

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA

HENRIQUE NAPOLIÃO BARRETO  
LUCAS LUGNANI FERNANDES

**CONTROLE E AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE AJUSTE DE  
POTÊNCIA DE UM FEIXE DE LASER**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

HENRIQUE NAPOLIÃO BARRETO  
LUCAS LUGNANI FERNANDES

**CONTROLE E AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE AJUSTE DE  
POTÊNCIA DE UM FEIXE DE LASER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Elétrica”

Orientador: Prof. Dr. Ismael Chiamenti

Coorientador: Prof. Dr. Amauri Assef e Prof. Dr. Eduardo Bertogna

CURITIBA  
2016

HENRIQUE NAPOLIÃO BARRETO  
LUCAS LUGNANI FERNANDES

## Controle e Automação do Sistema de Ajuste de Potência de um Feixe de Laser

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 21 de Junho de 2016.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso  
De Engenharia Elétrica do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Ismael Chiamenti, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Amauri Amorin Assef, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Co-Orientador

---

Eduardo Giometti Bertogna, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Co-Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Ismael Chiamenti, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Amauri Amorin Assef, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eduardo Giometti Bertogna, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Guilherme Luiz Moritz, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafael Fontes Souto, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento sincero a Deus e nossos familiares pelo apoio nesta caminhada de vários anos. Agradecemos aos nossos amigos com quem compartilhamos madrugadas insônes na busca por concluir trabalhos que, mal notávamos, aos poucos construíaam nosso conhecimento e nos tornavam mais humildes por saber o quanto ainda há por aprender. Aos professores e professoras que nos incentivaram, nos desafiaram, nos ensinaram, nos mostraram o caminho e contribuíram imensamente para o nosso crescimento pessoal e profissional, prestamos, aqui, nossos genuínos agradecimentos.

## RESUMO

BARRETO, Henrique Napolião; FERNANDES, Lucas Lugnani. CONTROLE E AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE AJUSTE DE POTÊNCIA DE UM FEIXE DE LASER. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho trata do controle e automação do sistema de ajuste de potência de um feixe de laser do Laboratório de Fotônica (FOTON) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR. O processo de ajuste abrange as etapas de: bloqueio do feixe do laser, posicionamento do sensor de potência ótica, leitura da potência no conjunto de medição e controle da posição angular de um disco atenuador de potência. Para o desenvolvimento do sistema automático, foram selecionados motor de passo, microcontrolador PIC e o *software* LabVIEW. Foi desenvolvido, neste *software*, um programa mestre que controla o sistema e um programa escravo para o PIC que executa os comandos dos periféricos. Foi confeccionada uma placa de circuito impresso para o PIC que possui comunicação serial e circuito de potência para alimentação e comando dos motores. O sistema automatizado foi entregue operacional ao FOTON, integrado ao sistema posicionamento tridimensional ao qual o sistema automatizado é subordinado e se comunica via TCP/IP.

**Palavras-chave:** Controle, Automação, Laser, Motor de Passo

## ABSTRACT

BARRETO, Henrique Napolião; FERNANDES, Lucas Lugnani. A Laser Beam Power Adjustment System Control and Automation. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This work deals with the control and automation of the Federal University of Technology of Paraná Photonics Laboratory's laser beam power adjustment system. The steps that compose the adjustment procedure are: blocking the laser beam, positioning the optical power sensor, reading the power display measure and controlling a attenuating disc's angular position. Stepper motors, the PIC 16F877A microcontroller and the software LabVIEW were chosen for the development of the automatic system. A master program was developed in this software and a slave program for the PIC which executes the peripherals commands. A printed circuit board (PCB) was made containing serial communication e power circuit drive for the powering and command of the motors. The automated system was delivered to the FOTON operational, fully integrated with the three-dimensional positioning system to which it is subordinated and has TCP/IP communication

**Keywords:** Control, Automation, Laser, Stepper Motor

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Sistema de Ajuste de Potência de um feixe de Laser. ....	7
FIGURA 2	– Componentes do Sistema de Ajuste Manual ....	8
FIGURA 3	– Sistema de Ajuste de Potência Manual ....	9
FIGURA 4	– Diagrama funcional do ajuste de potência automatizado ....	12
FIGURA 5	– Fluxograma do Sistema Automatizado ....	16
FIGURA 6	– Ajuste por polinômio de primeiro grau ....	19
FIGURA 7	– Fluxograma do <i>firmware</i> do PIC. ....	24
FIGURA 8	– Circuito Inicial do PIC com <i>Shield</i> dos Motores. ....	25
FIGURA 9	– Circuito de Alimentação e Comando dos Motores. ....	27
FIGURA 10	– Resposta Permanente à potência mínima. ....	29
FIGURA 11	– Resposta Permanente à potência intermediária. ....	29
FIGURA 12	– Resposta Permanente à potência máxima. ....	30
FIGURA 13	– Resposta Transitória a potência mínima. ....	31
FIGURA 14	– Resposta Transitória a potência intermediária. ....	31
FIGURA 15	– Resposta Transitória a potência máxima. ....	32
FIGURA 16	– Valores das Médias de Potência (mW) durante o Ajuste Automático - Primeiro Experimento. ....	34
FIGURA 17	– Valores das Médias de Potência (mW) durante o Ajuste Automático - Segundo Experimento. ....	34
FIGURA 18	– Valores das Médias de Potência (mW) durante o Ajuste Automático - Terceiro Experimento. ....	35
FIGURA 19	– Valores das Médias de Potência (mW) durante o Ajuste Automático - Quarto Experimento. ....	35
FIGURA 20	– Projeto do Circuito Inicial do PIC com <i>Shield</i> dos Motores. ....	40
FIGURA 21	– Projeto do circuito de Alimentação e Comando dos Motores. ....	40
FIGURA 22	– Projeto do circuito do microcontrolador. ....	41
FIGURA 23	– Projeto do circuito do drive de potência. ....	42

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Valores de potência medidos conforme posição angular do Disco .....	19
TABELA 2	– Desvios Padrão em Função do Nível de Potência e do Número de Amostras e suas Médias (0,1 x mW) .....	28
TABELA 3	– Resumo do ajuste de potência do segundo experimento .....	36
TABELA 4	– Resumo do ajuste de potência do quarto experimento .....	36
TABELA 5	– Tabela de Resultados 1º Experimento .....	44
TABELA 6	– Tabela de Resultados 2º Experimento .....	45
TABELA 7	– Tabela de Resultados 3º Experimento .....	46
TABELA 8	– Tabela de Resultados 4º Experimento .....	47



## LISTA DE SIGLAS

PIC	<i>Peripheral Interface Controller</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LV	LabVIEW
FOTON	Laboratório de Fotônica
UP	Unidade de Processamento
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
GND	<i>Ground</i>
IDE	<i>Integrated development environment</i>

PIC TCP/IP LabVIEW LV FOTON UP USB GPIB PC PCI GND IDE

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
1.1 TEMA	6
1.1.1 Delimitação do Tema	6
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	7
1.3 OBJETIVOS	10
1.3.1 Objetivos Específicos	10
1.4 JUSTIFICATIVA	11
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1 UNIDADE DE PROCESSAMENTO	15
2.1.1 Programa LabView	16
2.1.2 Microcontrolador	17
<b>3 DESENVOLVIMENTO</b>	<b>18</b>
3.1 TESTES PRELIMINARES	18
3.1.1 Teste do Disco Atenuador	18
3.1.1.1 Conclusão do Teste do Disco	20
3.2 CÓDIGO	20
3.2.1 Código em LabView	20
3.2.1.1 Comunicação entre o LV e o Sistema de Posicionamento Tridimensional	21
3.2.1.2 Comunicação entre LV e PIC	22
3.2.1.3 Ajuste Grosso - Medição e cálculo do número de passos do motor do disco	22
3.2.1.4 Ajuste Fino - Medição e critério de parada	23
3.2.1.5 Comunicação de potência ajustada	23
3.2.2 Código FOTON PIC	24
3.3 CIRCUITO DO PIC	25
3.3.1 Fonte de alimentação do Microcontrolador	25
3.3.2 Microcontrolador	26
3.3.3 Alimentação do Motores	26
3.3.4 Driver lógico de potência	27
3.4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS	27
3.4.1 Aquisição de Dados	28
3.5 CONEXÃO DO LV COM PROGRAMA DO POSICIONADOR TRIDIMENSIONAL	32
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>33</b>
4.1 DURAÇÃO DO AJUSTE	33
4.1.1 Tempos para Preparação do Sistema de Ajuste de Potência	34
4.1.2 Tempo de Aguardo do Posicionador Tridimensional	35
4.2 RESOLUÇÃO MÁXIMA DO AJUSTE E CRITÉRIO DE PARADA	36
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>37</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS	38
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>39</b>

<b>6</b>	<b>PROJETOS DA PLACA DO CIRCUITO DO PIC .....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>TABELAS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>43</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

A automação de processos é uma tendência observada há muito. ”Desde os primórdios de sua origem, o ser humano sempre se utilizou de ferramentas e utensílios que o auxiliaram na realização de diversas atividades cotidianas relacionadas às suas necessidades de sobrevivência.” (ROMANO, 2002). Desde o advento da tecnologia e do surgimento de processos industriais, cada vez mais, cresce a busca por maneiras de tornar esses processos independentes da ação direta da mão humana através da aplicação de controles automatizados.

Assim, a motivação de se criarem máquinas para substituir o homem na realização de tarefas é uma característica da natureza humana, como escreveu Aristóteles (sec. IV a.C.): “se os instrumentos pudessem realizar suas próprias tarefas, obedecendo ou antecipando o desejo de pessoas...” A automação, como afirma Pires, “é uma técnica que pode ser usada para reduzir custos de produção e aumentar a qualidade dos produtos” (PIRES, 2002). Ou seja, é possível, com o uso desses meios, minimizar e até mesmo eliminar a ocorrência de erros, por exemplo, em linhas industriais, alcançar homogeneidade dos resultados parciais e do serviço ou produto acabado. Aumenta-se, assim, a confiabilidade, além de economizar energia e ter maior agilidade e rapidez no processo.

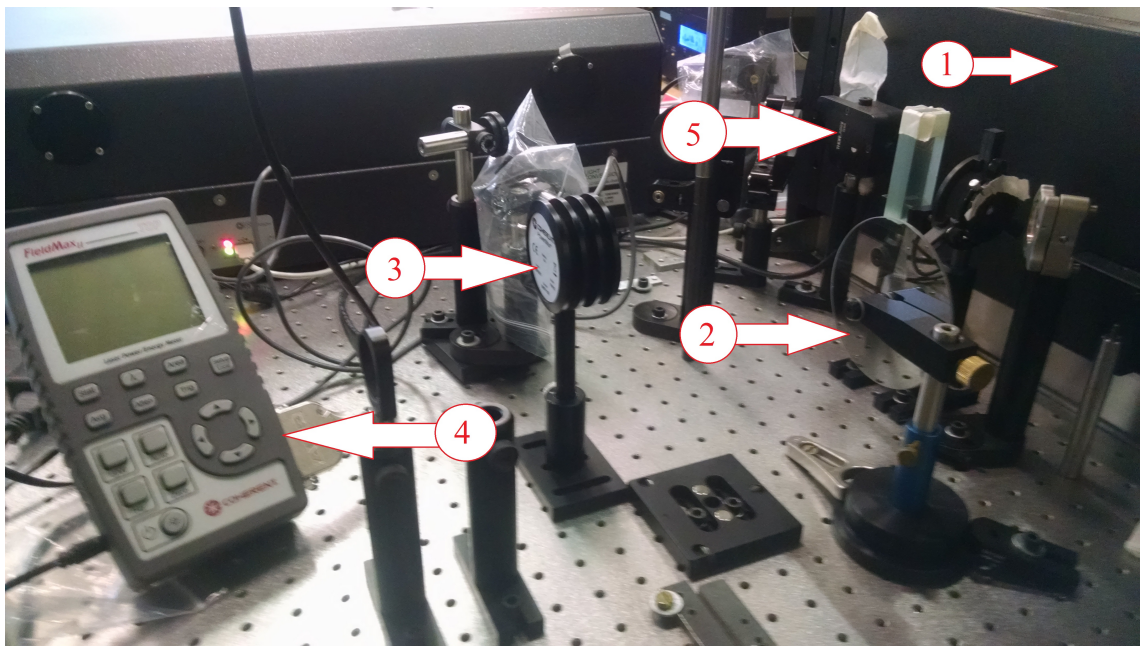
### 1.1.1 Delimitação do Tema

O Laboratório de Fotônica da UTFPR dispõe de um equipamento emissor de feixe de laser para produção de dispositivos óticos por técnica fotorrefrativa, como guias de ondas óticos (CHIAMENTI I.; BONFIGLI, 2014), cavidades ressonantes (FABRIS JOSÉ LUÍS ; BOCK, 2015), redes de Bragg (COSTA L. N. ; MOURA, 2015), modulação periódica de índice de refração (FIORIN R. ; COSTA, 2013), entre outros dispositivos óticos produzidos por microusinagem à laser. Os diversos experimentos, durante a sua execução, podem requerer diferentes valores de potência ótica do laser de gravação. O sistema fundamental de emissão

laser opera com banda espectral centrada em 800nm e com potência fixa em torno de 3W. Para variação do nível de potência, utiliza-se um mecanismo externo ao sistema fundamental de emissão.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A Figura 1 mostra uma foto da bancada do Laboratório Foton com os equipamentos que constituem o sistema de ajuste de potência manual e o sistema fundamental de emissão.

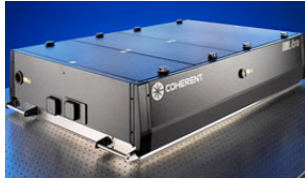


**Figura 1: Sistema de Ajuste de Potência de um feixe de Laser.**

**Fonte: Autoria Própria.**

As Figuras 2a, 2b, 2c, 2d e 2e mostram imagens individuais dos componentes enumerados na Figura 1.

1. Laser de Titânio:Safira (emissão em 800nm);
2. Disco atenuador (a ser automatizado). Este disco possui transmissão ótica variável com o ângulo de giro, variando de 10% a 90% da potência luminosa nele incidente;
3. Sensor de potência ótica (a ser automatizado);
4. Equipamento de leitura do nível de potência;
5. *Shutter* (obturador) de bloqueio do feixe de laser (a ser automatizado).



(a) Laser Femtosegundo LIBRA.



(b) Disco Atenuador.



(c) Sensor de potência ótica.



(d) Equipamento de leitura do nível de potência.



(e) Obturador de bloqueio do feixe de laser.

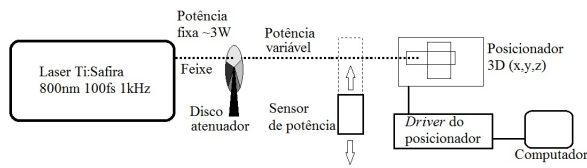
### Figura 2: Componentes do Sistema de Ajuste Manual

O sistema operado manualmente é mostrado na Figura 3a. Este sistema está sujeito a diversos problemas. Entre eles, o tempo excessivo gasto para um mesmo procedimento, possibilidade de erro na ordem das etapas do processo, danos aos equipamentos por imperícia ou desatenção. É interessante que esses problemas sejam minimizados.

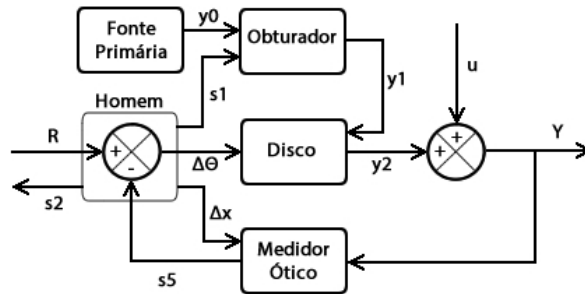
A operação de ajuste manual da potência demanda tempo e está sujeita a erros de fator humano e ruídos externos (o sistema continuará sob influência destes ruídos). Tal processo de ajuste pode ser representado pelo diagrama funcional da Figura 3b.

Sendo, na Figura 3b:

- R: Potência desejada do feixe de laser (entrada do sistema);
- u: Perturbações externas (variação de temperatura, luminosidade, etc.);
- Y: Potência do feixe de laser ajustado (saída do sistema).
- s1: O usuário aciona o Obturador;
- s2: O usuário verifica que o valor de potência atingido é satisfatório;
- s5: Saída do Conjunto Sensor Ótico e *Display* de Potência para o operador;
- y0: Feixe de laser da fonte primária (potência fixa);
- y1: Saída do obturador para o Disco Atenuador (feixe de laser);



(a) Esquema do Ajuste de Potência Manual.



(b) Diagrama funcional do ajuste de potência manual.

**Figura 3: Sistema de Ajuste de Potência Manual**

$y_2$ : Saída do Disco Atenuador (feixe de laser com potência ajustável);

$\Delta \Theta$ : O usuário gira o Disco Atenuador (ajuste de ângulo);

$\Delta x$ : O usuário posiciona o Sensor Ótico (deslocamento do sensor);

O bloco “disco” está indicado como “2” e o “medidor ótico” são os itens “3” e “4”, da Figura 1.

O ajuste de potência manual consiste de alguns procedimentos rotineiros que tem início em um dado valor de potência requerido para um experimento. O processo dinâmico do diagrama da Figura 3b pode ser descrito conforme a seguinte sequência:

1. Ajuste de potência é requerido (R);
2. O feixe do laser é bloqueado pelo obturador ( $y_1 = 0$ );
3. O sensor de potência é inserido no caminho ótico do laser ( $\Delta x$ );
4. O obturador é aberto ( $y_1 \neq 0$ );
5. A aferição da potência inicial do laser é realizada ( $s_5$ );
6. O disco atenuador é girado, manualmente, até ser observado o nível de potência desejado no medidor de potência ( $\Delta \Theta$ );
7. O obturador é fechado ( $y_1 = 0$ );

8. O medidor de potência é retirado do caminho ótico ( $\Delta x$ );
9. O obturador é aberto e dá-se continuidade ao procedimento experimental com a potência do laser ajustada ( $y_1 \neq 0$ ;  $s_2$  ajustado).

Observação: Certos procedimentos que fazem parte deste processo podem oferecer riscos de segurança, quando da inserção de objetos no caminho ótico do feixe. Portanto, é necessário que o obturador seja aberto somente quando necessário.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver a automatização do ajuste do nível de potência de um feixe de laser, conforme o parâmetro requerido por um dado experimento, e a integração deste sistema automatizado com o sistema de posicionamento tridimensional já em operação na bancada experimental.

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

Todos os componentes integrantes do sistema tem a opção de interface com o *software* LabView (LV) que foi utilizado para programação, controle e automatização do sistema de ajuste do nível de potência do feixe do laser e para a integração deste com um sistema de posicionamento (que possui sistema de comandos desenvolvidos fora do âmbito deste projeto). Dessa forma, os objetivos específicos deste projeto visam:

- Avaliar um microcontrolador para o controle do sistema;
- Pesquisar o tipo de motor mais adequado para a aplicação;
- Determinar o protocolo de comunicação entre obturador e LV;
- Definir o protocolo de comunicação entre motores e LV;
- Especificar protocolo de comunicação entre LV e sistema de posicionamento tridimensional;
- Determinar protocolo de comunicação entre LV e equipamento de leitura de nível de potência;
- Desenvolver o programa em LV para integração dos mecanismos;



- Determinar o processamento dos dados registrados;
- Integrar o sistema de ajuste com o sistema de posicionamento já em operação.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Atualmente, o processo de ajuste de potência do laser é realizado manualmente. Isto acarreta possibilidade de erro humano, imprecisão de medida e considerável demanda de tempo. Com o sistema de controle e ajuste de potência automatizados, visando minimizar a influência de distúrbios externos, haverá economia de tempo e de recursos, maior eficiência, redução de erros de medida e eliminação do erro humano. Todos, fatores importantes para correção e precisão de um experimento científico. Uma vantagem é o ajuste de potência de forma padronizada, além de ganho de tempo em experimentos de longa duração executados pelo sistema de posicionamento que já é automatizado e que, para cada potência requerida, precisava ser parado para o ajuste manual da potência. Também pode-se ressaltar que, durante intervalos de horas, a potência do laser apresenta variação de baixa frequência intrínseca ao sistema de emissão laser. Tal variação pode ser compensada por um ajuste da potência em intervalos pré-determinados, visando a realização do experimento com uma potência mais constante.

Dessa forma, haverá ganho para o laboratório, facilitando os demais experimentos que são realizados com o uso desse sistema, além de aumento da eficiência como um todo. Principalmente, haverá ganho de experiência dos autores e enriquecimento na formação de recursos humanos qualificados, pois, tal trabalho, demandará a aplicação de vários assuntos abordados nas aulas teóricas e nas práticas experimentais realizadas ao longo da graduação. Trará contato, ainda, com novos temas não abordados ao longo da formação acadêmica.

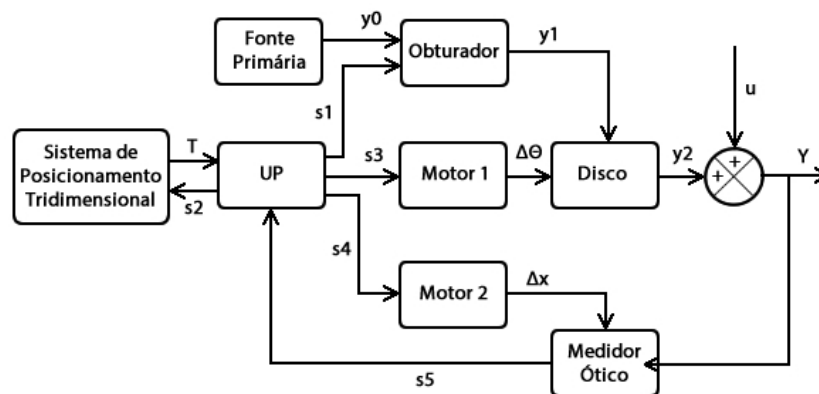
#### 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para implementar a automação do sistema de ajuste de potência do feixe de laser, faz-se necessário adotar os seguintes procedimentos:

- Familiarização com o *software* LV;
- Estudo do dispositivo de medição de potência existente no laboratório;
- Comunicação entre o dispositivo de medição e o *software* LV;
- Testes experimentais de registro e processamento de dados pelo LV;

- Implementação dos comandos operacionais do obturador via LV;
- Determinação dos atuadores de posicionamento do sensor e rotação do disco atenuador;
- Controle dos atuadores via LV;
- Integração destes atuadores ao arranjo experimental atual;
- Testes do sistema de ajuste automatizado;
- Integração do sistema implementado com os demais sistemas do arranjo experimental.

Com estes procedimentos metodológicos objetiva-se a implantação do sistema de ajuste automatizado do nível de potência do feixe do laser, conforme o diagrama funcional representado na Figura 4.



**Figura 4: Diagrama funcional do ajuste de potência automatizado**

**Fonte: Autoria Própria.**

Legenda:

- UP: Unidade de Processamento;
- Obturador: Interface mecânica para bloqueio do feixe de laser;
- Motor 1: Motor de passo do ajuste do ângulo do disco atenuador;
- Motor 2: Motor de passo para deslocamento do sensor ótico;
- Disco: Disco atenuador da potência do feixe do laser;
- Medidor Ótico: Conjunto sensor ótico e *display* de potência;

- T: Conjunto que inclui as informações do comando do obturador, do nível de potência desejado e limite de potência suportado para o experimento (oriundo do sistema de posicionamento tridimensional);
- s1: Saída da UP para comando do obturador;
- s2: Saída da UP para comunicação de ‘valor da potência ajustado’ para o sistema de posicionamento tridimensional;
- s3: Saída da UP para comando do motor 1;
- s4: Saída da UP para comando do motor 2;
- s5: Saída do conjunto sensor ótico e *display* de potência para a UP;
- y0: Feixe de laser da fonte primária (potência fixa);
- y1: Saída do obturador para o disco atenuador (feixe de laser);
- $\Delta \Theta$ : Saída do motor 1 para o disco atenuador (ajuste de ângulo);
- $\Delta x$ : Saída do motor 2 para o sensor ótico (deslocamento do sensor);
- y2: Saída do disco atenuador (feixe de laser com potência ajustável);
- u: Perturbações externas (variação de temperatura, luminosidade, etc.);
- Y: Feixe de laser com potência ajustada (saída do sistema).

O processo automatizado mostrado no diagrama funcional da Figura 4 terá a seguinte dinâmica (por etapas):

1. Com o obturador fechado ( $y1 = 0$ ), acionar sistema de deslocamento do sensor de potência para alinhamento deste com o eixo ótico do laser ( $s4 \rightarrow \Delta x$ );
2. Envio de sinal de comando para abertura do obturador ( $s1 \rightarrow y1 \neq 0$ );
3. Aquisição do nível de potência atual ( $s5$ ) e comparação com o nível de potência desejado ( $s5 = T?$ );
4. Ajuste da posição angular do disco atenuador ( $\Delta \Theta$ ), caso o nível medido não seja coerente com o nível desejado, e leitura do novo valor da potência do feixe ( $s5$ );

5. Uma vez ajustado o nível de potência, enviar sinal de comando para fechar o obturador ( $s1 \rightarrow y1 = 0$ );
6. Deslocamento do sensor de potência para fora do caminho ótico do feixe ( $\Delta x$ );
7. Envio de sinal para o sistema de posicionamento espacial informando que o nível de potência foi ajustado ( $s2$ );
8. Estado de espera para recebimento do sinal do sistema de posicionamento para novo ajuste de potência ( $T = ?$ ).

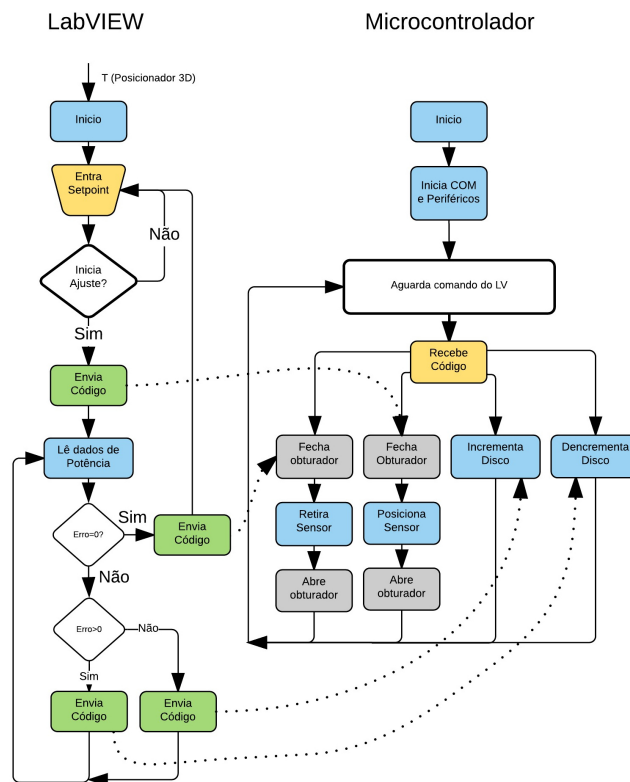
Prevê-se a necessidade de um atuador para dispor e recolher o sensor de potência no caminho ótico (motor 2, na Figura 4 ) e de um atuador para variar a posição angular do disco atenuador (motor 1, na Figura 4). Será realizada uma série de medidas do nível de potência do laser para estimar suas características em termos do seu valor médio e do desvio padrão de um conjunto de medidas ao longo do tempo. Além disso, serão aplicadas variações do nível de potência na forma de “degrau” para levantamento do tempo de estabilização da leitura do sensor perante variações do nível de potência. Esta etapa é necessária para a implementação do controle de malha fechada. Como define Ogata: “Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (...), realimenta o controlador, de modo que minimize o erro e acerte a saída do sistema ao valor desejado”. (OGATA et al., 2003)

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma vez estabelecida a problemática e os objetivos deste trabalho, procedeu-se para a pesquisa de referências teóricas. Tal pesquisa representa a determinação das metodologias que serão aplicadas. Representa também, uma vez pesquisadas alternativas, a escolha e justificativa de equipamentos, *software* e protocolo de comunicação.

### 2.1 UNIDADE DE PROCESSAMENTO

A unidade de processamento é composta pelo conjunto microprocessador e programa LV. Através destes, foi desenvolvido e executado o protocolo de comunicação do sistema de ajuste de potência com o sistema de posicionamento tridimensional. Também por meio deste conjunto, foi desenvolvido o protocolo de comunicação com o medidor de potência (FieldMaxII-TOP), pois este já possui biblioteca compatível com o programa LV. Através deste conjunto, concebeu-se o código de programação para comando dos motores de passo. Cabe ainda, à unidade de processamento, supervisionar as etapas do processo de ajuste de potência, conforme pode ser visto na Figura 5.



**Figura 5: Fluxograma do Sistema Automatizado**

**Fonte: Autoria Própria**

### 2.1.1 Programa LabView

Ao programa implementado no LV cabe a decisão lógica das etapas do processo, quando houver. Este programa recebe informações do nível de potência desejada, oriundas do programa do posicionador tridimensional, bem como recebe as informações do medidor de potência, envia comandos para o microcontrolador e supervisiona o processo de ajuste.

O programa LabView (abreviação de Laboratório de Bancada de Engenharia de Instrumentação Virtual, em inglês) é uma plataforma de projeto de sistemas e ambiente de desenvolvimento com linguagem de programação essencialmente visual da National Instruments. (MANUAL, 1998)

Tal linguagem de programação é denominada “G” e foi inicialmente desenvolvida pela Apple Macintosh em 1986. É comumente utilizada para aquisição de dados, controle de instrumentos e automação industrial por diversas plataformas, dentre elas, Microsoft Windows, Linux e Mac OS X. (MANUAL, 1998)

A lógica de programação é do tipo linguagem de programação por fluxo de dados. A

ordem de execução é determinada por um diagrama de blocos, construído pelo programador através de conexão de blocos de funções ou nós de função por meio de linhas de conexão. As linhas de conexão propagam as variáveis e qualquer nó pode executar sua função tão logo receba todas suas variáveis de entrada. Em muitos casos, múltiplos nós podem estar conectados e, portanto, receber informações simultaneamente. Isso implica na capacidade da linguagem G de execução em paralelo. (MANUAL, 1998)

Dentre os diversos benefícios do LV, são oportunos para o desenvolvimento deste trabalho os seguintes itens:

- O LV possui pacotes extensos de interface com equipamentos, instrumentos, câmeras e outros dispositivos. A interface do usuário com *hardware* se dá tanto por escrita de comandos *direct bus* (USB, GPIB, Serial), quanto por *drivers* dedicados que provêm nós de funções nativos do LV para controle do dispositivo;
- A National Instruments disponibiliza milhares de *drives* de dispositivos para *download* na Rede de Driver de Instrumento NI (IDNet);
- O programa possui um compilador interno que traduz, em linguagem reconhecível ao microcontrolador, a programação desenvolvida em G;
- A existência de diversas bibliotecas disponibilizadas em pacotes do LV para estatística, matemática, interface gráfica, etc.

Tais fatores, somados à disponibilidade do pacote LV para o FieldMaxII-TOP, justificam sua escolha para este trabalho. Através deste programa de interface intuitiva para o usuário, modificações futuras são possíveis para aprimoramento do sistema, caso necessário, em oportunidades ulteriores a este trabalho.

### 2.1.2 Microcontrolador

Ao microcontrolador caberá comandar os motores para o ajuste de potência, através de sinais recebidos do programa escolhido. Deve ser de baixo custo para facilidade de reposição, suportar até 5V que é a tensão dos sinais de comando e possuir razoável velocidade de processamento. Neste trabalho, foi utilizado microcontrolador com frequência de 20MHz, possibilitando alcançar tempo de resposta de 200 ns, que é suficiente para atender os requisitos do projeto e viabilizá-lo.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Uma vez pesquisados equipamentos e programas para este trabalho, deu-se prosseguimento ao desenvolvimento do código e do circuito, conforme os procedimentos metodológicos.

#### 3.1 TESTES PRELIMINARES

Em uma fase inicial, procurou-se determinar características reais do motor 2 e do disco atenuador da Figura 4. Com relação ao motor, obteve-se torque de 1,4kg que equivale a 3 vezes o peso do conjunto a ser manobrado.

##### 3.1.1 Teste do Disco Atenuador

Este teste foi realizado para calcular a atenuação de potência por grau do disco ( $mW/^\circ$ ). Com os resultados, espera-se determinar a variação da transmissão de potência em função da variação angular do disco e, assim, decidir via programação o incremento de ângulo que será enviado do PIC para o motor de passo.

A escala do medidor FieldMaxII-TOP foi ajustada para 300mW. O feixe de laser emitido, para a realização deste teste, medido sem disco atenuador, foi de 100mW.

O teste consiste na medição de valores de potência de saída do feixe transmitida pelo disco atenuador, para determinadas posições (em graus) do disco. Inicialmente, o disco foi posicionado de maneira que o feixe de laser incidisse sobre a parte mais opaca. Esta posição foi marcada como inicial e, portanto, registrada como a posição  $0^\circ$  (zero graus).

Em seguida, a posição do disco foi incrementada de  $90^\circ$  em  $90^\circ$  e aferido o valor de potência. Para cada posição do disco foi tomada, uma amostragem de 3 medidas de valores de potência ( $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ ). Calculou-se, então, a média da potência e o desvio padrão da amostra para cada posição do disco conforme indicado na Tabela 1.

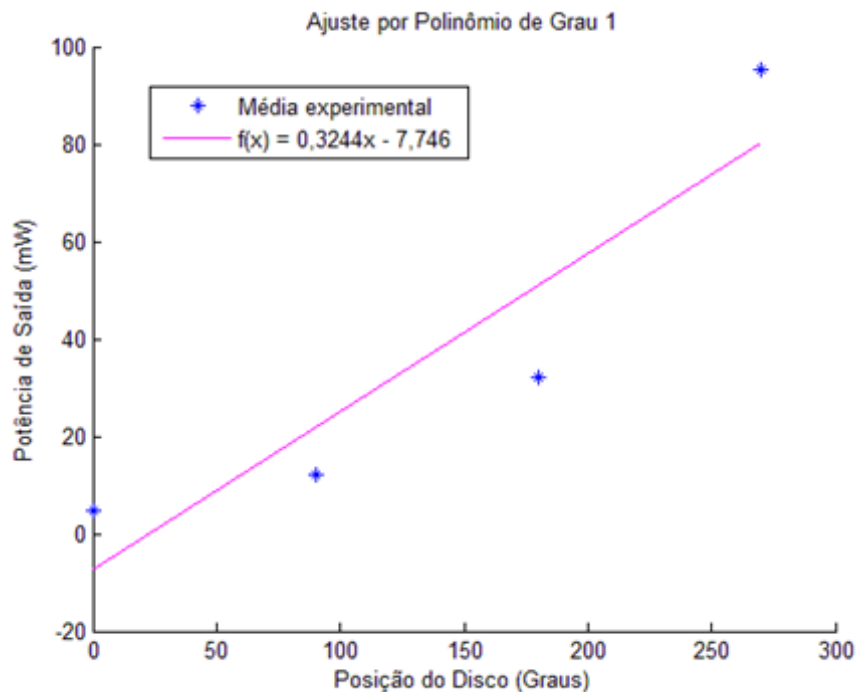


**Tabela 1: Valores de potência medidos conforme posição angular do Disco**

$\theta$	p1(mW)	p2(mW)	p3(mW)	Média(mW)	Desvio Padrão
0°	4,4	4,9	4,7	4,7	0,3
90°	11,8	12,3	12,4	12,2	0,3
180°	31,8	32,1	32,0	32,0	0,2
270°	94,4	95,8	96,0	95,4	0,9

Cabe ressaltar que foram tomadas poucas medições, pois este procedimento causa desgaste no disco. Um desgaste previamente ocorrido devido ao uso normal do disco pode justificar a variação na leitura de potência para a posição de 270°. Como pode ser visto na Tabela 1, o desvio padrão da amostra nessa posição é cerca de três vezes maior que o das outras posições.

Com os valores mostrados na Tabela 1, foi possível traçar um polinômio de primeiro grau que interpola, em função da posição do disco, os valores de potência média calculados. O gráfico é apresentado na Figura 6. Também pode-se perceber este desgaste observando a Figura 6, onde a média da potência na posição 270° é 60% maior do que o valor  $f(270) = 79,842$  dado pelo ajuste.



**Figura 6: Curva de atenuação do disco. Em azul, valores observados em laboratório e, em magenta, o polinômio interpolador.**

**Fonte: Autoria Própria**

Os pontos do gráfico representam os valores de potência média calculados. Em magenta, um polinômio interpolador de primeiro grau cujos coeficientes foram calculados pela função *Polyfit* do Matlab.

### 3.1.1.1 Conclusão do Teste do Disco

Assim, a atenuação de potência por grau do disco pode ser calculada pelo coeficiente angular do polinômio interpolador  $f(x) = 0,3244x - 7,746$ . Comparando as equações e observando que o coeficiente angular 'a' = 0,3244, então a atenuação do disco é definida:  $a = \Delta P / \Delta \theta = 0,3244 \text{ mW}^\circ$ . O coeficiente de atenuação de potência por grau do disco pode ser expresso em porcentagem. Obedecendo a função do polinômio interpolador previamente encontrado, para uma variação de  $270^\circ$  do disco, tem-se uma variação de 79,84mW de potência ótica. Sendo essa variação de potência ótica 100%, a porcentagem de atenuação de potência por grau do disco é dada pela razão entre o coeficiente angular 'a' vezes 100 e o valor de variação de potência. Assim,  $\Delta P\%(\text{porgrau}) = \frac{0,3244 \cdot 100}{79,84} = 0,37\%(\text{porgrau})$ .

## 3.2 CÓDIGO

Os códigos desenvolvidos para este trabalho estão disponíveis em (TCC, 2016).

Os códigos em linguagem G, do LV, e C, gravado no PIC, foram desenvolvidos com base no fluxograma da Figura 5. Interface com o usuário, comunicação com o programa do posicionador e tomada de decisão constam no código desenvolvido no LV.

Portanto, o microcontrolador fica escravo do programa em LV, estando nele implementado o código de comando efetivo das partes que executam os ajustes necessários para a operacionalização do sistema. Para a comunicação entre o LV e o PIC foi estabelecido protocolo via serial.

### 3.2.1 Código em LabView

Para desenvolvimento do programa em LV, foi utilizado uma estrutura de programação baseada em fluxograma, a máquina de estados e estrutura. A estrutura define estados em que o programa pode se encontrar e também ações necessárias para que o programa mude de estado. Conforme o fluxograma em que a máquina de estados for baseada, o programa é executado somente na ordem de estados desejada.

Cada estado tem então sua sequência de ações e decisões definidas. Os estados concebidos para o programa foram:

- *Eventos*: Estado *default* e inicial do programa. É o estado de aguardo de comando do posicionador 3D. Também, nesse estado, é especificado o tratamento de erro da comunicação com o PIC, através da mudança de valor da variável ‘Erro comando PIC’;
- *Recebe Potência*: Estado que recebe o conjunto de informações que especificará se ocorrerá apenas manobra do obturador ou ajuste da potência e, também, limite de potência suportado pelo experimento e valor de potência desejado;
- *Limites P3D*: Neste Estado é identificado se apenas será requisitado do sistema manobra do obturador e, caso contrário, se o valor de potência desejado está dentro dos limites do laser e do experimento;
- *Apenas obturador*: Ocorre apenas abertura ou fechamento do obturador e comunicação do evento para o sistema de posicionamento tridimensional;
- *Ajuste de potência*: Estado em que de fato ocorre o processo automatizado de ajuste de potência com os passos já definidos (Página 13).
- *Stop*: Caso o botão ‘quit’ seja pressionado (botão no painel frontal do LV para interrupção do programa), interrompe o programa, fecha o obturador e envia mensagem de erro ao posicionador tridimensional.

### 3.2.1.1 Comunicação entre o LV e o Sistema de Posicionamento Tridimensional

A comunicação entre o programa em LV e o programa de posicionamento se dá utilizando o protocolo TCP/IP, onde um dos integrantes cria uma conexão como servidor para o outro integrante. Cabe ao servidor estabelecer os parâmetros: endereço, local e tempo de aguardo da conexão. Neste caso, o sistema de ajuste de potência foi configurado como servidor.

Como os dois sistemas compartilharão o mesmo computador para seus programas, sua conexão será totalmente virtual. Para tanto, o endereço foi configurado como ‘localhost’, o local como *Port 20551* e tempo de aguardo de conexão como -1 (o servidor aguarda indeterminadamente o recebimento de dados). Os dados recebidos pelo sistema de ajuste foram estipulados como uma *string* de 10 caracteres de tal modo que:

- Caso o usuário queira apenas operar o obturador, ele enviará nos 2 primeiros caracteres as letras ‘AS’ ou ‘FS’.

- Nos 4 caracteres seguintes, o usuário informa qual o limite de potência que seu experimento permite (em décimos de mW). Caso o valor informado para a potência desejada seja superior a esse limite, o programa LV não executará o ajuste e retornará mensagem de erro.
- Os últimos 4 caracteres são utilizados para informar o valor desejado de potência, em décimos de mW.

Em seguida, o programa LV retorna a *string* 'hold' para o sistema de posicionamento tridimensional, de modo que apenas um dos sistemas fique operacional. Após o recebimento de dados pela comunicação TCP/IP tem início o ajuste de potência.

#### 3.2.1.2 Comunicação entre LV e PIC

A comunicação se dá através do protocolo da UART, utilizando portanto a porta serial. Ambos os programas (LV e *firmware* programado no PIC) devem ter seus parâmetros configurados com os mesmos valores (*Baud rate, data bits, parity, stop bits*).

O LV envia *strings* de comando para o PIC que estão de acordo com a sequência de eventos do sistema automatizado. Caso haja erro na comunicação, o LV encerra seu processo e o PIC fecha o obturador.

#### 3.2.1.3 Ajuste Grosso - Medição e cálculo do número de passos do motor do disco

Antes de calcular o número de passos que o motor deverá mover, é feita uma série de medidas do nível de potência, sendo calculados o valor médio e desvio padrão desta série. Caso o desvio da série seja superior ao critério estabelecido, uma nova série de medidas é feita.

Do contrário, é feita a diferença entre a média da série de medidas e o valor de potência desejado. Essa diferença é transformada em valor percentual em relação à potência máxima do laser. É então dividida pelo coeficiente de variação percentual de potência por número de passos, para a primeira iteração do programa. Esse valor de passos equivale à primeira variação angular do disco atenuador em busca do valor de potência desejado.

O LV envia o número de passos necessários para o motor do disco executar essa primeira variação angular. É feita nova série de medições e caso a diferença entre a nova média e o valor desejado seja inferior a 5mW, o programa avança para o ajuste fino, que será explanado na seção seguinte. Se a diferença for superior, é feita nova série de medidas (com o mesmo

critério de validação) e calculado novamente a diferença percentual entre o valor desejado e a média. Entretanto, a partir da segunda iteração o coeficiente para conversão da diferença em número de passos é calculado através da diferença entre a média atual e a média da iteração anterior, dividida pela quantidade de passos dada na iteração anterior.

A atualização do coeficiente busca determinar a melhor reta (através do seu coeficiente angular) que aproxima a curva real do disco entre os dois pontos medido no intervalo entre a iteração(n) e a iteração(n-1). Tal mudança no coeficiente de conversão se deve à característica não linear do disco atenuador, que ocorre devido ao desgaste que este sofre ao longo dos experimentos realizados.

#### 3.2.1.4 Ajuste Fino - Medição e critério de parada

Alcançada uma diferença inferior a 5mW entre o valor medido e o desejado, o programa passa a fazer medida única e decide pelo incremento ou decremento de um único passo. Esse processo se repete até que a diferença do valor medido para o desejado pelo usuário seja inferior a 0,4mW.

O valor de 0,4mW foi obtido experimentalmente (e será apresentado no Capítulo 4). Valores menores foram testados, mas se confundiam com o ruído do sistema e o critério de parada não era atendido. Portanto, o valor de 0,4mW representa a precisão máxima alcançada pelo sistema automatizado.

#### 3.2.1.5 Comunicação de potência ajustada

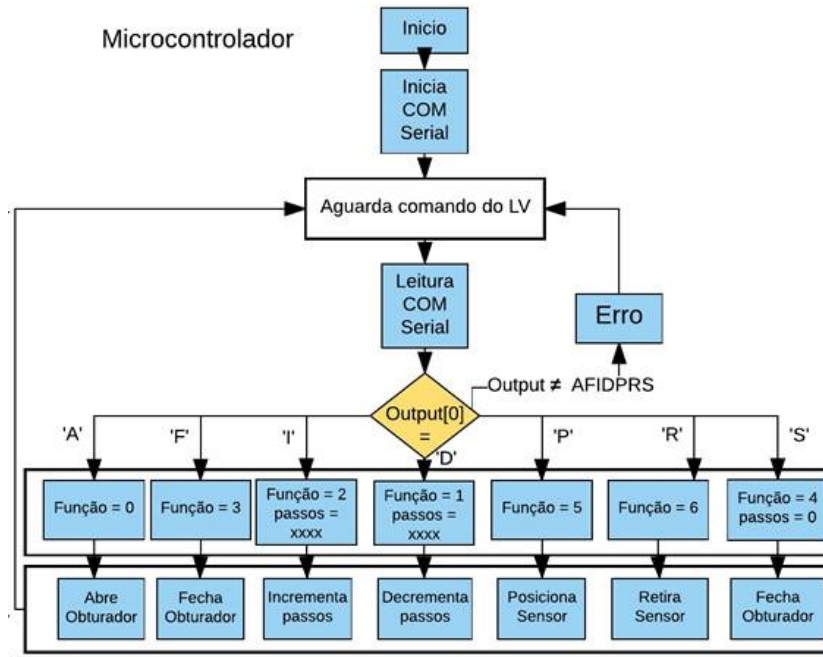
Uma vez atingida a potência desejada pelo usuário, o LV medirá novamente a potência e armazenará o valor em variável do tipo *string* que será enviada via comunicação TCP/IP para o sistema de posicionamento tridimensional.

Este envio só ocorrerá uma vez que o programa execute os passos para retirada do sensor e entrega do laser com a potência ajustada e obturador fechado (conforme passos mostrados na Página 13).

Enviada a mensagem de 'Potência Ajustada:X,XXXXW' (onde X,XXXX representa os caracteres numéricos da potência ajustada, em W), o LV retorna ao Estado Eventos, no aguardo do recebimento de novo valor de potência.

### 3.2.2 Código FOTON PIC

O código em C foi desenvolvido tendo em vista que o PIC não tomará nenhuma decisão, apenas estabelecerá comunicação com o PC, receberá *strings* pré-definidas e enviará os sinais de comando para os motores (do disco atenuador e do sensor de potência). A Figura 7 mostra o fluxograma do código do PIC.



**Figura 7: Fluxograma do *firmware* do PIC.**

**Fonte: Autoria Própria**

Ao ser ligado o circuito do PIC, o programa inicializa a comunicação serial com o programa LV. Aguarda recebimento de mensagem do LV para então indentificar a função requerida. Nenhuma ação é tomada sem o recebimento de mensagem e cada mensagem só aciona uma única ação. A mensagem recebida do LV via comunicação serial será sempre na forma 'X0000OK'. O primeiro caracter define uma das 7 funções que podem ser executadas pelo PIC:

- A: Ativa a função ABRE SHUTTER;
- F: Ativa a função FECHA SHUTTER;
- P: Ativa a função POSICIONA SENSOR;
- R: Ativa a função RETIRA SENSOR;

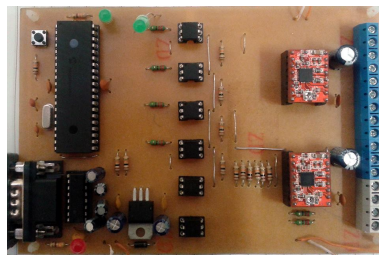
- I: Ativa a função INCREMENTA PASSOS;
- D: Ativa a função DECREMENTA PASSOS;
- S: Ativa a função STOP.

Caso o PIC identifique o primeiro caracter como 'I' ou 'D', procederá então para a conversão dos 4 caracteres seguintes para valor inteiro. Cabe ressaltar que o PIC não recebe nova função enquanto não finaliza a função comandada anteriormente. Uma vez identificada a função, executará a função com os periféricos pertinentes (motores, fins-de-curso, LEDs, Obturador).

### 3.3 CIRCUITO DO PIC

Foi confeccionada uma placa de circuito impresso (PCI) para o circuito do PIC. Esta placa possui as funções de *reset* com *push button*, regulação de tensão, comunicação serial, LEDs de sinalização, opto acopladores para isolamento elétrico, espaço para os Shields de controle e alimentação dos motores, bem como saídas para as bobinas e circuito dos fins de curso.

A Figura 8 mostra a PCI do circuito do PIC já montada.



**Figura 8: Circuito Inicial do PIC com *Shield* dos Motores.**

**Fonte: Autoria Própria**

#### 3.3.1 Fonte de alimentação do Microcontrolador

O circuito que fornece a tensão  $V_{cc}$  para o microcontrolador foi constituído por um regulador de tensão LM7805 (1A) ao qual são conectados, em paralelo, tanto na sua entrada como na saída, dois capacitores, um eletrolítico para manutenção do nível de tensão e outro cerâmico para supressão de interferências. Um LED foi adicionado para que seja possível

verificar se a tensão está chegando ao ponto Vcc. Todo o conjunto é alimentado por uma fonte de tensão contínua de +12V através do diodo D1 que não permite a circulação de corrente da entrada do regulador para a fonte.

### 3.3.2 Microcontrolador

- Entrada VDD: Na entrada da alimentação do microcontrolador, nos pinos 11 e 32, foram instalados dois capacitores cerâmicos de 100nF/50V ligados ao GND a fim de suprimir possíveis interferências.
- GND: Aos pinos 12 e 31 foi conectado o neutro do circuito da alimentação GND.
- Cristal X1: O cristal utilizado para o clock do microcontrolador é de 8MHz. Ele é conectado nos pinos 13 e 14, aos quais foram conectados, em cada um, um capacitor cerâmico 15pF/50V que é conectado ao GND para filtragem dos harmônicos do cristal;
- Conversor RS-232: Foi implementado um circuito conversor RS-232 pelo qual é feita a comunicação, via serial, do LV com o microcontrolador. O conversor é composto basicamente por um circuito integrado MAX232 que faz a transformação dos sinais da porta serial (TXD e RXD) conectados aos pinos 13 e 14 e os adequa à utilização para o PIC aos pinos 11 e 12. Este CI utiliza 4 capacitores eletrolíticos de 1uF/50V que auxiliam na geração dos sinais de tensão necessários para a comunicação. O circuito do conversor é alimentado pela fonte Vcc e possui um capacitor cerâmico de 100nF/50v na entrada a fim de suprimir interferências

### 3.3.3 Alimentação do Motores

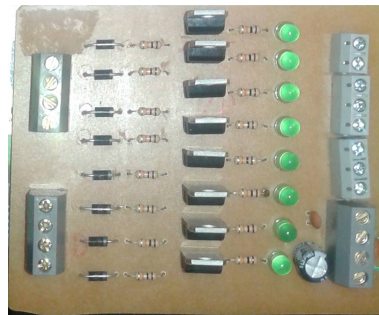
Ao realizar um teste de acionamento das bobinas dos motores, com 5V, verificou-se que os motores drenam uma corrente de 1,78A. O regulador de tensão da alimentação do PIC não suporta esse nível de corrente. Optou-se, assim, por realizar uma alimentação separada para os motores, que é ligada em comum e diretamente com um circuito lógico de potência (*driver*), para que este faça a comutação entre as bobinas daqueles. Foi acoplado na entrada da alimentação dos motores dois capacitores: um eletrolítico de 100uF/50V, a fim de amenizar os efeitos do abaixamento da tensão ao acionar um passo do motor, e um capacitor cerâmico de 100nF/50v afim de suprimir interferências durante o seu funcionamento.



### 3.3.4 Driver lógico de potência

Inicialmente, pretendia-se utilizar os Shields para alimentar e comutar as bobinas dos motores. No entanto, os Shields foram incompatíveis com o circuito do PIC e foi necessária a construção de um circuito lógico de potência à parte. O circuito *driver* projetado para acionar as bobinas dos motores tem capacidade para 3A e é alimentado por uma fonte de 5V. Ele é formado basicamente por 8 (oito) *Transistors* TIP122 que recebem sinal lógico do PIC e permitem a alimentação individual de cada bobina dos motores. O *layout* da PCI projetado para impressão do circuito deste *driver* consta no Apêndice A.

A Figura 9 mostra o circuito lógico de potência já montado.



**Figura 9: Circuito de Alimentação e Comando dos Motores.**

**Fonte: Autoria Própria**

## 3.4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS EXPERIMENTAIS

No Laboratório de Fotônica, foi realizado levantamento de valores de potência do laser para testar comunicação do programa LV com o medidor de potência MAXTOPII e conformar os limites de atraso para aquisição, limites aceitáveis de variação da potência e indicador da validade da aquisição de valores medidos (no caso, foi escolhido o desvio padrão). Foi necessário que um teste de comunicação entre o medidor de potência e o programa LV fosse executado para que os códigos fornecidos pelo fabricante do medidor fossem adequadamente integrados ao programa desenvolvido em LV.

Já a aquisição de dados se faz necessária para determinar a natureza das características da planta sobre o qual sistema irá atuar (resposta transitória, tolerância de variação de valores, distinção entre ruído e erro, etc).

### 3.4.1 Aquisição de Dados

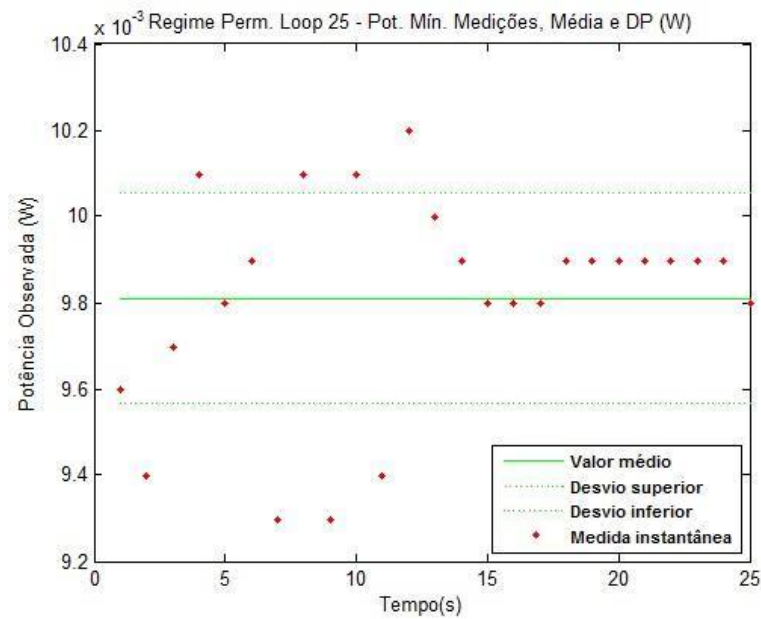
Inicialmente, foi realizada a conexão do medidor de potência com o programa LV. A potência atual máxima é de aproximadamente 130mW. Foi feita medida de desvio padrão, uma vez já estabilizados o laser e o sensor de potência.

Foram utilizadas séries de medidas de 5, 10, 15, 20 e 25 amostras para calcular média e desvio padrão à potência de aproximadamente 10% (potência mínima), 50% (potência intermediária) e 100%(potência máxima). Para determinar o número de passos que serão enviados ao motor, alterando assim o valor de potência, o programa LV converte a diferença entre o valor de potência desejado e a média dos valores medidos de potência atual, em número de passos, multiplicando esta diferença pelo coeficiente de conversão (nº de passos/%potência). Para validar uma série de medidas, foi utilizado o desvio padrão. Os resultados das médias e desvio padrão são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Desvios Padrão em Função do Nível de Potência e do Número de Amostras e suas Médias (0,1 x mW)**

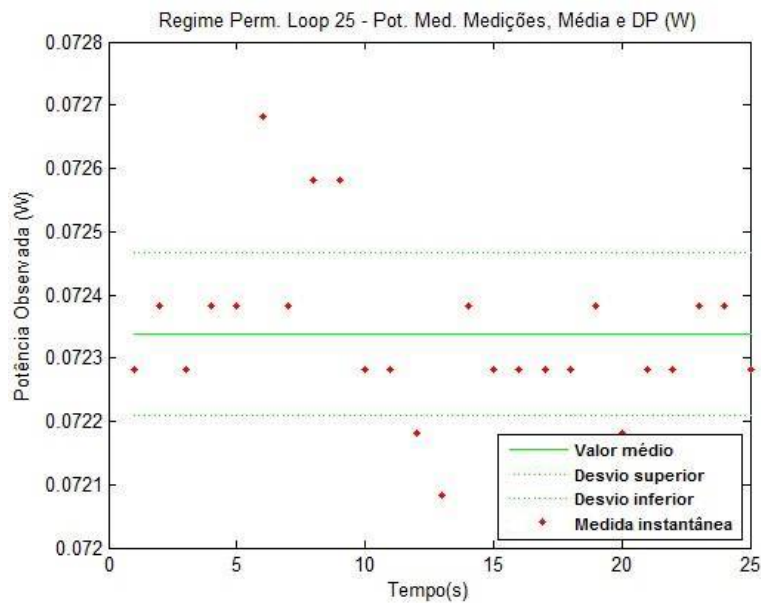
<b>Potência / Nº de Amostras</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>Média STD/Pot</b>
<b>131,08mW (Máxima)</b>	0,4471	1,9884	4,1680	2,4143	2,3103	2,2656
<b>73,08mW (Intermediária)</b>	1,2244	1,3372	1,6413	1,7002	1,2933	1,4393
<b>9,277mW (Mínima)</b>	2,1674	2,0971	2,1641	1,9462	2,4373	2,1624
<b>Média STD/t</b>	1,2796	1,8076	2,6578	2,0202	2,0136	

Através dos valores obtidos nesta tabela de média e desvio padrão foram estipulados gráficos de distribuição da série de 25 amostras, para os 3 níveis de potência. Os resultados são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12. Observou-se que o desvio padrão se mantém estável indicando, portanto, estabilidade da potência do laser e validade do desvio como aferidor de uma série de medidas.



**Figura 10: Resposta permanente à potência mínima.**

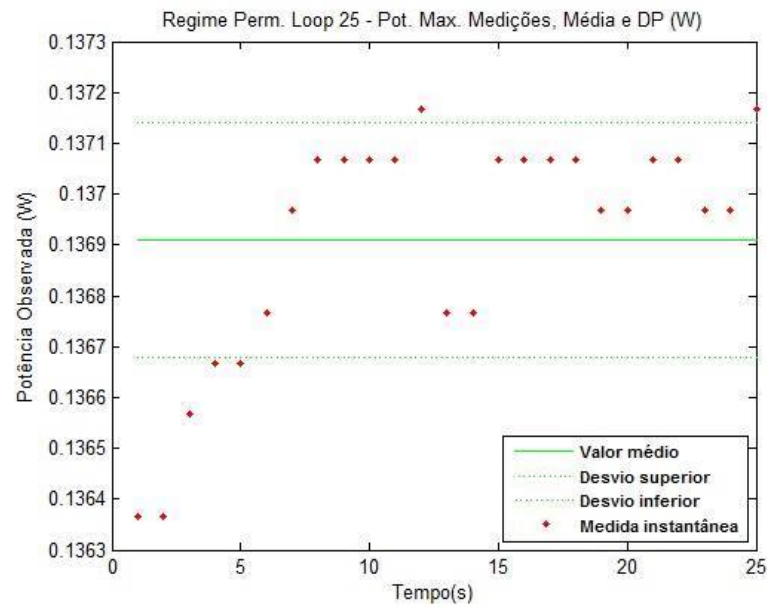
Fonte: Autoria Própria



**Figura 11: Resposta permanente à potência intermediária.**

Fonte: Autoria Própria

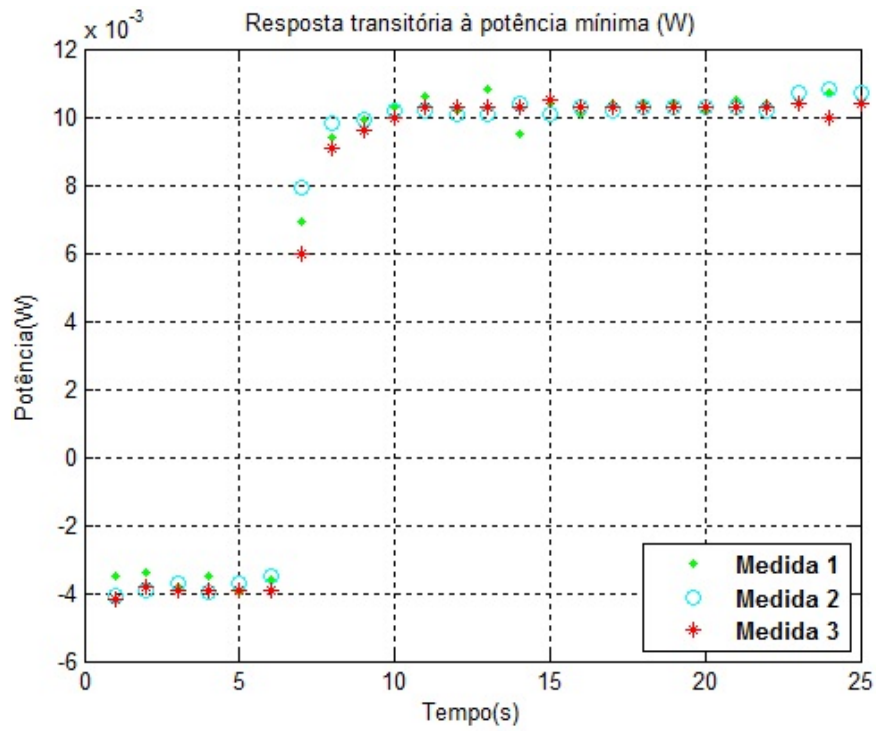
Com os dados apresentados, determinou-se inicialmente que um número adequado de amostras para atender o critério de desvio e formar a média é de 20 medidas. Tomadas as medidas, foi interrompido o laser para que o sensor termo-óptico resfriasse naturalmente, a fim de adquirir sua resposta transitória ao ser aplicada uma variação na forma de degrau no



**Figura 12: Resposta permanente à potência máxima.**

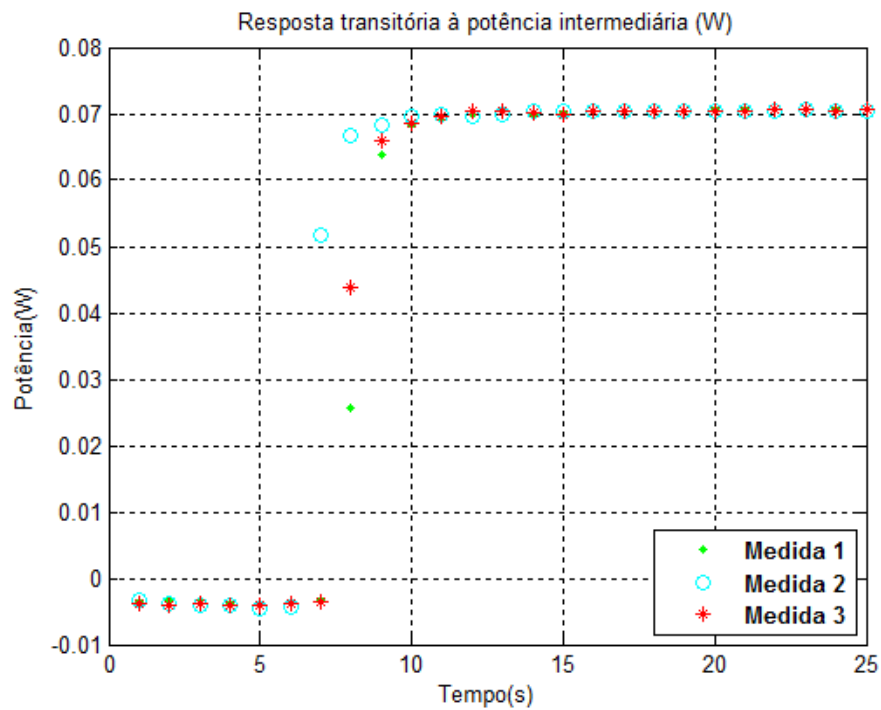
**Fonte: Autoria Própria**

nível de potência e determinar o atraso para início das medidas, de modo que todas sejam válidas. Este teste também foi realizado utilizando 25 amostras, a 3 níveis de potência. Os resultados são apresentados nas Figuras 13, 14 e 15. Com estes resultados foi possível estipular inicialmente um atraso de 10 segundos para início da aquisição de valores do sensor, quando este está resfriado. *À posteriori*, a partir dos resultados práticos, foi possível diminuir esse tempo de espera para iniciar a aquisição para 3 segundos.



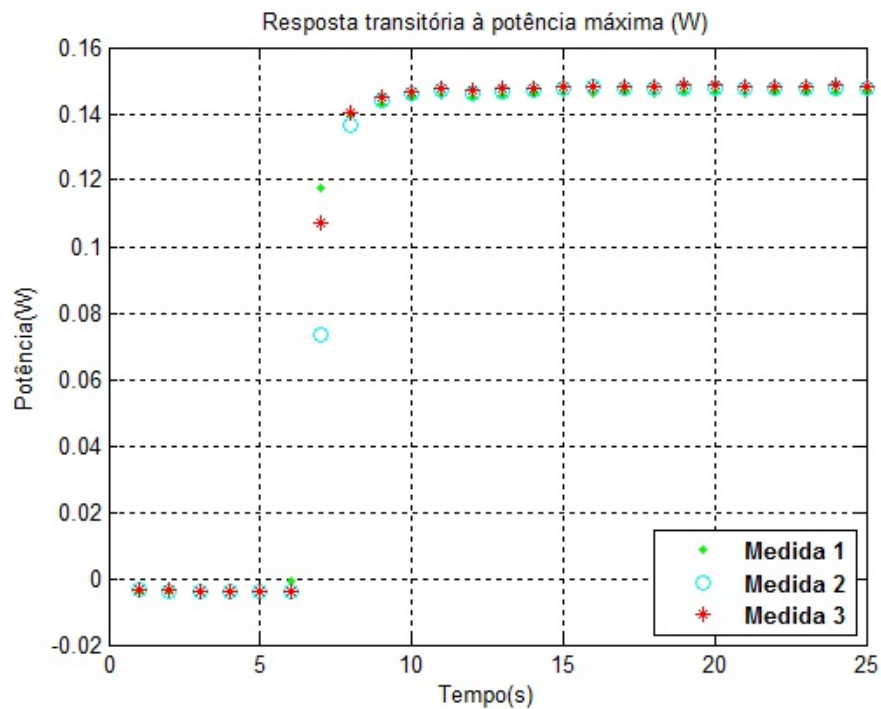
**Figura 13: Resposta Transitória a potência mínima.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 14: Resposta Transitória a potência intermediária.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 15: Resposta Transitória a potência máxima.**

**Fonte: Autoria Própria**

### 3.5 CONEXÃO DO LV COM PROGRAMA DO POSICIONADOR TRIDIMENSIONAL

Como o sistema de ajuste de potência tem seu início determinado por requisição do posicionador tridimensional, um teste de conexão e reconhecimento de protocolo entre os sistemas foi desenvolvido. O teste teve por objetivo sintonizar o protocolo de mensagem e definir os parâmetros para estabelecimento da comunicação. Também estabeleceu redundâncias que impossibilitem a atuação de um sistema enquanto o outro está atuando, avisem o sistema de posicionamento que houve erro no envio ou na leitura da mensagem e avisem o sistema que houve erro no ajuste de potência.

O teste inicial foi desenvolvido através de cabo de rede entre dois PCs, para determinação de conexão TCP/IP entre os sistemas. Houve sucesso na conexão entre os dois PCs e o passo seguinte foi o mesmo teste, mas dessa vez utilizando um programa desenvolvido em LV instalado no mesmo PC que o programa de ajuste, simulando o envio da mensagem de potência desejada pelo posicionador tridimensional. Este teste teve por fim simular o caso real, em que ambos os sistemas serão instalados numa mesma máquina. Finalmente, foi testado o comando do sistema de ajuste de potência pelo programa do posicionador tridimensional, ambos instalados no mesmo PC. A comunicação ocorreu como esperado.

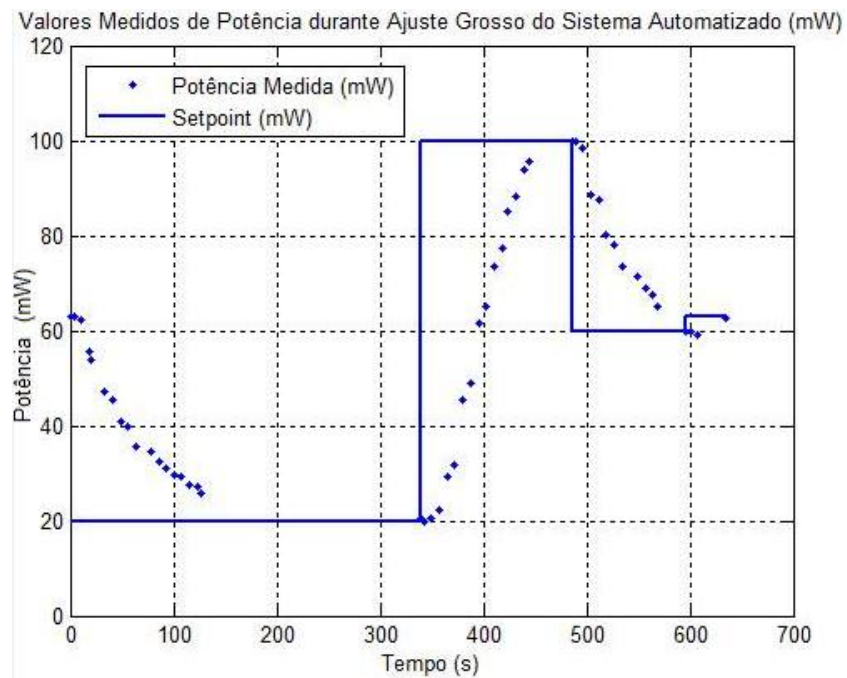
## 4 RESULTADOS

Com o sistema desenvolvido, deu-se prosseguimento a sua implementação na bancada do Laboratório de Foton. Durante a implementação, de modo a ajustar o projeto concebido a particularidades surgidas, algumas alterações foram feitas. As alterações, juntamente com os resultados operativos do sistema entregue ao laboratório, são apresentados a seguir.

### 4.1 DURAÇÃO DO AJUSTE

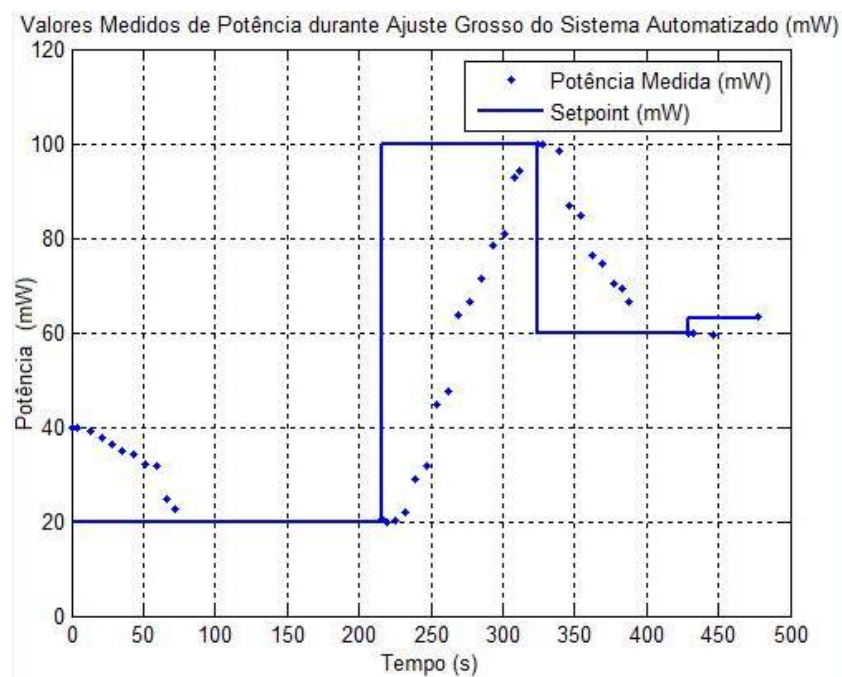
Para este teste, foram programados via posicionador tridimensional 4 valores de potência desejados (20, 100, 60 e 63mW). Com essa sequência de valores, objetivou-se o correto funcionamento do sistema tanto para valores próximos aos extremos da escala (20 e 100mW) quanto para um valor intermediário (60 mW). Observou-se, também, que o sistema se comporta de maneira satisfatória tanto para grandes variações do valor de potência requerida em sequência (de 20 para 100mW), quanto para pequenas variações (de 60mW para 63mW). O teste foi repetido 3 vezes com os mesmos valores de potência (conforme gráficos das Figuras 16, 17 e 18), para aferir seu correto funcionamento. Também foi feito um quarto experimento com novos valores de potência requeridos (35,5, 80,8, 73,3 e 121,7mW) a fim de assegurar que o sistema se comportava de modo semelhante com valores intermediários de potência.

Outra característica do sistema testada com esse quarto experimento foi o teste de limites que o programa LV executa antes de iniciar o ajuste. Para os experimentos realizados, o valor máximo de potência do laser estava configurado no programa LV em 115mW. Como o último valor de potência requerido no quarto experimento ultrapassa este valor, o sistema apenas retornou a mensagem : ‘potência excedida:121,7’. Nenhum ajuste foi realizado para este valor, como pode ser observado na Figura 19. Para todos os gráficos, foram tomadas medidas somente durante o ajuste grosso, uma vez que no ajuste fino a variação da potência por iteração é diminuta.



**Figura 16: Valores das Médias de Potência durante o Ajuste Automático - Primeiro Experimento.**

**Fonte: Autoria Própria**



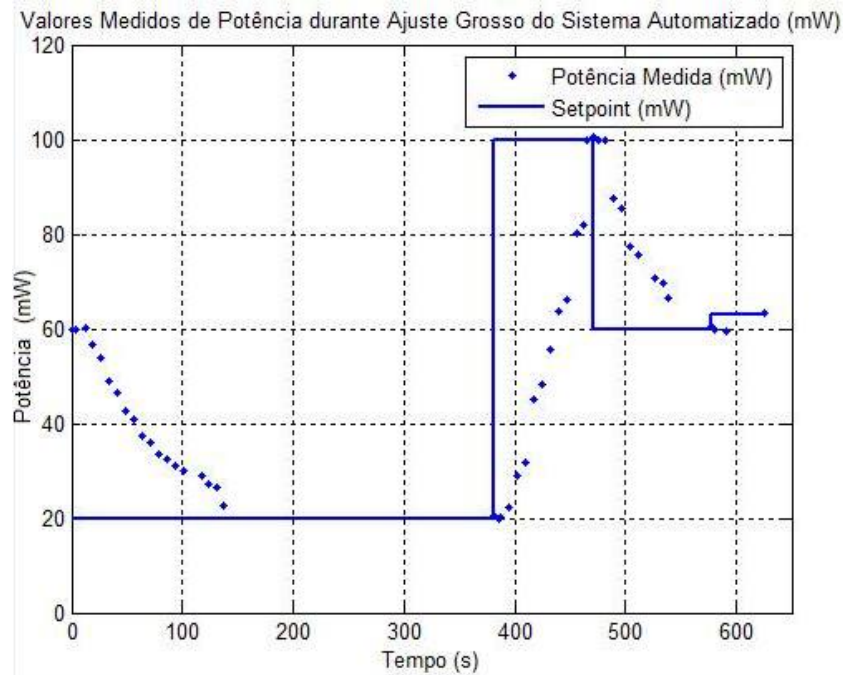
**Figura 17: Valores das Médias de Potência durante o Ajuste Automático - Segundo Experimento.**

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.1.1 Tempos para Preparação do Sistema de Ajuste de Potência

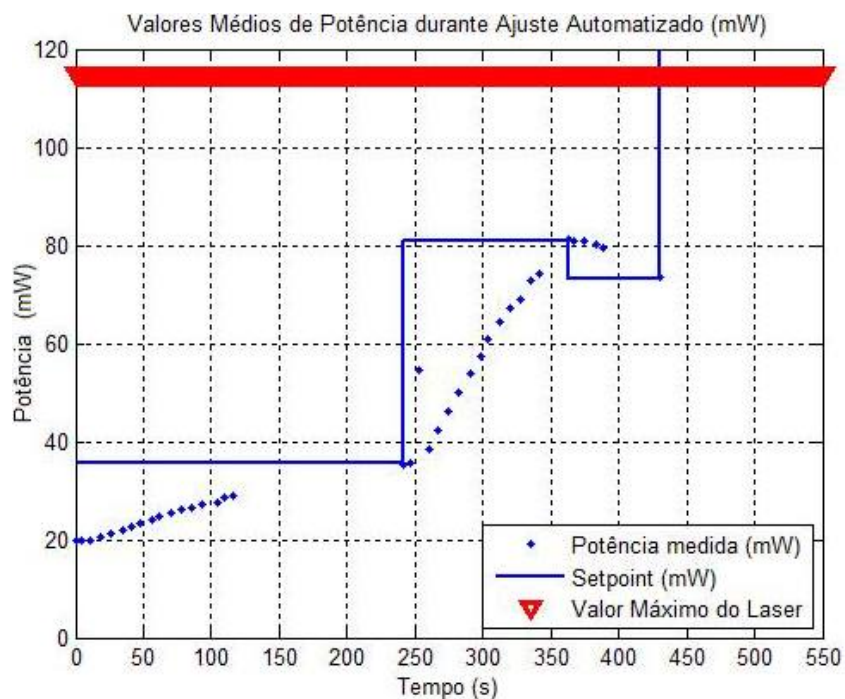
Notou-se que não há variação significativa no intervalo de tempo para preparação do sistema a fim de iniciar as medições e ajustes. Tal valor é de 4 segundos, com pouca variação.





**Figura 18: Valores das Médias de Potência durante o Ajuste Automático - Terceiro Experimento.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 19: Valores das Médias de Potência durante o Ajuste Automático - Quarto Experimento.**

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.1.2 Tempo de Aguardo do Posicionador Tridimensional

Pelo desgaste apresentado pelo disco, valores de potência requisitados em certas faixas demandam mais tempo do sistema para realização do ajuste. Para que o sistema de

posicionamento tridimensional não perca a conexão com o sistema de ajuste, observados os testes de implementação, o tempo de aguardo de resposta do sistema de posicionamento tridimensional foi reajustado para 10 minutos, em função dos ajustes de potência que demandam mais tempo.

#### 4.2 RESOLUÇÃO MÁXIMA DO AJUSTE E CRITÉRIO DE PARADA

Devido à sensibilidade do sensor de potência e ruídos atuando sobre o sistema, valores inferiores à 0,4mW para critério de parada não poderiam ser utilizados, pois os fatores mencionados são apenas parcialmente controláveis. As Tabelas 3 e 4 mostram, o resumo do ajuste de potência da sequência de valores requeridos no segundo e no quarto experimento Figuras 17 e 19.

**Tabela 3: Resumo do ajuste de potência do segundo experimento**

<i>Set point</i> (mW)	Tempo (s)	Potência entregue (mW)	Erro (mW)
20	216	20,3950	0,3950
100	147	99,9757	0,0243
60	110	59,9642	0,0358
63	39	63,1846	0,1846
Total: 636			

**Tabela 4: Resumo do ajuste de potência do quarto experimento**

<i>Set point</i> (mW)	Tempo (s)	Potência entregue (mW)	Erro (mW)
35,5	216	35,2912	0,2088
80,8	121	81,1810	0,3810
73,3	67	73,5821	0,2821
Total: 404			

Pelo erro indicado na linha do *set point* de 20mW da Tabela 3, comprova-se que um valor inferior de critério de parada não seria possível de ser atendido em todos os casos, corroborando o critério de parada encontrado nas aquisições experimentais de valores.

## 5 CONCLUSÃO

Uma vez realizados os ajustes na implementação do sistema, foi possível entregá-lo pronto para operação no laboratório. Os objetivos propostos foram todos alcançados, uma vez que:

- O valor de potência ajustado possui precisão de 0,4mW, ao menos duas vezes maior que o sistema operando manualmente com o qual alcançava-se precisão em torno de 1,0mW;
- O risco de danos por imperícia foram reduzidos, uma vez que o usuário apenas insere o valor de potência desejado. Mesmo que essa inserção seja errônea, o sistema retorna ao usuário mensagem notificando-o, sem iniciar qualquer ajuste;
- O tempo total de ajuste foi reduzido. Individualmente, cada ajuste de potência automatizado demanda tempo superior ao de um ajuste manual feito por um usuário experiente. Entretanto, os experimentos demandam vários ajustes de potência ao longo de horas. Com o sistema automatizado, é dispensável a permanência do usuário à supervisão de todo o processo, podendo, assim, executar outras tarefas.

Além do processo automatizado, em que o LV recebe comandos do posicionador tridimensional para realizar vários ajustes de potência em série, foi disponibilizada uma segunda maneira de ajustar o nível de potência em que o LV opera de forma independente do posicionador tridimensional atendendo a necessidade do usuário em realizar experimentos mais curtos, ajustando um nível de potência por vez. Esta função não era prevista neste projeto, mas conseguiu-se implementá-la de modo a dispensar a necessidade de desacoplar o sistema de ajuste de potência dos outros sistemas para experimentos que não utilizem o posicionador tridimensional.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Ao ligar o equipamento emissor do laser, antes de começar a realização dos experimentos, é necessário aferir a potência máxima que ele está emitindo. Para isso, retira-se o sensor do braço que é usado no processo automatizado e então posiciona-o estrategicamente ao lado do obturador. A potência é aferida e considera-se essa potência como sendo a máxima emitida pelo laser. Este processo de ajuste e primeira medição da potência máxima não foram vislumbrados no domínio deste projeto e, portanto, ainda é feito de forma manual. Sugere-se a criação e implementação de um algoritmo, via LV, que faça uma varredura ao girar o disco atenuador buscando a região de menor atenuação, ou seja, o valor máximo de potência do laser. Desse modo, será aprofundada a automatização do sistema.

Outra sugestão de implementação futura é o escaneamento, via LV, do disco atenuador para localização das faixas de valores com variação linear, a fim de utilizar coeficientes de variação de potência por passo distintos para cada faixa do disco conforme sua variação de potência.

Uma terceira sugestão de trabalho futuro é a diminuição do tempo de ajuste através da substituição do algoritmo de ajuste implementado em LV. Uma possibilidade, seria a adaptação da busca binária para o programa.

## REFERÊNCIAS

- CHIAMENTI I.; BONFIGLI, F. G. A. S. L. M. F. M. R. M. K. H. J. Optical characterization of femtosecond laser induced active channel waveguides in lithium fluoride crystals. **Journal of Applied Physics**, v. 115, p. p. 023108, 2014.
- COSTA L. N. ; MOURA, C. C. . O. V. . C. I. . K. H. J. . A. N. J. . B. L. M. B. **Bragg Gratings Written with Ultrafast Laser Pulses**. 2015.
- FABRIS JOSÉ LUÍS ; BOCK, W. J. . F. R. . C. F. N. . A. J. L. S. . R. L. . d. O. V. . A. I. . K. H. J. **Femtosecond laser micromachining of Fabry-Perot cavity in fibre Bragg grating**. 2015.
- FIORIN R. ; COSTA, L. N. . A. I. . C. I. . M. C. C. . K. H. J. **Manufacturing of microchannels in soda-lime glass by femtosecond laser and chemical etching**. 2013.
- MANUAL, L. U. **National Instruments**. 1998.
- OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. **Engenharia de controle moderno**. Prentice Hall, 2003.
- PIRES, J. N. **Automação Industrial**. Lidel - edições técnicas LTDA, 2002.
- ROMANO, V. F. **Robótica Industrial**. Edgard Blucher LTDA, 2002.
- TCC. 06 2016. Disponível em: <<https://github.com/Cleidemos/TCC/tree/master>>.

## 6 PROJETOS DA PLACA DO CIRCUITO DO PIC

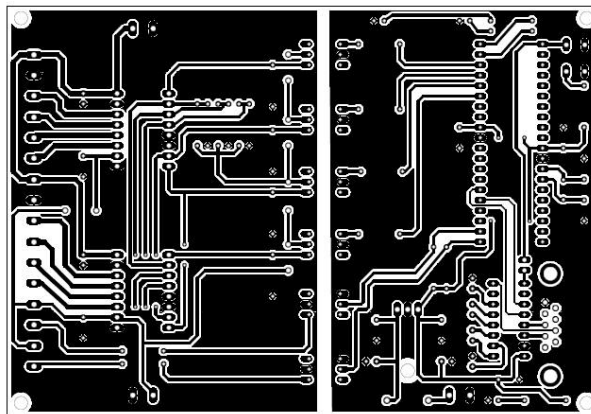


Figura 20: Projeto do Circuito Inicial do PIC com *Shield* dos Motores.

Fonte: Autoria Própria

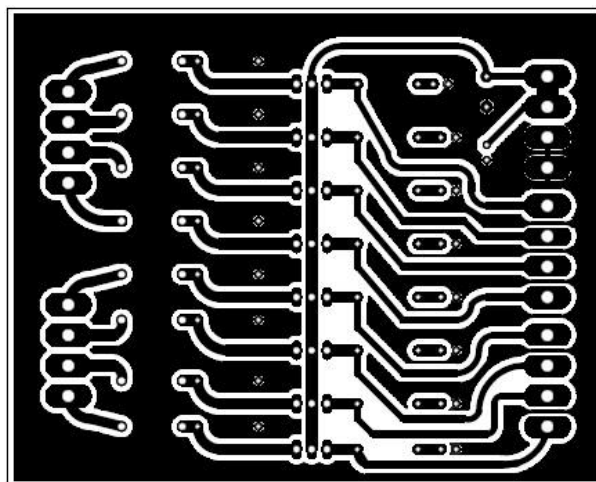
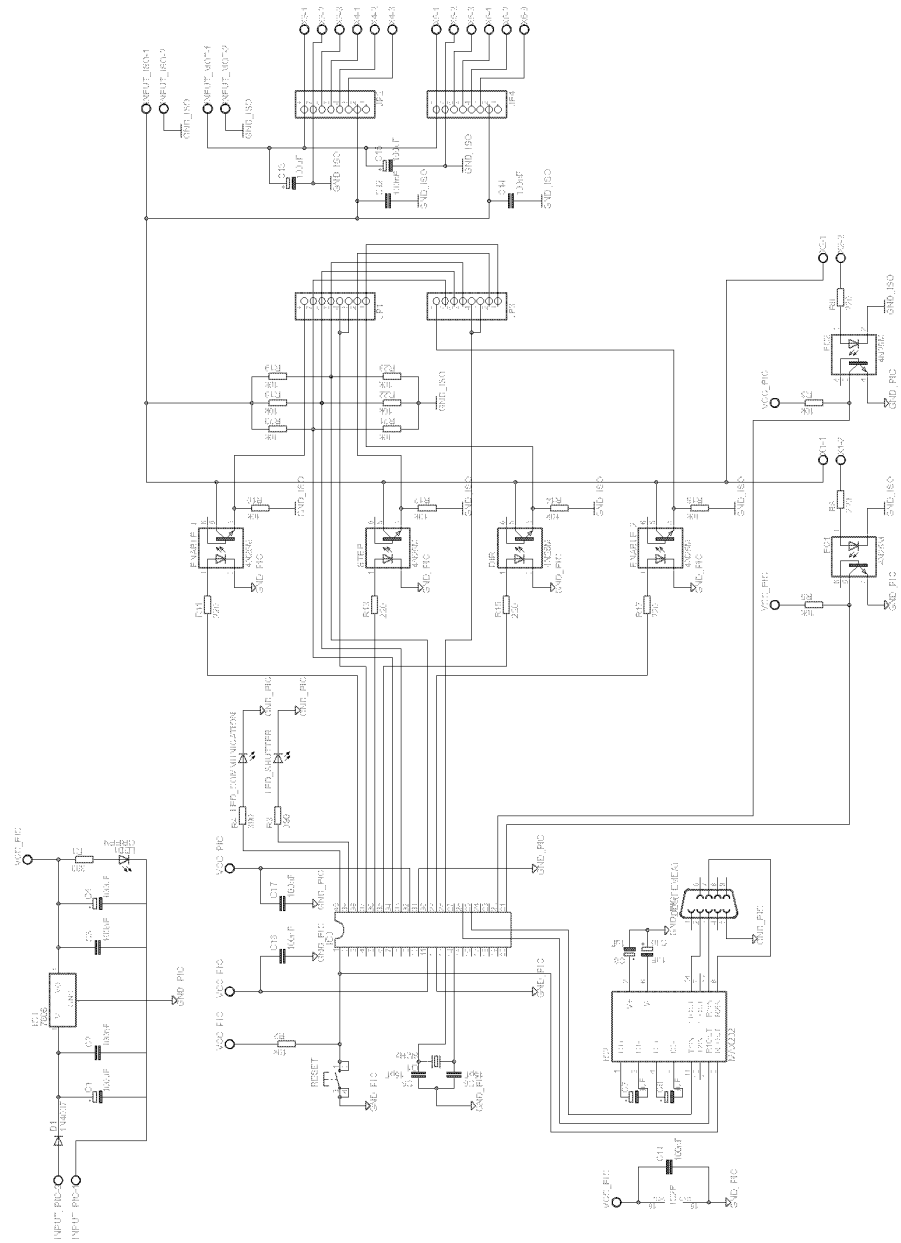


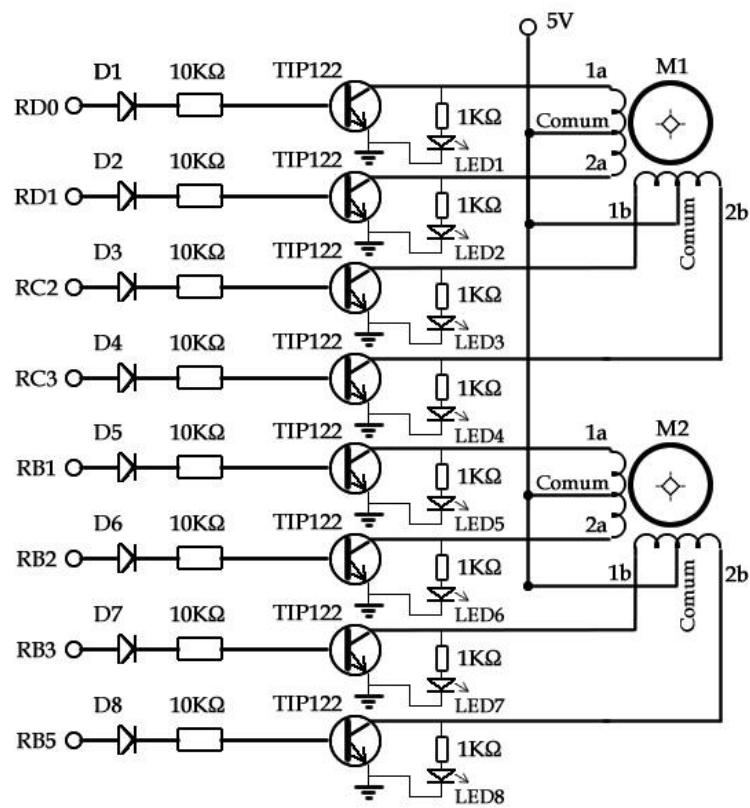
Figura 21: Projeto do circuito de Alimentação e Comando dos Motores.

Fonte: Autoria Própria



**Figura 22: Projeto do circuito do microcontrolador.**

**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 23: Projeto do circuito do drive de potência.**

**Fonte: Autoria Própria**



## **7 TABELAS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

**Tabela 5: Tabela de Resultados 1º Experimento**

<b>Setpoint (mW)</b>	<b>(s)</b>	<b><math>\Delta t</math> Medida e Ajuste (s)</b>	<b>Potência Média (mW)</b>	<b>STD)</b>
20	10,9	10,9	62,2844	0,00027
20	18,5	18,5	55,7264	0,00023
20	20,7	20,7	53,7481	0,00015
20	32,8	32,8	47,3265	0,00017
20	40,7	40,7	45,3685	0,00012
20	48,5	48,5	40,9945	0,00014
20	55,8	55,8	39,6961	0,00009
20	63	63	35,7115	0,0001
20	78	78	34,6743	0,0002
20	86	86	32,5256	0,0001
20	93	93	31,1469	0,00026
20	101	101	29,7927	0,00008
20	108	108	29,1325	0,00011
20	116	116	27,6934	0,00023
20	123	123	27,2533	0,00011
20	127	127	25,7939	0,00005
20	339	339	20,395	0
100	349,7	10,7	20,3551	0,00018
100	357	18	22,2945	0,00014
100	364,6	25,6	29,2728	0,00033
100	371,8	32,8	31,6723	0,00067
100	379,5	40,5	45,5508	0,00033
100	388	49	48,8681	0,00022
100	395,7	56,7	61,5859	0,00032
100	402	63	64,9442	0,00014
100	410	71	73,6221	0,00021
100	418	79	77,4211	0,00016
100	424	85	85,0993	0,00017
100	432	93	88,3785	0,00013
100	439	100	93,8721	0,00014
100	445	106	95,7252	0,00021
100	486	147	99,9757	0
60	496,7	10,7	98,5361	0,00069
60	504,5	18,5	88,7184	0,00025
60	511,6	25,6	87,5791	0,00006
60	518,6	32,6	80,1205	0,0001
60	526,5	40,5	77,9416	0,00005
60	534,5	48,5	73,4821	0
60	549	63	71,3826	0,00006
60	557	71	68,8832	0,00004
60	564	78	67,7035	0,00007
60	568	82	65,0641	0,00069
60	596	110	59,98541	0,00004
63	608	12	59,2855	0,0003
63	635	39	62,7845	0

**Tabela 6: Tabela de Resultados 2º Experimento**

<b>Setpoint (mW)</b>	<b>Duração (s)</b>	<b><math>\Delta t</math> Medida e Ajuste (s)</b>	<b>Potência Média (mW)</b>	<b>STD)</b>
20	13,8	13,9	39,1904	0,0003
20	21,4	21,4	38,8308	0,00004
20	28,7	28,7	36,3711	0,00039
20	35,6	35,6	34,7715	0,00019
20	43,3	43,3	34,2316	0,00012
20	51,6	51,6	31,9722	0,00007
20	59	59	31,9122	0,00022
20	66	66	24,8749	0,00036
20	72	72	22,4745	0,00016
20	216	216	20,395	0
100	225,6	9,6	20,1151	0,00024
100	232,7	16,7	22,0946	0,00015
100	239,4	23,4	29,0729	0,00029
100	247	31	31,6123	0,00004
100	254,5	38,5	44,7691	0,0003
100	262,2	46,2	47,5884	0,00006
100	269	53	63,7045	0,00042
100	277	61	66,3638	0,00007
100	285	69	71,4155	0,00031
100	293	77	78,4609	0,00011
100	301	85	81,0203	0,00026
100	308	92	92,6474	0,00007
100	312	96	94,3571	0,00021
100	324	108	99,9873	0
60	339	15	98,5961	0,00005
60	346,3	22,3	86,7389	0,00032
60	354	30	84,7893	0,00007
60	362	38	76,3014	0,00022
60	369,3	45,3	74,5218	0,00013
60	376,9	52,9	70,5028	0,00012
60	383	59	69,3431	0,00013
60	388	64	66,5638	0,00009
60	429	105	59,9642	0,00021
63	446	17	59,5255	0,0005
63	477	48	63,1846	0

**Tabela 7: Tabela de Resultados 3º Experimento**

<b>Setpoint (mW)</b>	<b>Duração (s)</b>	<b><math>\Delta t</math> Medida e Ajuste (s)</b>	<b>Potência Média (mW)</b>	<b>STD)</b>
20	12	12	60.0446	0.0002
20	19.4	19.4	56.5462	0.0001
20	26.8	26.8	53.9868	0.00017
20	34.3	34.3	48.8081	0.00009
20	41.7	41.7	46.4089	0.00011
20	48.9	48.9	42.5096	0.00021
20	56.8	56.8	40.8102	0.00007
20	63	63	37.4309	0.00013
20	71	71	36.0112	0.00007
20	79	79	33.5918	0.00007
20	86	86	32.5207	0.00023
20	94	94	31.0324	0.00008
20	101	101	29.9327	0.0001
20	117	117	28.9329	0.00008
20	124	124	27.1334	0.00016
20	131	131	26.3935	0.00009
20	137	137	22.4762	0
100	387	6	20.1909	0.00016
100	394	13	22.2945	0.00012
100	401.8	20.8	28.9929	0.00027
100	409.7	28.7	31.5925	0.00012
100	416.8	35.8	45.1894	0.00027
100	424.2	43.2	48.2885	0.00009
100	432.17	51.17	55.5021	0.00035
100	439.5	58.5	63.7644	0.00007
100	447	66	66.1039	0.00033
100	456	75	80.2804	0.00008
100	462	81	81.9801	0.00007
100	465	84	99.9351	0.00003
100	471	90	100.3955	0
60	481	10	99.8754	0.00006
60	488.5	17.5	87.3787	0.00027
60	496.3	25.3	85.5193	0.00009
60	504	33	77.4011	0.00016
60	511.5	40.5	75.7015	0.00007
60	526.8	55.8	70.7627	0.0001
60	534	63	69.6009	0.00016
60	538	67	66.6637	0.00011
60	577	106	60.3853	0
63	591	14	59.38556	0.0005
63	626	49	63.38459	0

**Tabela 8: Tabela de Resultados 4º Experimento**

<b>Setpoint (mW)</b>	<b>Duração (s)</b>	<b><math>\Delta t</math> Medida e Ajuste (s)</b>	<b>Potência Média (mW)</b>	<b>STD)</b>
35.5	10.9	10.9	19.9954	0.00011
35.5	18.2	18.2	20.6349	0.00015
35.5	25.6	25.6	21.2148	0.00007
35.5	35	35	22.0146	0.00004
35.5	41	41	22.6944	0.00003
35.5	48	48	23.4543	0.00024
35.5	56	56	23.9141	0.00007
35.5	62	62	24.8939	0.00009
35.5	70	70	25.3338	0.0001
35.5	78	78	26.0936	0.00011
35.5	85	85	26.5335	0.00005
35.5	93	93	27.2133	0.00007
35.5	104	104	27.6131	0.00007
35.5	109	109	28.4937	0.00006
35.5	116	116	28.8129	0.00004
35.5	242	242	35.2912	0
80.8	252.9	10.9	54.6115	0.00015
80.8	260.3	18.3	38.3906	0.00006
80.8	267.3	25.3	42.2097	0.00012
80.8	274.8	32.8	46.2087	0.00016
80.8	282.5	40.5	50.1645	0.00007
80.8	290.6	48.6	53.9468	0.0001
80.8	298	56	57.2061	0.0001
80.8	304	62	60.9651	0.00015
80.8	312	70	64.2243	0.00008
80.8	320	78	67.1736	0.00008
80.8	328	86	68.9032	0.00004
80.8	335	93	72.9022	0.00015
80.8	342	100	74.0419	0.00008
80.8	363	121	81.1806	0
73.3	373.9	10.9	81.0491	0.00045
73.3	383.6	20.6	80.2804	0.00003
73.3	388.9	25.9	79.3477	0.0001
73.3	430	67	73.5821	0