

# Desenvolvimento de um Sistema de Medição Baseado em Espectroscopia Resolvida no Tempo e no Espectro da Energia: Integração de um Espectrômetro Triplo a um Motor de Micropassos

---

Luana da Costa Faria

Engenharia de Controle e Automação, Escola de Engenharia, UFMG, Brasil.

Bruno Alberto Soares Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, UFMG, Brasil.

Franklin Massami Matinaga

Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas, UFMG, Brasil.

Hugo César Coelho Michel

Departamento de Engenharia Eletrônica, Escola de Engenharia, UFMG, Brasil.

**Resumo:** Esta pesquisa consiste na integração de um espectrômetro triplo a um motor de micropassos controlado e acoplado a um espelho para redirecionamento do laser. O objetivo dessa integração é implementar a técnica de espectroscopia resolvida no tempo, utilizando um laser da ordem de femtossegundos para análise da geração de segundo harmônico em um cristal não-linear. É utilizada a linguagem G do ambiente LabView para desenvolver uma aplicação que comanda o espectrômetro e uma aplicação que comanda o motor. A primeira é uma aplicação servidora que, ao receber uma conexão da aplicação cliente (segunda): 1) adquire e salva um espectro referente à emissão de uma amostra na qual os pulsos de laser incidem; 2) calcula a intensidade integrada desse espectro por meio de um ajuste de curva; 3) plota em um gráfico o espectro adquirido e o ajuste realizado; 4) envia a intensidade integrada para o cliente conectado e 5) retorna ao estado de espera por novas conexões. A aplicação cliente é responsável pelo acionamento do motor de micropassos. A cada passo realizado, é aberta uma conexão com a aplicação servidora para que seja realizado um espectro daquela posição correspondente a um atraso temporal causado pelo deslocamento micrométrico do espelho acoplado ao motor.

**Palavras-chave:** Espectroscopia, Motor de Micropassos, Sistema de Medição.

**Abstract:** This research consists of the integration of a triple spectrometer to a controlled micro-motor and coupled to a mirror for redirection of the laser. The purpose of this integration is to implement the time resolved spectroscopy technique using a laser of the order of femtoseconds to analyze the second harmonic generation in a nonlinear crystal. The G language of the LabView environment is used to develop an application that commands the spectrometer and an application that commands the motor. The first is a server application that, upon receiving a connection from the client application (second): 1) acquires and saves a spectrum referring to the emission of a sample in which the laser pulses are incident; 2) calculates the integrated intensity of this spectrum by means of a curve fit; 3) plot the spectrum acquired and the adjustment performed on a graph; 4) sends the integrated intensity to the connected client and 5) returns to standby by new connections. The client application is responsible for driving the micropayment motor. At each step performed, a connection is opened with the servo application so that a spectrum of that position corresponding to a time delay caused by the micrometric displacement of the mirror coupled to the motor is realized.

**Palavras-chave:** Spectroscopy, Motor of Micropasses, Measuring System.

Corresponding author: Bruno Alberto Soares Oliveira, [brunoalbertobambui@ufmg.br](mailto:brunoalbertobambui@ufmg.br)

Received: 04 Jan 2022 / Accepted: 25 Jan 2022 / Published: 28 Jul 2022.

CALIBRE - Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada, v. 7, nº 1 (2022).

## 1 Introdução

A automação laboratorial é uma área que vem crescendo nos últimos anos. O objeto de estudo do presente projeto mostra que hoje é possível automatizar um laboratório com o uso de computadores desenvolvendo comunicação entre os equipamentos em uma camada de aplicação.

De acordo com a referência [14], a aquisição de dados provenientes de diferentes processos pode se tornar muito trabalhosa e, principalmente, introduzir muitos erros se realizada manualmente. Nesses casos, a automação pode melhorar a qualidade e aumentar a quantidade de dados adquiridos em um intervalo de tempo, diminuindo drasticamente o tempo de aquisição.

A automação produz melhores resultados em um menor tempo. Um ponto importante da realização de qualquer tarefa é a otimização do tempo de execução. A exatidão dos resultados também é importante em um laboratório. Automatizar um processo contribui para melhorar tal exatidão. Dessa forma, consegue-se diminuir muito a incerteza dos resultados.

Além disso, com a automação é possível diminuir o esforço do operador. No caso de um processo realizado em laboratório de forma automatizada, o operador pode se dedicar a outras coisas enquanto o processo é realizado, aumentando-se a produtividade daquele laboratório.

O presente projeto surge da necessidade de se realizar medições por meio da espectroscopia resolvida no tempo (ERT), usada para obter informações sobre as propriedades atômicas de uma amostra, por exemplo, um cristal. Esse processo consiste em bombardear a amostra com pulsos de laser que passam por um divisor de feixes e se dividem em pulsos de bombeio e de prova. O pulso de prova (em inglês, probe), usado para monitorar condições da amostra como reflexão e emissão, sofre um atraso em relação ao pulso de bombeio (em inglês, pump) provocado pelo deslocamento de um espelho posicionado ortogonalmente aos pulsos de laser e acoplado a um motor de micropassos. De acordo com a distância percorrida pelo espelho, calcula-se um tempo de atraso. Os pulsos de bombeio e prova são desviados por meio de espelhos até incidirem na amostra. Para isso, é necessário integrar um espectrômetro a um motor de micropassos de forma sincronizada.

Para realizar as medições de ERT, manualmente, se faz necessário o comando passo a passo do motor, de maneira a realizar um deslocamento específico do espelho e obter um espectro da amostra, algo que é inviável e depende tempo considerável.

Portanto, tem-se a demanda para desenvolver a técnica de ERT, integrando dois equipamentos de funcionalidades e protocolos de comunicação diferentes, que não compartilham protocolos de comunicação padronizados entre si. Logo, desenvolve-se um sistema de medição capaz de realizar, de forma sincronizada e automática, as medições por ERT.

Além disso, implementa-se também o tratamento de dados de espectros gerados pelas medições, de forma a obter a intensidade integrada da amostra em função do

atraso temporal. Portanto, tem-se uma integração e uma automatização que envolve a aquisição de dados pelo espectrômetro, o controle e acionamento do motor de micropassos, a sincronização dos dois e, ainda, o registro, o tratamento e a apresentação de resultado de medições realizadas.

O objetivo principal é a implementação de um sistema automática capaz de adquirir o espectro de uma amostra (fenômeno ultrarrápido da ordem de  $10^{-15}$  segundos), utilizando a técnica de ERT. Para isso, é necessário integrar um motor de passos de alta resolução e um espectrômetro triplo para que eles se comuniquem de forma sincronizada em uma camada de aplicação. Além disso, os dados gerados pelo espectrômetro são tratados automaticamente de forma a obter o resultado esperado.

É desenvolvida uma aplicação para realizar o controle e acionamento do motor de micropassos (aplicação cliente), bem como uma análise dos dados em um computador (PC-A). Desenvolve-se também outra aplicação (aplicação servidora) em outro computador (PC-B) para controle e comando do espectrômetro. As duas se comunicam via rede TCP/IP. A aplicação associada ao espectrômetro, APP-1, funciona como servidora, e a aplicação associada ao motor de passos, APP-2 funciona como cliente. Tanto a aplicação que comanda o motor de passos quanto a aplicação que comanda o espectrômetro utilizam aplicações ActiveX fornecidas por cada fabricante.

A Figura 1 ilustra essa arquitetura, em que é possível ver que a aplicação cliente e a aplicação servidora se comunicam via TCP/IP. Além disso, a aplicação cliente se comunica via ActiveX com o software fornecido pelo fabricante do motor de micropassos (APT User) e a aplicação servidora se comunica com o software fornecido pelo fabricante do espectrômetro (LabSpec). Nota-se, também, nessa figura, que o LabSpec controla o espectrômetro e está presente no PC-B, enquanto o APT User controla o motor de micropassos e está no PC-A. O projeto atende muitos requisitos de um projeto de automação, pois demanda menor tempo, maior precisão e tem maior facilidade de operação do processo.

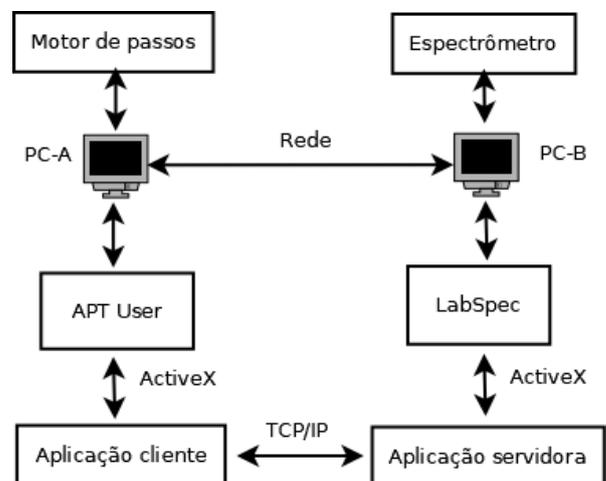


Figura 1: Arquitetura do sistema.

O local de realização desse projeto é o Laboratório de Fotônica, localizado no Departamento de Física do ICEX na UFMG. Neste laboratório, estuda-se fenômenos que envolvem a espectroscopia óptica de materiais relacionados a efeitos ópticos não-lineares, como por exemplo a geração de segundo harmônico e o efeito Faraday de poláritons em uma microcavidade. Além disso, conta com infraestrutura para experimentos em espectroscopia óptica na faixa do visível e do infravermelho próximo. Utiliza lasers de Ti:Safira CW ou pulsado de 50 femtossegundos ( $50 \cdot 10^{-15}$  segundos), e um sistema de criogenia para o controle de temperatura de amostras, com a possibilidade de estudo de macro ou micro fotoluminescência. Esta infraestrutura permite ainda colaborações nos estudos ópticos em variados projetos, tais como o estudo de cristais, cerâmicas ou mesmo filmes fotovoltaicos [9].

No Laboratório de Fotônica, muitos procedimentos são realizados manualmente, requerendo que o posicionamento de certos objetos seja alterado para se obter medições e, muitas vezes, as distâncias movidas são demasiadamente pequenas para serem acionadas manualmente, o que indica a necessidade de automação de diversos procedimentos realizados nesse local.



## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Espectroscopia Resolvida no Tempo

A maior aplicação de pulsos de femtossegundos é para estudos resolvidos no tempo de processos dinâmicos ultrarrápidos em química, física do estado sólido, como materiais rígidos, e amostras biológicas [12]. Os pulsos de laser ultracurtos são muito importantes para o estudo de espectroscopia óptica não-linear.

A espectroscopia resolvida no tempo baseia-se nos conceitos de bombeio e prova. Um pulso de laser ultracurto de bombeio excita a amostra e a tira do estado de equilíbrio, provocando uma mudança em alguma característica óptica da amostra. Um segundo pulso de prova é incidido na amostra e em parte absorvido. Em seguida, é analisado o espectro da parte que é emitida, caracterizando assim a luminescência da amostra. O pulso de prova, que tem intensidade menor do que o pulso de bombeio, chega na amostra com um atraso com relação ao de excitação [4].

A dinâmica do estado de desequilíbrio em semicondutores tem sido bastante estudada nas últimas décadas. Muitas técnicas têm sido utilizadas para o estudo da dinâmica das cargas. Entre elas, podemos citar a espectroscopia resolvida no tempo. Essa técnica é muito poderosa para estudar o comportamento dinâmico das cargas como resfriamento e aprisionamento [16].

A espectroscopia resolvida no tempo também pode ser usada para rastrear estados intermediários em reações químicas como níveis energia e fenômenos de transferência de cargas e elétrons, além de mudanças conformacionais. Além disso, essa técnica também pode caracte-

terizar vários estados eletrônicos e fenômenos de transferência de energia em nanopartículas.

### 2.2 Geração de Segundo Harmônico Resolvida no Tempo

Cristais de materiais não-lineares exibem um comportamento chamado geração de segundo harmônico. Esse fenômeno ocorre quando incidimos pulsos de laser na amostra e a emissão da amostra é o resultado da soma de resíduos desse pulso e acrescidos de uma onda cuja frequência é o dobro do da frequência do pulso incidente, e cujo comprimento de onda é metade do comprimento de onda do pulso incidente [15].

Ao aplicar a técnica de espectroscopia resolvida no tempo, pode-se analisar a espectro da geração do segundo harmônico de um cristal emitido pela incidência dos pulsos de bombeio e prova. Dessa forma, é gerado um segundo harmônico para cada atraso temporal entre o pulso de prova e o de bombeio. Quando o atraso temporal entre os dois pulsos é nulo, ocorre o ponto de interferência construtiva máximo entre os pulsos de bombeio e prova. Dessa forma, o espectro da emissão da amostra de cristal possui a maior amplitude observada quando o atraso temporal é nulo.

Ao calcular a integração dos espectros obtidos por meio de um ajuste de curva que, no caso da geração de segundo harmônico, pode ser obtido por uma gaussiana, obtém-se a intensidade integrada. O modelo obtido é uma curva da intensidade integrada do SHG (Second Harmonic Generation, ou, em português, geração do segundo harmônico) em função do atraso temporal. A Equação (1) ilustra esse modelo em que  $G(\tau)$  é chamada função de correlação de segunda ordem. [7].

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t + \tau)dt, \quad (1)$$

em que  $\tau$  é o atraso temporal (variável calculada),  $t$  é o tempo e  $I$  é a intensidade (variável medida).

### 2.3 Cálculo da Intensidade Integrada

Para calcular a intensidade integrada, é feito um ajuste de curva não-linear representado pela equação (2) que demonstra a distribuição gaussiana com um deslocamento vertical.

$$I = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} + d, \quad (2)$$

em que  $I$  é a intensidade e  $x$  é o comprimento de onda. O parâmetro  $a$  é a amplitude,  $b$  é a posição central do pico,  $c$  é o desvio padrão do pico e  $d$  é o deslocamento vertical da gaussiana.

Dessa forma, obtém-se a intensidade integrada de cada espectro por meio da seguinte equação:

$$A = a\alpha\sqrt{2\pi}. \quad (3)$$

## 2.4 Movimento do Motor de Micropassos

Com a posição inicial, a posição final e o número de micropassos, é calculada qual distância o motor de passos deve mover de cada vez. Essa distância dada por  $\Delta d$  é calculada como na equação abaixo:

$$\Delta d = (P_f - P_i)/n, \quad (4)$$

em que  $P_f$  é a posição final,  $P_i$  é a posição inicial e  $n$  é o número de passos.

Se o  $\Delta d$  é menor que a resolução do motor de micropassos que é de 0,0005mm, o programa exibe uma mensagem de erro para o usuário e para a execução.

## 2.5 Cálculo do Atraso Temporal

O atraso temporal entre os pulsos de bombeio e prova é calculado pelo tempo que a luz demora a percorrer a distância de ida e volta do pulso de prova ao incidir no espelho acoplado ao motor de passos e retornar ao espelho onde incide o pulso de bombeio. O cálculo é feito a partir da seguinte fórmula:

$$\tau = 2((P_i - P_f)/(cn))n_{atual} = \Delta t, \quad (5)$$

em que  $\Delta t$  é dado pela equação abaixo:

$$\Delta t = 2(P_{zero} - P_f)/c. \quad (6)$$

Nas equações acima,  $\tau$  é o atraso temporal,  $P_i$  é a posição inicial do motor de passos,  $P_f$  é a posição final do motor de passos,  $c$  é a velocidade da luz,  $n$  é o número de passos total,  $n_{atual}$  é o número da iteração correspondente ao passo atual e  $P_i$  é a posição do motor de passos, setada pelo usuário, em que ocorre o atraso temporal nulo.

## 2.6 Integração de Dados em Sistemas de Automação

O termo automação está associado, fundamentalmente, à aplicação de dispositivos que visam substituir o trabalho braçal, insalubre ou repetitivo. O termo informação está associado, por sua vez, ao processamento de dados para o monitoramento de atividades e processos, e à tomada de decisões. A integração de ambos resulta em sistemas de automação e informação, que proporcionam benefícios como o aumento da produtividade e da qualidade, redução de custos e maior agilidade nos processos de tomada de decisão. [17].

Integrar sistemas de instrumentação, controle e automação é configurar, adequar, desenvolver e preparar diversos dispositivos, equipamentos e aplicações relacionados, de forma coordenada, com o objetivo de cada um determinar funções específicas que permitem maximizar o potencial produtivo de determinada solução.

Dessa forma, é importante o uso de diferentes tecnologias e protocolos de comunicação entre as aplicações envolvidas de forma a garantir a correta transmissão de

dados e a execução dos comandos pelos equipamentos [13].

Conforme discutido na referência [18], o modelo OSI (Open Systems Interconnection) é baseado em sete camadas para organizar os protocolos de comunicação: física, enlace, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação.

## 3 Material e Métodos

### 3.1 Componentes Físicos do Sistema

#### 3.1.1 Espectrômetro

De acordo com a descrição fornecida na referência [6], um espectrômetro é um instrumento utilizado para medir as propriedades da luz em uma determinada faixa do espectro eletromagnético. Sua estrutura se resume a uma rede de difração e a um captador chamado CCD (do inglês, charge-coupled device). A rede faz com que o feixe de luz se divida em feixes monocromáticos, que incidem em um sensor fotovoltaico, seja, um captador. Dessa forma, mede-se a intensidade luminosa de cada comprimento de onda existente na rede de difração. Com isso é possível caracterizar uma série de materiais. O espectrômetro possui controlador chamado Spectra Link que controla os motores dentro do espectrômetro, responsáveis por determinar a faixa de comprimento de onda da medição. Nesse projeto foi utilizado o espectrômetro triplo Horiba Jobin Yvon T64000.

#### 3.1.2 Motor de Micropassos

O motor de passo é um tipo de motor elétrico utilizado em aplicações que demandam uma precisão extrema seja ela em uma posição ou ângulo. O motor de passo converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos gerando variações discretas de ângulo. O rotor é incrementado em pequenas variações de ângulo chamados de "passos"[2].

O princípio básico de funcionamento do motor de passo se dá com o uso de solenoides alinhadas dois a dois. Ao serem energizados, o rotor é atraído, para, e se alinha ao eixo dos solenoides, causando uma pequena variação angular. A velocidade e sentido de movimento depende de como os solenoides são energizados [2]. O motor de micropassos utilizado nesse sistema foi o NRT150 150mm do fabricante ThorLabs sendo controlado pelo controlador APT Microstepping Controller da Thorlabs.

#### 3.1.3 Laser Ultrarrápido e Microscópio

Um laser é um dispositivo de geração ou amplificação de luz que funciona a partir da combinação de um amplificador (um meio de ganho que, por intermédio da emissão estimulada de radiação, emite luz com aproximadamente a mesma frequência, as mesmas direções de propagação e polarização, e em fase com o campo a ser amplificado) e um ressonador (uma cavidade que aprisiona o campo gerado, fazendo com que ele passe mais de uma vez pelo

meio de ganho, imprimindo aos fótons, por consequência, uma distribuição estatística bastante peculiar, a qual distingue o laser de outras fontes de luz [11].

O laser pulsado, utilizando de Ti:Safira, pode emitir pulsos da ordem de 50 femtossegundos, com potência de pico de 1 Terawatt e taxa de repetição de 100MHz [5]. Foi utilizado nesse projeto o laser de 50 femtossegundos de Ti:Safira Trestles-50 da Del Mar Photonics e o microscópio foi o Olympus BX41 que possui lentes que possibilitam a focalização dos pulsos de laser na amostra.

### 3.2 Integração Baseada em ActiveX

ActiveX é um framework desenvolvido pela Microsoft que combina recursos das tecnologias COM (Component Object Model) e OLE (Object Linking and Embedding) possibilitando a integração e compartilhamento de recursos entre aplicações em ambiente Windows [10].

Dessa forma, é possível desenvolver uma aplicação que contém um controle ActiveX que permite o acesso a recursos e interfaces de uma outra aplicação previamente instalada no ambiente Windows.

### 3.3 LabView como Ambiente de Integração de Dados

Segundo [8], o LabView é uma linguagem gráfica que usa ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. As aplicações são criadas usando programação de fluxo de dados em que o fluxo determina a ordem de execução dos dados. Labview foi criado pela National Instruments.

O programa desenvolvido em LabView é constituído de uma VI ( Instrumento virtual) que consiste da parte visível ao usuário — o painel frontal— e do diagrama de blocos, o qual integra a parte que contém o fluxo de dados e os ícones da linguagem.

A linguagem G (usada pelo LabView) permite a comunicação entre aplicações que se encontram em computadores distintos utilizando TCP/IP. É possível, dessa forma, enviar dados entre aplicações. Além disso, essa linguagem permite também o controle de recursos de aplicações presentes em um sistema Windows, utilizando a tecnologia ActiveX [1].

### 3.4 Arquitetura Proposta para o Sistema

O espectrômetro se comunica com um computador via barramento SCSI (do inglês, Small Computer System Interface) por meio de seu controlador Spectra Link. O computador que controla o espectrômetro possui um chip que contém uma controladora SCSI instalada em sua placa-mãe. Essa controladora é capaz de interpretar comandos oriundos do software Labspec 5.1 (fornecido pelo fabricante do espectrômetro) e enviar ao espectrômetro.

O software Labspec contém em sua estrutura scripts SCSI, uma linguagem de alto nível usada para executar sequências SCSI pelo processador que se encontra na controladora SCSI (em inglês, host adapter). Portanto, esses scripts são independentes da CPU e do barramento

do sistema do computador, e possuem comandos que podem fazer o processador SCSI selecionar, desselecionar, desconectar, esperar por uma desconexão, transferir dados do usuário, transferir informação SCSI, mudar as fases do barramento e implementar todos os aspectos do protocolo SCSI. Dessa forma, o processador transfere o controle da execução baseado em comparações de fase do barramento SCSI. De forma alternativa, um valor no comando do script SCSI pode ser comparado com o valor do dado de entrada no barramento, permitindo transferência de controle com base em comparação de dados da entrada. [3]

Na Figura 2, à direita, tem-se um espectrômetro controlado pelo Spectra Link que se comunica via SCSI com um computador, cujo sistema operacional é o Windows XP, no qual desenvolve-se uma aplicação servidora que se comunica com o LabSpec via ActiveX e consegue adquirir espectros quando solicitada. A geração de espectros acontece quando ocorre a conexão em rede via TCP/IP realizada por uma aplicação cliente.

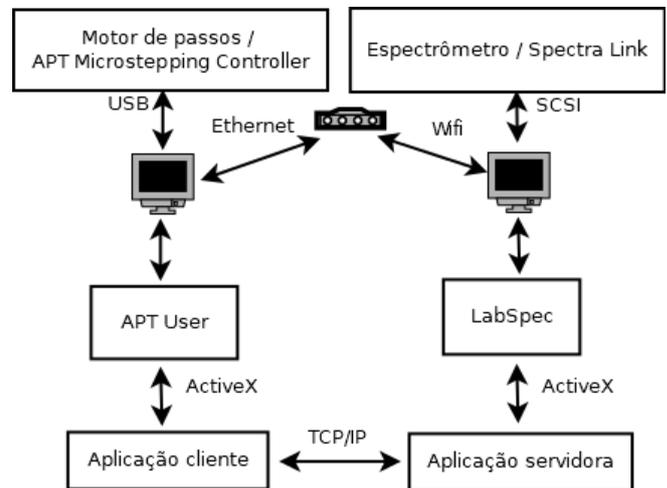


Figura 2: Arquitetura proposta.

Já o motor de passos se comunica com um computador, visto à esquerda da Figura 2, cujo sistema operacional é o Windows 7, por meio de seu controlador APT Microstepping Controller via USB. Esse computador contém o software APT User que consegue controlar o motor de micropassos. Nesse computador, é desenvolvida uma aplicação cliente que se comunica com esse software via ActiveX e consegue mover o motor de passos e se conectar à aplicação servidora que controla o espectrômetro via TCP/IP para enviar ou receber dados. O protocolo TCP/IP é utilizado, pois é confiável, visto que garante a integridade dos dados e possui garantia de entrega.

Na Figura 2, observa-se que os dois computadores foram colocados em uma rede por meio de um roteador da marca TP-LINK modelo TL-WR741ND. O computador que controla o espectrômetro se comunica com a rede via Wifi, enquanto o computador que controla o motor de passos se comunica com a rede via Ethernet.

Foi proposta essa arquitetura, pois o software LabSpec 5.1 que controla o espectrômetro é uma versão antiga e está instalado no computador com Windows XP. Já o software que controla o motor de passos só funciona no Windows 7 ou versões mais recentes. Dessa forma, não é possível integrar os dois equipamentos em um único computador.

### 3.5 Requisitos para as Aplicações Desenvolvidas

Tanto a aplicação cliente quanto a aplicação servidora foram desenvolvidas utilizando o ambiente LabView 8.5 que possui um controle ActiveX. Para a aplicação cliente, estas ferramentas permitem a utilização de recursos do software APT User fornecido pelo fabricante do motor de micropassos utilizado. Dessa forma, consegue-se fazer o acionamento e o comando do motor de passos. Para a aplicação servidora, o emprego desses recursos permite a utilização de funções do software LabSpec 5.1 fornecido pelo fabricante do espectrômetro utilizado. Dessa forma, consegue-se fazer o acionamento e o comando do espectrômetro.

## 4 Desenvolvimento



Foram desenvolvidas duas aplicações: a aplicação servidora que controla o espectrômetro e a aplicação cliente que controla o motor de micropassos. Ambas foram desenvolvidas utilizando a linguagem G do ambiente LabView 8.5.

### 4.1 Aplicação Servidora que Controla o Espectrômetro

Foi criada uma interface, na qual o usuário pode incluir a configuração inicial da aquisição de espectros (os parâmetros de tempo de integração, o número de acumulações e a faixa de comprimento de onda analisada no espectro). Esses parâmetros são importantes, pois podem variar dependendo do processo a ser analisado. A Figura 3 mostra como esses controles foram criados. O controle 'De' indica o início da faixa de comprimento de onda, e o controle 'Para' indica o fim da faixa de comprimento de onda.

Além disso, o usuário pode selecionar a pasta em que quer salvar os espectros e o arquivo que contém os comprimentos de onda para a faixa escolhida por meio de botões localizados na parte superior da Figura 3. É necessário escolher esse arquivo que contém os comprimentos de onda analisados, pois, por um motivo desconhecido, o controle ActiveX não salva os valores de comprimento de onda corretos quando é escolhido um formato de texto.

Quando se clica no botão de escolha da pasta em que são salvos os espectros, abre-se um diálogo para escolha da pasta, e, quando se clica no botão de escolha do arquivo que contém os comprimentos de onda, abre-se um diálogo para escolha do arquivo de texto. A interface contém, também, um gráfico que mostra o espectro

adquirido e seu ajuste de curva a cada nova aquisição, localizado do lado direito da Figura 3.

Além disso, pode-se escolher as tentativas iniciais para os parâmetros do ajuste de curva pela gaussiana, localizados abaixo no texto 'parâmetros iniciais' na Figura 3. O primeiro parâmetro é a amplitude, o segundo a posição central do pico, o terceiro é o desvio padrão que representa a largura do pico e o último é o deslocamento vertical do pico. Existe um controle também para escolher quantos picos existe no espectro, representado pelo número de gaussianas. Porém, nesse trabalho, foi implementada somente a função para espectros de um pico.

Ao iniciar a execução da aplicação, entra-se em um estado de espera em que o servidor escuta por novas conexões na porta 6460. Esse estado de espera pode ser interrompido de duas maneiras. A primeira maneira é estabelecendo uma conexão com um cliente, e a segunda maneira é quando o usuário pressiona o botão 'Parar'.

Quando um cliente se conecta, o programa inicia o processo de aquisição de um novo espectro, salvamento do espectro, cálculo da intensidade integrada e envio da intensidade integrada para o cliente. Após o cliente se desconectar, o programa volta ao estado de espera por novas conexões.

Foi informado pelo fabricante do espectrômetro que não era possível o controle do espectrômetro utilizado nesse projeto pelo software LabView. De fato, ocorre um problema ao salvar o espectro pela aplicação, pois a coluna de comprimento de onda é salva com valores que não são os comprimentos de onda correspondentes. Dessa forma, é preciso fazer uma configuração dos comprimentos de onda corretos por meio de um arquivo que é selecionado pelo usuário que contém a coluna de comprimentos de onda corretos.

A aquisição de espectro é realizada com um controle ActiveX que se comunica com o software LabSpec e adquire um espectro com os parâmetros previamente configurados pelo usuário. O espectro adquirido é, então, salvo em dois formatos de arquivo, '.txt' e '.ngs'. O formato '.ngs' é um formato lido pelo software LabSpec fornecido pelo fabricante do espectrômetro.

Após a aquisição do espectro, calcula-se a intensidade integrada por meio da leitura da coluna de intensidade salva no arquivo do espectro e da coluna de comprimento de onda configurada pelo usuário, realizando-se um ajuste de curva não-linear representado por uma distribuição gaussiana.

Na Figura 4, é possível observar o trecho de código em que é realizado o ajuste de curva. Nesse código, é possível observar a função do LabView utilizada para realizar o ajuste de curva e o cálculo realizado em um MathScript para calcular a intensidade integrada. Os parâmetros calculados do ajuste de curva realizado são salvos em buffer para serem posteriormente salvos em um arquivo de texto quando o usuário desejar encerrar a execução do servidor.

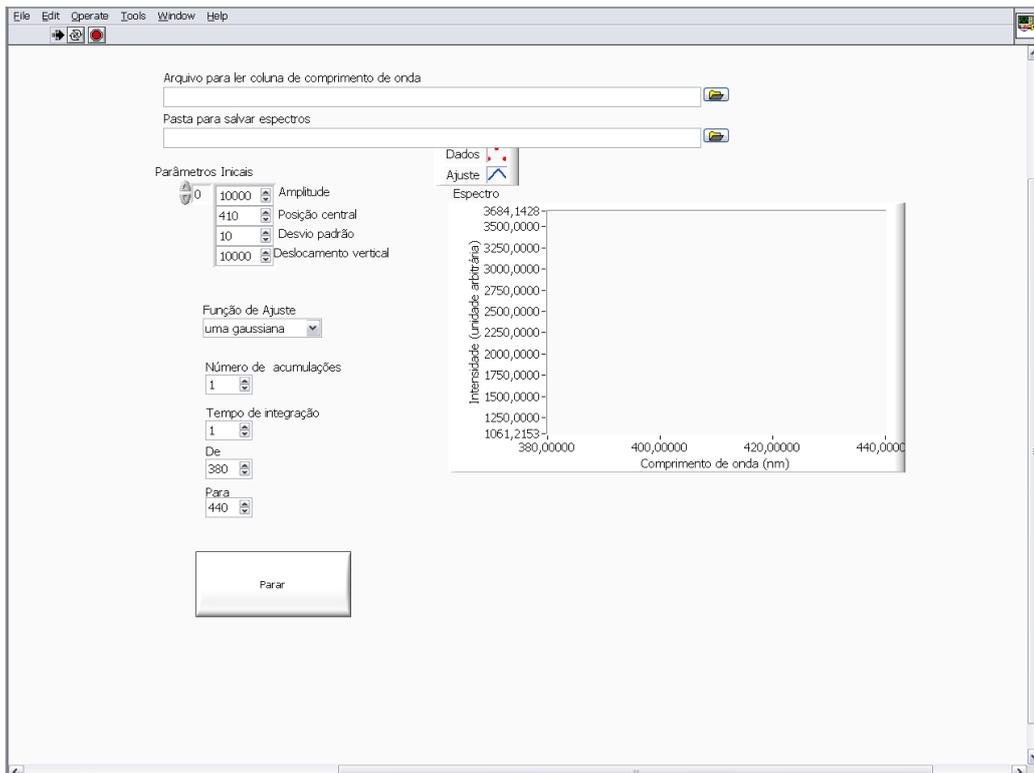


Figura 3: Visão geral da interface.

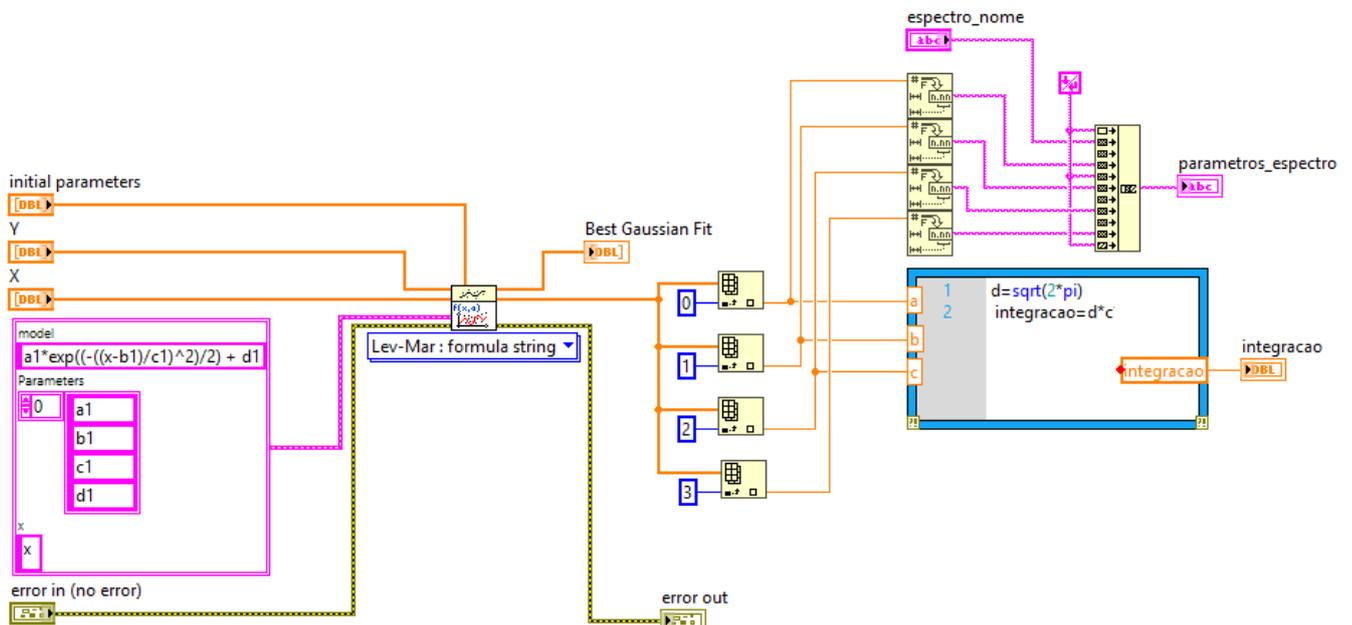


Figura 4: Código do ajuste de curva.

Após o ajuste de curva, plota-se no gráfico da interface os pontos do espectro adquirido e o ajuste de curva realizado.

O envio da intensidade integrada é realizado utilizando o protocolo TCP/IP. O valor calculado é convertido em uma string. Então, o número de bytes da intensidade é calculado e enviado para o cliente por um

comando de escrita. Depois, abre-se outro comando de escrita para enviar a intensidade integrada calculada.

Quando o usuário clica no botão 'Parar' para finalizar a execução da aplicação, é aberto um diálogo para o usuário escolher onde e com qual nome deseja salvar todos os parâmetros calculados do ajuste de curva de cada espectro na forma de arquivo de texto. Após clicar em salvar, o buffer que contém todos os parâmetros de cada

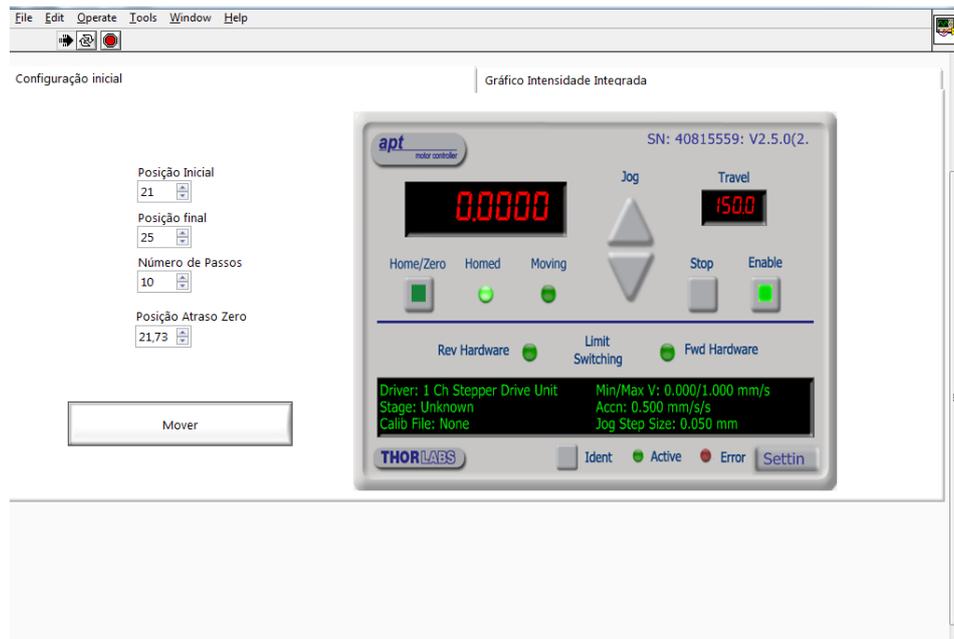


Figura 5: Aba 'Configuração Inicial'.

ajuste de curva realizado em cada espectro é salvo em arquivo de texto no formato '.txt'.

#### 4.2 Aplicação cliente que controla o motor de passos

A interface contém duas abas. Na aba Configuração Inicial, ilustrada na Figura 5, é possível escolher o número de passos, a posição inicial e final do motor e a posição de atraso nulo ilustrados na forma de controles à esquerda da figura. Além disso, essa aba contém um botão para iniciar a execução da aplicação e um container com o controle activeX do programa do motor de passos APT User que mostra a posição em que o motor de passos está. Também contém botões para configurar o motor de passos ou movê-lo manualmente (situado à direita da Figura).

Na aba 'Gráfico Intensidade Integrada', ilustrada na Figura 6, é possível visualizar o gráfico da intensidade integrada em função do atraso temporal que é plotado à medida em que a aplicação está sendo executada. Além disso, essa aba contém botões para parar a aplicação, parar a aplicação e voltar para posição do motor igual a 0 ou pausar a aplicação.

Ao iniciar a execução da aplicação, move-se o motor de passos para a posição 0. Após selecionar a configuração inicial e pressionar o botão iniciar, abre-se, então, um diálogo para o usuário escolher onde e com qual nome quer salvar o arquivo com os dados de posição do motor de passos, atraso temporal e intensidade integrada de cada espectro.

Após o usuário clicar em ok: 1) move-se o motor de passos até a posição 'inicia'; 2) abre-se a conexão com o servidor em um endereço de IP e porta previamente fixados para receber a intensidade integrada que é calcu-

lada pelo servidor; 3) calcula-se o atraso temporal para essa posição do motor; 4) salva-se no arquivo de texto a posição do motor, intensidade integrada e atraso temporal e 5) plota-se no gráfico da interface, a intensidade integrada e o atraso temporal. Executam-se esses procedimentos para cada passo do motor até completar o número de passos configurado pelo usuário.

O IP do computador que controla o espectrômetro foi fixado, de forma que a aplicação sempre abre uma conexão com uma mesma porta e um mesmo IP configurados previamente de forma padrão na aplicação.

O movimento do motor de micropassos é realizado por meio de um controle ActiveX que consegue enviar comandos para o software APT User de forma que ele consiga mover o motor de passos. Com a posição inicial, a posição final e o número de passos, é calculada a distância que o motor de passos deve percorrer de cada vez.

Após mover o motor de passos, a aplicação estabelece uma conexão com a aplicação servidora para que esta realize o espectro, faça a curva de ajuste e envie a intensidade integrada. Dessa forma, a aplicação cliente recebe o número de bytes que se deseja enviar e depois recebe a intensidade integrada do espectro realizado.

Quando o nome e local do arquivo é configurado pelo usuário, cria-se um arquivo de texto no formato '.txt' e abre-se esse arquivo para leitura. A cada passo do motor de passos, salva-se nesse arquivo a coluna de posição atual do motor de passos, intensidade integrada calculada e atraso temporal calculado.

A cada iteração do programa, correspondente a um passo do motor, é plotado na interface o gráfico de intensidade integrada em função do atraso temporal.

Existem dois botões de parar. O botão 'Parar' move o motor de passos para posição inicial configurada e es-

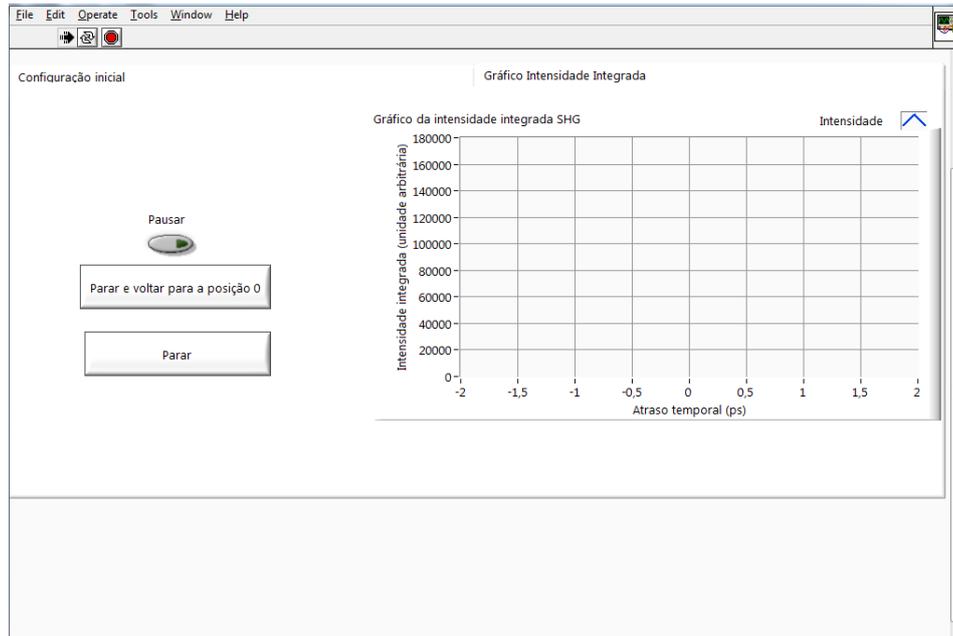


Figura 6: Aba 'Gráfico Intensidade Integrada'.

pera até o botão iniciar ser apertado e continuar com o processo de movimento do motor de passos, e o botão 'Parar e voltar para a posição 0' move o motor de passos para a posição zero e para a execução da aplicação. Além disso, existe um botão para poder pausar a execução do programa em que a aplicação entra em um estado de espera até que o botão 'Pausar' seja desabilitado.

## 5 Resultados

### 5.1 Montagem

A montagem do procedimento para que a luz do laser incida na amostra e seja emitida, e, assim, seja capturada pelo espectrômetro é descrita a seguir. A Figura 7 mostra um diagrama que ilustra essa montagem.

Na Figura 7, pode-se ver que a luz proveniente do laser é dividida em dois pulsos por um divisor de feixes. O pulso de bombeio é desviado para incidir no espelho 1 acoplado ao motor de passos e, então, refletido para o espelho 2. O pulso de prova é desviado para incidir no espelho 4 e no espelho 5 e, em seguida, no espelho 2. O espelho 2 é o ponto de encontro entre os pulsos de bombeio e prova que então incidem no espelho 3 e, em seguida, no microscópio que focaliza os pulsos na amostra. A amostra então emite o pulso resultante que é desviado para o espectrômetro pelo espelho 6.

### 5.2 Amostra Utilizada e sua Focalização

Foi utilizada uma amostra de um cristal óptico não-linear BIBO (BiB3O6) por possuir um excelente coeficiente efetivo não-linear e prover fácil observação da geração de segundo harmônico. Dessa forma, o resultado esperado

é a geração de segundo harmônico resolvida do tempo dessa amostra.

O microscópio empregado foi o Olympus BX41, que focalizou a luz dos pulsos de bombeio e prova na amostra de cristal BIBO. Para isso, observou-se a imagem do microscópio por meio de uma câmera da ThorLabs USB 2.0 conectada a um computador. Utilizou-se o software ThorCam para observar os pulsos de luz incidentes na amostra. A luz incidente na amostra pode ser observada na Figura 8, na qual é possível ver raios circulares concêntricos correspondentes à luz proveniente dos pulsos de laser que incidem na amostra.

### 5.3 Configuração Inicial da Aplicação Cliente

Após a montagem do processo, foi realizada uma aquisição do espectro contínuo utilizando o software Labspec enquanto movia-se o motor de passos para verificar em qual posição deste ocorre o atraso temporal nulo. Para fazer essa verificação, observou-se a posição do motor de passos em que ocorre o aumento da amplitude do espectro em relação às demais posições. Esse aumento observado é em torno de quatro vezes a amplitude do pulso de bombeio ou do pulso de prova, visto que eles possuem mais ou menos a mesma intensidade em seus picos. No ponto de atraso nulo, ocorre a interferência construtiva de fase nula entre os dois pulsos, pois aqui observa-se um espectro de pico de maior amplitude em todo o processo. Encontrou-se a posição de atraso nulo igual a 92,95mm. Dessa forma, escolheu-se a posição inicial igual a 92,7mm e a posição final igual a 93,2mm. O número de passos escolhido foi 100, pois é um número de passos considerável para a observação do fenômeno.

## 5.4 Configuração Inicial da Aplicação Servidora

Com o software LabSpec, observa-se que o espectro do segundo harmônico gerado pela amostra está na faixa de 380nm a 440nm. Logo, realizou-se um espectro com uma aplicação que usa o ActiveX para controlar o Labspec, na faixa de 380nm a 440nm e salvar no formato '.txt'. Esse é o arquivo de configuração da coluna de comprimento de onda utilizado na obtenção desse resultado.

Além disso, observando o espectro da geração de segundo harmônico da amostra, verificou-se quais seriam bons parâmetros iniciais para o ajuste de curva. Assim, escolheu-se 10000 de amplitude, 410 de posição central, 10 de desvio padrão e 1000 de deslocamento vertical.

Para os parâmetros de aquisição do espectro, escolheu-se número de acumulações igual 1, pois não é um espectro muito ruidoso, tempo de integração igual 1s para que não ocorresse a saturação da amostra, e faixa de 380nm a 440nm para que pudesse ser observado o fenômeno da geração de segundo harmônico.

## 5.5 Ensaios para Medição

Após a configuração inicial das aplicações, executou-se a aplicação servidora e, em seguida, a aplicação cliente.

O tempo demandado para a execução da aplicação foi em torno de 14 minutos, ou seja, um tempo razoavelmente pequeno para a quantidade de dados que foi adquirida, visto que são 100 espectros que se fossem adquiridos manualmente para cada posição do motor de passos demandariam muitas horas de trabalho.

Um exemplo de espectro gerado pela aplicação servidora é mostrado na Figura 9.

Na Figura 9 é possível observar um ruído próximo a 440nm que corresponde à luz visível ou aos raios cósmicos capturados pela CCD do espectrômetro. Esse ruído é identificado na Figura por meio de pontos para os quais

o valor da intensidade é acima de 1060 e podem ser vistos à direita da imagem. É possível observar que o espectro gerado corresponde ao segundo harmônico do laser, pois o laser utilizado possui espectro na faixa próxima a 830nm, e o espectro gerado está na faixa próxima a 415 nm que corresponde à metade do comprimento de onda do laser e ao dobro da frequência do laser como esperado.

O gráfico de intensidade integrada gerado pela aplicação cliente pode ser visto na Figura 10. Nessa figura, é possível observar que próximo ao ponto em que o atraso temporal é nulo, ocorre o ponto de maior amplitude da intensidade integrada. Esse ponto corresponde à posição do motor de passos em que os pulsos de bombeio e de prova incidem na mesma posição na amostra, ocorrendo, assim, o ponto de interferência construtiva máxima entre eles. Além disso, observa-se que esse ponto de intensidade máxima não está exatamente na posição em que o atraso é nulo, pois o gráfico está um pouco deslocado devido à posição de atraso nulo configurada não ser a posição exata.

A variação da intensidade integrada vista no gráfico da Figura 10, entre -0,5ps e 0,5ps é explicada pela interferência entre os pulsos de bombeio e de prova que, dependendo do atraso temporal, pode assumir valores distintos. Essa interferência ocorre quando o pulso de bombeio e o pulso de prova compartilham de uma área comum de incidência na amostra.

Foi realizado um gráfico em formato de cascata dos 100 espectros salvos pela aplicação servidora mostrado na Figura 11, na qual é possível observar um espectro de maior amplitude entre todos os espectros gerados, correspondente à posição do motor de micropassos em que o atraso temporal é nulo. Além disso, é observado nesse gráfico picos próximos de 440 nm correspondentes à luz visível ou aos raios cósmicos. Como a CCD do espectrô-

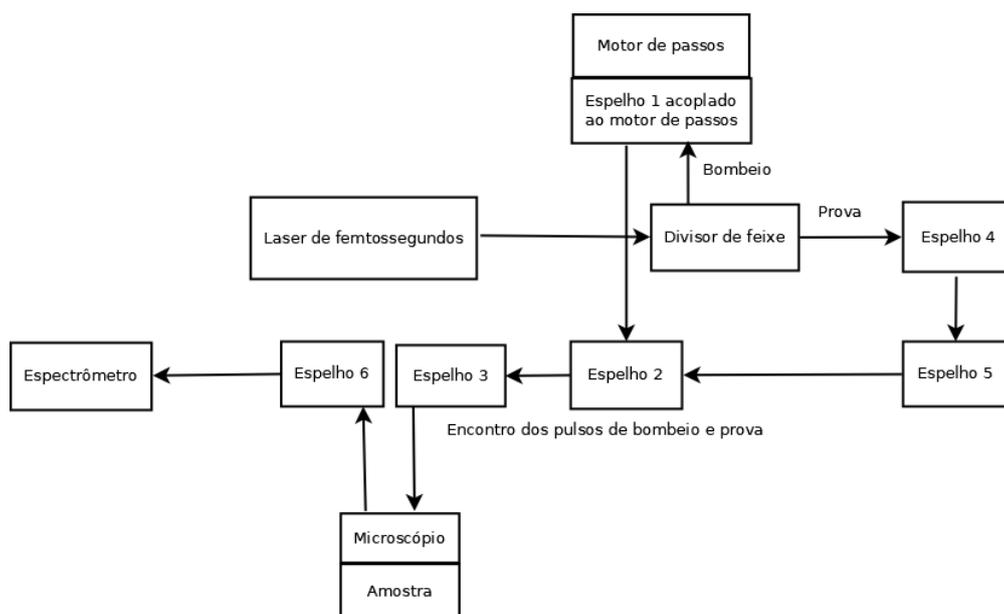


Figura 7: Diagrama de montagem.

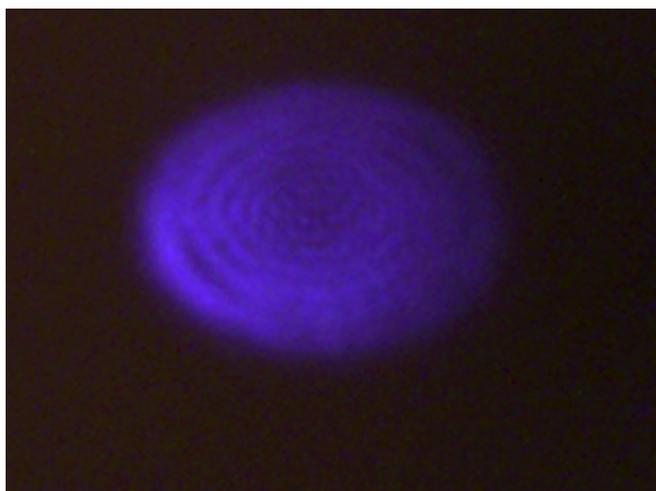


Figura 8: Imagem dos pulsos de laser incidentes na amostra focalizada pelo microscópio.

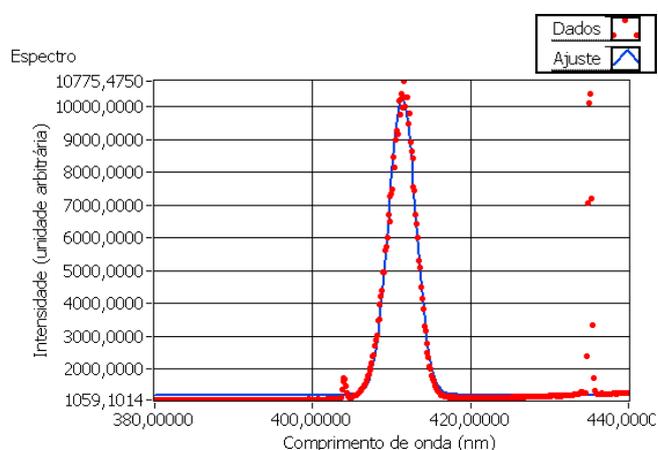


Figura 9: Gráfico gerado pela aplicação servidor.

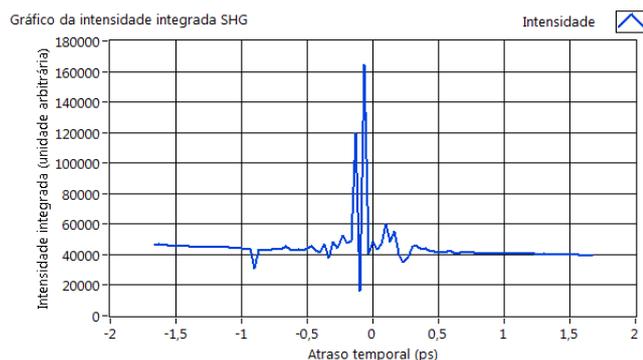


Figura 10: Gráfico de intensidade integrada gerada.

metro é muito sensível, é possível observar nos espectros gerados esses ruídos.

Para a obtenção de 100 espectros, foram necessários cerca de 14 minutos. Se esse procedimento fosse realizado manualmente demandaria horas para ser realizado e muito esforço do operador que teria que mover o motor de passos manualmente via software APT User por 100 vezes e, a cada movimento do motor, adquirir um

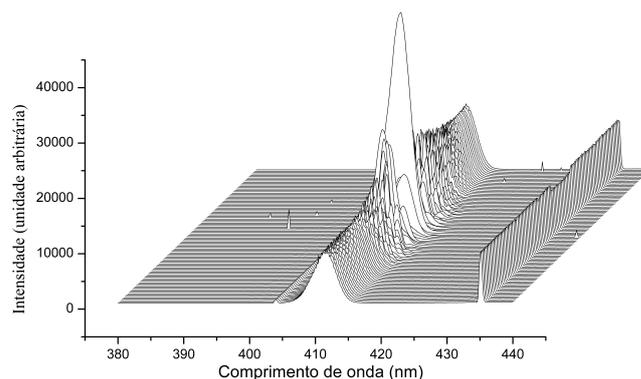


Figura 11: Gráfico em cascata dos espectros gerados.

espectro com o software LabSpec e salvar esse espectro no formato de texto. Após esse procedimento, o operador teria que realizar a análise de cada espectro para obtenção da intensidade integrada. Esse procedimento, se realizado manualmente, demandaria muitas horas de trabalho.

## 6 Conclusão

O presente projeto atingiu os objetivos propostos, visto que foi desenvolvido um sistema na camada de aplicação, no qual é possível controlar o espectrômetro e o motor de passos de forma sincronizada e automática e, dessa forma, obter resultados de intensidade integrada em função do atraso temporal para analisar fenômenos de óptica não-linear que envolvem energia resolvidos no tempo.

Além disso, foi possível obter os dados da intensidade integrada de cada espectro, do atraso temporal e da posição do motor de passos em um arquivo de texto e na forma de um gráfico de intensidade integrada em função do atraso temporal. Também foi possível obter os dados de cada ajuste de curva no formato de uma gaussiana e os dados de cada espectro adquirido no formato de texto. O espectro também é salvo no formato '.ngs' que é um formato do software LabSpec.

As aplicações desenvolvidas fornecem a integração entre os equipamentos que antes não se comunicavam, tornando-se possível o comando automático do espectrômetro e do motor de micropassos. Dessa forma, os objetivos de integração foram atingidos.

Além disso, o tempo demandado para realização do processo foi drasticamente menor que o tempo que seria demandado se o processo fosse realizado manualmente. Dessa forma, o sistema desenvolvido reduz o custo relacionado ao tempo e consegue-se assim obter quantidade maior de dados em menor tempo.

Como limitações do trabalho, houve dificuldade na aquisição do espectro, visto que não foi possível salvar

os espectros com a coluna de comprimento de onda correta, tendo que ser feita uma configuração dessa coluna solicitando arquivo do usuário para correção.

Como trabalhos futuros existe a possibilidade de se levar o trabalho desenvolvido para outros laboratórios de diferentes universidades, o que pode ocasionar ganhos no processo de medição.

## Referências

- [1] Rick Bitter, Taqi Mohiuddin, and Matt Nawrocki. LabVIEW: Advanced programming techniques. Crc Press, 2006.
- [2] Felipe Gonçalves Brites and Vinicius Puga de Almeida Santos. Motor de passo. Pet Tele Universidade Federal Fluminense. Niterói/RJ, 2008.
- [3] NCR Corporation. NCR 53C720 Programmer's Guide. 1991.
- [4] Thonimar Vieira de Alencar Souza. Espectroscopia de femtossegundos e propriedades ópticas não lineares em nanomateriais bidimensionais. 2014.
- [5] Weiwei Feng, Lihuang Lin, Wenyao Wang, Ruxin Li, and Zhizhan Xu. 100-mhz multi-terawatt femtosecond ti: sapphire laser with a regenerative amplifier. Chinese Optics Letters, 5(101):S166–S168, 2007.
- [6] PC Isolani, MC Kida-Tinone, H Harald V Linnert, Jair J Menegon, Jose M Riveros, and Peter W Tiedemann. Construção e desempenho de um espectrometro de massas por transformada de fourier. Quim. Nova, 15:351–354, 1992.
- [7] Gloria Regina Jacobovitz et al. Geração de pulsos laser com duração de femtossegundos. 1985.
- [8] Gary W Johnson. LabVIEW graphical programming. Tata McGraw-Hill Education, 1997.
- [9] Franklin Massami Matinaga. Laboratório de Fotônica. <http://lilith.fisica.ufmg.br/~fotonica/>, 2016. Acesso em : 24-05-19.
- [10] Docs Microsoft. Introduction to ActiveX Controls. [https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/internet-explorer/ie-developer/platform-apis/aa751972\(v=vs.85\)](https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/internet-explorer/ie-developer/platform-apis/aa751972(v=vs.85)), 2017. Acesso em : 2-05-19.
- [11] Flávio Campopiano Dias de Moraes. Construção e caracterização de um laser contínuo de titânio-safira. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2013.
- [12] Shaul Mukamel. Principles of nonlinear optical spectroscopy, volume 29. Oxford university press New York, 1995.
- [13] Bruno Alberto Soares Oliveira, Servílio Assis, and Carlos Nolli. Development of a prototype electrical energy monitoring system via internet/desenvolvimento de um protótipo de sistema de monitoramento de energia elétrica via internet. Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis, 12(1):48–61, 2019.
- [14] Bruno Alberto Soares Oliveira, Matheus Soares Nametala, Brayan Rawlison Castoril, Marcos Diego Catalano, and Ciniro Aparecido Leite Nametala. Avaliação de uma rede neural artificial como estimador temporal pluviométrico no sistema de abastecimento cantareira. Revista de Informática Aplicada, 14(1), 2018.
- [15] Rüdiger Paschotta. RP Photonics Enciclopedia. [https://www.rp-photonics.com/frequency\\_doubling.html](https://www.rp-photonics.com/frequency_doubling.html), 2017. Acesso em : 2-05-19.
- [16] SS Prabhu and AS Vengurlekar. Time Resolved Pump-Probe Reflectivity in GaAs and GaN. [https://www.researchgate.net/publication/268204574\\_Time\\_Resolved\\_Pump-Probe\\_Reflectivity\\_in\\_GaAs\\_and\\_GaN](https://www.researchgate.net/publication/268204574_Time_Resolved_Pump-Probe_Reflectivity_in_GaAs_and_GaN), 2015. Acesso em : 12-03-19.
- [17] Julio César Braz de Queiroz. Integração de sistemas. Puc Minas, 2010.
- [18] Hubert Zimmermann. Osi reference model-the iso model of architecture for open systems interconnection. IEEE Transactions on communications, 28(4):425–432, 1980.