



**Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Faculdade de Engenharia da Computação**

## ***INTERROGADOR ÓPTICO DE BAIXO CUSTO PARA DETECÇÃO DE CURVATURA EM FIBRA ÓPTICA***

*Trabalho de Conclusão de Curso  
Orientado: Yan Sérgio de Oliveira – 201006840052  
Orientador: Prof. Dr. Marco José de Sousa*

## 1. Introdução

- Monitoramento Estrutural
- Sensores ópticos
- Medidores ópticos
- Solução proposta

## 2. O interrogador

- Princípio operacional
- Componentes externos

## 3. Circuitos

## 4. Software

## 5. Testes e resultados

## 6. Conclusões e trabalhos futuros

## 7. Referências.

# 1 – Introdução

## Monitoramento Estrutural (SHM – Structural Health Monitoring)

3

- Utilizada para prolongar a vida útil de estruturas que consistem grandes investimentos.
- Avanços constantes, otimização de métodos e equipamentos.
- Subdivisão: Sensores elétricos e Sensores ópticos.
- Sensores ópticos possuem:
  - Imunidade a interferências eletromagnéticas.
  - Independência de fontes de energia elétricas externas.
  - Longevidade.
  - Capacidade de trabalhar em imersão de outros materiais.

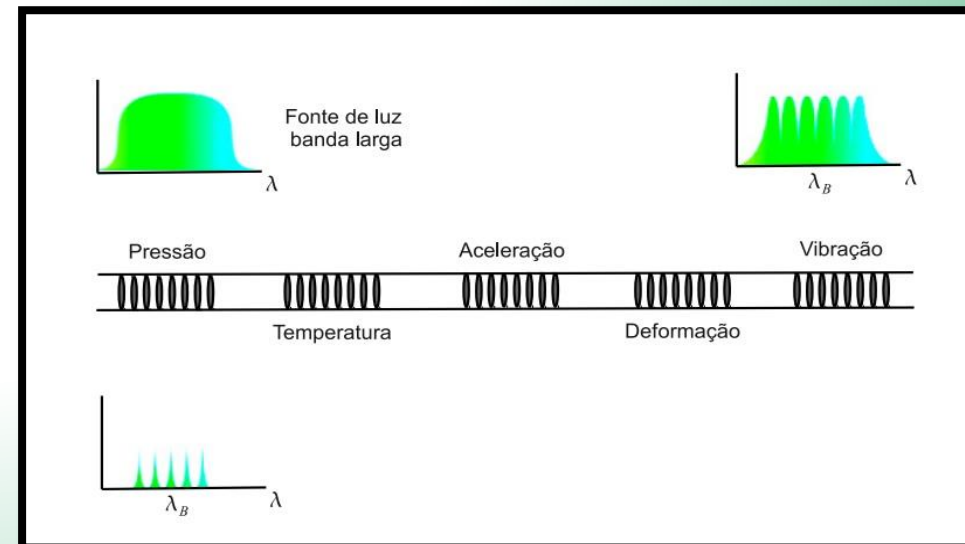
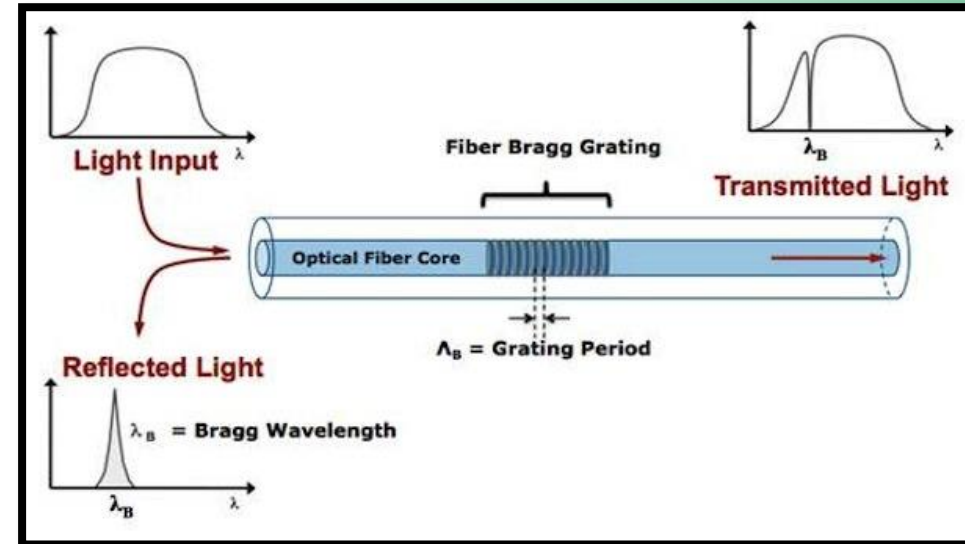


# 1 – Introdução

## Sensores Ópticos FBG (*Fiber Bragg Gratings*)

4

- Sensores FBG: baseado no princípio de grades de fibras de Bragg.
  - **GRADE DE FIBRA DE BRAGG:** Trecho cujo há uma modificação proposital e periódica no índice de refração da fibra óptica, causando uma reflexão de sinal em determinado comprimento de onda.
- Grades podem ser multiplexadas para determinar diversos parâmetros da fibra simultaneamente.
- Excelente para captura de parâmetros mecânicos.
- Sensor precisa de equipamentos específicos para ser reproduzido.



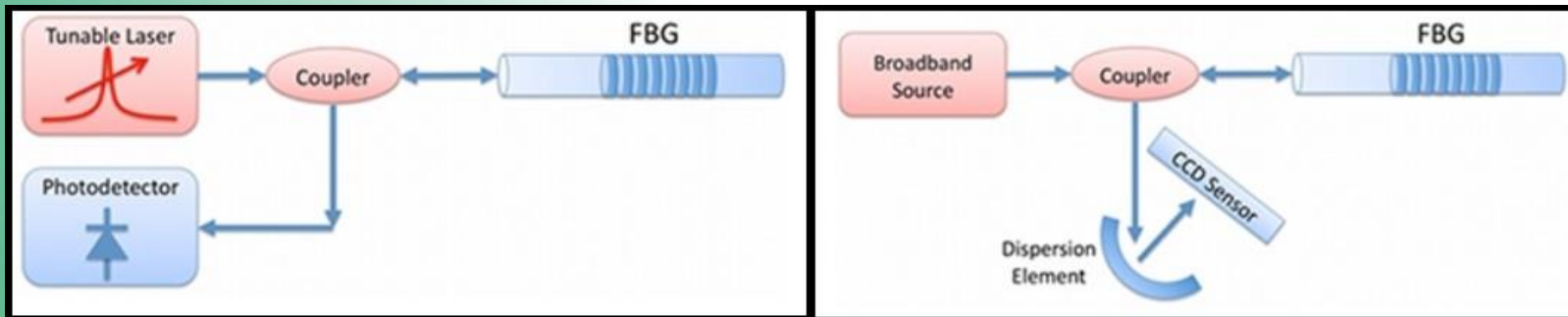


# 1 – Introdução

## Sensores Ópticos FBG (*Fiber Bragg Gratings*)

5

- Interrogação de sensores FBG:
  - Equipamentos caros, porém eficientes.
  - **Fonte de luz:** Laser (SNR alto) ou fonte de banda larga (baixa potência, SNR baixo)
  - **Fotodetector:** Fotodetector ou Sensor CCD com elemento de dispersão.

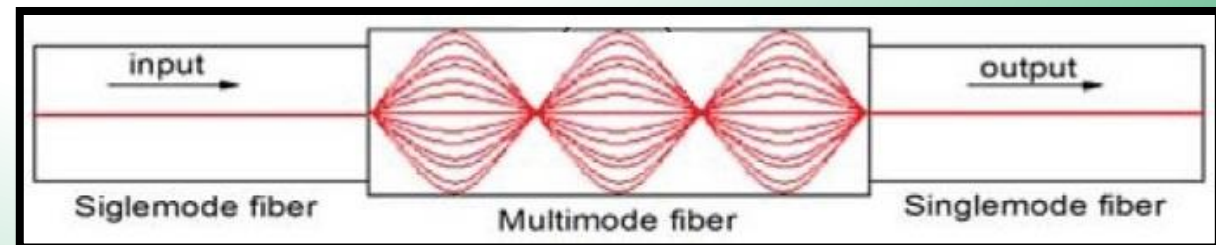
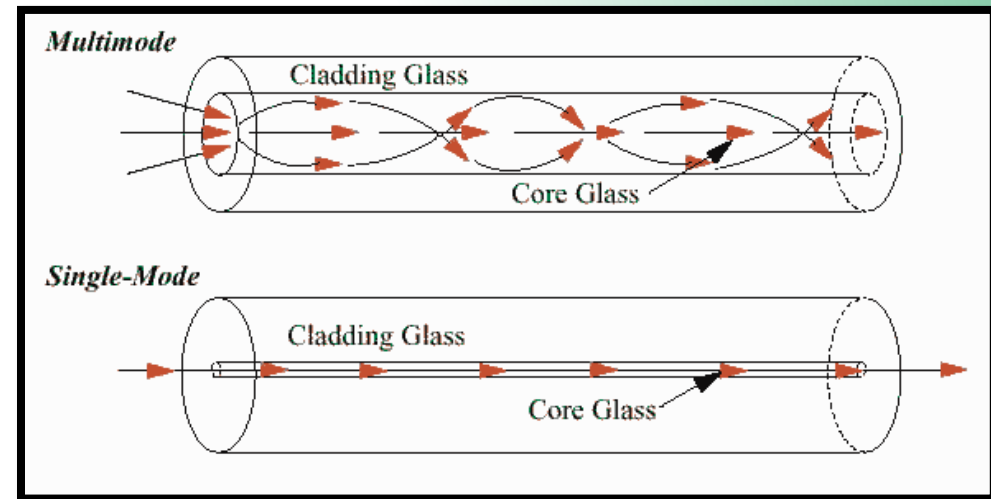


# 1 – Introdução

## Sensores SMS (*Single-Multi-Single Mode*)

6

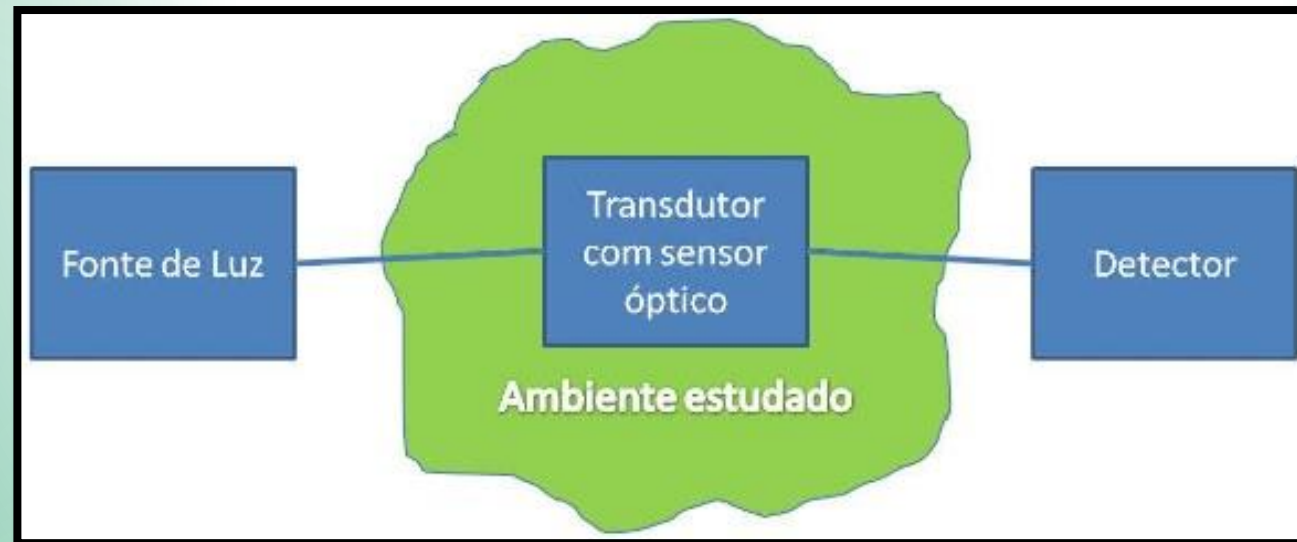
- Sensores SMS: Baseado no princípio de **diferença entre modos** de uma fibra.
  - Variação de potência entre modos da fibra.
  - Emendas SMS funcionam como sensores.
  - Fácil de ser reproduzido.
  - Fibra monomodo:
    - Mais energia conservada no núcleo estreito.
    - Materiais mais caros.
  - Fibra multimodo:
    - Menor taxa de transmissão devido ao núcleo ser mais amplo.
    - Materiais mais baratos.
  - Não pode ser multiplexado.



# 1 – Introdução

## Sensores SMS (*Single-Multi-Single Mode*)

- Interrogação SMS:
  - Simples e com componentes mais baratos, comparados aos equipamentos de interrogação dos sensores FBG's.
  - Captura de diferença de potência de sinal causada pela sensor.



# 1 – Introdução

## Medidores ópticos

- **OPM** – *Optical Power Meter*:
- Medidor de potência de sinal na fibra.
- Fonte de luz ajustada a um certo nível de potência.
- Detector com amplificador para medição
- Display para visualização
- Custa em torno de R\$ 2.745,00. Pode sofrer acréscimos nesse valor.
- Podem possuir outras funções práticas:
  - Medidor de luminosidade.
  - Fotômetro.

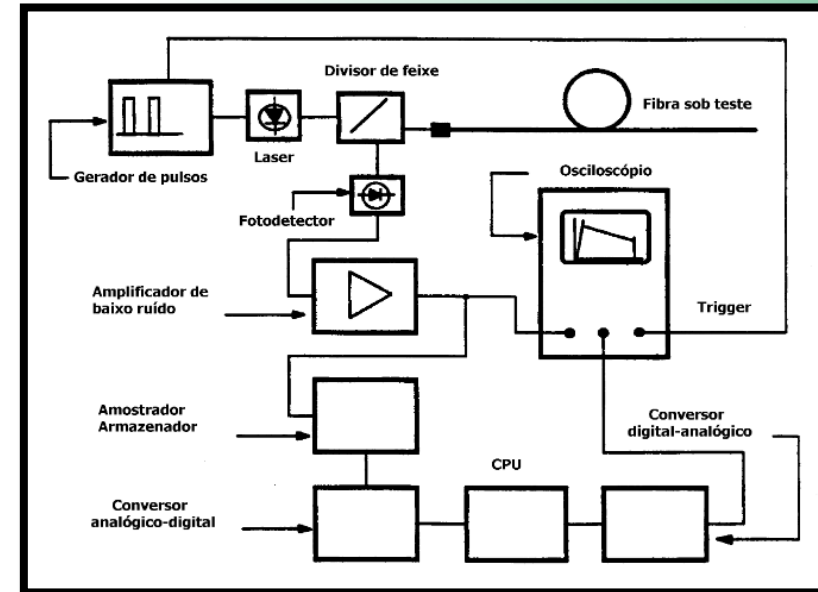




# 1 – Introdução

## Medidores ópticos

- **OTDR – Optical Time Domain Reflectometer:**
- Usa Laser Diodo para gerar pulsos de luz.
- Com um Fotodetector, Amplificador de baixo ruído e um osciloscópio captura-se e exibe as respostas encontradas.
- Medições diversas: Atenuação; Perdas na fibra; Identificação e localização de falhas de instalação.
- Método confiável e muito eficiente, porém pouco portátil.
- Valores em torno de R\$ 8.920,00. Podendo haver acréscimos, de acordo com os modelos pesquisados.

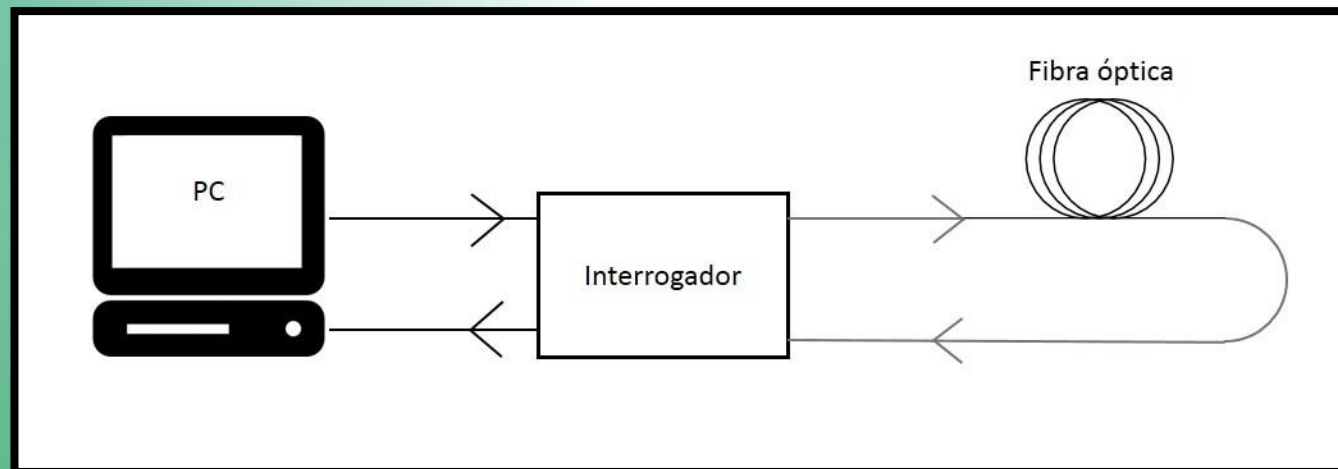


# 1 – Introdução

## Proposta

10

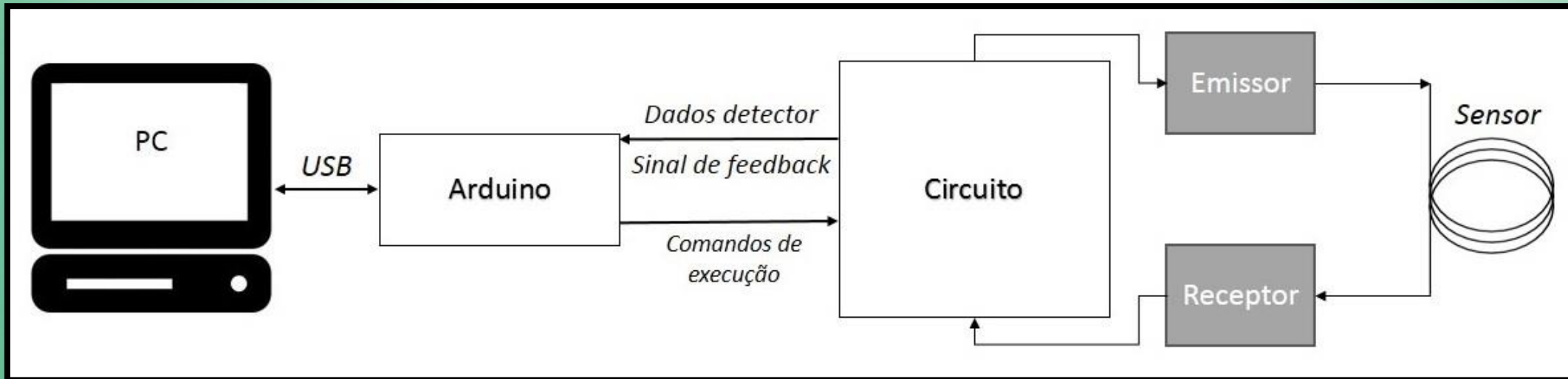
- Projetar e construir um interrogador que sirva como alternativa ao uso dos medidores comumente usados em sensores de curvatura SMS.
- Interrogador de baixo custo. Utilizado componentes disponíveis em laboratório.
- Capaz de realizar captura de dados em função do tempo.
- Grava resultados em computador através da porta USB.
- Utiliza apenas *softwares open-source*.



## 2. O interrogador

### Princípio Operacional

- Semelhante ao OPM e ao método de interrogação do sensor SMS.
- Um Laser Diodo escolhido como emissor envia o sinal de potência.
- O Fotodetector no receptor captura diferença de potência entre os terminais da fibra óptica com o sensor inserido.



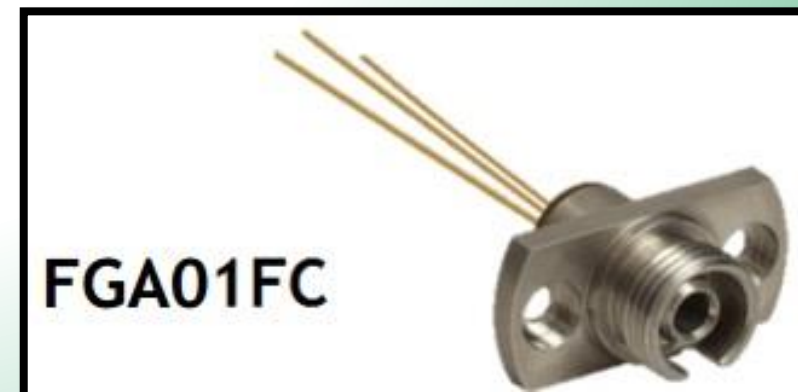
- Opera com 12V de tensão DC de alimentação e corrente gerada ao Laser de até 70 mA.
- Potência de operação do Laser entre 1.8 – 60 mW.

## 2. O interrogador

### Componentes externos

12

- O interrogador é formado pelos seguintes componentes:
- SBC ArduinoUno®
- Laser Diodos:
  - Modelos disponíveis: LP, LPM, LPS, LPSC.
  - Comprimentos de onda: 660-1550 nm
  - Potência Máxima: 60 mW
- Fotodetector:
  - Modelo: FGA01FC
  - Comprimentos de onda: 800-1770 nm
  - Potência Máxima: 18 mW

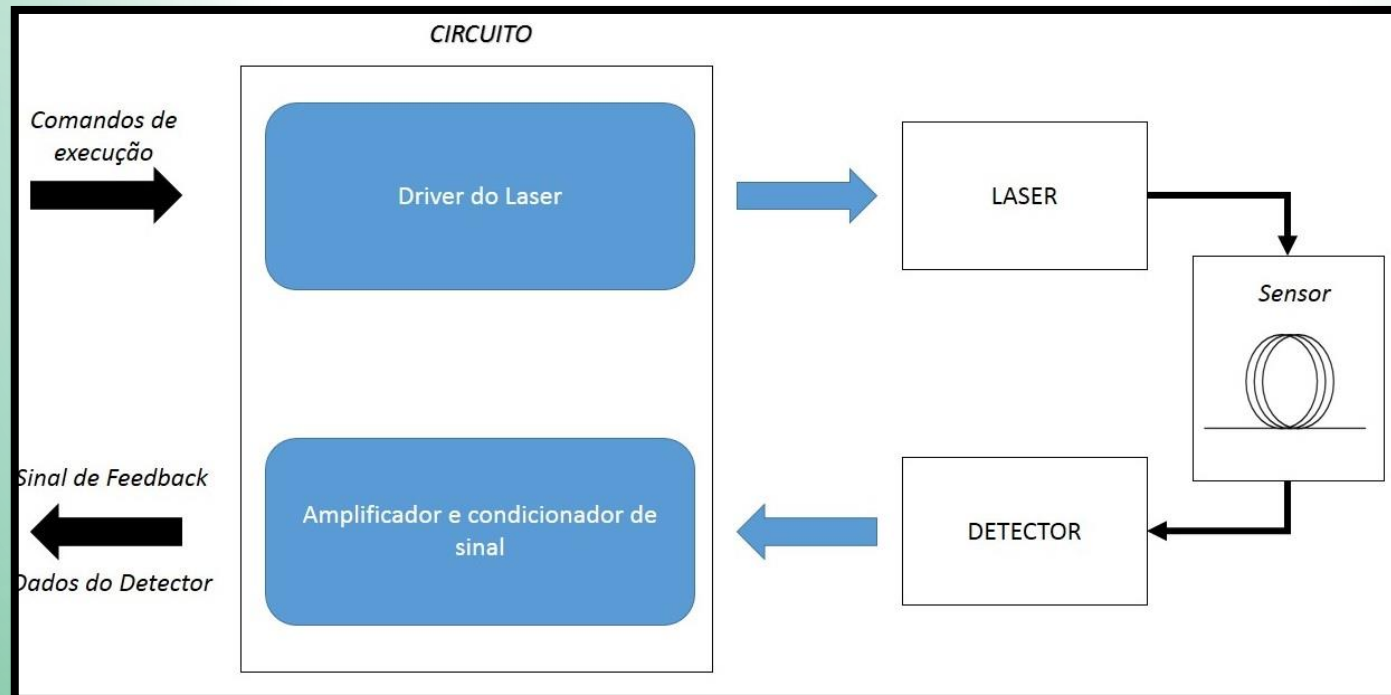




### 3. Circuitos

13

- Além dos componentes externos, o interrogador possui circuitos criados para operar conforme especificações do Laser (no Emissor) e do fotodetector (Receptor).
- Desta forma, os circuitos dividem-se, conforme sua funcionalidade, em:
  - Circuito Driver do Laser
  - Circuito Amplificador e condicionador de sinal.

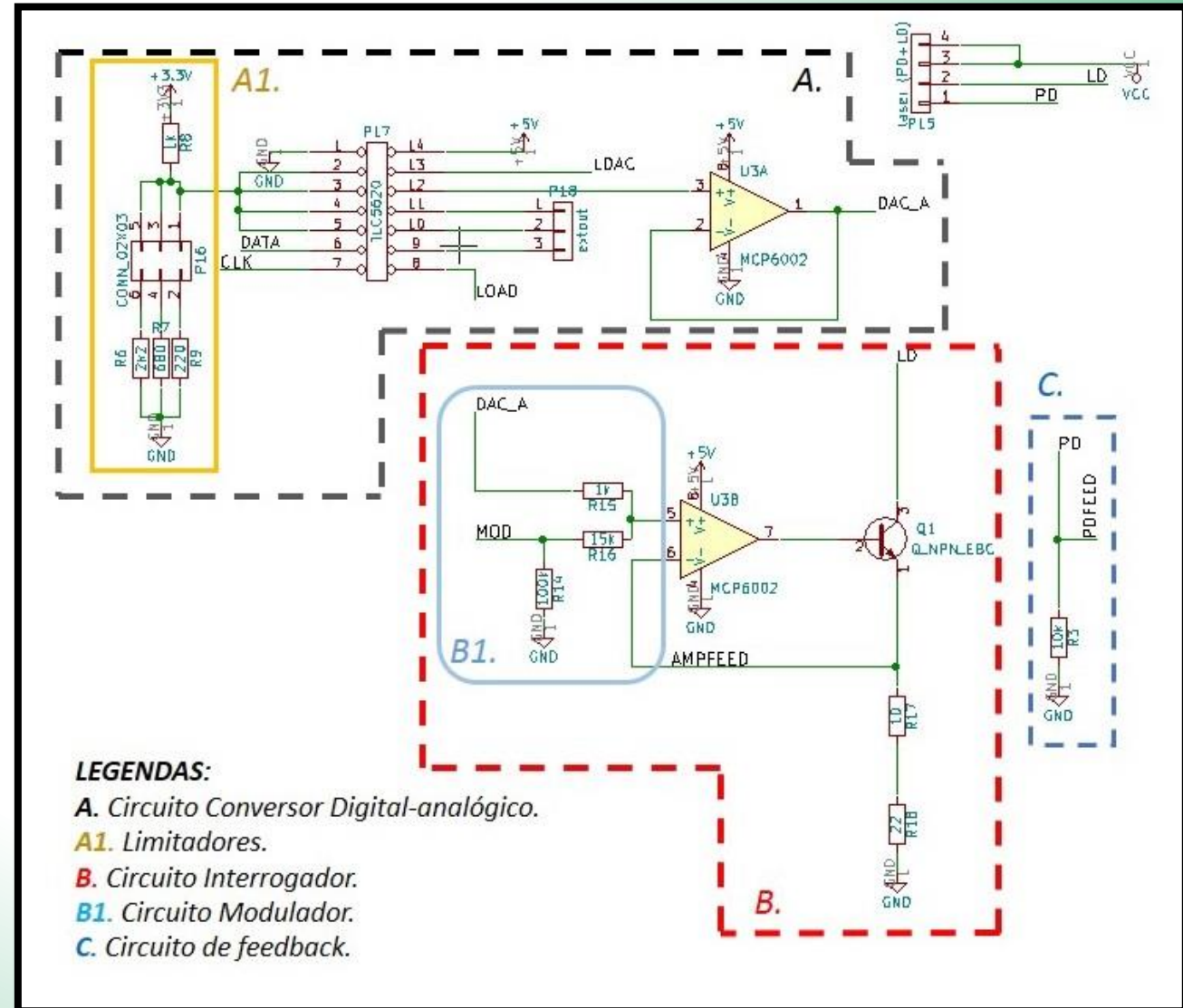


# 3. Circuitos

## Circuito Driver do Laser

14

- Função:
  - Ativar laser diodo conforme solicitado.
- Composto por:
  - Conversor Digital-analógico.
  - Circuito Interrogador.
  - Circuito Modulador.
  - Circuito de feedback.
- Componentes:
  - TLC5620 (8-bits DAC)
  - MCP6002 (rail-to-rail AMPOP)
  - 2N2222 (NPN fonte de corrente)
  - Resistores.

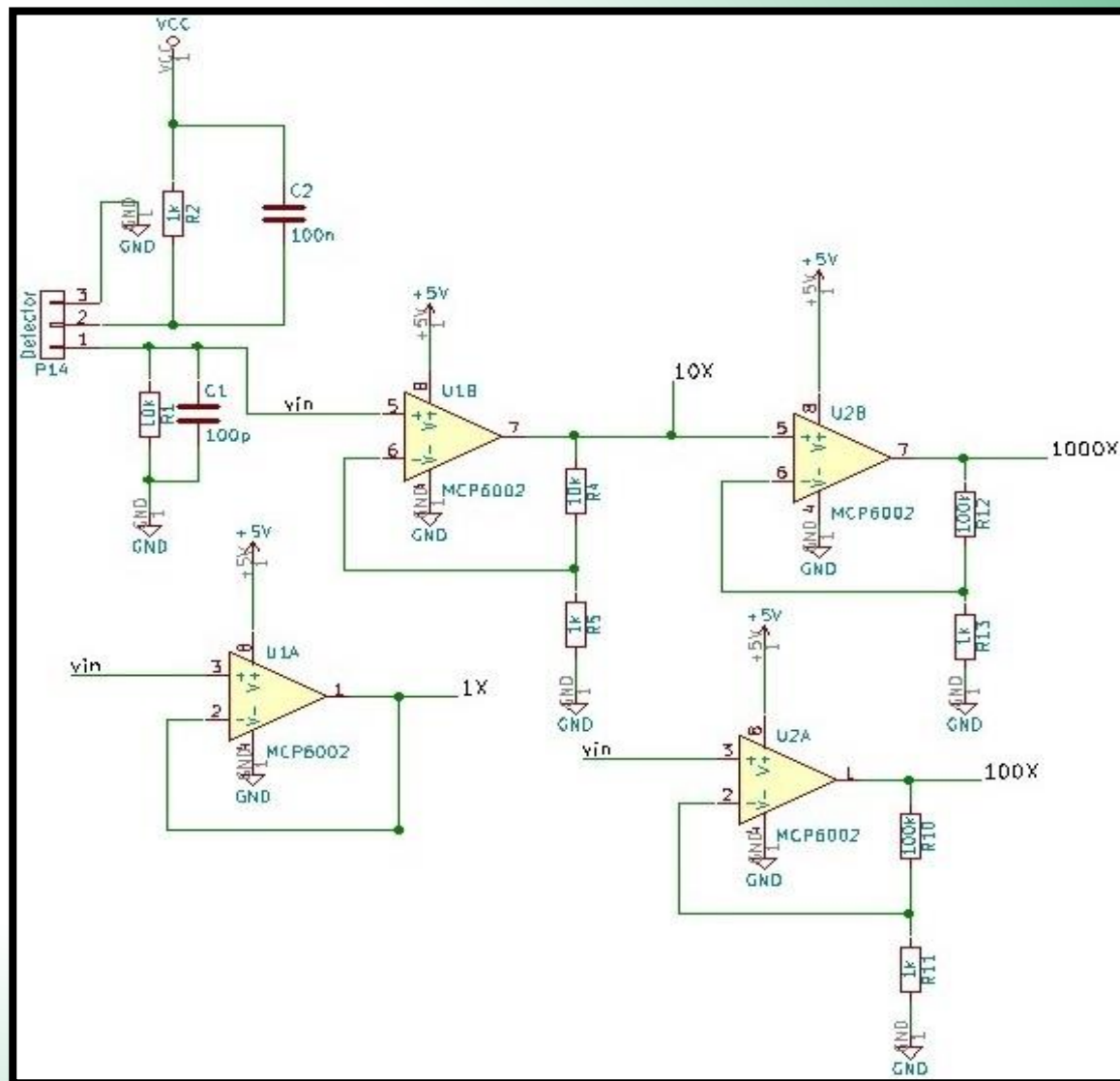


### 3. Circuitos

## Circuito Amplificador e Condicionador de Sinal.

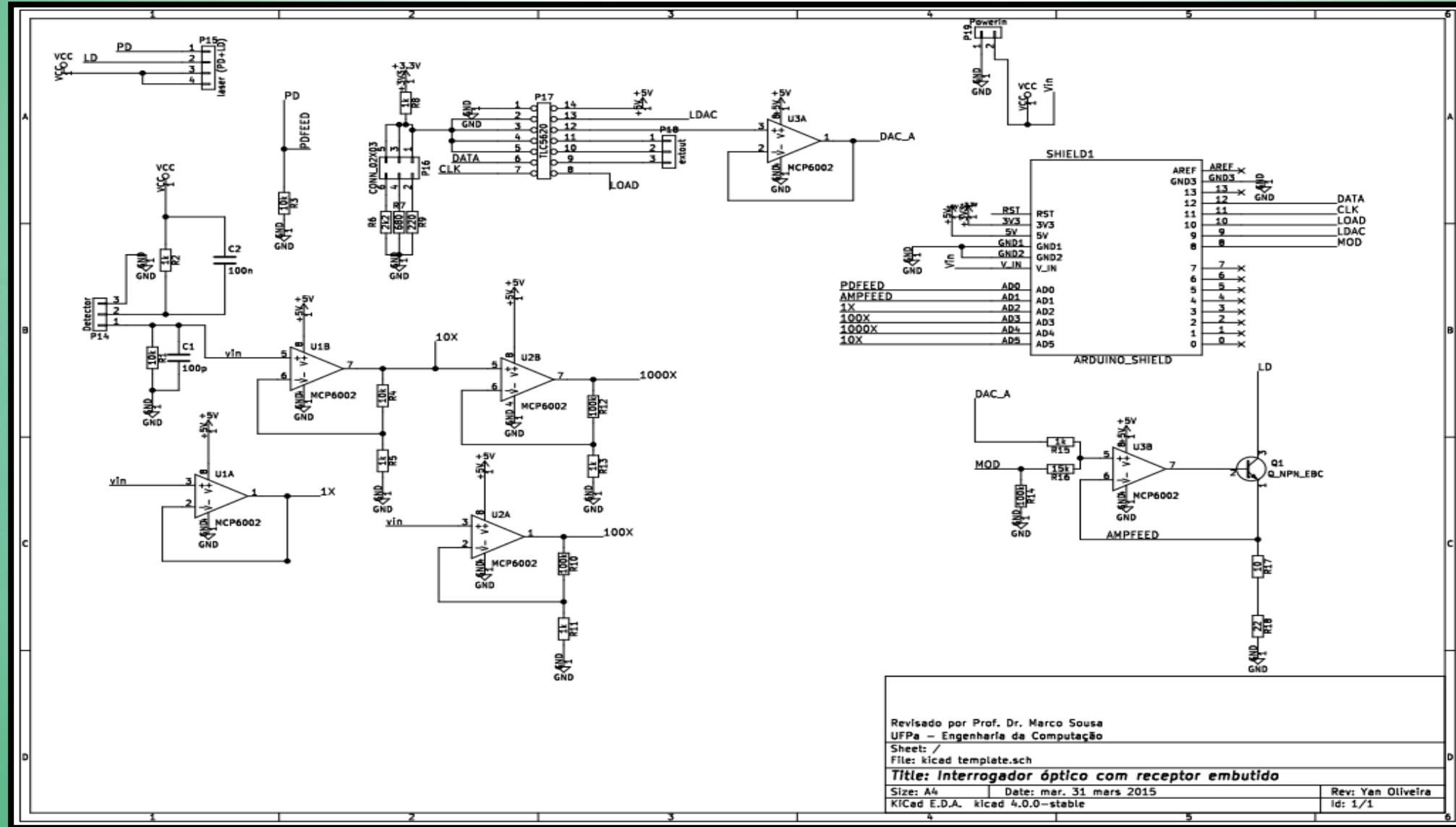
15

- Função:
  - Receber sinal do FGA01FC e condicionar às portas do Arduino.
- Componentes:
  - MCP6002 (rail-to-rail AMPOP).
  - Resistores e capacitores.
- Observações:
  - Configuração recomendada do FGA01FC.
  - Cascadear AMPOPS para ampliar ganhos.
  - Ganhos reais de 1x, 11x, 101x, 1111x.



# 3. Circuitos. Esquemático Completo.

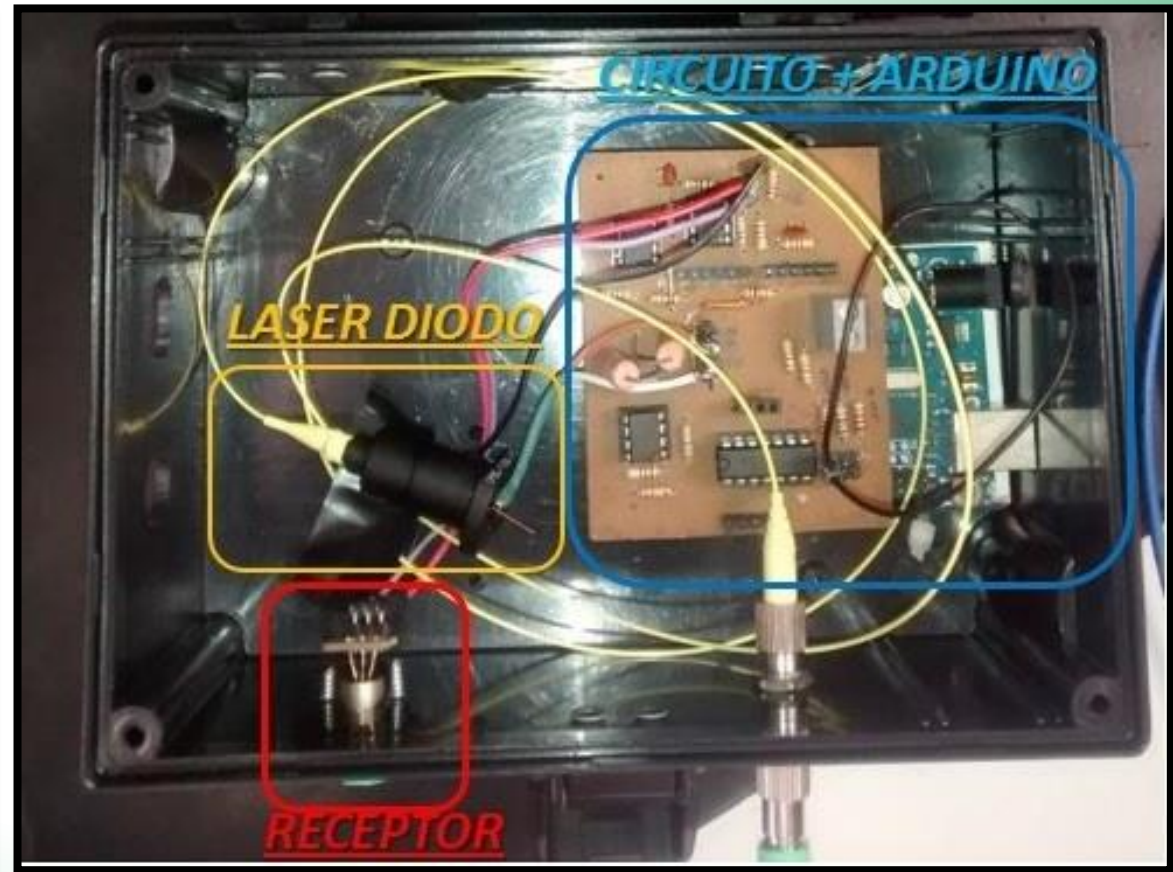
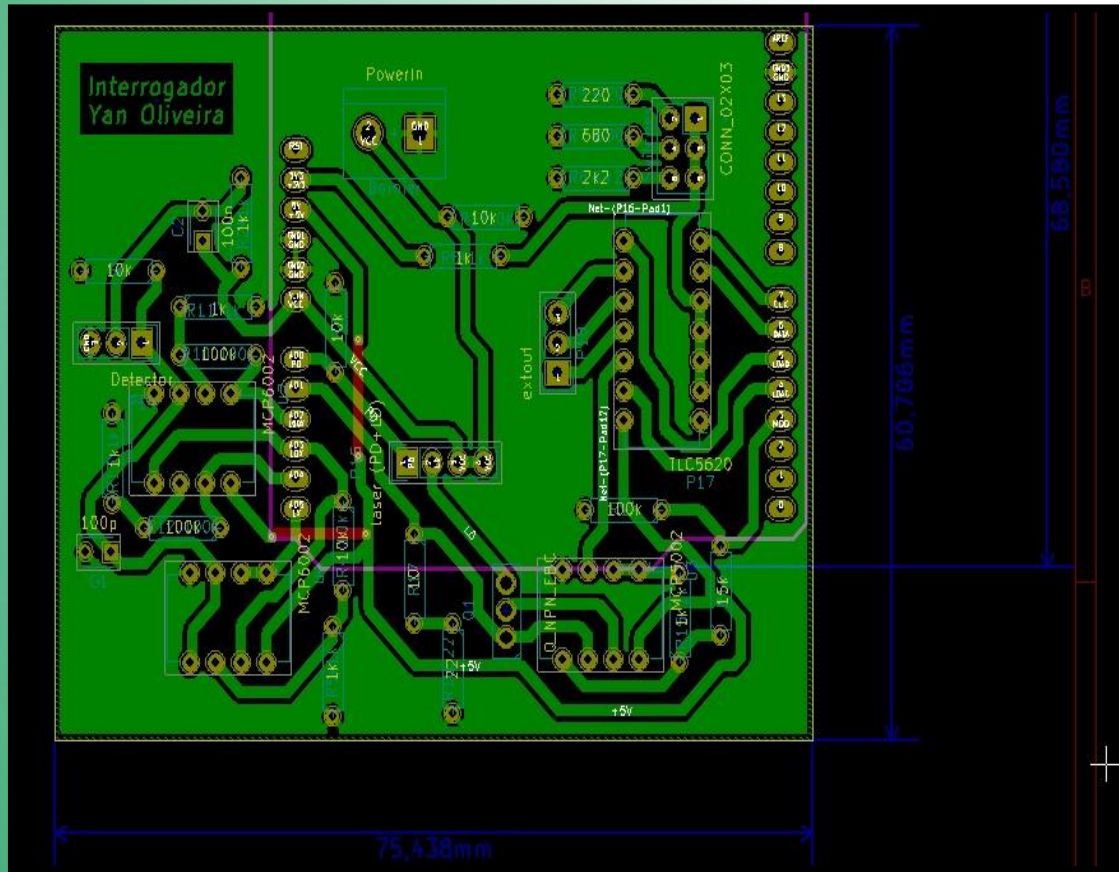
16





### 3. Circuitos. Footprint e placa

17



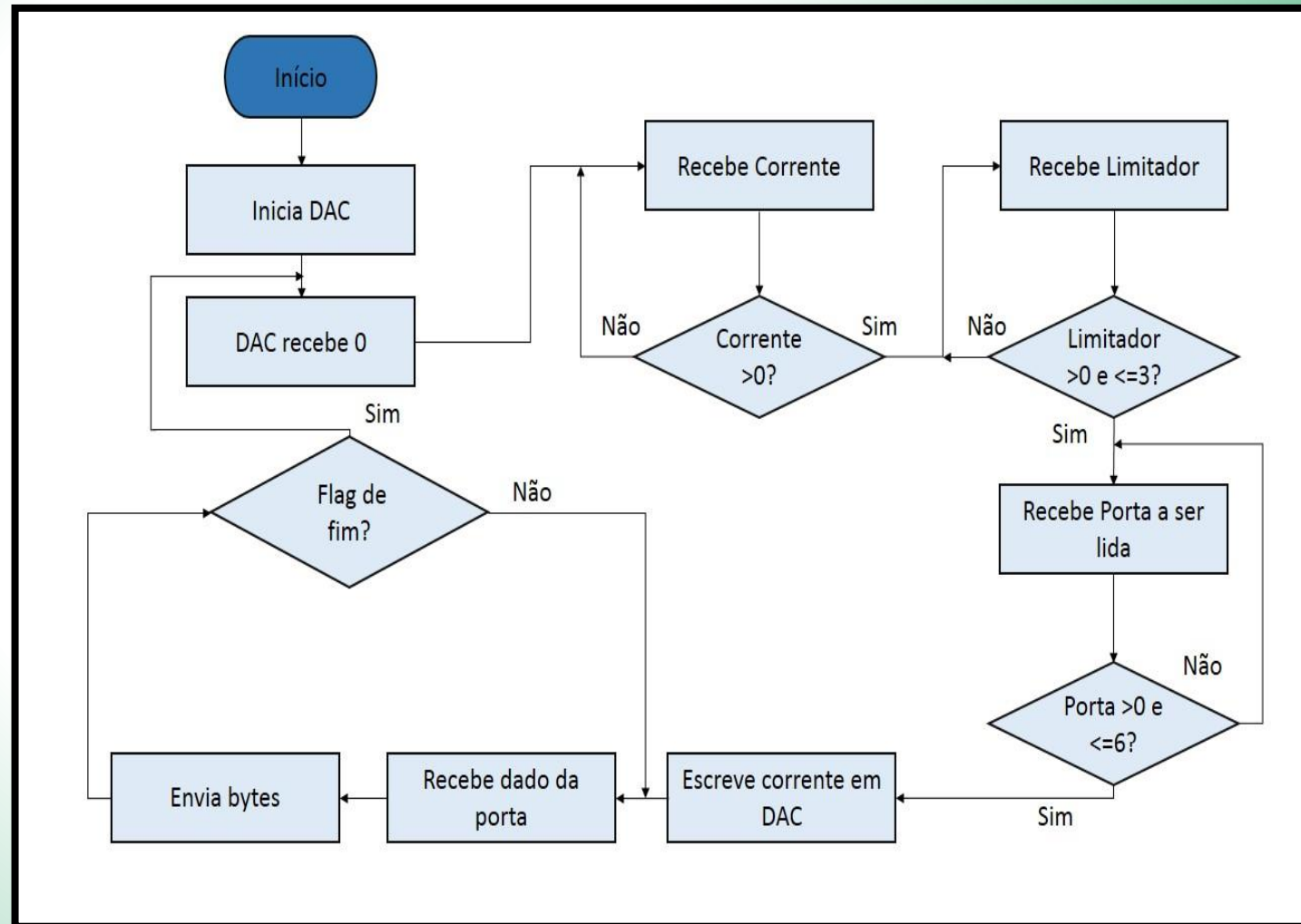
# 4. Software

## Software Arduino

18

### ■ Software Arduino:

- Captura requisição vinda da porta Serial.
- Envia dados ao DAC.
- Captura dados de porta solicitada no interrogador.
- Retorna bytes à porta Serial.
- Taxa Serial: 250.000 bps.

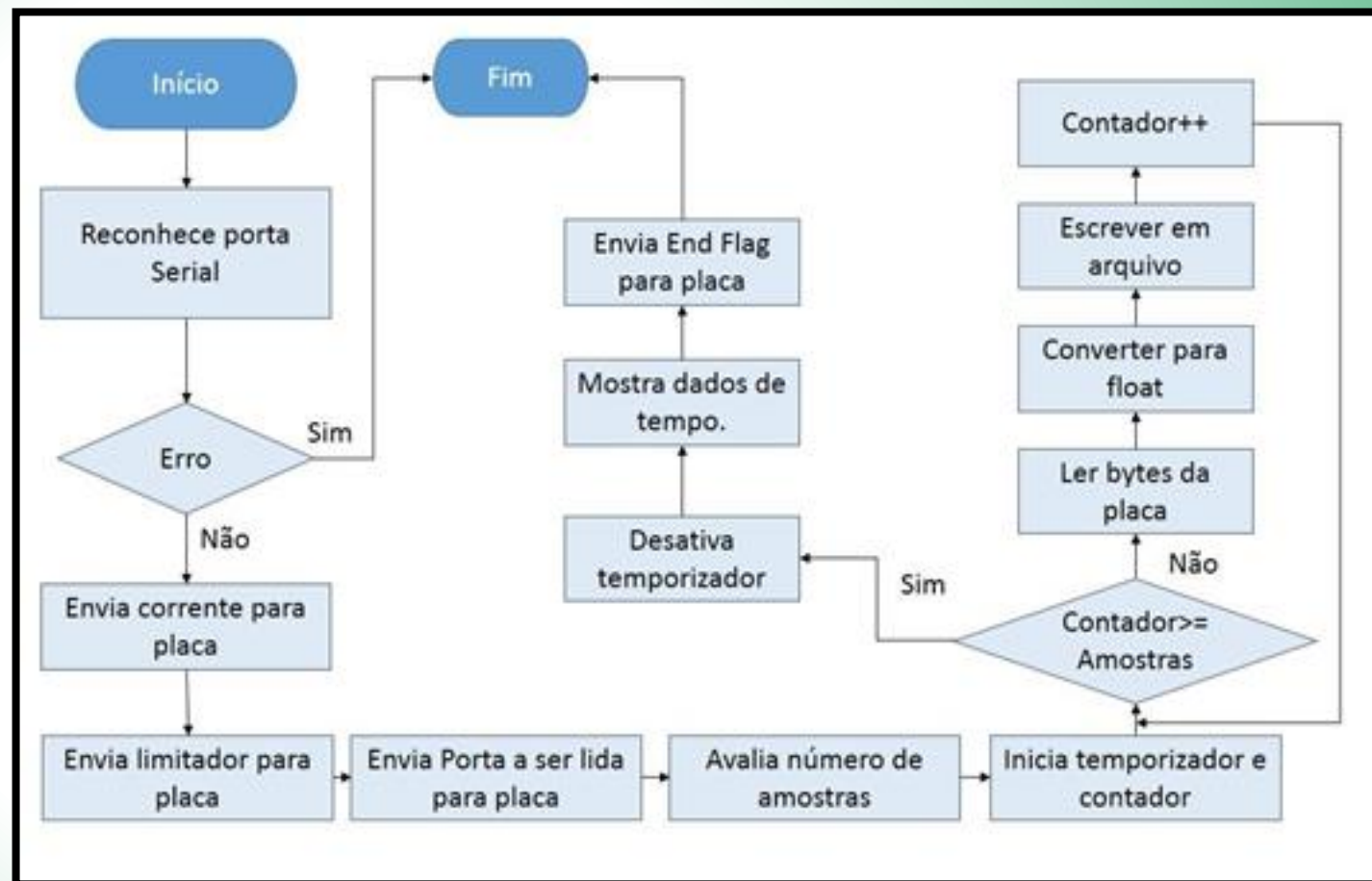


# 4. Software Software Python

19

## ■ Software Python (PySerial)

- Captura requisitos do *prompt* de comando valores.
  - Envia dados através da comunicação Serial pela porta USB.
  - Grava dados retornado pela porta USB em documento.
- 
- Taxa de 8.200 amostras por segundo.



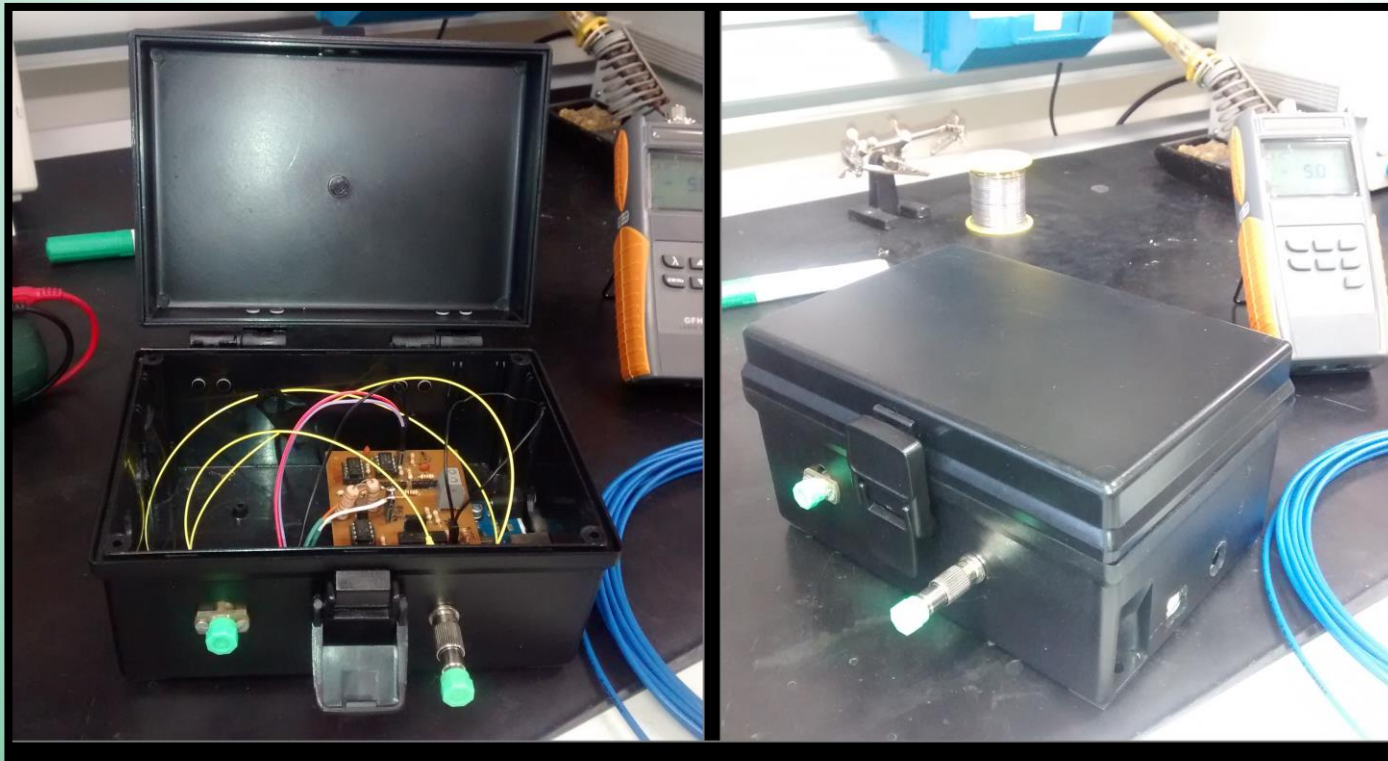
**Formato de requisição: “interrogador.py <limitador escolhido> <valor corrente> <número de amostras> <porta lida> <nome do arquivo com dados>”**



## 5- Resultados e testes.

20

- Valor final do interrogador: R\$ 2.355,00
- Comparação ao OPM: R\$ 2.745,00 (OPM) – R\$ 2.355,00 = R\$ 390,00
- Possibilidade de reduzir os custos. Utilizando outros LD's e fotodetectores.

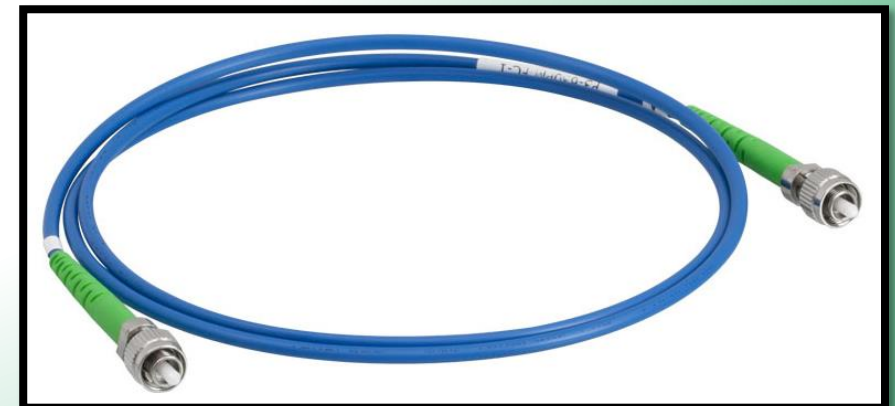




## 5- Resultados e testes.

21

- Os testes dividem-se da seguinte forma:
  - Teste eletrônico do Circuito Driver do Laser.
  - Emissão Simples.
  - Recepção Simples.
  - Loopback do circuito em Regime Fechado.
  - Experimento de vazão de fluidos.
- Componentes auxiliares:
  - Atenuadores 10 dB, 20 dB e 25 dB.
  - Laser: LPSC-1550-FC 60mW
  - Fotodetector: FGA01FC
  - OPM: GFHP-B e GFHS-B
  - Multímetro e Fibra óptica FC/APC 1550 nm

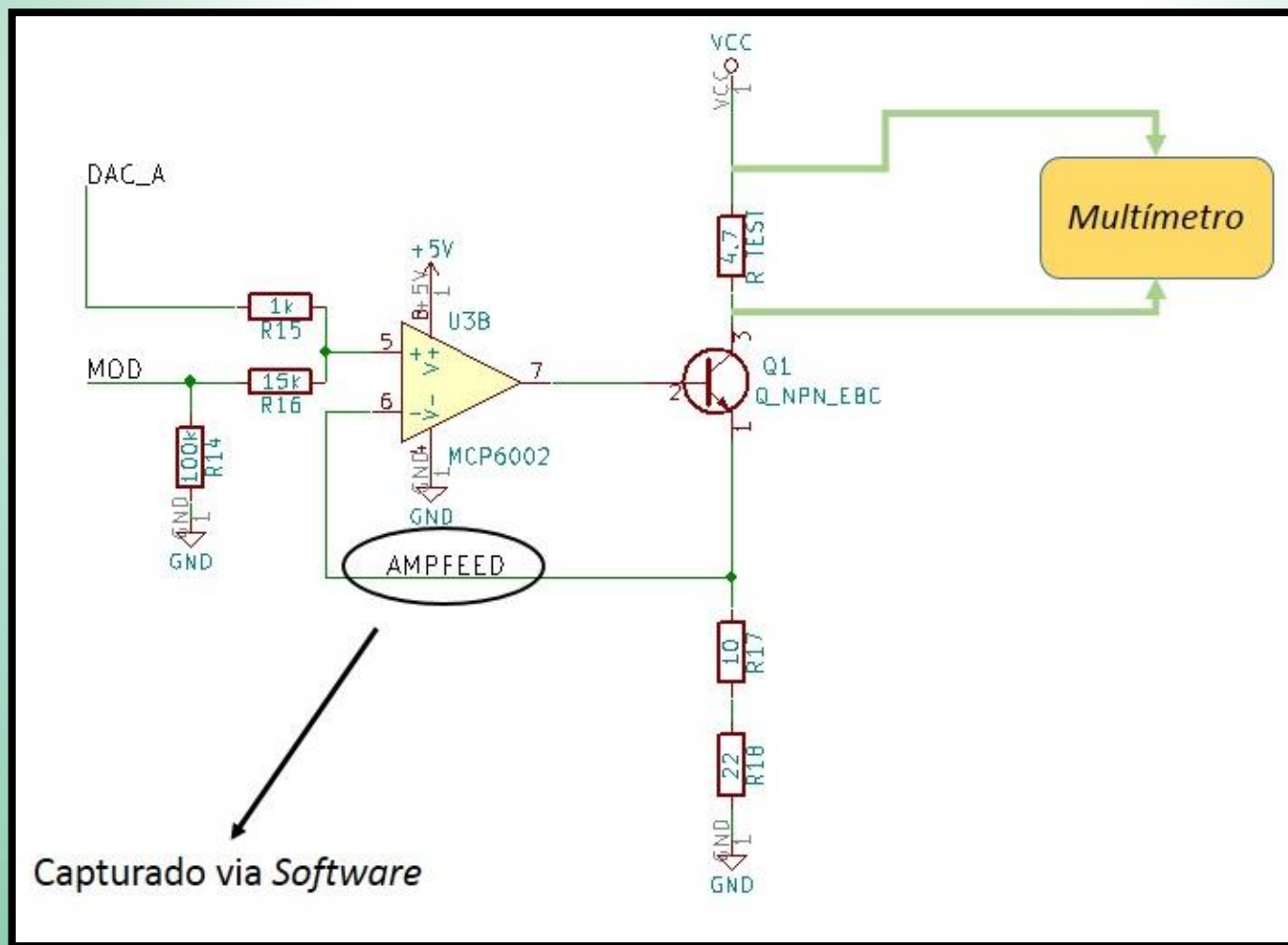


## 5- Resultados e testes

### Teste Eletrônico do Circuito Driver do Laser

22

- Substitui-se o LD por uma resistência de 4.7 Ohm.

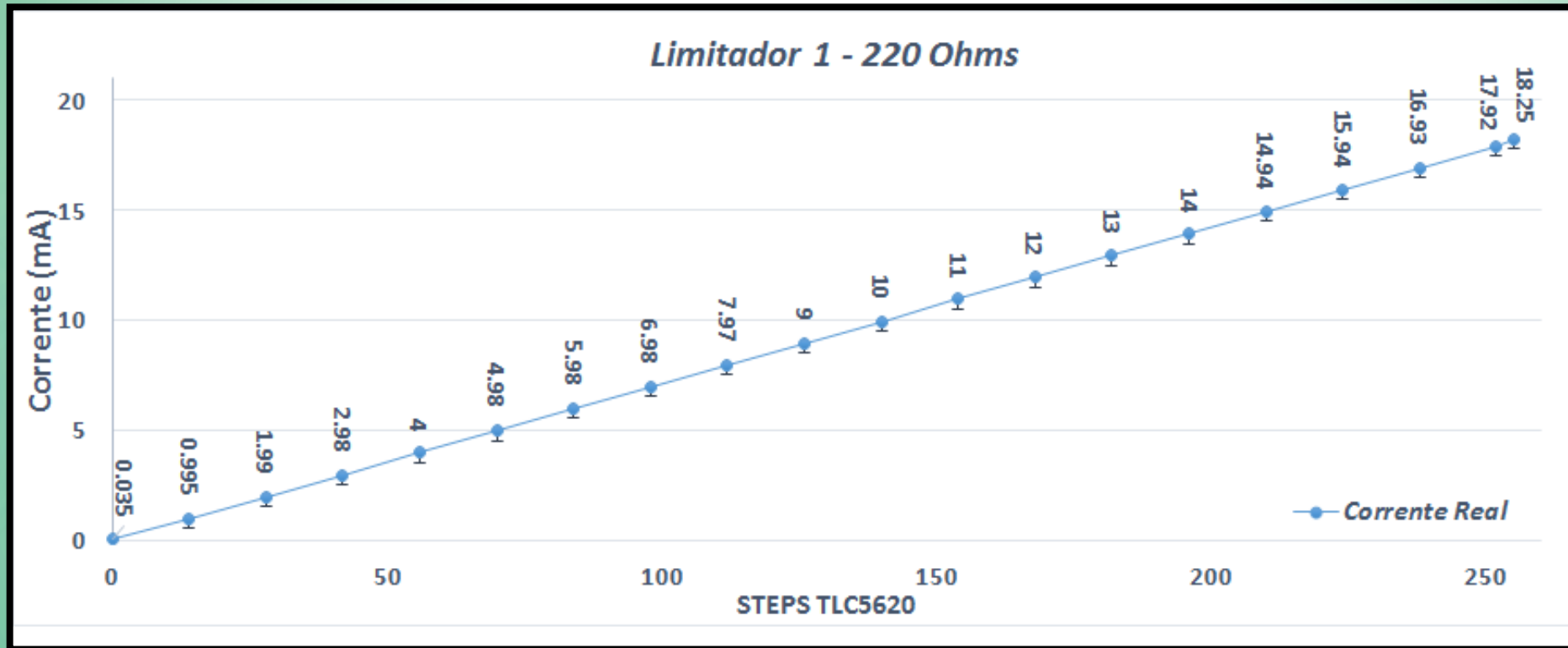


# 5- Resultados e testes

## Teste Eletrônico do Circuito Driver do Laser

23

- Limitador 1 (220 Ohms):



- Precisão: 68,93  $\mu\text{A}/\text{step}$

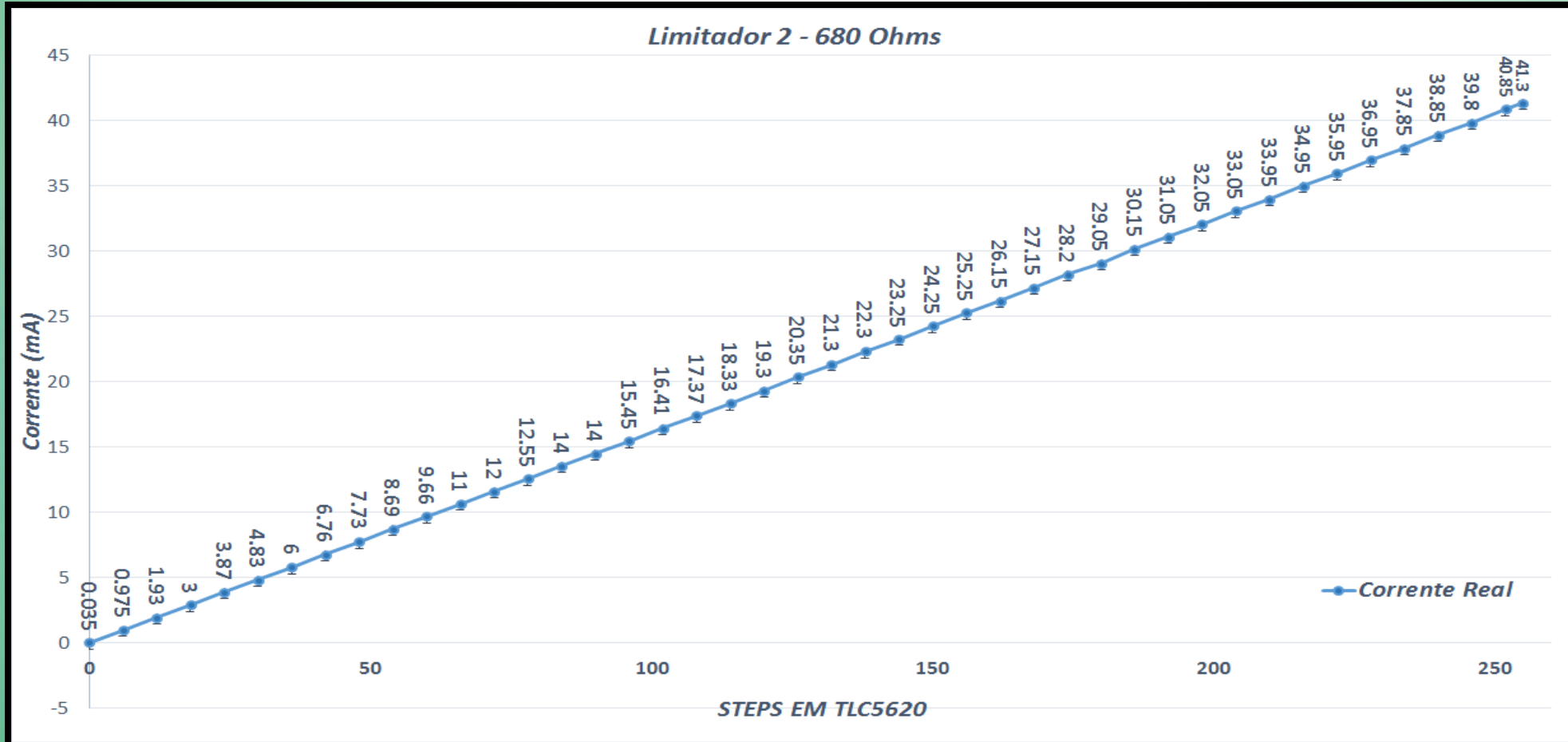
- Erro:  $< 0,4 \text{ mA}$

# 5- Resultados e testes

## Teste Eletrônico do Circuito Driver do Laser

24

- Limitador 2 (660 Ohms):



- Precisão: 159,13  $\mu$ A/step

- Erro: < 0,5 mA

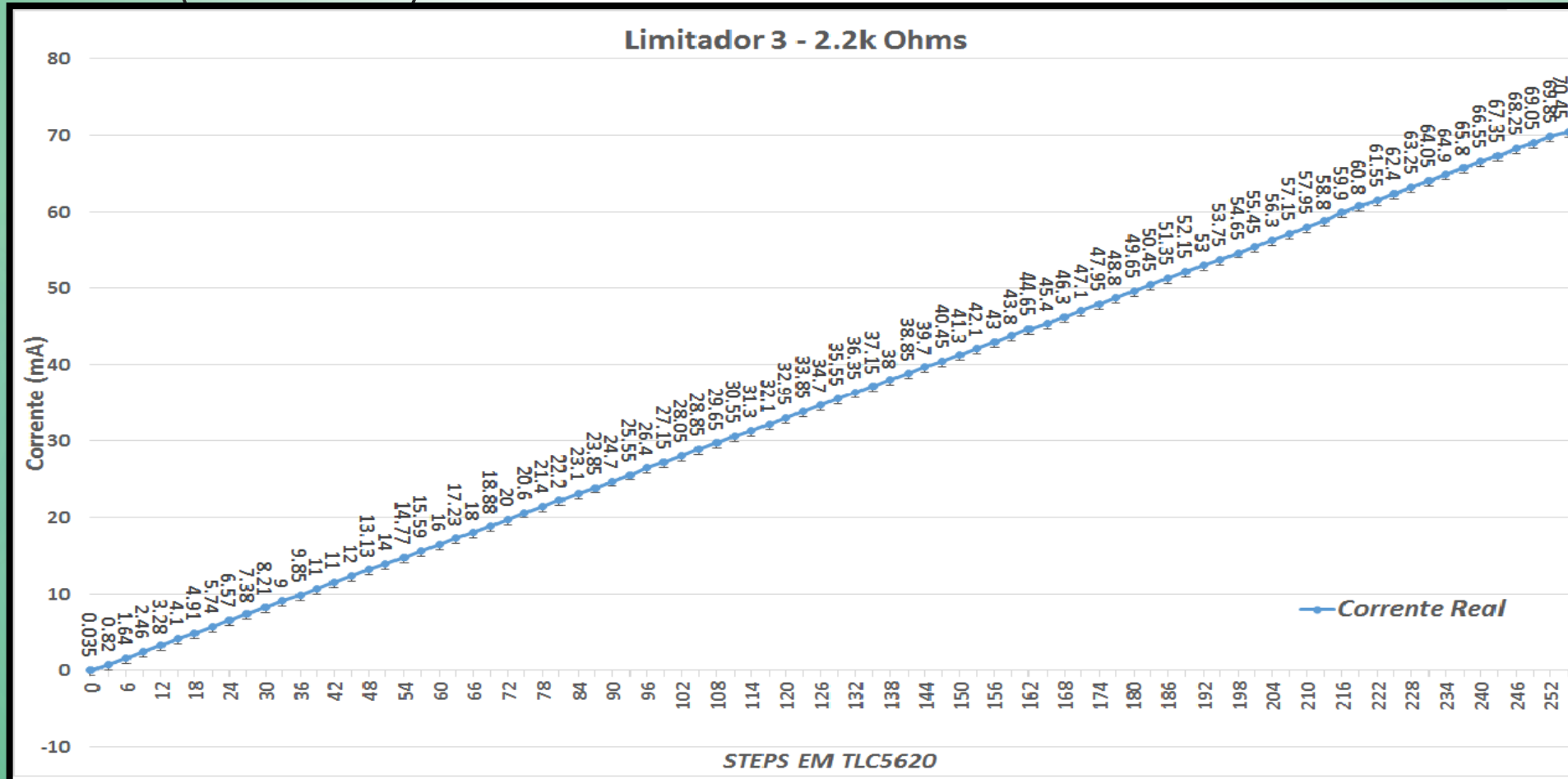


# 5- Resultados e testes

## Teste Eletrônico do Circuito Driver do Laser

25

- Limitador 3 (2,2k Ohms):



- Precisão: 275,2  $\mu$ A/step

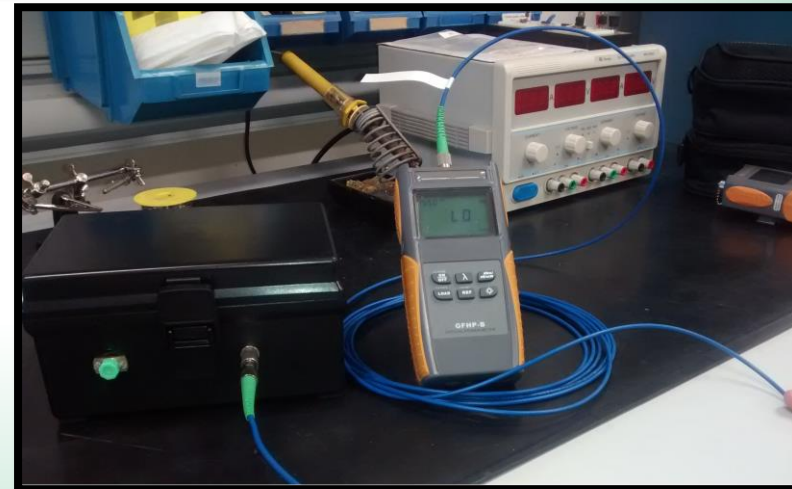
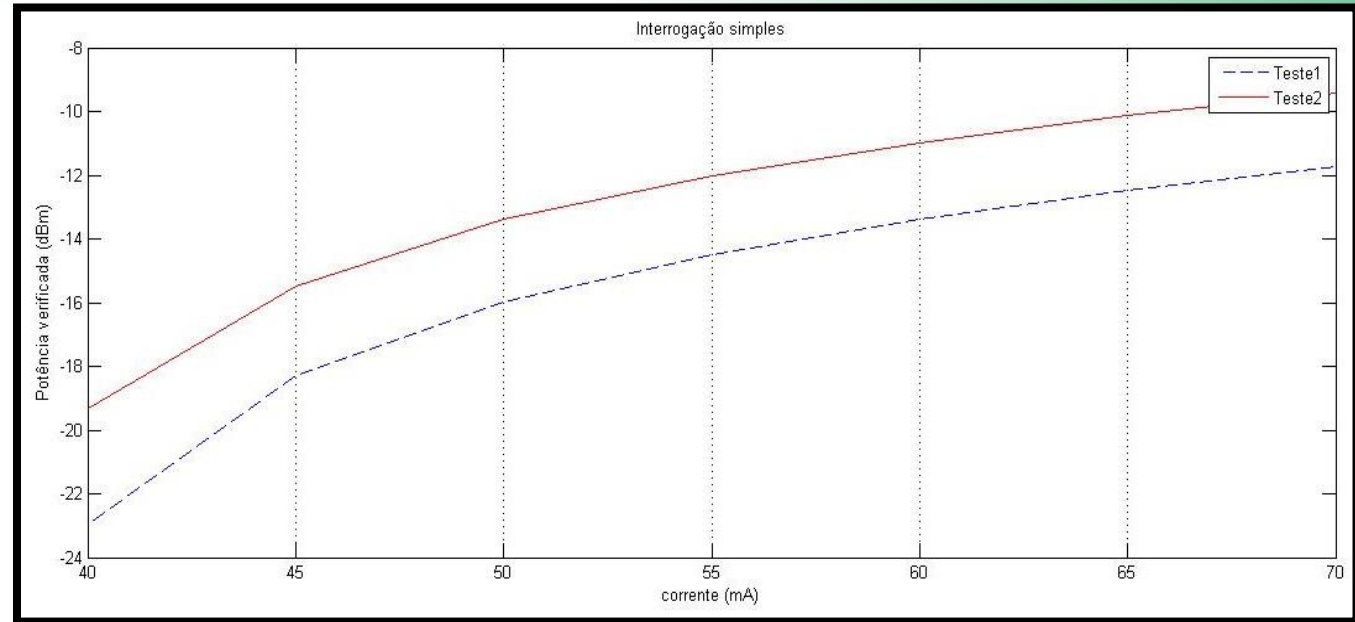
- Erro: < 0,14 mA

# 5- Resultados e testes

## Emissão simples

26

- Laser Diodo conectado a um terminal da fibra sem sensores.
- Receptor OPM conectado no fim da fibra
- Atenuador de 20 dB utilizado para não danificar OPM.
- 40 – 70 mA (limitador 3 – 2.2k Ohm).
- Dois testes com fibras distintas.
- Atenuação 2.6 dB ocasionado pela mudança das fibras.

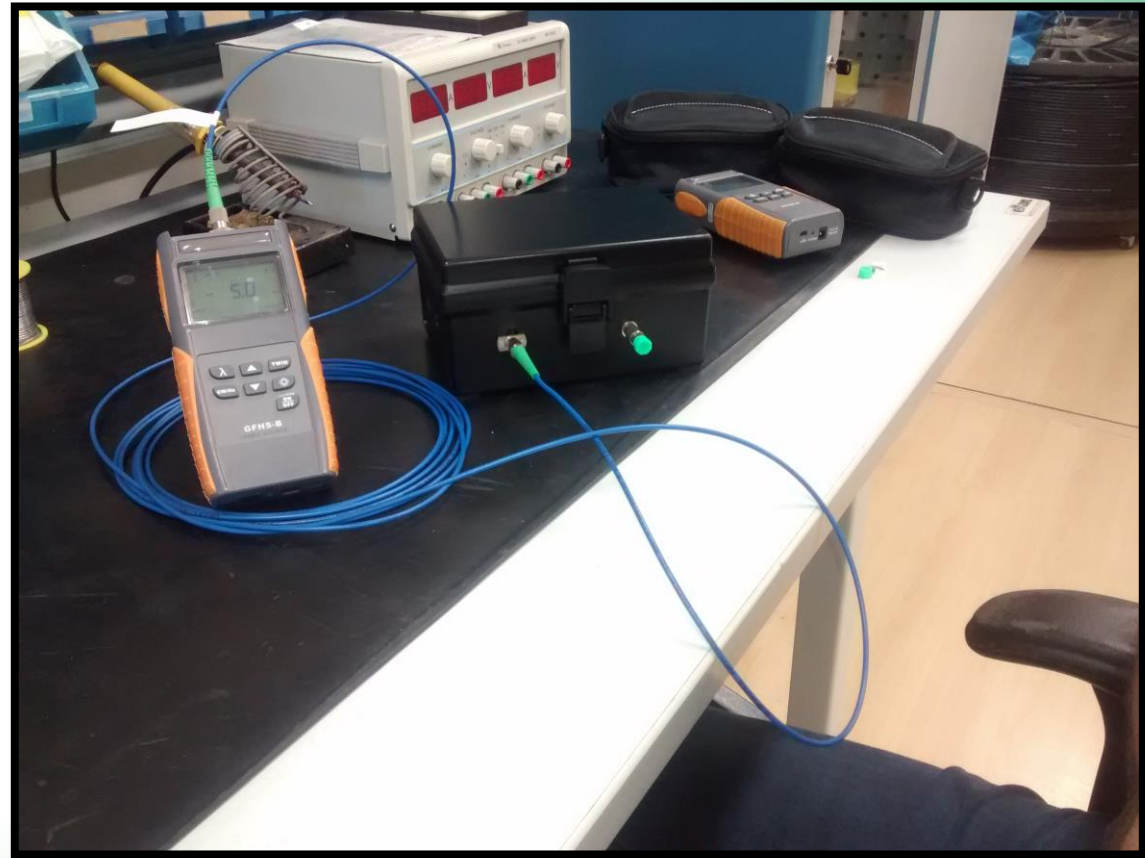


## 5- Resultados e testes

### Recepção simples

27

- Feito com *software* próprio apenas para o teste. (evitar problemas comunicação Serial)
- Nível de potência do sinal do *Laser Source*: -8 dBm a -2 dBm
- Utilizou-se atenuadores ópticos para gerar variações na faixa de potência e para testar as portas do interrogador. 10, 20 e 25 dB



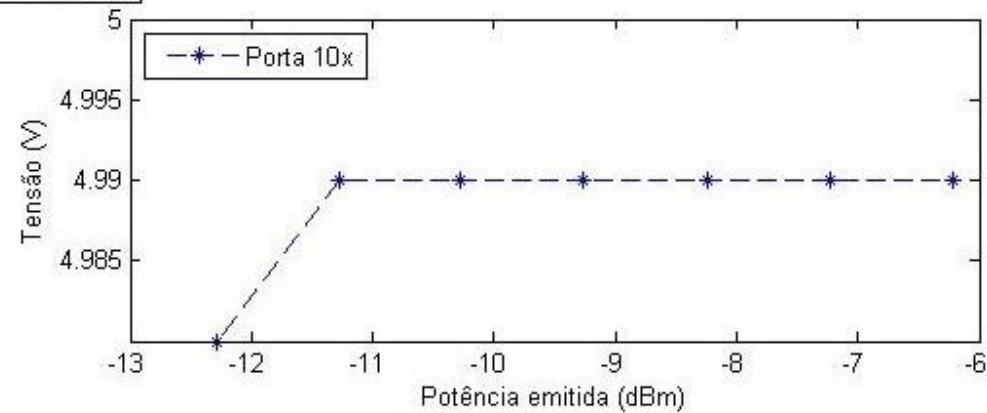
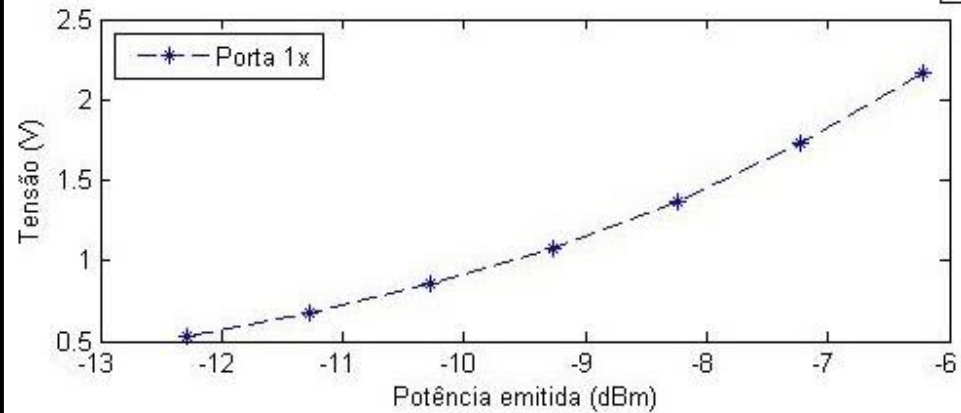


# 5- Resultados e testes

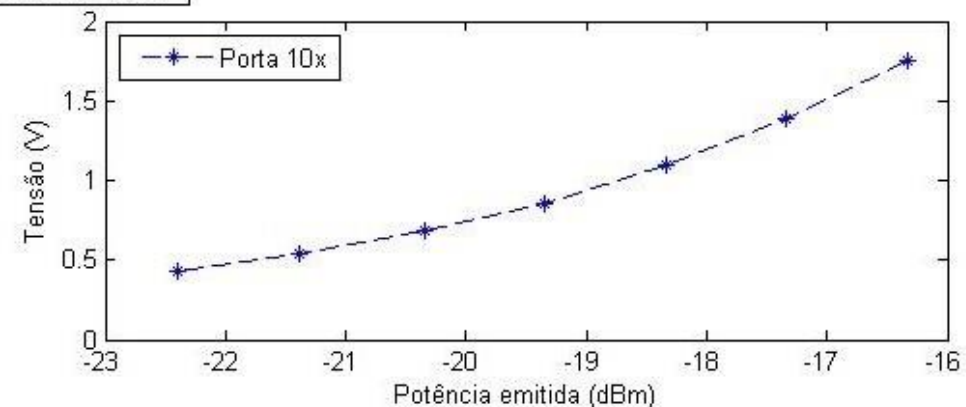
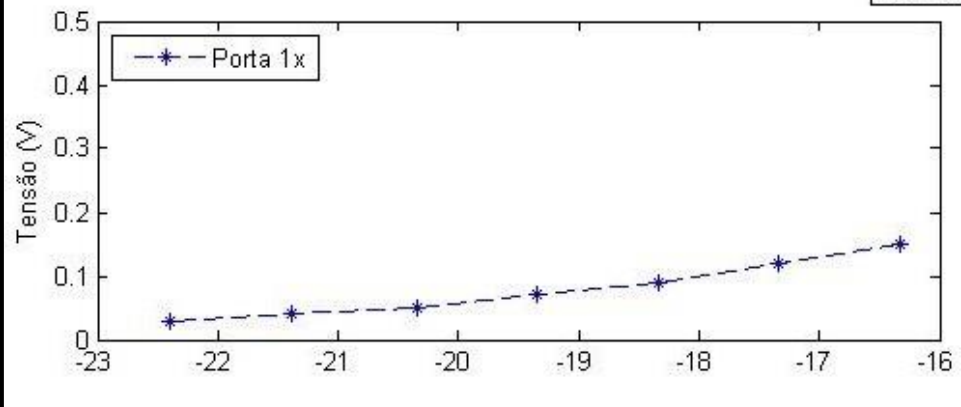
## Recepção simples

28

SEM ATENUADORES



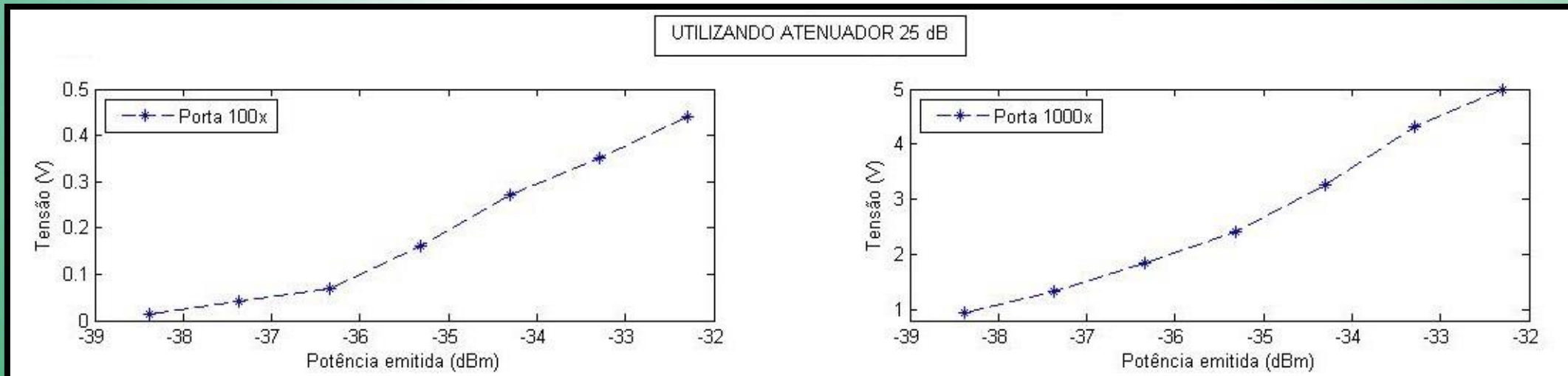
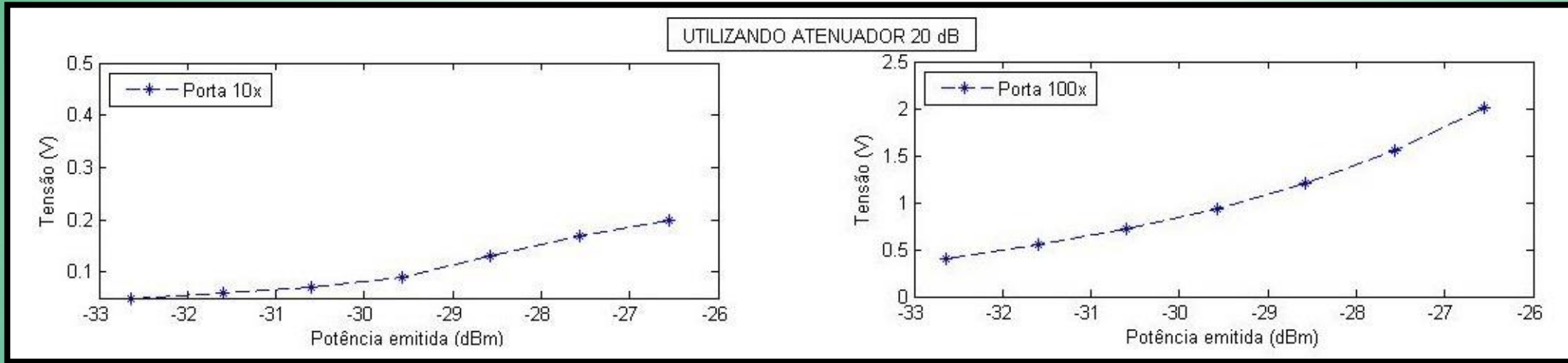
UTILIZANDO ATENUADOR 10 dB



# 5- Resultados e testes

## Recepção simples

29



## 5- Resultados e testes

### Recepção simples

30

<i>PORTAS</i>	<i>Erro Médio (uW)</i>	<i>Erro Percentual (%)</i>
<b>1X</b>	<b>11.81</b>	<b>9.818</b>
<b>10X</b>	<b>4.13</b>	<b>47.06</b>
<b>100X</b>	<b>0.178</b>	<b>17.05</b>
<b>1000X</b>	<b>0.0703</b>	<b>28.6</b>

- Recomenda-se uso de portas de menor amplificação.
- Sistema operacional, apresentou resposta em todas as portas.

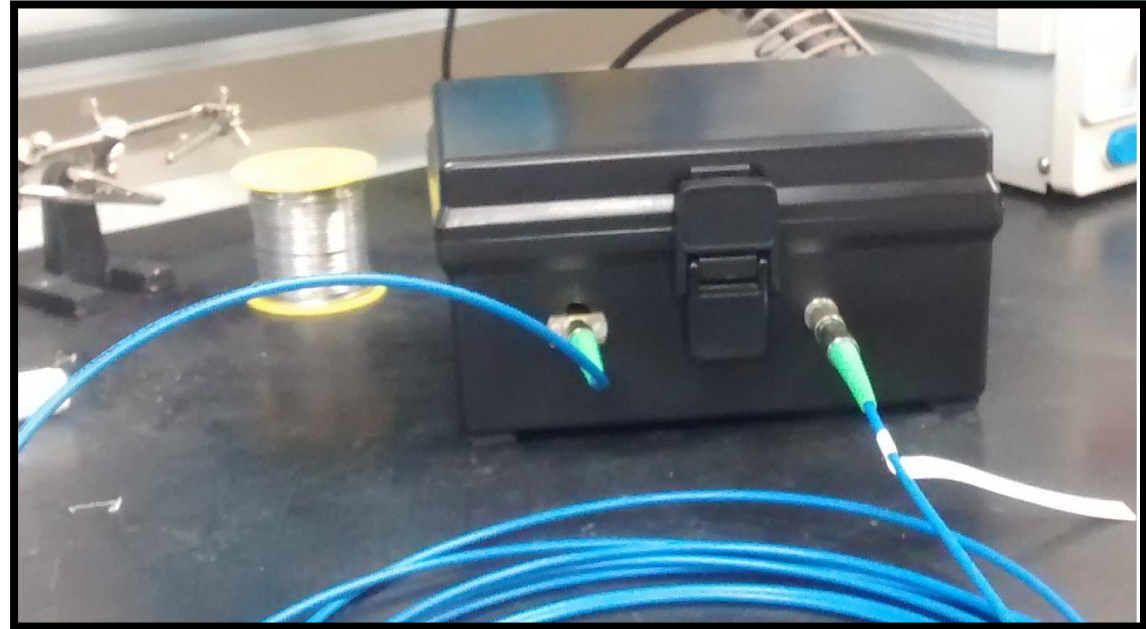


## 5- Resultados e testes

### Teste de *loopback* do Circuito.

31

- Teste controlado pela porta USB do computador.
- Atenuador de 20 dB, segurança.
- Corrente enviada: 40 - 70 mA
- Eficiência do LD: 6.4 mW – 11,2 mW
- N° de amostras: 100.000 por porta e corrente
- Total: 2.800.000 amostras
- Tempo total: 312 segs
- Erro: 1,5 amostras a cada 100.000.
- Porta 1X manteve-se sem variação.
- Porta 1000X esteve saturada durante todo o experimento.

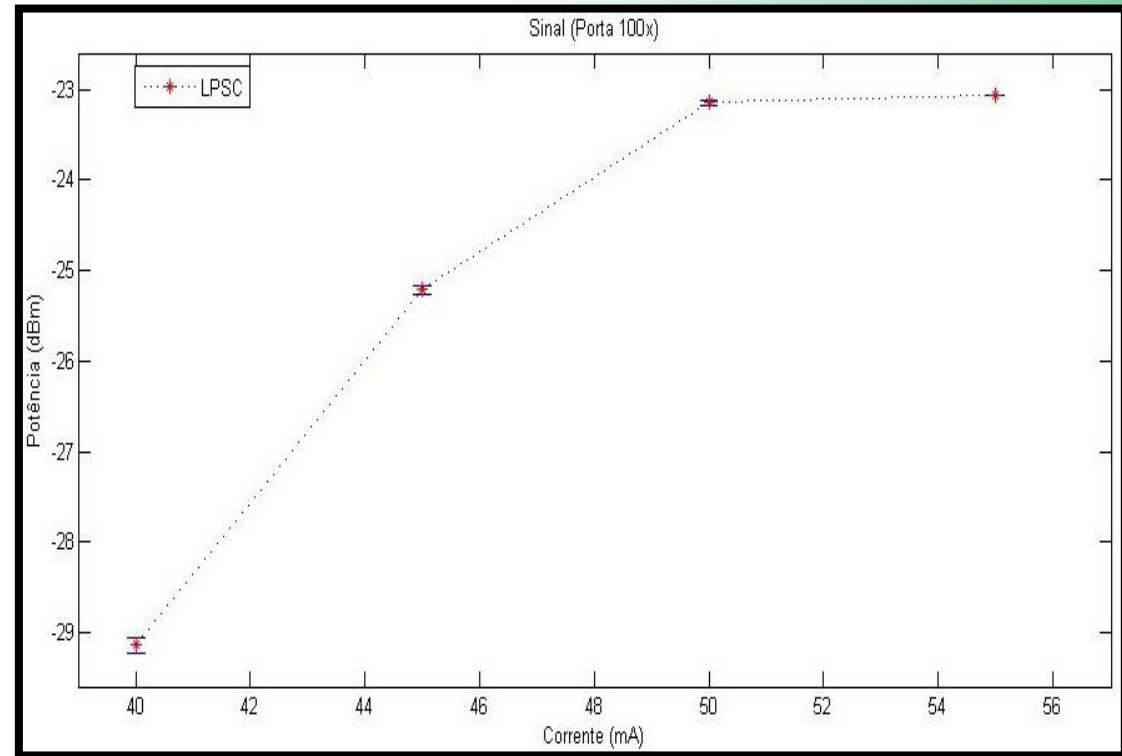
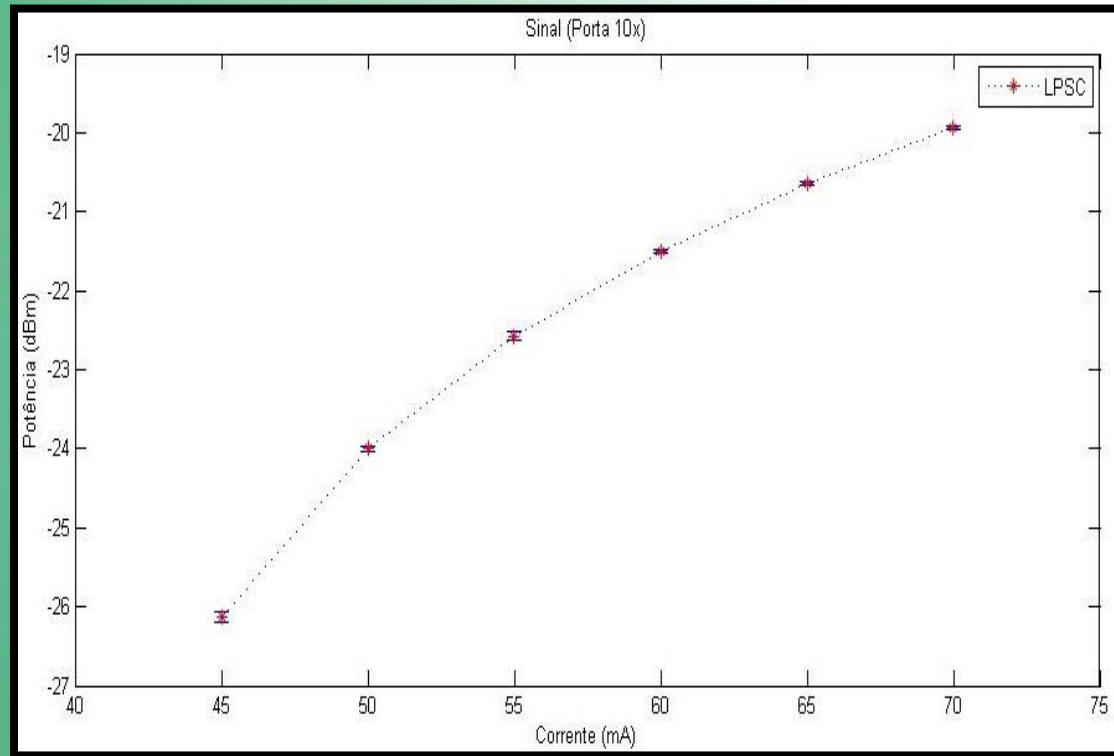


- *Precisão de captura de sinal:*
  - 1x- 488.76 nW
  - 11x – 44.432 nW
  - 101x – 4.84 nW
  - 1111x – 0.44 nW

## 5- Resultados e testes

### Teste de *loopback* do Circuito.

32

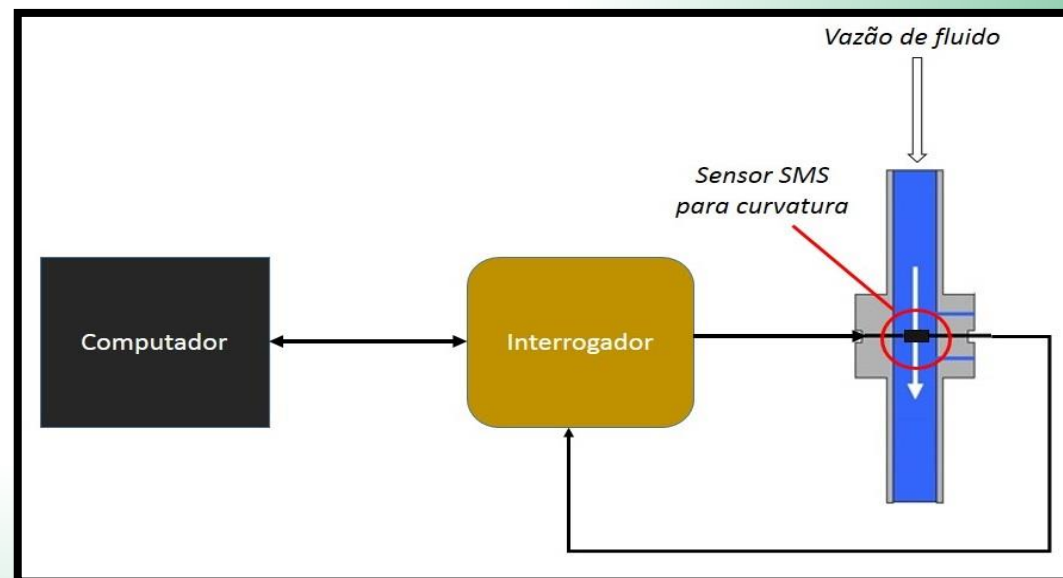
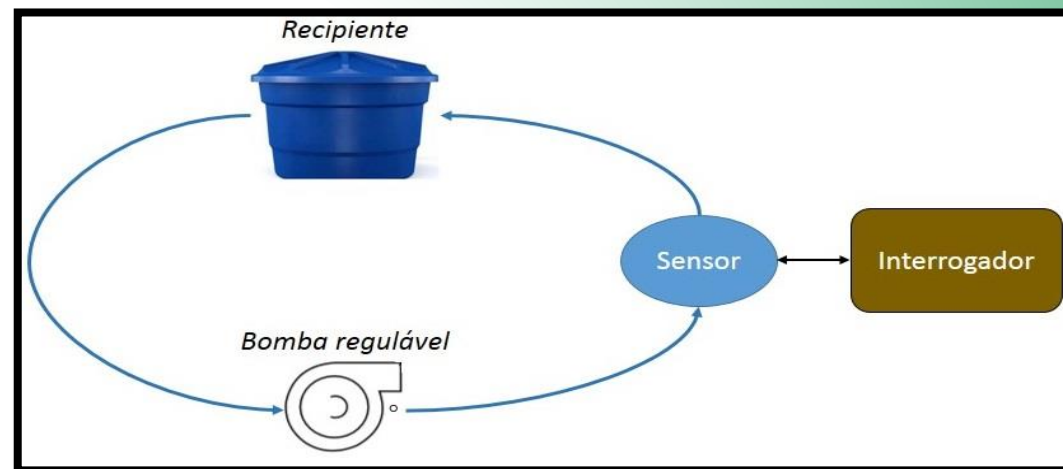


# 5- Resultados e testes

## Experimento de vazão de fluidos

33

- Realizado no LABFLUIDO (UFPa)
- Complexo de vazão de fluidos
- Analisar a variação de potência no sensor óptico exposto a vazões diversas.
- Taxa de vazão:
  - 0 – 70 l/min (ida)
  - 70 – 0 l/min (volta)
- 70 mA na Porta 1x sem atenuador.
- Atenuação do sistema: 12.25 dB.

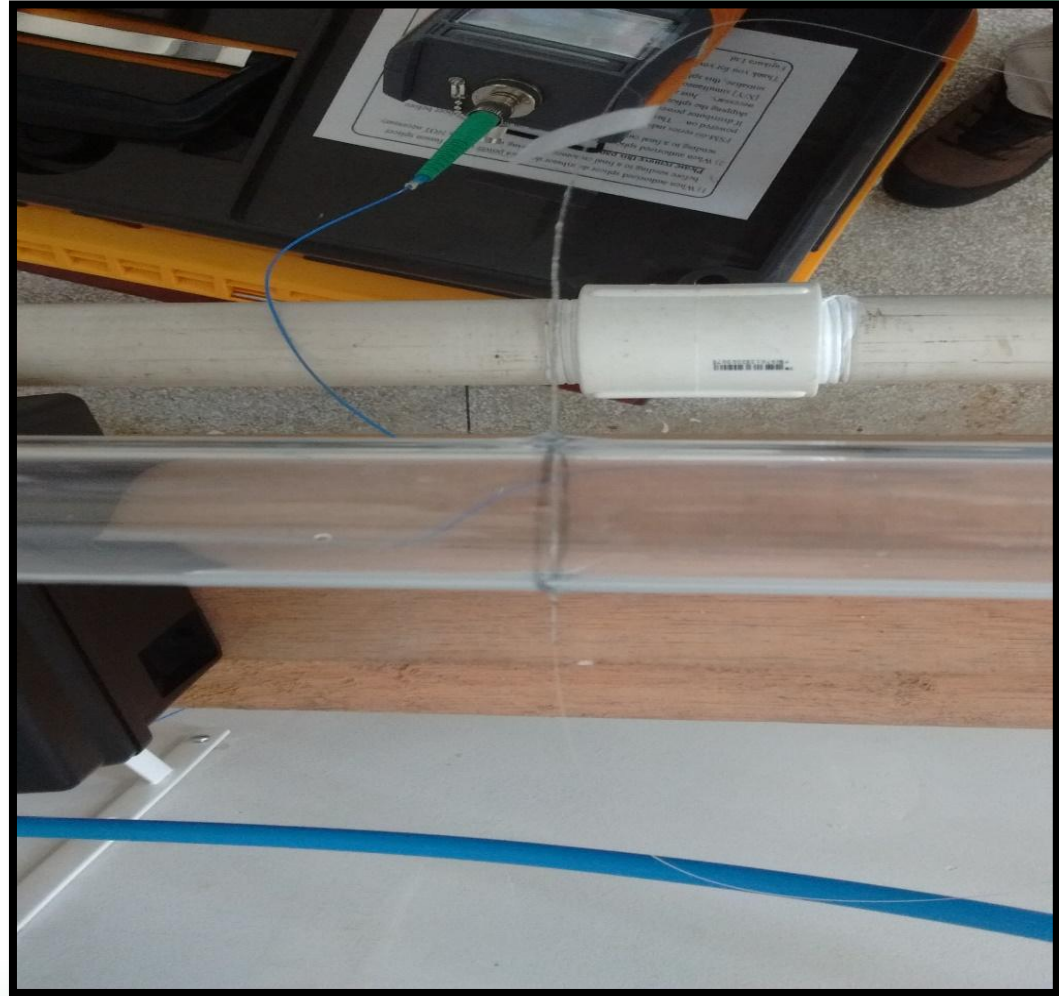
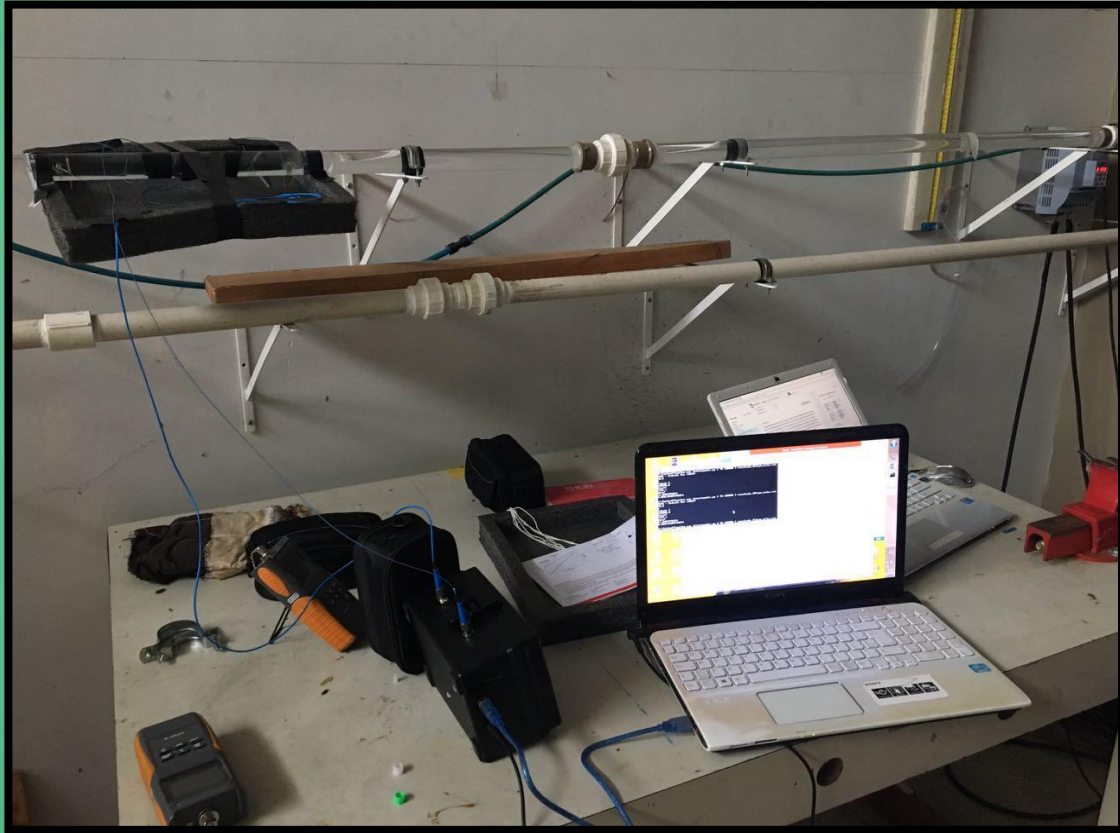




# 5- Resultados e testes

## Experimento de vazão de fluidos

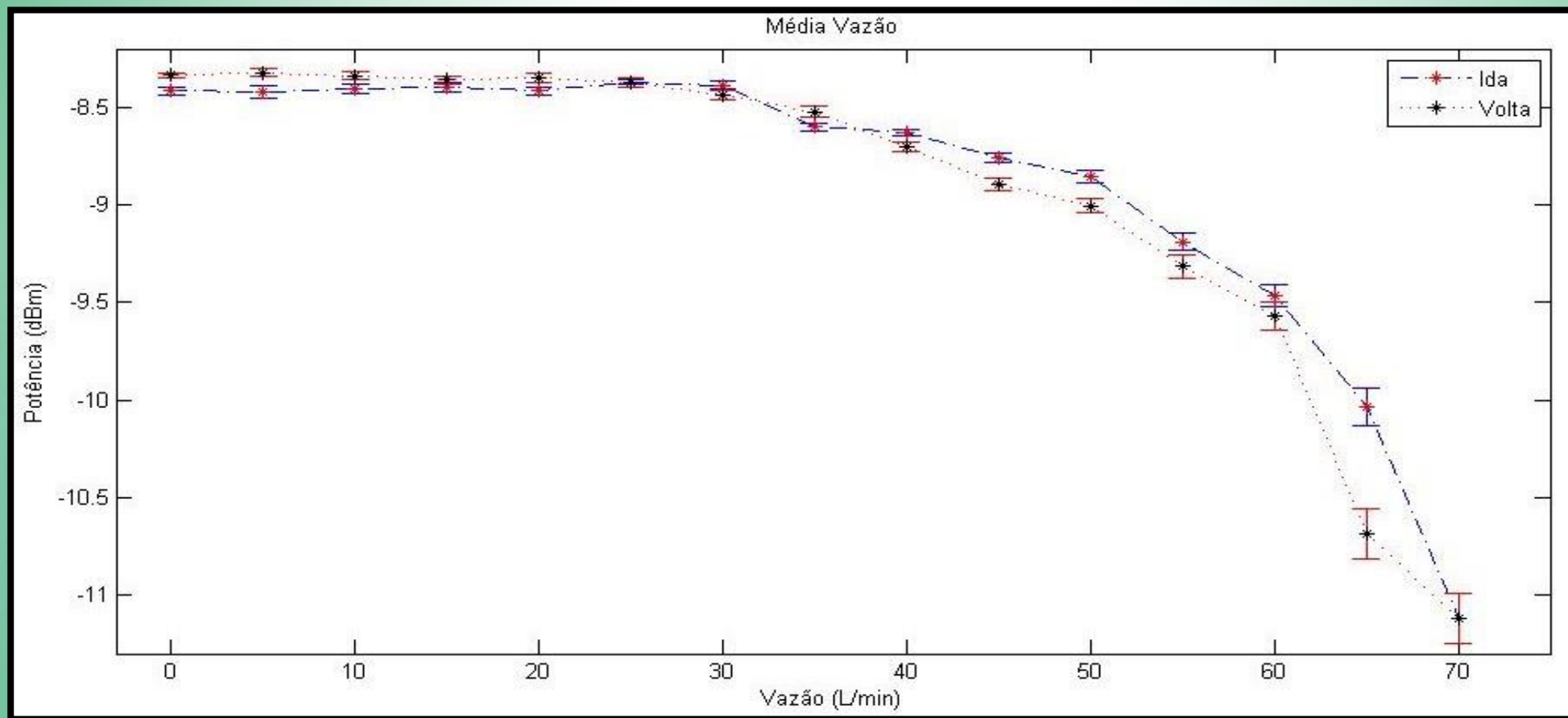
34



## 5- Resultados e testes

### Experimento de vazão de fluidos

35



- Queda de potência quando regime muda de laminar para turbulento. (30 l/min).
- Maior oscilação se dá quando a vazão se encontra em 70 l/min (entre -10.99 e -11.27 dBm).
- Sistema possui grande atenuação, claramente podendo ser melhorado.

- Interrogador se encontra operacional.
- Otimizar o interrogador para torna-lo comerciável.
- Problemas encontrados:
  - Instabilidade da ferramenta PySerial.
  - Código não é multiplataforma.
  - Implementar todos os circuitos. (Circuito Modulador, p.e.)
- Trabalhos futuros:
  - Tornar interrogador autônomo, com implante de leitura de cartão SD, incremento de bateria e display.
  - Automatizar o reconhecimento do limitador, evitando possíveis falhas humanas.
  - Melhorar a segurança de código.
  - Otimizar custos com componentes.



## 7- Referências bibliográficas

37

- ▶ ABADDE & CAMPOS - ABADDE, André L. R. CAMPOS, Maria Regina. **Aplicação do OTDR na Análise de Problemas de Atenuação em Fibras Ópticas: Estudo de casos.** REVISTA Científica Periódica – Telecomunicações ISSN 1513-2338. Telecom Volume 06 – nº 02 12/2002
- ▶ AGRAWAL, Govind. **Fiber-optic communication systems.** 3º ed. 2002 Seção: 1.4.2.
- ▶ BALLOD, Yanes Checcacci. **Dispositivos à fibra óptica baseados em interferência multimodal (MMI) para telecomunicações e sensoramento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - PGET - Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ. 2011.
- ▶ DOS SANTOS, Adam Dreyton Ferreira. **Desenvolvimento de sistema de persistência para redes de sensores ópticos.** Monografia (Engenharia da Computação) – ITEC- Universidade Federal do Pará. Belém-Pa. 2013.
- ▶ DUARTE & CARVALHO - DUARTE, Lucas. CARVALHO, Henrique. **INSTRUMENTAÇÃO PARA ENSINO.** [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2003/002013Lucasm-Carvalho\\_F809\\_RF10\\_0.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/002013Lucasm-Carvalho_F809_RF10_0.pdf) Acessado em : 17/01/2016.
- ▶ FERNANDES, Cindy Stella. **DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-PPGEE-UFPA. Belém, 2016.
- ▶ FS.COM. **Five Basics About Fiber Optic Cables.** Disponível em: <http://www.fiber-optic-equipment.com/tag/multimode-fiber>. Visto em: 20/03/2016.
- ▶ GARRET, Kellis. How optical sensing solves the toughest sensing challenges. NI -November 01, 2012. Disponível em: <http://www.edn.com/design/test-and-measurement/4400423/How-optical-sensing-solves-the-toughest-sensing-challenges>. visto em 19/01/2017 às 17:30.



## 7- Referências bibliográficas

38

- ▶ HBM [2]. **O que é um sensor FBG? (FIBER BRAGG GRATING)**. Disponível em: <http://www.hbm.com/pt/4596/dicas-e-informacoes-o-que-e-sensor-fbg/> Acessado em 19/01/2016.
- ▶ HBM. **Introdução HBM monitoramento estrutural**. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/5530/monitoramento-estrutural/> Acessado em: 02/01/2017.
- ▶ LOUZADA, Daniel Ramos. **Deteção e caracterização de danos estruturais através de sensores a rede de Bragg e Redes Neurais Artificiais** - Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.
- ▶ MEJIA & BASURTO. A.R. Mejia-Aranda, M.A. Basurto-Pensado, E.E. Antunez-Ceron. **Fiber Optic Pressure Sensor of 0–0.36 psi by Multimode Interference Technique**. Journal of Applied Research and Technology. JART. Vol 11 Núm 5. Oct/2013.
- ▶ NATIONAL INSTRUMENTS. **Fundamentos de detecção óptica (FBG)**. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/11821/en/> Escrito em: 01/2016. Visto em: 09/01/2017.
- ▶ ROBERTSON, Bruce. **KINGFISHER International Application Notes**. Disponível em: <https://www.kingfisherfiber.com/Application-Notes.aspx> Acessado em: 15/01/2016.
- ▶ SOUSA. Marco J. **Síntese de grades de Bragg em fibra: técnicas de aceleração e codificação para algoritmos evolucionários**. PhD thesis, Universidade Federal do Pará, Belém-Pa. Feb, 2008.

***Obrigado pela atenção!***