

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
DEPARTAMENTO DE APOIO A PESQUISA – DAP
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES OPTICAS NÃO-LINEARES UTILIZANDO A
TECNICA DE Z-SCAN**

Bolsista: Scarlat Farias Alves, CNPq

Manaus, 31 de julho de 2015

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
DEPARTAMENTO DE APOIO A PESQUISA – DAP
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Relatório Final

PIB-E/0178/2014

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES OPTICAS NÃO-LINEARES UTILIZANDO A
TECNICA DE Z-SCAN**

Bolsista: Scarlat Farias Alves, CNPq

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Adriano Cotta

Manaus, 31 de julho de 2015

Resumo

Caracterização das propriedades ópticas não lineares de materiais é de extrema interesse em vários campos da física, tanto dos fundamentais, bem como pontos aplicadas de vista. Em particular, um grande esforço tem sido dedicado à determinação da terceira ordem susceptibilidade óptica não-linear $\chi^{(3)}$, responsável por fenômenos ópticos úteis, tais como harmônica de terceira geração, a conjugação de fase óptica e de transmissão não linear em meios isotrópicos. Entre alguns métodos de medição disponíveis $\chi^{(3)}$, a técnica de varredura-Z é o mais popular. Neste método, a amostra é a translação ao longo do eixo de um concentrado Feixe Gaussiano (tomado como o eixo z), e a energia transmitida é medida como uma função da posição da amostra. A posição do ponto focal é tomada como $z = 0$. Um gráfico apresentado com o valor de z no eixo dos x e a energia normalizada transmitida no eixo-y é conhecido como o Z-scan curva. Por numericamente ajuste dos dados da curva de varredura-Z para não-linear padrão equações de transmissão, as partes real e imaginária do susceptibilidade de terceira ordem $\chi^{(3)}$ pode ser calculada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3	MÉTODOS UTILIZADOS.....	8
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	10
5	CONCLUSÃO.....	15
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
7	CRONOGRAMA.....	17

1. Introdução

A óptica não-linear é uma das áreas da óptica moderna que desenvolveu-se mais rapidamente nesta década devido ao interesse considerável em se encontrar materiais que possuem efeitos não-lineares ultra-rápidos, no que se refere ao desenvolvimento de dispositivos puramente ópticos. Várias técnicas experimentais vêm sendo elaboradas para possibilitar a investigação de efeitos não-lineares, destacando-se a técnica Z-Scan.^[1]

A técnica Z-Scan tem ganhado uma rápida aceitação da comunidade de óptica não-linear como uma técnica padrão para a determinação separadamente das mudanças do índice de refração Δn e da absorção óptica $\Delta\alpha$ dos materiais. A técnica consiste em medir a transmitância (normalizada pela intensidade incidente) de um feixe Gaussiano ao passar por uma amostra colocada entre uma lente e uma abertura controlável. A amostra é deslocada ao longo do eixo óptico da lente (eixo z) em torno posição focal do feixe e a cada posição da amostra, a intensidade transmitida é registrada.^[2]

Entretanto, inicialmente é necessário que seja feita a caracterização do feixe, para isso foi utilizada a técnica de Knife-edge. Nesta técnica, uma lâmina desloca-se transversalmente à direção de propagação do feixe de laser estando em função da potência total transmitida, através da mesma pode-se determinar a cintura do feixe que é um parâmetro imprescindível para a obtenção de outros parâmetros das equações envolvidas.^[3]

A técnica Z-Scan será implementada no Laboratório de Óptica de Materiais da UFAM (OptiMa-UFAM) de forma inovadora, pois trata-se do único local na região Norte que terá tal sistema em operação. Isto permitirá ampliar as áreas de atuação do Laboratório possibilitando analisar de forma simples e robusta as propriedades ópticas não-lineares, tais como a absorção óptica e a refração, que só podem ser acessadas através de métodos experimentais específicos. Sendo aplicada a materiais sólidos, líquidos ou soluções aquosas, tanto em materiais orgânicos e inorgânicos. Esta proposta baseia-se na segunda fase de implantação da técnica no laboratório de óptica de materiais do Depto. de Física da UFAM.

2. Revisão bibliográfica

2.1- Principais parâmetros dos feixes gaussianos:

Os lasers comerciais, em geral, fornecem um feixe no modo transversal eletromagnético Gaussiano (TEM₀₀). Este modo do laser é caracterizado por apresentar uma distribuição espacial de amplitude gaussiana. De um ponto de vista matemático, um feixe gaussiano não é mais que uma solução de da chamada equação de Helmholtz, quando utilizamos a aproximação paraxial.

Como estamos interessados mais no comportamento espacial da onda de luz que no tempo, podemos separar a parte temporal da espacial na expressão do campo, onde \mathcal{W} é frequência.

$$\mathbb{E}(r, t) = \mathbb{E}(r)e^{-i\mathcal{W}t}$$

1

E substituir na equação de onda. Procedendo desta forma chegamos a equação de Helmholtz para a amplitude complexa da onda:

$$(\nabla^2 + k^2)E(r) = 0$$

2

Considerando uma solução da equação 2 na forma de uma onda plana que se propaga na direção aproximadamente paralela ao eixo z:

$$\mathbb{E}(r) = \Psi(r)e^{-ikz}$$

3

A solução da equação resultante para $\Psi(r)$ e, em consequência para $\mathbb{E}(r)$, é dada pela expressão:

$$\mathbb{E}(r) = \mathbb{E}_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}} e^{-ikz} \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^2}\right] \exp\left[i \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right) - i \frac{\pi r^2}{\lambda z \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^2}\right]$$

4

Onde identificamos em w_0 como sendo a cintura do feixe gaussiano dada pela segunda exponencial, o que acontece para $z = 0$. Supondo a aproximação paraxial, a expressão que representa pode ser escrita como:

$$\frac{1}{R} e^{-ikR} \approx \frac{1}{z} e^{-ikz} \exp[-ikr^2/2R]$$

5

Sendo o R o raio de curvatura da onda esférica. Comparando as equações 4 e 5 vemos que a solução da equação de Helmholtz corresponde a uma onda esférica na aproximação paraxial, se realizarmos a seguinte identificação:

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right]$$

6

A segunda exponencial descreve a distribuição de amplitude transversal da onda. Ela tem a mesma forma de uma distribuição gaussiana com uma largura (diâmetro do feixe) dada por:

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]$$

7

Define-se o parâmetro confocal ou Rayleigh range, z_0 , como:

$$z_0 = \pi w_0^2 / \lambda$$

8

Este parâmetro representa a distância a partir da posição do foco ($z = 0$) na qual o diâmetro do feixe aumenta de w_0 para $(2w_0)^{1/2}$.

Assim, a intensidade do feixe gaussiano é dada pela seguinte expressão:

$$I(r,z) = I_0 \frac{w_0^2}{w^2(z)} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2(z)}\right]$$

9

Os parâmetros apresentados acima são os mais relevantes para a Técnica Z-Scan.^[4]

2.2 – Técnica Z-Scan:

Esta técnica, denominada de Z-Scan, está baseada em princípios de distorção espacial do feixe e oferece tanto sensibilidade quanto simplicidade experimental. Uma de suas principais características é permitir que se estime o índice de refração não-linear através de uma relação simples entre a variação da transmitância observada e a distorção de fase induzida, sem a necessidade de ajustes teóricos detalhados. A Z-Scan mede a potência transmitida através de uma abertura, quando um feixe focalizado atravessa uma amostra que se move ao longo do seu eixo de propagação. A movimentação da amostra ao redor da posição focal, permite que esta fique sujeita a diferentes intensidades, o que acarretará, ou não, a manifestação do efeito não-linear. Para eliminação de efeitos lineares, a potência transmitida para a amostra numa dada posição z , é dividida pela potência transmitida quando a amostra está distante do foco, onde os efeitos não-lineares não estão presentes. Tal quantidade é denominada transmitância normalizada $T(z)=P(z)/P(z_0)$. Assim, o resultado observado é uma curva da transmitância normalizada em função da posição z da amostra.^[1]

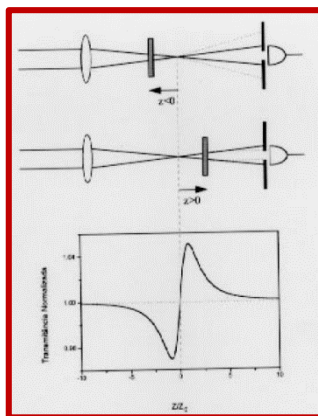
A equação da transmitância normalizada é dada por:

$$T\left(\frac{z}{z_0}\right) = 1 - \frac{4\left(\frac{z}{z_0}\right)\Delta\varphi_0}{\left[\left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 1\right]\left[\left(\frac{z}{z_0}\right)^2 + 9\right]}$$

10

onde z é a coordenada da amostra medida no plano focal e z_0 é o parâmetro de Rayleigh, levando-se em conta que $|\Delta\varphi_0| = \pi$. Substituindo todos os parâmetros conhecidos na equação de transmitância com o parâmetro mudança de fase ajustado, podemos então determinar um valor confiável para n_2 .^[5]

O efeito da não linearidade da amostra pode ser analisado a partir da mudança de fase não-linear $\Delta\varphi_0$ induzida pela intensidade do feixe, que é dada por $\Delta\varphi_0 = k_0 n_2 I_0 L$, onde $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ é o número de onda no vácuo (sendo λ_0 o comprimento de onda do laser), I_0 é a intensidade do laser e L é a espessura da amostra, considerando inicialmente o uso de amostras finas.



Movendo a amostra em direção ao foco, o aumento da intensidade provoca um aumento no efeito de auto-modulação de fase, e assim o efeito de lente induzida na amostra torna-se importante. Uma lente convergente ($n_2 > 0$) colocada antes do plano focal ($z < 0$), tende a aumentar a difração do feixe e a transmitância na abertura e reduzida, como mostra a Fig. a. Com a amostra no lado positivo ($+z$) do foco, o efeito de lente colima o feixe e faz com que a transmitância na abertura aumente como se vê na Fig. b. Quando a amostra encontra-se muito próxima ao foco ($z = 0$) e como se colocássemos uma lente no foco, o que resulta numa mudança mínima no padrão observado no campo distante. Para finalizar a varredura, a amostra é levada muito distante do foco e a

transmitância retorna ao valor original.

3. Metodologia

Na primeira parte do projeto foi feito um estudo puramente teórico, na intenção de familiarizar-se e aprofundar-se nos conhecimentos específicos necessários para o desenvolvimento do trabalho, sendo estes referentes a óptica não-linear, efeito Kerr, feixes gaussianos e seus afins.

Seguido da determinação da largura do feixe laser incidente, pois antes de começar a montagem e aplicação da técnica Z-Scan, é importante que seja feita a caracterização do feixe gaussiano, e isso dá-se através da técnica Knife-edge, onde foi possível determinar o tamanho da cintura do feixe no ponto focal. Sendo a cintura do feixe um parâmetro de grande importância para encontrar outros parâmetros das equações utilizadas nessa caracterização.

A técnica Knife-edge consiste em mapear a largura do feixe usando uma lâmina que ‘corta’ perpendicularmente o feixe em um determinado ponto. Automaticamente a potência é reduzida, porque a lâmina vai impedindo a total entrada do feixe laser no fotodetector.

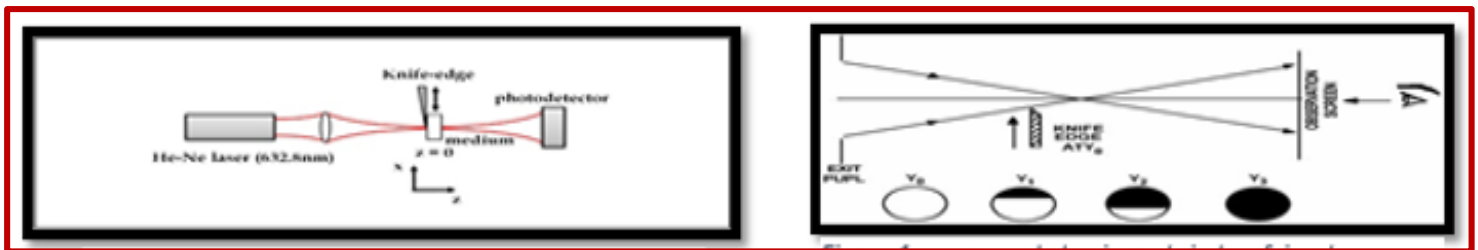


Figura 1: esquema da técnica knife-edge

Neste experimento foi utilizado:

- Laser He-Ne (632.8nm);
- Duas lentes: a distância focal da 1ª lente é de 10cm e a da 2ª lente é de 2,5cm.
- Carrinho com micrometro;
- Diafragma para focalizar no fotodetector, excluindo as bordas (anéis de newton);
- Fotodetector ligado ao osciloscópio.
- *Chopper*.

Foi utilizado o *chopper*, que como descrito no relatório parcial, mostrou-se mais rápido e mais preciso. Esquema da montagem:

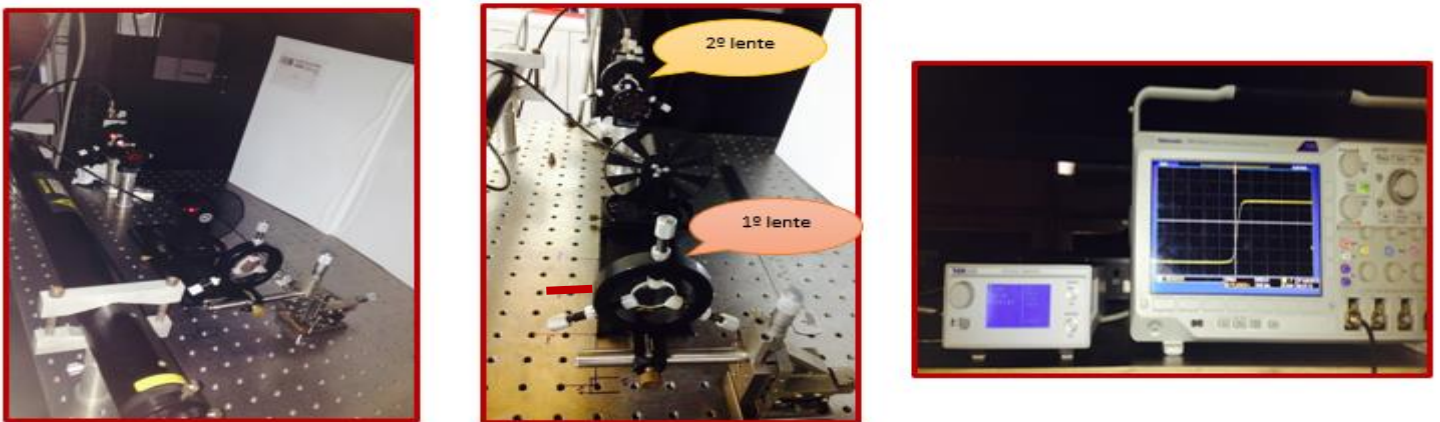


Figura 2:(da esquerda pra direita) A primeira figura mostra todo o esquema, a segunda figura enfatiza as lentes com distancias focais diferentes e o traço em vermelho representa a distância focal da 1ª lente que coincide com a cintura do feixe e a terceira mostra o gráfico que se obtém através do osciloscópio.

❖ Medida com o *chopper*:

Através do sinal obtido pelo osciloscópio pode-se obter os dados: Tendo uma frequência de 100Hz e sabendo que a equação do movimento circular é:

$$s(t) = R\theta(t)$$

$$\theta = \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$s(t) = R * 2\pi f * t$$

Onde R é a distância do ponto onde o laser chega até o centro da circunferência do *chopper* medido sendo este de 2.25cm, f é a frequência definida no regulador de frequência de 100 Hz. Tendo em vista que a 1ª lente que colima o feixe para o *chopper* tem uma distância focal de 10cm, onde possivelmente se encontra a cintura do feixe que é o valor procurado, foi então a partir dos 10cm marcado um intervalo de -5cm e +5cm, centralizando os 10cm, para o *chopper* “varrer” esse intervalo, com um passo de meio centímetro. Cada gráfico referente a uma posição foi obtido pelo osciloscópio. Após isso, cada um dos gráficos foram ajustados no MatLab onde foi possível obter valores para a largura do feixe (W), ajustando assim a curva experimental à curva teórica. A partir dos valores obtidos desse ajuste foi obtido um gráfico, através do Origin 8, que mostra o menor valor da largura do feixe (W), ou seja a cintura do feixe (W_0).

❖ Montagem da técnica Z-scan:

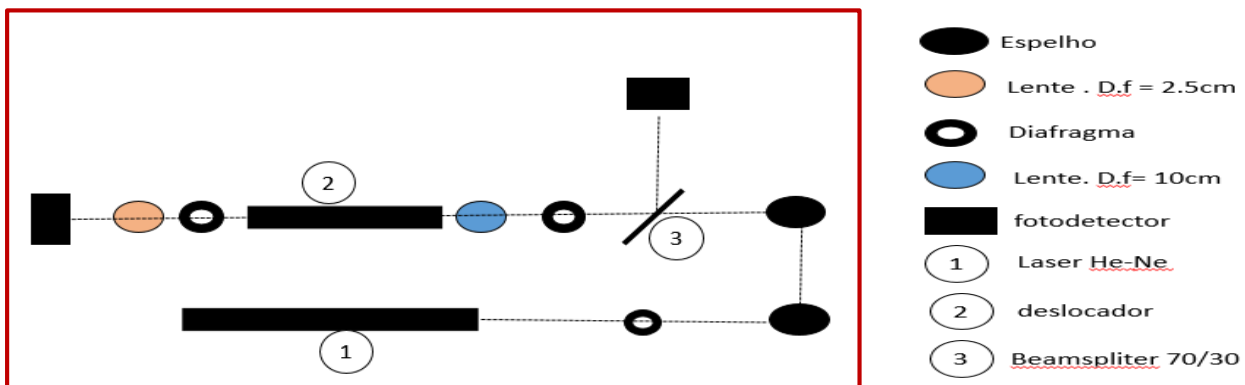


Figura 3: esquema experimental do z-scan, ao lado a legenda. Abaixo a montagem real da técnica z-scan. Mostrando a cubeta de quartzo.

Para o deslocador, foi utilizado o programa LabView 2013. Foi desenvolvida a interface que pudesse enviar comandos ao deslocador de forma que ela possa se deslocar o quanto for necessário dentro da sua capacidade, com uma certa variação de velocidade, a qual pode-se modificar também.

O que é de profunda necessidade para técnica de z-scan, de acordo com os parâmetros já mencionados. Para teste de calibração foi utilizado o óleo de oliva que descrito na literatura possui não linearidades refrativas bastante apreciáveis. [6] Foi utilizada uma cubeta de quartzo de 2mm de diâmetro interno, onde foi colocado o óleo de oliva e depois azeite de dendê.



4. Resultados

Como proposto no cronograma, um dos itens era a determinação da largura do feixe laser, descrito no item 3, através da técnica de Knife-edge, para medirmos também o seu perfil transversal gaussiano.

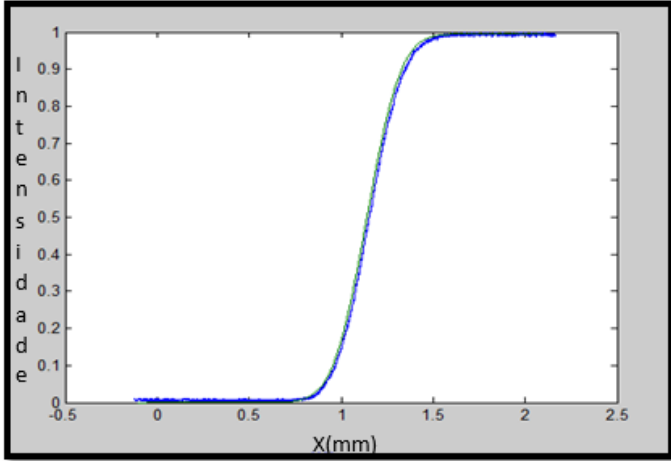


Figura 4: Ajuste de curva, onde a curva verde é a teórica e a azul é a experimental

As figs. 4 representa a potência em função da posição x. A partir do ajuste dessa curva é possível obter a medida da cintura do feixe $w_0(z)$ na posição z. O ajuste foi feito através do programa Matlab, a função $\text{erf}(x)$ que ajustou perfeitamente.

$$P(x) = \frac{P_{max}}{2} \left(1 \pm \text{erf} \left(\frac{\sqrt{2}(x(b) - x_0)}{w_0} \right) \right)$$

Foram obtidos os valores da largura do feixe, até obter um menor valor de $w_0(z)$ que é a sua cintura. Podemos observar que essa curva de $w(z)$ em função da posição é dada pela equação:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{Z_R} \right)^2}$$

Através desse ajuste foi possível obter o valor da cintura do feixe, da posição da cintura e do comprimento de Rayleigh:

$$Z_0: 0,018 \pm 0,007 \text{ (m)}$$

$$W_0: 0,000086 \pm 0,000003 \text{ (m)}$$

$$X_0: 0,1076 \pm 0,0008 \text{ (m)}$$

Ajustando o resultado com a equação acima, que descreve a dependência da largura do feixe gaussiano em função da posição z para um feixe colimado focalizado por uma lente com perfil parabólico, obtivemos uma concordância nos valores da posição focal e cintura do feixe.

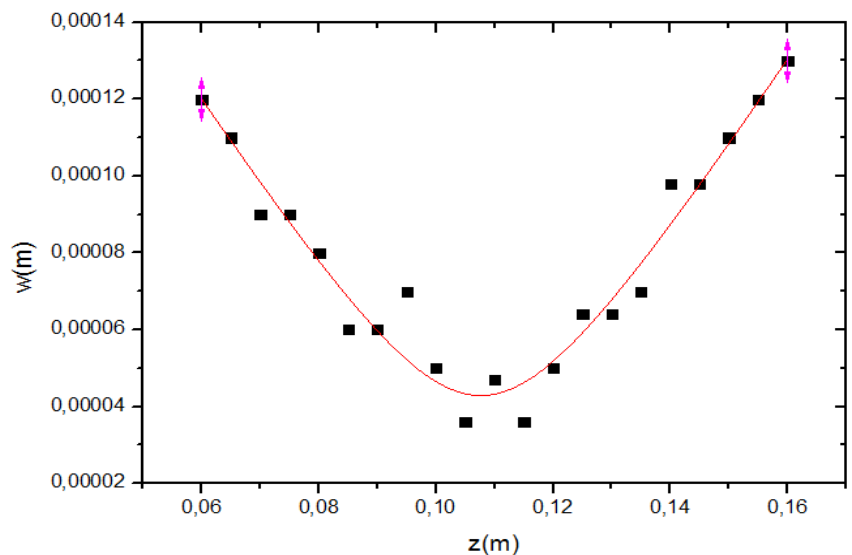


Figura 4: gráfico com o perfil do foco da lente de 100mm.

A aproximação de um frente de onda esférica tem um raio $R(z)$, e portanto esta função é conhecida como raio de curvatura da frente de onda de um feixe de perfil gaussiano, sendo representado por:

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

O raio de curvatura $R(z)$:0.077m. pode-se entender que no foco a onda é plana, porem em z_0 ela é infinita.

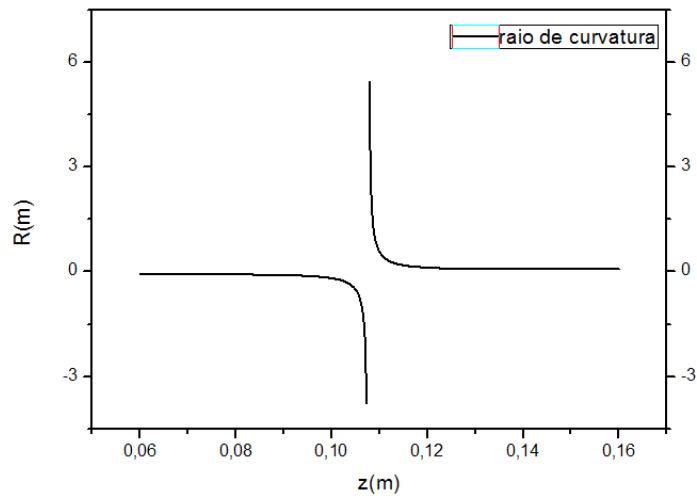


Figura 5: Gráfico de raio de curvatura

O programa desenvolvido no LabVIEW 2013 permitiu-nos criar uma interface mostrada abaixo:

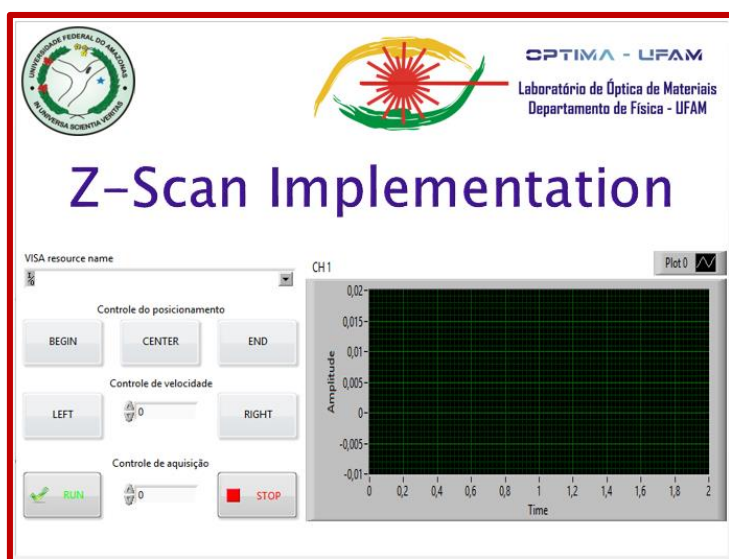


Figura 6: interface do programa que controla o deslocador

Onde os comandos são desenvolvidos em forma de diagrama de blocos em uma outra janela.

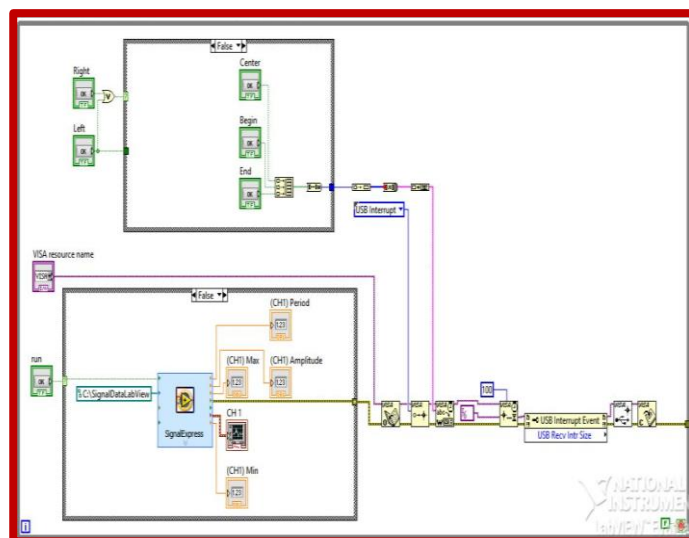


Figura 7: diagrama de blocos do programa que controla o deslocador

O *LabVIEW* é uma linguagem gráfica de programação que usa ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução do programa, o *LabVIEW* usa programação onde o fluxo de dados determina a forma da execução. A Interface de operador é construída por um conjunto de ferramentas e objetos, sendo designada por o painel frontal. O programa é efetuado usando representações gráficas de funções, para controlar os objetos no painel frontal. O código fica definido num diagrama de blocos, que se pode associar a um fluxograma. [7]



Figura 8: medidas com a técnica z-scan totalmente montada

O gráfico resultante mostra a transmitância em função da posição. A cada posição a amostra fica alguns segundos submetida ao laser, o passo entre cada posição é de uma volta completa. O óleo de Oliva não apresenta não-linearidades refrativas sensíveis a esse comprimento de onda (632,8), entretanto o azeite de Dendê apresentou uma não-linearidade refrativa negativa. Isso porque a configuração correspondente é pico-vale, enquanto que se fosse uma não-linearidade positiva teria a configuração inversa (vale-pico). Foi feito um ajuste de curva no Matlab dos dados plotados no oringim 8. A equação 10 foi descrita no Matlab para que pudesse ajustar os dados experimentais ao teórico.

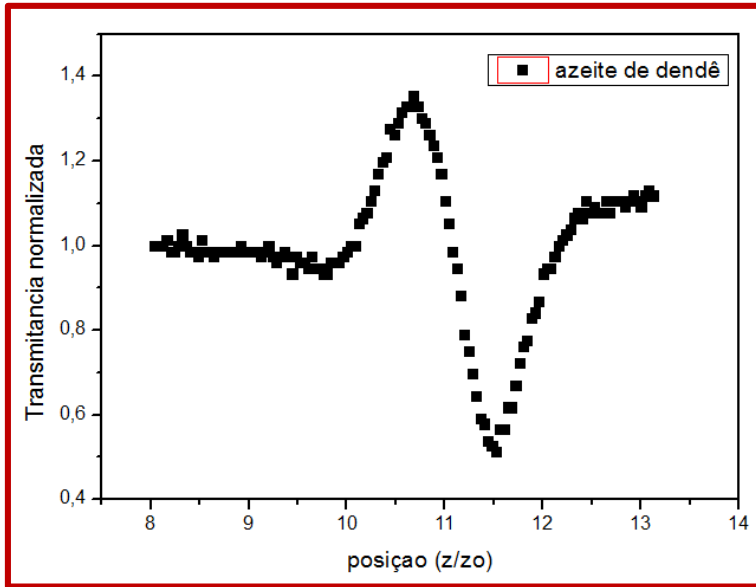


Figura 9: dados experimentais obtidos no laboratório Optma, do azeite de dendê

Foi desenvolvido através do programa Matlab uma simulação da transmitância tanto para absorção não-linear quanto para o índice de refração não-linear. Embora para este trabalho só foi realizada uma medida qualitativa para o índice de refração não-linear.

$$T\left(\frac{z}{z_0}, s\right) = \frac{e^{-\alpha L} \left\{ \ln \left[1 + \frac{\beta I_0 [1 - e^{-\alpha L}]}{\alpha \left(1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 \right)} \right] \right\}}{\left(\frac{\beta I_0 (1 - e^{-\alpha L})}{\alpha \left[1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 \right]} \right)} \quad (11)$$

$$T = 1 - \frac{4 \frac{z}{z_0} \Delta \phi_0}{\left[\left(\frac{z^2}{z_0^2} + 1\right) \left[\left(\frac{z^2}{z_0^2} + 9\right) \right]} \quad (12)$$

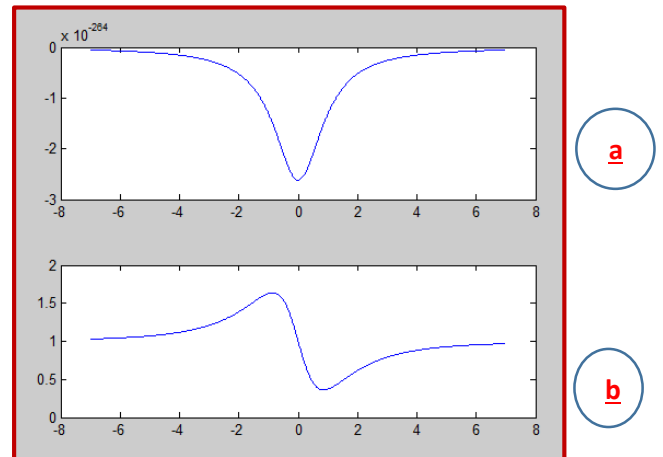


Figura 11: equações de transmitância.

Figura 12: Gráficos referente as transmitâncias. Simulações

A imagem **a** é referente ao comportamento da transmitância para a absorção não-linear positiva, enquanto que se estivesse invertida, ou seja, um pico seria absorção não-linear negativa. A equação 11, que descreve a transmitância, pode-se observar que há uma dependência em S, que é a abertura do diafragma que é apresentado na fig. 3. O diafragma está totalmente aberto, (S=0) permitindo que a intensidade do feixe alcance o fotodetector sem nenhuma interferência. Isso por que a não-linearidade absorpsiva não precisa que tenha essa fenda para que se perceba sua presença.

A imagem **b** é referente ao comportamento da transmitância para o índice de refração não-linear negativo, que como já dito acima, é o mesmo comportamento do azeite de dendê. A equação 12, também descreve a transmitância, entretanto para um S=1, onde o laser é interferido pela abertura do diafragma, pois só assim é possível observar a não-linearidade refrativa. Sem a fenda esse efeito não é observado.

5. Conclusão

Como a técnica faz uso de lasers, e a grande maioria dos lasers possui distribuição espacial de intensidade gaussiana, para melhor compreensão de como funciona a técnica e de seus princípios básicos, foi feita uma análise a respeito do que se trata um feixe gaussiano, no intuito de saber seus principais parâmetros que são de fundamental importância para a técnica de Z-scan. Foram encontrados todos esses principais parâmetros: cintura do feixe e raio de curvatura onde sobrepondo os gráficos observa que coincidem, o que era esperado.

O Z-Scan é uma técnica bastante versátil, podendo ser utilizada para a análise de materiais de diferentes naturezas. Foram utilizados o azeite de dendê e o óleo de oliva, apesar de o óleo de oliva não possuir sensibilidade para esse comprimento de onda, já foi feito estudos que estão descritos na literatura, que o mesmo possui um valor bastante apreciável para comprimentos de onda menores. Entretanto o azeite de dendê não foi encontrado nenhuma referência sobre já ter sido feito algum estudo como esse com esse azeite. O azeite de dendê apresentou alta sensibilidade para esse comprimento de onda. Abrindo mais possibilidades de estudos com o azeite de dendê, que é de fácil acesso.

O tratamento de dados foi possível devido a criação do software que permitiu a locomoção do atuador/deslocador através do programa LabView. Mas os dados foram adquiridos a partir do osciloscópio, sendo feito o tratamento de dados no origin e a simulação e ajuste de curva no Matlab.

O laboratório de óptica de materiais trabalha essencialmente com o uso de semicondutores para desenvolvimento de novos dispositivos ópticos, e para isso é fundamental obter informações de propriedades ópticas específicas do material a ser usado, como índice de refração e o coeficiente de absorção.

É importante ressaltar, que o laboratório bem estruturado proporciona ao aluno grande aprendizado, sendo esta uma área da física muito promissora e delicada. A orientação e ajuda do grupo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Embora tenhamos encontrado a curva, de forma satisfatória, a técnica esteja implantada e funcionando, a automatização criada através do programa Labview, demorou um pouco mais do que se esperava para que pudesse ser concluída, isso devido ao fato de inicialmente não termos o pacote computacional LabView e os componentes eletrônicos necessários para que houvesse a comunicação necessária entre o deslocador e o programa. Impossibilitando os testes finais de calibração. Entretanto estes testes devem ser desenvolvidos no próximo Pibic, pois em relação a todo trabalho desenvolvido são detalhes, mas que merecem muita atenção.

6. Referências bibliográficas

- [1] C.R. Medonça, L. missoguti, F.F.Dall´Agnol, S.C.Zilio, “Demonstração de um efeito óptico não-linear utilizando a técnica de varredura-z em uma amostra de chá chinês”, *Revista brasileira do ensino de física*; vol.21; n°2, 1999.
- [2] R.Fiederling, et al., *Nature* 402,787(1998) 2.
- [3] Saleh; Teich;2007.
- [4] S.L.Gomez, “Determinação e caracterização de propriedades opticas não-lineares de cristais líquidos liotrópicos utilizando a técnica de Varredura-Z”, *Tese de doutorado*.
- [5] L.Palfavi, B.C.Toth, G.Almási, J.A.Fulop, J.Hebling. “A general Z-scan theory, applied Physics B. Springer-Verlag”, 2009.97,679 (2009).
- [6] Al- Dergazly, A.A.; Fadhel, A. “Investigation of Olive Oil as a New Photonic Liquid Crystal for Optical Communication Systems”, *Advanced Research in Physics and Engineering*.
- [7] Apostila de programação basica de *LabVIEW*; *Mario Ramalho*.

