom resultado porque os resultados dos testes que foram realizados são de acordo com os previstos.

Bibliografia

- [1] Snyder Allan W and Love John D “Optical waveguide theory”, *Chapman & Hall, 1991*
- [2] H.-E. Albrecht “Laser doppler and phase Doppler measurement techniques”, *Springer, 2003.*
- [3] Perez J. Ph. “Optique geometrique et ondulatoire”, *Edition Masson, 1994.*
- [4] Lemaitre Auger Pierre “Velocimetrie laser doppler en optique integree sur verre : conception et prototypes”, *thèse, INP Grenoble, janvier 1998.*
- [5] Schanen duport “Etude de structures collimatrices en optique integree sur verre : aplication a l’interferometrie”, *thèse, INP Grenoble, decembre 1992.*
- [6] Bucci Davide “Mise au point d’un duplexeur pompe/signal à base de guides segmentés en optique intégré sur verre”, *thèse, INP Grenoble, decembre 2006.*

Anexo 1 – Coódigo fonte do programa

```
#include <stdio.h>
#include <iostream>
#include <conio.h>
#include <math.h>

int main()
{ //Declaration des variables
  float ouverture;
  float indicel;
  float indice2;
  float taillet, taille;
  float distance, comeco;
  float raioreceptor;
  int energie;
  int a=0;
  float pi=3.141;
  float inclination;

  //Contact avec le user
  printf("*****\n");
  printf("Logiciel pour decouvrir les parametres de reception\n");
  printf("*****\n");
  printf("\n*****Valeurs de distance en micrometres*****\n\n");
  //Indice du verre
  printf("Valeur du indice du verre:");
  scanf("%f", &indicel);
  //Indice du guide
  printf("Valeur du indice du guide:");
  scanf("%f", &indice2);
  // Taille entre les bords des cones
  printf("Hauteur entre le recepteur et la particule:");
  scanf("%f", &taille);
  //Distance entre le recepteur et le volume de mesure
  printf("Distance du volume de mesure:");
  scanf("%f", &distance);
  //Rayon de la sortie du recepteur
  printf("Rayon du recepteur:");
  scanf("%f", &raioreceptor);
```

```

//Definition de l angle critique
double tetac = asin(indice1/indice2);
float tetacgraus=(180*tetac)/pi;
printf("L'angle critique est %f\n", tetacgraus);
//Definition de l ouverture numerique
ouverture=sqrt((indice2*indice2)-(indice1*indice1));
printf("L ouverture numerique est %f\n", ouverture);
//Definition de l angle de acceptance
double onrad=asin(ouverture);
float ondeg=(180*onrad)/pi;
printf("L angle d acceptance est %f\n", ondeg);
//Definition de la variable comeco, où le recepteur commence a voir le emeteur
comeco=taille/tan(onrad);
//Rayon de la circonference formée par le emeteur
float raiocone =tan(onrad)*distance;
//taille d un centre au l autre
float taillecac= taille+raioreceptor;
//Area du cone
float areacone=pi*raiocone*raiocone;
//Impression des donnees pour conferer
printf("La distance du volume est %f\n", distance);

//Condition pour voir si la fibre de reception vois tout le cone que est
//formé pour l'emission
//Condition si le recepteur vois le volume normalement
if (taille + raiocone < 0)
{
    if(raiocone>raioreceptor){
        float area = pi*(raioreceptor*raioreceptor);
        printf("le rayon du cone du emeteur est %f\n",
            raiocone);
        printf("La distance que la reception commence
            a voir est 0\n", comeco);
        printf("L area d interserction est %f \n", area);
        printf("On a %f per cent de l area du cone qui\
            est recuperé pour le recepteur\n",
            (area/areacone)*100);
    }
    else{
        float area = pi*(raiocone*raiocone);
        printf("le rayon du cone du emeteur est %f\n",
            raiocone);
        printf("La distance que la reception commence a\
            voir est 0\n", comeco);
        printf("L area d interserction est %f \n", area);
        printf("On a %f per cent de l area du cone qui\
            est recuperé pour le recepteur\n",
            (area/areacone)*100);
    }
}

//Si la particule est dans le paroi du recepteur
else if (distance == 0)
{
    printf("La particule est dans le paroi\n");
}

```



```

//Si la particule est dans le meme hauteur du recepteur
else if (taille == 0)
{
    // Si la reflexion est plus grand que la sortie
    // du recepteur
    if(raiocone<2*raioreceptor){
        float area = 0.5*pi*(raiocone*raiocone);
        printf("le rayon du cone du emetteur est %f\n",
                raiocone);
        printf("La distance que la reception commence a\
                voir est 0\n", comeco);
        printf("L area de intersection est %f \n", area);
        printf("On a %f per cent de l area du cone qui \
                est recupere pour le recepteur",
                (area/areacone)*100);
    }
    else
    {
        float area = pi*(raioreceptor*raioreceptor);
        printf("le rayon du cone du emetteur est %f\n",
                raiocone);
        printf("La distance que la reception commence a\
                voir est 0\n", comeco);
        printf("Il voit tout et l area est %f \n", area);
        printf("On a %f per cent de l area du cone qui\
                est recupere pour le recepteur\n",
                (area/areacone)*100);
    }
}
}

```

```

else
{
    printf("La distance que la reception commence a voir est %f et\
            initialement le volume est a %f\n", comeco, distance);
    float w=atan(taille/distance);
    float wgraus=(180*w)/pi;
    //Si le volume est assez proche pour que le recepteur
    // ne peut pas calculer la vitesse
    if(tetacgraus<wgraus){
        printf("Le volume est tres proche de\
                la parois, on ne peut pas incliner a\
                cause de l angle critique\n");
    }
}
}

```

```

//Si le volume peut être vu avec l'inclination
//du recepneur
else {
    printf("Le recepneur ne vois pas le\
    volume, il faut incliner le guide\n");
    printf("Le rayon du cone du emetteur\
    initialement est %f\n", raiocone);
    printf("Le recepneur va commencer a\
    voir le emetteur quand il est incline\
    %f degrees jusqu a %f \n",
    wgraus, tetacgraus);
//Pour chaque degres, jusq a l'angle critique
//l'area d'intersection va être calculé
for( ondeg>wgraus; ondeg<=tetacgraus; ondeg++)
{
    if(ondeg>wgraus){
        float ondegrad=(pi*ondeg)/180;
        float raiocone2 =tan(ondegrad)*distance;
        printf("Le rayon du cone visa par le\
        recepneur est %f avec l'ouverture\
        numerique de%f \n", raiocone2, ondeg);

        float alfa= 90 - tetacgraus;
        float beta=inclination+alfa;

        beta=asin((indice2*sin(ondegrad))/indice1);
        float betagraus=(180*beta)/pi;

        float tetax=betagraus-alfa;
        printf("Il faut incliner %f\n", tetax);

        printf("Pour une ouverture de %f on a\
        une area d'intersection de:\n", ondeg);
        area(raioreceptor, taillecac, raiocone2 );
        }
    }
}

getch();

return 0;
}

```

```

//Function pour calculer l'area d'intersection
void area(float raioceptor1, float taille1, float raiocone1 )
{
    //Definition des variables
    float energia=0;
    float pi=3.141;
    float raiouml, raiofois1;

    float x=((raiouml*raiouml)+(taille1*taille1)-(raiofois1*raiofois1))/2*taille1);

    float a1= 2*(raiouml*raiouml)*(taille1*taille1);
    float a2= 2*(raiofois1*raiofois1)*(taille1*taille1);
    float a3= 2*(raiouml*raiouml)*(raiofois1*raiofois1);
    float a4= (raiouml*raiouml*raiouml*raiouml);
    float a5= (raiofois1*raiofois1*raiofois1*raiofois1);
    float a6=( taille1*taille1*taille1*taille1);
    float a=a1+a2+a3-a4-a5-a6;

    float b=(4*taille1*taille1);
    float y=sqrt(a/b);
    float yp=y;
    float yn=-y;

    float length=yp-yn;
    float angle1=2*asin((length/2)/raiouml);
    float angle2=2*asin((length/2)/raiofois1);
    float aseg1=raiouml*raiouml*angle1*0.5;
    float atril=x*yp;
    float aseg2=raiofois1*raiofois1*angle2*0.5;
    float atri2=(taille1-x)*yp;

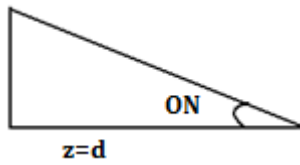
    float asect1=aseg1-atril;
    float asect2=aseg2-atril;
    float area=asect1+asect2;

    float areacone=pi*raiofois1*raiofois1;

    if(area<=0.000000000005){printf("l'area d'intersection est beaucoup petite\
                                par rapport au recepteur");
        }
    else {printf("Et l'area d'intersection est %f\n", area);
        printf("On a %f per cent de l'area du cone qui est recupere pour \
                le recepteur\n", (area/areacone)*100);
        }
}
}

```


Anexo 2– Calculo para achar $\tan \theta_{max}$



Nós temos:

$$\tan \theta_{max} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d}$$

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \tan \theta_{max} * d$$

$$x^2 + y^2 = \tan^2 \theta_{max} * d^2 = R_0$$

$$R_0 = d * \tan \theta_{max}$$

$$ON = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}$$

$$n_0 * \theta_{max} = \sin^{-1} ON$$

$$n_{ext} * \sin \theta_{max} = ON$$

$$\cos \theta_{max} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{max}}$$

$$\cos \theta_{max} = \sqrt{1 - \left(\frac{ON}{n_{ext}}\right)^2}$$

$$\cos \theta_{max} = \frac{\sqrt{n_{ext}^2 - ON^2}}{n_{ext}}$$

$$\tan \theta_{max} = \frac{\sin \theta_{max}}{\cos \theta_{max}} = \frac{ON}{n_{ext}} * \frac{ON}{\sqrt{n_{ext}^2 - ON^2}} = \frac{ON}{\sqrt{n_{ext}^2 - ON^2}}$$

Anexo 3 - As leis de Flick [6]

Com relação ao estudo da difusão no interior do vidro, nós podemos descrever os fluxos graças a lei de Flick. A primeira lei pode ser descrita pela equação A 3.1 :

$$\begin{cases} \vec{J}'_A = -D_A * \vec{\nabla} * C_A \\ \vec{J}'_B = -D_B * \vec{\nabla} * C_B \end{cases} \quad (A 3.1)$$

Onde J'_A et J'_B são os fluxos dos íons A et B, C_A et C_B são suas concentrações no interior do vidro e D_A et D_B suas capacidades de difusão.

Se as capacidades de difusão D_A et D_B não são idênticas, os íons A^+ e B^+ não se deslocam com a mesma velocidade. Isto faz criar uma zona de troca de carga que acelera o efeito de difusão dos íons. O fluxo iônico devido a difusão de Flick, irá superpor o efeito devido ao campo elétrico interno da zona de carga do espaço.

De mesma forma, um campo externo (onde os efeitos se adicionam com relação ao campo interno), pode ser aplicado para influenciar a sua difusão. Os fluxos iônicos totais serão então obtidos a partir da soma dos efeitos devido aos gradientes e aos campos como na equação A 3.2:

$$\begin{cases} \vec{J}'_A = -D_A + \mu_A C_A (E_{int} + E_{ext}) \\ \vec{J}'_B = -D_B + \mu_B C_B (E_{int} + E_{ext}) \end{cases} \quad (A 3.2)$$

Onde o campo elétrico total é decomposto em um campo interno, devido a zona de carga do espaço e um campo externo devido a aplicação de uma diferença de potencial durante a troca. Os termos μ_A e μ_B são as mobilidades iônicas, que no vidro são ligadas a capacidade de difusão pela relação (A 3.3) de Nernst-Einstein :

$$D_i = H * \frac{kT}{q} * \mu_i \quad (A 3.3)$$

Onde i é ou A ou B, $k = 1,38 * 10^{-23} K^{-1}$ é a constante de Boltzmann, T é a temperatura em Kelvin da troca de íons, $q = 1,6 * 10^{-19} C$ que é a carga do elétron e H um coeficiente sem unidade, chamado relação de Haven que depende da natureza da difusão no vidro escolhido.

Uma simplificação possível nas equações pode ser feita observando que no vidro, o número de lugares iônicos disponíveis é uma constante no tempo e no espaço. Isto é verdade se nos supormos que a matriz definida pelos formadores de rede do vidro não é perturbada pelo processo de troca. No início, todos os lugares ocupados são ocupados pelos íons modificadores A^+ normalmente presentes no vidro, com uma concentração c_0 . Isto permite definir uma concentração normalizada de íons B^+ entrando no vidro :

$$c = \frac{C_B}{C_0} \quad (A 3.4)$$

O fluxo total de íons é dado pela soma dos fluxos \vec{J}'_A et \vec{J}'_B e é nulo na ausência de campo externo aplicado, pois tem tantos íons que entram e que saem na superfície do vidro. Isto permite calcular uma expressão do campo elétrico interno :

$$E_{int} = \frac{(D_B - D_A) \vec{\nabla} c}{\mu_A + C_A (\mu_B - \mu_A)} \quad (A 3.5)$$

O campo interno E_{int} não sendo medido, a equação (A 3.5) permite de reescrever o fluxo de íons B⁺, que entra no vidro, utilizando parâmetros acessíveis à medida :

$$J_B = \frac{c(D_B\mu_A - D_A\mu_B) - D_B\mu_A}{\mu_A + c(\mu_B - \mu_A)} \vec{\nabla}c + \mu_B c E_{ext} \quad (A 3.6)$$

A segunda lei de Flick exprime a conservação do fluxo :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\vec{\nabla} * \vec{J}_B \quad (A 3.7)$$

As relações (A 3.6) e (A 3.7) permitem de escrever uma equação de derivadas parciais representando o processo de difusão.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \vec{\nabla}(D(c)\vec{\nabla}c - \mu_B c E_{ext}) \quad (A 3.8)$$

Onde o termo $D(c)$ é chamado de coeficiente de interdifusão e pode ser escrito na forma seguinte, observando que, segundo a relação (A 3.3) $D_B\mu_A = D_A\mu_B$

$$D(c) = \frac{D_B}{1 - c \alpha} \quad (A 3.9)$$

onde $\alpha = 1 - \frac{D_B}{D_A}$ é chamado de coeficiente de Stewart.

A introdução do coeficiente de interdifusão na equação (A 3.8) permite tratar o problema de difusão dos dois íons utilizando com único parâmetro a concentração normalizada c . De qualquer forma, a difusão de dois íons não sendo independente por causa do campo interno, a equação de difusão (A 3.8) é não linear desde que ($D_B \neq D_A$).

Para um problema de uma dimensão, com a hipótese de simplificação que os coeficientes de difusão são iguais ($D_B = D_A$), a equação (A 3.8) se simplifica em uma equação linear de difusão do calor, então a solução é em função do erro complementar :

$$c(x) = c_{surf} * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{D_B * t}}\right) \quad (A 3.10)$$

Onde a função erfc é definida como :

$$\operatorname{erfc}(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_q^\infty e^{-\alpha^2} d\alpha \quad (A 3.11)$$