

• U



C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Metrologia óptica da detonação – Sensor único**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Ana Sofia Félix Ribeiro**

**Orientador**

**Prof. Doutor José Leandro Simões de Andrade Campos**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor José Carlos Miranda Góis  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor José Leandro S. de Andrade Campos  
Professor associado da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Junho de 2017**

## Agradecimentos

Este presente trabalho só foi possível com a colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o reconhecimento.

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Andrade Campos por toda a disponibilidade e partilha de conhecimento demonstrado ao longo deste trabalho.

Ao Alexandre Anastácio, por toda a sua disponibilidade, partilha de informação e colaboração na realização da parte prática. Muito obrigado pelas longas conversas.

À minha família pelo apoio incondicional e por ter sempre acreditado em mim.

Ao Gustavo Carvalho e ao João Pimenta por todo o apoio, paciência e companhia que dedicaram durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, sem os quais todo o meu percurso académico e pessoal ao longo de todos estes anos não seria igual.

---

## Resumo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema simples de medida da velocidade de detonação de explosivos condensados. Esta velocidade é conseguida através da utilização de um sistema optoelectrónico, fazendo uma medição discreta por imersão de duas ou mais fibras ópticas na emulsão explosiva. Cada fibra transmite a radiação proveniente da frente de detonação, conectada através de uma ligação SMA a um fotodíodo. Este constitui o conversor optoelectrónico com 8 canais e converte o sinal óptico em sinal elétrico. Cada sinal é analisado pelo osciloscópio que mede o tempo entre os sinais ópticos.

O modelo simples da detonação foi utilizado com o fim de determinar quais os parâmetros relevantes. A velocidade de detonação foi admitida como o mais importante. Para a sua medição procedeu-se à montagem experimental de componentes num circuito electrónico. Os sensores foram seleccionados de entre os disponíveis no mercado. Como o tempo de resposta de um sensor fotodíodo, montado em circuito resistência/condensador, depende do condensador aplicado no circuito, foi feito um estudo de optimização do seu valor, utilizando um gerador de luz pulsada. Finalmente, o sistema de medida produzido, foi aplicado em medidas de velocidade de detonação de um explosivo do tipo emulsão e discutidos os resultados.

Os resultados comprovaram a validade deste método para a medida de velocidade de detonação com a utilização de fibras ópticas, bem como a sua precisão.

**Palavras-chave:** Detonação, Fibra Óptica, Velocidade de Detonação, Fotodíodo, Conversor optoelectrónico, Tempo

## Abstract

The main objective of this work is the development of a simple system to measure the detonation velocity of condensed explosives. This velocity is achieved with an optoelectronic system, for the discrete measurement of this parameter we use two or more optical fibers inserted in the explosive emulsion. Each fiber transmits a radiation from the detonation front, connected through an SMA connection to a photodiode. This constitutes the optoelectronic converter with 8 channels and converts the optical signal into electrical signal. Each signal is analyzed by a digital signal sensor, oscilloscope, that measures the time between the optical signals.

The simplest detonation model was initially analyzed for a selection of the relevant parameters and a detonation velocity was considered the most important one. It was selected the best components for the development of the optoelectronic sensor and the circuit were assembled, with the representative selection of the best components in the market. The photodiode is selected by the best response time, according to its circuit and an intensive study of its value. Finally, the system produced was tested, in which, according to between fibers and the time signals we can calculate velocity of detonation.

The results obtained validate the method for the measurement of velocity with optical fibers, with considerable precision of results.

**Keywords** Detonation, Optic Fiber, Detonation Rate, Photodiode, Optoelectronic Converter, Time.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	viii
Siglas .....	ix
1. Introdução .....	10
1.1. Plano e Organização da dissertação de mestrado .....	10
2. Revisão Bibliográfica .....	12
2.1. Detonação .....	12
2.2. Material explosivo – Emulsão Explosiva .....	14
2.3. Radiação térmica – Princípios de emissão e recepção .....	15
3. Componentes e montagem .....	17
3.1. Transmissão - Fibra óptica .....	18
3.1.1. Fibra óptica .....	19
3.2. Recetores - Fotodíodos .....	22
3.2.1. Recetores .....	24
3.3. Equipamento Periférico - Osciloscópio .....	31
3.4. Gerador de luz pulsada .....	31
3.5. Montagem .....	33
4. Resultados com o gerador de pulsos e explosivos .....	34
4.1. Resultados com o gerador de pulsos .....	34
4.1.1. Análise para cada condensador .....	34
4.1.2. Tratamento com recurso ao MS Excel .....	36
4.2. Resultados experimentais com explosivos .....	48
4.2.1. 1º Ensaio .....	50
4.2.2. 2º Ensaio .....	50
4.2.3. 3º Ensaio .....	51
4.2.4. 4º Ensaio .....	52
4.2.5. Medida de velocidade de detonação .....	52
5. Conclusões .....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58
Apêndice A .....	58
Apêndice B .....	62
Anexo A .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Onda de choque, variação das propriedades do material.....	12
Figura 2.2 Cavidade de corpo negro .....	16
Figura 3.1 . Esquema para análise do conversor optoelectrónico .....	17
Figura 3.2 Atenuação da fibra ótica de sílica em função do comprimento de onda (linha sólida) e limites teóricos (linhas tracejadas) .....	18
Figura 3.3 Atenuação da fibra ótica de PMMA em função do comprimento de onda.....	19
Figura 3.4 Fibras óticas de Sílica, multimodo pela Rs-Components .....	20
Figura 3.5 Fibras óticas de Sílica, multimodo pela Thorlabs.....	20
Figura 3.6 Fibras óticas de Sílica, multimodo pela Farnell.....	21
Figura 3.7 Fibra ótica de Sílica – 20m de comprimento .....	21
Figura 3.8 Fibra ótica selecionada - RS Pro 20 m, 50µm, conector A e B SMA .....	22
Figura 3.9 - Característica da fibra da Toray .....	22
Figura 3.10 Esquema da junção PN .....	23
Figura 3.11 Proposta de conexão do fotodíodo num circuito revertido .....	23
Figura 3.12 Circuito RC .....	24
Figura 3.13 Fotodíodos disponíveis da Farnell.com .....	25
Figura 3.14 Fotodíodos disponíveis pela Digi-Key .....	26
Figura 3.15 Sensor disponível pela Hamamatsu .....	26
Figura 3.16 Especificações dos recetores de 820 nm da Rs-Pro .....	27
Figura 3.17 Resposta típica espectral para o Fotodíodo HFBR2406Z.....	28
Figura 3.18 Esquema de circuito proposto do sensor HFBR2406Z.....	28
Figura 3.19 Alteração do circuito proposto do HFBR2406Z.....	29
Figura 3.20 Alteração do circuito proposto para o fotodíodo HFBR2406Z .....	29
Figura 3.21 Circuito de fase positiva .....	30
Figura 3.22 Circuito de fase negativa.....	30
Figura 3.23 Pin – Fotodíodo.....	30
Figura 3.24 Osciloscópio TektronixTDS2024C.....	31
Figura 3.25 Transmissor selecionado para o gerador de luz .....	32
Figura 3.26 Esquema de montagem do sensor optoelectrónico .....	33

---

Figura 4.1 Sinal obtido para o condensador de 0.2nF .....	34
Figura 4.2 Condensador de 1nF a)50ns de campo de visão b)25ns de campo de visão.....	35
Figura 4.3 Condensador de 0,1 $\mu$ F a)50ns de campo de visão b)25ns de campo de visão .	35
Figura 4.4 Os 5 Ensaio para o condensador de 0,2nF .....	36
Figura 4.5 Média $\bar{x}$ - Condensador de 0,2nF .....	37
Figura 4.6 Desvio Padrão, $\sigma$ - Condensador de 0,2nF .....	37
Figura 4.7 Erro padrão – Condensador de 0,2nF .....	38
Figura 4.8 5 Ensaio para o condensador de 1nF .....	38
Figura 4.9 Média $\bar{x}$ - Condensador de 1nF .....	39
Figura 4.10 Desvio Padrão, $\sigma$ - Condensador de 1nF .....	39
Figura 4.11 Erro padrão, SE- Condensador de 1nF.....	39
Figura 4.12 5 Ensaio para o condensador de 100nF .....	40
Figura 4.13 Média $\bar{x}$ - Condensador de 100nF .....	40
Figura 4.14 Desvio Padrão, $\sigma$ - Condensador de 100nF .....	41
Figura 4.15 Erro padrão, SE- Condensador de 100nF.....	41
Figura 4.16 Média do sinal com o tempo adimensional para os três condensadores .....	42
Figura 4.17 Desvio padrão com tempo adimensional .....	42
Figura 4.18 Características do fotodiodo HFBR 2406Z - DataSheet <sup>4</sup> .....	43
Figura 4.19 Suplemento Solver para o condensador de 0.2nF .....	44
Figura 4.20 Sinal teórico e prático - Condensador de 0.2nF .....	44
Figura 4.21 Suplemento solver para o condensador de 1nF .....	45
Figura 4.22 Sinal teórico e prático - Condensador de 1 nF .....	45
Figura 4.23 Excel c/ suplemento Slover para o condensador de 100nF .....	46
Figura 4.24 Sinal teórico e prático - Condensador de 100nF .....	46
Figura 4.25 Carregamento teórico do Condensador medida aos bornos da resistência .....	47
Figura 4.26 Configuração base do cartucho .....	48
Figura 4.27 Cartucho vista de lado, aberturas para inserir as fibras.....	49
Figura 4.28 Ensaio típico com o Trigger .....	49
Figura 4.29 1ºEnsaio - 10mm de Altura e 1% EPS .....	50
Figura 4.30 2ºEnsaio - 15mm de Altura e 2% EPS .....	51
Figura 4.31 3ºEnsaio - 15mm de Altura e 1% EPS .....	51
Figura 4.32 4ºEnsaio - 15mm de Altura e 1% EPS .....	52
Figura 4.33 Velocidade média do 2ºEnsaio.....	54
Figura 4.34 Velocidade média do 4ºEnsaio.....	55

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Diâmetro e Raio.....	53
Tabela 4.2 Velocidade de detonação entre cada fibra - 2º Ensaio ..... <b>Erro! Marcador não definido.</b>	
Tabela 4.3 Velocidade de detonação entre cada fibra - 4º Ensaio .....	54



---

## SIGLAS

BND – Conector Bayonet Neil Concelman

CJ-Chapman e Jouguet

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EoS- Equação de estado

EPS – Poliestireno expandido

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LASER – Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação

LED- Light Emitting Diode

LEDAP- Laboratório de Energica e Detónica, Associação de Apoio

PMMA – Poli-Metil-Met-Acrilato

SMA - SubMiniature Version A

SWG – Generator wave signal

ZND - Zeldovitch-Neuman- Doring

## 1. INTRODUÇÃO

Uma explosão compreende um processo de expansão rápida, após a propagação de uma reação muito rápida de uma massa com uma massa volúmica muito superior ao valor final. Às explosões estão associados diversos efeitos, como a violenta reação química de oxidação, a propagação de um elevado ruído, nuvens de fumo, emissão de luz e projeções de produtos da reacção. Dois regimes se podem observar numa explosão: a deflagração e a detonação, consoante a velocidade de reação é respectivamente subsónica ou supersónica. No caso em estudo apenas se considera a detonação. O modelo mais simples para a descrever pressupõe a frente de reação como uma descontinuidade, isto é um conjunto onda de choque-onda de reação que assegura a sua propagação. A aplicação das equações de conservação (massa, momento e energia) permitem a determinação dos seus principais parâmetros. O explosivo selecionado para os ensaios demonstrativos foi uma emulsão explosiva.

Este trabalho tem como propósito a continuação do desenvolvimento de um sistema simples para detetar os sinais ópticos emitidos durante uma detonação, com o recurso a fibras ópticas, embutidas na emulsão explosiva, conectadas a um analisador de sinal digital, osciloscópio, para a medição dos intervalos de tempo.

### 1.1. Plano e Organização da dissertação de mestrado

No trabalho apresentado foi, primeiramente, realizado o estudo sobre os conceitos teóricos por detrás deste fenómeno. De seguida foi feita a melhoria e seleção através da análise de novos componentes, existentes no mercado e feita a construção deste aparelho de medida metrológico optoelectrónico.

Foram testados diferentes condensadores de modo a se obter o melhor tempo de reposta do fotodíodo que compõe o conversor em estudo, utilizando um gerador de luz pulsada, já existente no laboratório. Posteriormente foi testado o conversor num ensaio real e analisados os resultados obtidos de modo a se obter a velocidade de um explosivo.

No texto que se segue, capítulo 2, é apresentada uma análise teórica sobre a reação de detonação, o conceito de explosivo e o fenómeno físico da radiação. No capítulo 3 são

---

selecionados os componentes, elaborados os circuitos e os procedimentos, para os ensaios, descritos no capítulo 4. No capítulo 4 é ainda feita a análise e discussão dos resultados experimentais, sendo apresentadas as conclusões no capítulo 5.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1. Detonação

Detonação é uma reação química de alta velocidade caracterizada pela propagação à velocidade supersónica de uma onda de choque (onda de pressão) no material fresco. Este fenómeno gera de um modo quase instantâneo altas pressões e gases a alta temperatura.<sup>1</sup>

Os mecanismos de formação de uma onda de choque são deduzidos através da equação de conservação e são explicados pela teoria de Chapman-Jouguet que relaciona as equações de conservação associadas à propagação de uma onda de choque segundo a direção unidimensional, ou seja, a onda é considerada com uma descontinuidade plana em regime permanente.

Como a onda de reação é solidária com a onda de choque que a precede, analisaremos a aplicação das equações de conservação a uma onda de choque. A Figura 2.1, uma onda de choque plana que atravessa o material com velocidade  $U$ , no estado inicial tem uma densidade  $\rho_0$  (ou volume específico  $v_0$ ), uma energia interna específica  $e_0$ , uma pressão  $P_0$  e está animado de velocidade  $u_0$ , na direção e sentido da onda de choque. Após a passagem da onda de choque, as propriedades do material passam para  $\rho_1, e_1, P_1$ , e  $u_1$ .<sup>2</sup>

Num referencial Lagrangeano, ligado à onda de choque, o material é visto a aproximar-se da onda com uma velocidade  $U - u_0$  e a afastar-se da onda de choque com a velocidade  $U - u_1$ .<sup>3</sup>

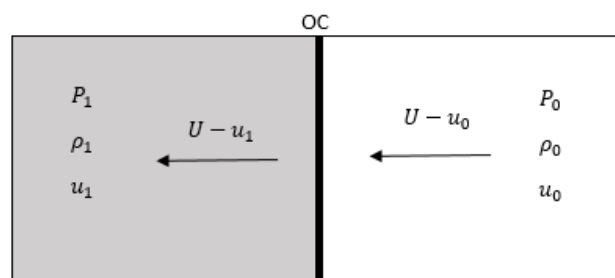


Figura 2.1 Onda de choque, variação das propriedades do material

Tomando o caso particular, em que a velocidade do material  $u_0$  é nula (corpo em repouso) e sendo os valores de  $P_0$  e  $e_0$  desprezáveis relativamente a  $P_1$  e  $e_1$ , respetivamente.

---

Consegue-se assim uma formulação geral das equações de conservação, Equações 2.1, 2.2 e 2.3,

$$\text{Lei de conservação de massa: } \frac{u_p}{u_s} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \quad (2.1)$$

$$\text{Lei de conservação da quantidade de movimento: } P - P_0 = \rho_0 u_p u_s \quad (2.2)$$

$$\text{Lei de conservação da energia: } (e - e_0) = \frac{1}{2} (P + P_0)(v_0 - v) \quad (2.3)$$

Consequentemente, estas três equações características (eq. 2.1, 2.2 e 2.3) não são suficientes para a determinar as características de detonação de um explosivo, continuando este a ser um problema (linearmente) insolúvel, em virtude de termos um sistema de quatro incógnitas e três equações:

- A velocidade de detonação,  $D$  (dependente de  $U$ ),
- A velocidade particular,  $u$
- A pressão de detonação,  $P$
- A massa volúmica,  $\rho_{final}$

De modo a solucionar este problema é necessário primeiro relembrar que as grandezas características ( $P$ ,  $\rho$ ,  $E$ ) de qualquer estado termodinâmico de um meio material não variam de uma forma independente. Pode-se, assim, estabelecer uma relação do tipo  $E(P, \rho, E)=0$ . Esta relação é a equação de estado, que permite correlacionar as diferentes variáveis, para esses estados de equilíbrio.

Numa representação a três dimensões ( $P$ ,  $\rho$ ,  $E$ ) esta equação de estado é uma superfície, designada por superfície de estado e que representa o lugar geométrico de todas as transformações físicas possíveis que o meio material pode ter. Cada transformação física específica é expressa pela relação termodinâmica particular entre  $P$ ,  $\rho$  e  $E$ , ou de grandezas extensivas e intensivas que lhes estão associadas, como por exemplo a entropia  $S$  e a temperatura  $T$ . Pode-se ainda mesmo transformar a equação de estado na forma energética

na correspondente entrópica. Esta é a 4ª equação, ficando assim solucionado o problema. Desta solução há duas grandezas fundamentais a determinar: a velocidade de detonação  $D$  e a energia  $E$ . O valor médio de  $D$  (assumindo a onda de detonação como uma descontinuidade plana numa secção) pode ser medido pelo intervalo de tempo entre a alteração de uma propriedade, em 2 secções consecutivas, em que se conheça, de início, a distância entre elas:

$$D = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Muitas vezes a metodologia aplicada para a medida da velocidade de detonação permite também a medida da pressão, medindo a velocidade do choque, induzido pelo explosivo, numa fina placa de impedância de choque conhecida. A energia exige geralmente uma metodologia mais complexa, medindo a energia de expansão dos produtos de detonação.

## 2.2. Material explosivo – Emulsão Explosiva

Um explosivo define-se como sendo uma substância energética capaz de libertar energia num curto espaço de tempo, através duma reação química rápida e auto-propagável em toda a sua massa sem a participação de qualquer agente exterior. Esta decomposição gera temperaturas elevadas e é acompanhada pela formação de um grande volume de gases, conduzindo a um grande aumento de pressão.<sup>4</sup>

A maioria dos explosivos puros apresentam-se no estado líquido ou sólido. De forma a melhorar as propriedades mecânicas, térmicas ou de sensibilidade ao choque é adicionado outro explosivo ou um material inerente.

Neste trabalho é utilizado uma mistura saturada de nitrato de amónio, com óleo natural e água. O uso de emulsões explosivas permite um manuseamento seguro e têm uma massa volúmica entre 0,8 e 1,11g/cm<sup>3</sup>.

A sensibilidade é a facilidade que um explosivo tem em poder ser iniciado à detonação. Em função do tipo de sensibilidade usado, a emulsão explosiva pode ser sensível ao detonador ou precisar de um explosivo reforçador.

---

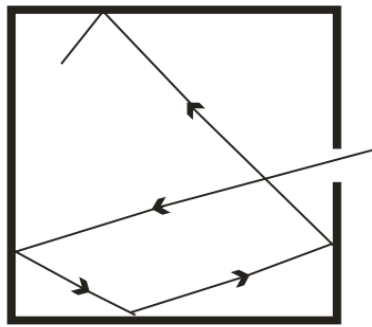
Para se obter a melhor *performance* da emulsão adiciona-se um material polimérico, como o poliestireno expandido (EPS) de modo a diminuir a massa volúmica do explosivo levando ao aumento da velocidade de detonação, sem comprometer a sua vulnerabilidade a iniciação accidental.

Todas as composições que se apresenta são valores de aproximação. Isto é, não só por não se saber exactamente quais as composições realmente utilizadas na formulação industrial, mas também por se utilizarem industrialmente componentes complexas cuja aproximação é feita por componentes de composição mais simples. Assim, admite-se que a composição da emulsão explosiva é constituída por uma solução aquosa de nitrato de amónio, a 11% de concentração em água, emulsionada com uma mistura de óleos e emulsionantes, sensibilizada por esferas ocas de polietileno, com densidade ente os 0,15 e os 0,4 g/cm<sup>3</sup>.

### **2.3. Radiação térmica – Princípios de emissão e receção**

Os produtos de detonação emitem radiação, nos mais variados comprimentos de onda, através do aquecimento dos gases provenientes da detonação, as fibras ópticas (PMMA ou Sílica) transmitem eficazmente em apenas alguns comprimentos de onda, dado que fora destes valores há uma grande atenuação sentida na fibra.

Um modelo e exemplo idealizado de corpo negro é demonstrado na Figura 2.2, em que se representa uma cavidade com uma pequena abertura. A energia radiante incidente sobre a abertura é absorvida e emitida pelas paredes gerando múltiplas reflexões. Somente uma pequena parte, quase desprezável, consegue escapar, ou seja, é refletida para fora da cavidade. Praticamente toda a energia é absorvida. A abertura da cavidade tem propriedades de uma superfície de corpo negro Este corpo emite mais radiação do que qualquer outro corpo.



**Figura 2.2** Cavidade de corpo negro

Na natureza, é muito difícil encontrar-se este corpo ideal, pois a superfície do corpo tem de absorver toda a região do espectro eletromagnético, não apenas uma parte desse espectro, mas é possível encontrar corpos que se comportam como corpos negros para certas partes do espectro eletromagnético.

Existem muitas complexidades matemáticas intrínsecas a problemas que consideram a radiação conjunta com condução e convecção, estas resultam na resolução de equações diferenciais integrais complicadas, devido à necessidade de resolução de integrais com diferentes potências<sup>5</sup>.

Um corpo negro possui as seguintes propriedades<sup>5</sup>:

- É um emissor perfeito;
- A sua radiação é isentrópica quando colocada no interior de um invólucro preto;
- É um emissor perfeito em qualquer direção e comprimento de onda;
- A sua radiação total é só função da temperatura.

Estas propriedades são demonstradas pelas leis da termodinâmica, em que a segunda explica este fenómeno físico, pois dois sistemas fechados em contacto térmico tendem a atingir o equilíbrio térmico e um sistema com temperatura mais baixa não pode transmitir energia a outro, que se encontra com uma temperatura mais elevada

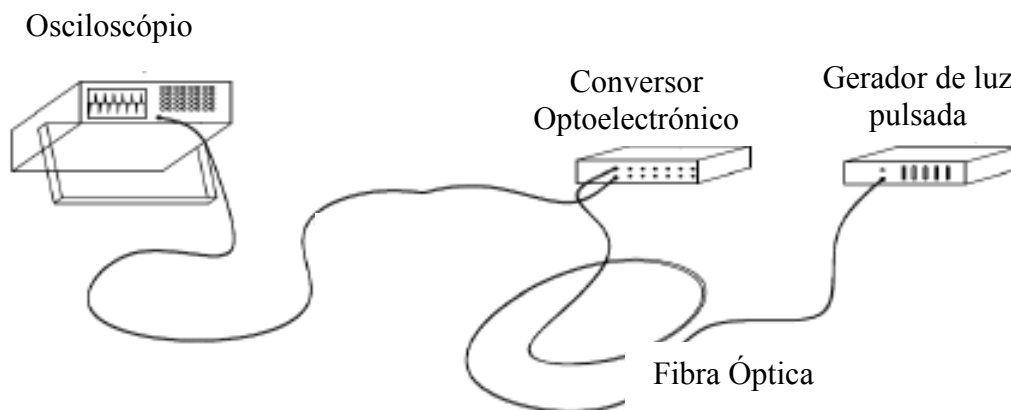
De modo a se compreender as formulações matemáticas que descrevem este fenómeno da transmissão de radiação eletromagnética para um corpo negro é necessário a noção de vários conceitos que são enunciados no apêndice A.



---

### 3. COMPONENTES E MONTAGEM

O sistema representado na Figura 3.1, já existe em laboratório e foi utilizado para analisar os valores gerados pelo conversor optoelectrónico. O gerador de luz pulsada simula a radiação proveniente da onda de detonação. A fibra óptica transmite este sinal óptico até ao fotodíodo, que irá constituir o conversor optoelectrónico. Através do circuito elétrico do fotodíodo analisa-se o fluxo gerado pelo conjunto de uma resistência e um condensador que é assim conectado ao osciloscópio por um cabo com conector do tipo *Bayonet Neil-Concelman*, mais conhecido como conector BNC.



**Figura 3.1** . Esquema para análise do conversor optoelectrónico<sup>6</sup>

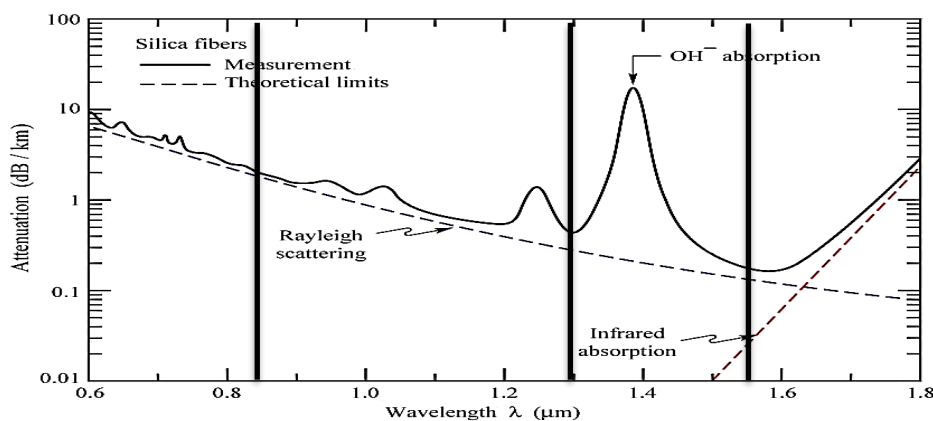
Todo este equipamento funciona devido ao fenómeno de radiação, com exceção do osciloscópio. Para se proceder à escolha dos equipamentos para este conversor optoelectrónico faz-se uma abordagem teórica sobre o funcionamento de todo o sistema e procede-se à escolha dos componentes em mercado do equipamento em estudo.

### 3.1. Transmissão - Fibra óptica

É muito importante obter a máxima radiação proveniente do fenómeno explosivo, de modo que o fotodíodo detete a radiação máxima possível, ou seja, nos mais diversos comprimentos de onda. Assim foi feito o estudo para dois tipos de fibras multimodo: de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e de polimetil-metacrilato, mais conhecido como PMMA.

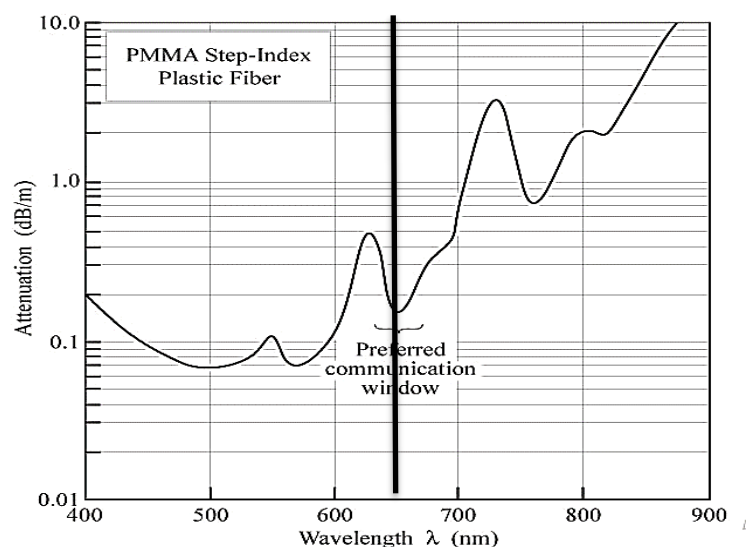
As fibras de sílica apresentam boa durabilidade e menores atenuações quando comparadas às fibras de PMMA, como se observa Figura 3.2 e Figura 3.3.

A partir da Figura 3.2, constata-se que as fibras ópticas de sílica possuem três janelas de transmissão para comprimentos de onda de 0,85, 1,3 e 1,55  $\mu\text{m}$ . As perdas são, respectivamente, 1,8, 0,5 e 0,2  $\text{dB/km}$ <sup>6,7</sup>.



**Figura 3.2** Atenuação da fibra óptica de sílica em função do comprimento de onda (linha sólida) e limites teóricos (linhas tracejadas)

A Figura 3.3 mostra a atenuação das fibras ópticas de PMMA, onde a janela de transmissão mais favorável é de 650nm, com uma perda de 0,2  $\text{dB/m}$ . No entanto, este valor de atenuação pode sofrer alterações conforme o diâmetro e comprimento de fibra. As fibras ópticas de PMMA são utilizadas na maior parte das vezes para curtas distâncias, pois possuem perdas 1000 vezes superiores as fibras de sílica. Desta forma, consoante o tipo de fibra escolhida, se procede à escolha do fotodíodo, que deverá ser sensível à região onde a atenuação na fibra é menor.



**Figura 3.3** Atenuação da fibra óptica de PMMA em função do comprimento de onda

Numa análise primária, seria de esperar que o uso de fibras de PMMA fosse mais apropriado considerando os valores de radiação obtidos e a bibliografia existente sobre a temperatura de detonação. Contudo, devido ao problema de atenuação da fibra de PMMA que se desfaz ao sofrer um grande choque, as fibras de sílica tornam-se melhores do que as de PMMA.

### 3.1.1. Fibra óptica

Para a aquisição da fibra óptica necessária, foi conduzida uma pesquisa seguindo as propriedades requisitadas. Foi definido como objetivo a escolha de fibras com terminal incorporado de conector tipo *SubMiniature Version A*, conhecido como SMA. As fibras deverão ser constituídas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), com modo de transmissão multimodo e comprimento mínimo de 20 metros.

A empresa RS-componentes <sup>8</sup> têm 2 fibras óticas com especificações desejadas, a Figura 3.4 mostra as fibras em questão,

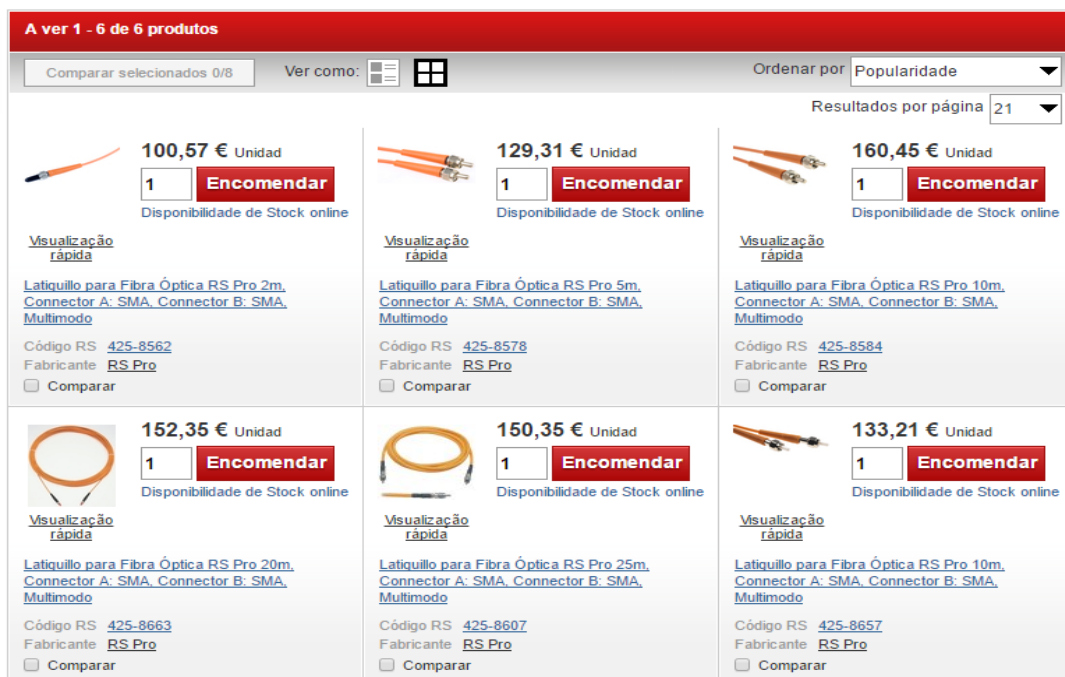


Figura 3.4 Fibras ópticas de Sílica, multimodo pela Rs-Components<sup>8</sup>

Como se pretende uma fibra óptica com um comprimento de pelo menos 20 metros, há apenas duas fibras que apresentam as especificações pretendidas, das duas, a única escolha possível é a fibra ótica RS Pro 20m, Conector A SMA, Conector B SMA, Multimodo, pois possui o diâmetro de core dentro das condições necessárias.

A empresa Thorlabs<sup>9</sup>, apresenta diversas fibras com as especificações pretendidas, como se visualiza na Figura 3.5. As fibras com o núcleo de sílica da *Thorlabs* têm diâmetros que variam de 10 a 1500µm e apenas com comprimentos até 5 metros. Portanto, por não possuir o comprimento mínimo, não se considerou esta companhia para a escolha da fibra.



Figura 3.5 Fibras ópticas de Sílica, multimodo pela Thorlabs<sup>9</sup>

A empresa Farnell<sup>10</sup> com as condições pretendidas apresenta 3 produtos, estes estão apresentados na Figura 3.6,

Código de encomenda	Nº da peça do fabricante	Fabricante / Descrição
1208907	A65A152A0 <a href="#">Technical Data Sheet (41.23KB) EN</a> Conformidade RoHS	<b>FIBRE DATA</b> <b>LEAD, FIBRE OPTIC, 2M</b> ★★★★★ (0) No. of Fibres <b>1Fibres</b> Fibre Type <b>Hard-Clad Silica</b> Fibre Diameter <b>200µm</b> <a href="#">+ Ver todas as informações sobre o produto</a>
1208864	A10B5L20A0 <a href="#">Technical Data Sheet (288.63KB) EN</a> Conformidade RoHS	<b>FIBRE DATA</b> <b>LEAD, FIBRE OPTIC, 20M</b> ★★★★★ (0) No. of Fibres <b>1Fibres</b> Fibre Type <b>Multimode</b> Fibre Diameter <b>50µm</b> <a href="#">+ Ver todas as informações sobre o produto</a>
1208908	A65A155A0 <a href="#">Technical Data Sheet (41.23KB) EN</a> Conformidade RoHS	<b>FIBRE DATA</b> <b>LEAD, FIBRE OPTIC, 5M</b> ★★★★★ (0) No. of Fibres <b>1Fibres</b> Fibre Type <b>Hard-Clad Silica</b> Fibre Diameter <b>200µm</b> <a href="#">+ Ver todas as informações sobre o produto</a>

Figura 3.6 Fibras ópticas de Sílica, multimodo pela Farnell<sup>10</sup>

As três fibras apresentam as mesmas características, a fibra mais apropriada ao caso em estudo é a que apresenta um maior comprimento, 20 metros, a suas especificações são apresentadas na Figura 3.7.



Fabricante: FIBRE DATA  
 Código Farnell 1208864  
 Nº da peça do fabricante A10B5L20A0  
[Technical Data Sheet \(288.63KB\) EN](#)

Q Fazer zoom

*A imagem é meramente ilustrativa. Consulte a descrição do produto.*

### Especificações de produtos, documentos e outros

- Fibre Optic Connector A
- Fibre Optic Connector B
- No. of Fibres 1Fibres
- Fibre Type Multimode
- Fibre Diameter 50µm
- Product Range -
- SVHC No SVHC (15-Jun-2015)

Figura 3.7 Fibra óptica de Sílica – 20m de comprimento<sup>10</sup>

Em laboratório já se encontram disponível dois tipos de fibras. A Figura 3.8 apresenta a fibra da *RS-Components* Pro 20m com Conector A SMA, Conector B SMA, Multimodo.

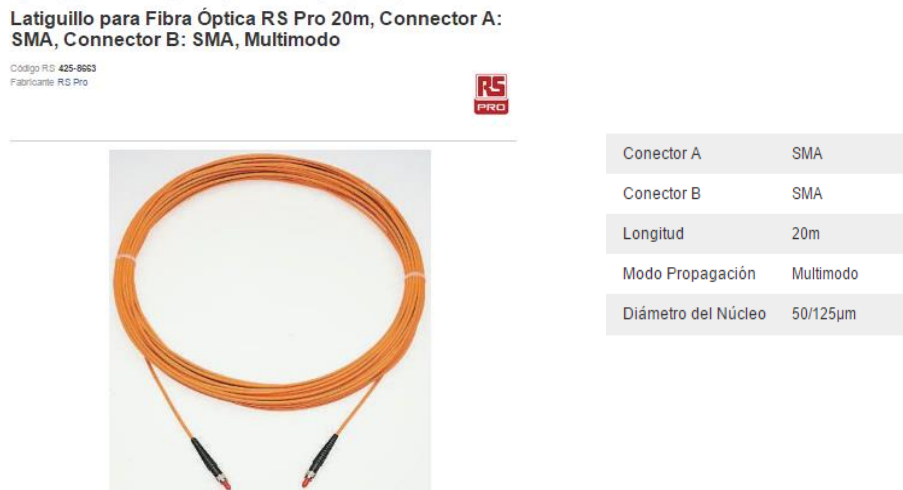


Figura 3.8 Fibra óptica selecionada - RS Pro 20 m, 50µm, conetor A e B SMA<sup>11</sup>

Na Figura 3.9 está apresentada a outra fibra disponível também em laboratório: *Toray* PGS-FB 250 com 12000m de comprimento.

Grade	Product Code	Fiber Diameter (mm)	Fiber Length On Spool (m)	Attenuation dB/m (at 650nm)
S	PGS-FB 265	0.265	12,000	-0.30
	PGS-FB 250	0.250	12,000	-0.30

Figura 3.9 - Característica da fibra da Toray<sup>12</sup>

### 3.2. Recetores - Fotodíodos

Os recetores são utilizados para detetar a radiação proveniente da fibra óptica e converter o sinal óptico em elétrico de modo a ser analisado pelo osciloscópio.

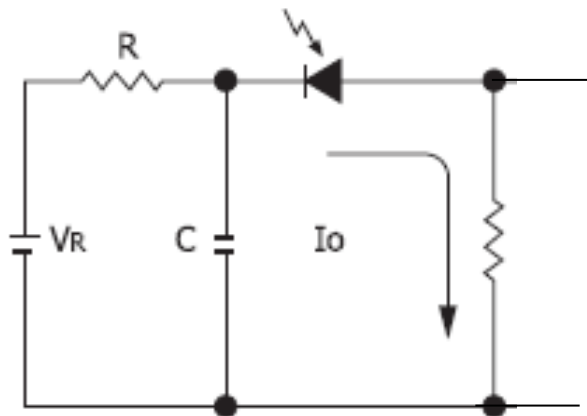
Os fotodíodos são semicondutores baseados na reação em junção PN, com uma interface entre duas camadas diferentes de um material semicondutor dopado, P(Positivo) e N (Negativo), Figura 3.10



**Figura 3.10** Esquema da junção PN

A interface semicondutora, normalmente de silício, tem a característica de variar a sua resistência elétrica em função da intensidade da luz (número de fótons) nela incidente, de duas formas distintas: como uma célula fotovoltaica, gerando tensão quando recebe luz, ou como uma célula fotocondutiva, gerando corrente quando recebe luz.

Assim, os fotodíodos utilizados foram montados com base no princípio de modo de polarização inversa em que este é montado com uma diferença de potencial inversa em relação ao díodo tradicional, sendo esta aplicada aos terminais do fotodíodo. Ou seja, a corrente vai do cátodo para o ânodo, mantendo uma grande linearidade da corrente prevenindo a saturação do sensor, mesmos para grandes intensidades de luz. O fotodíodo torna-se num gerador de corrente com uma resistência, havendo amplificação do sinal. <sup>13</sup>



**Figura 3.11** Proposta de conexão do fotodíodo num circuito revertido <sup>13</sup>

A utilização do circuito com polarização reversa aumenta os níveis de ruído e da corrente escura, que faz com que a depleção cresça, ou seja, a área sensível à luz incidente torna-se maior. Com o aumento da concertação da luz no fotodíodo o tempo de resposta diminui, tornando o fotodíodo mais rápido, assim se garante que o cátodo é mantido num potencial positivo em comparação com o ânodo. <sup>13</sup>

O circuito com polarização inversa é um circuito muito simples, em que se optou pela utilização de um circuito simples RC. Este é formado por uma resistência e um condensador, que podem estar ligados tanto em série como em paralelo, sendo alimentados por uma fonte de tensão, como se demonstra na Figura 3.12 (Em que C representa o condensador, R a resistência e  $\varepsilon$  é a fonte de alimentação.) O circuito RC é um dos mais simples filtros eletrônicos de resposta de impulso infinita analógicos.

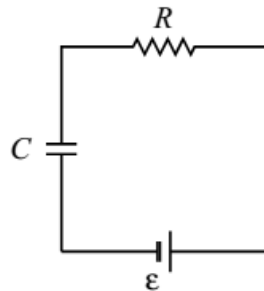


Figura 3.12 Circuito RC

O recetor escolhido foi um fotodíodo que seja sensível ao comprimento de onda de 820nm. Outro fator importante é o seu tempo de resposta. Esta característica é relevante para a precisão das medições nos ensaios realizados. Assim, foi imposto que o tempo de resposta não seja superior a 50 ns, garantindo deste modo e uma boa precisão na medição efetuada.

### 3.2.1. Recetores

De modo a escolher o recetor necessário para converter o sinal óptico em elétrico é efetuada a pesquisa no mercado deste tipo de componentes e é apresentada de seguida. É importante referir que esta foi feita tendo em conta os seguintes parâmetros:

- Ser analógico
- Ter um comprimento de onda 820nm
- Conector SMA
- Menor tempo de resposta

A empresa Farnell.com, Figura 3.13, apresenta 4 desses fotodíodos disponíveis, o único possível é o HFBR2406Z, pois os restantes apresentem uma montagem diferente da SMA, que é a pretendida.



Referencia del fabricante	Código Farnell	Fabricante / Descripción
<input type="checkbox"/> <b>HFBR-2416Z</b> 	<b>1173150</b>  Technical Data Sheet (291.00KB) EN  Conforme a RoHS	<b>BROADCOM LIMITED</b> <b>Receptor de Fibra Óptica, Puerto ST, 820 nm, 160 Mbaud, 2700 m</b> ★★★★★ (0) Longitud de Onda Típ... <b>820nm</b> Velocidad Máx. de Da... <b>160Mbaud</b> Distancia de Transmis... <b>2700m</b> <a href="#">+ Ver toda la información del producto</a>
<input type="checkbox"/> <b>HFBR-2406Z</b> 	<b>1173149</b>  Technical Data Sheet (476.60KB) EN  Conforme a RoHS	<b>BROADCOM LIMITED</b> <b>Receptor de Fibra Óptica, Puerto SMA, 820 nm, 155 Mbps, 2.7 km</b> ★★★★★ (0) Longitud de Onda Típ... <b>820nm</b> Velocidad Máx. de Da... <b>155Mbps</b> Distancia de Transmis... <b>2.7km</b> <a href="#">+ Ver toda la información del producto</a>
<input type="checkbox"/> <b>HFBR-2416MZ</b> 	<b>1247652</b>  Technical Data Sheet (71.48KB) EN	<b>BROADCOM LIMITED</b> <b>Receptor de Fibra Óptica, Puerto ST, 820 nm, 0.16 Gbps, 2700 m</b> ★★★★★ (0) Longitud de Onda Típ... <b>820nm</b> Velocidad Máx. de Da... <b>0.16Gbps</b> Distancia de Transmis... <b>2700m</b> <a href="#">+ Ver toda la información del producto</a>
<input type="checkbox"/> <b>HFBR-2416TZ</b> 	<b>1247654</b>  Technical Data Sheet (291.00KB) EN  Conforme a RoHS	<b>BROADCOM LIMITED</b> <b>Receptor de Fibra Óptica, Puerto ST, 820 nm, 160 Mbaud, 2700 m</b> ★★★★★ (0) Longitud de Onda Típ... <b>820nm</b> Velocidad Máx. de Da... <b>160Mbaud</b> Distancia de Transmis... <b>2700m</b> <a href="#">+ Ver toda la información del producto</a>

Figura 3.13 Fotodíodos disponíveis da Farnell.com<sup>14</sup>

A empresa *Digi-Key* apresenta 9 fotodíodos, Figura 3.14. O fotodíodo da *TT Electronics* OPF550 e OPF562 e os da *Broadcom* com a referência HFBR2x1xx são descartados das opções porque não tem a ligação SMA. O fotodíodo da *BroadCom* HFBR2406Z e da *TT Electronics* OPFF2416T/TC, cumprem os requisitos pretendidos com o mesmo tempo de resposta de 6.3ns. Contudo, o componente da *Broadcom* tem uma melhor velocidade de sinalização de 160MBd, enquanto os outro apresenta um valor de 155MBd.





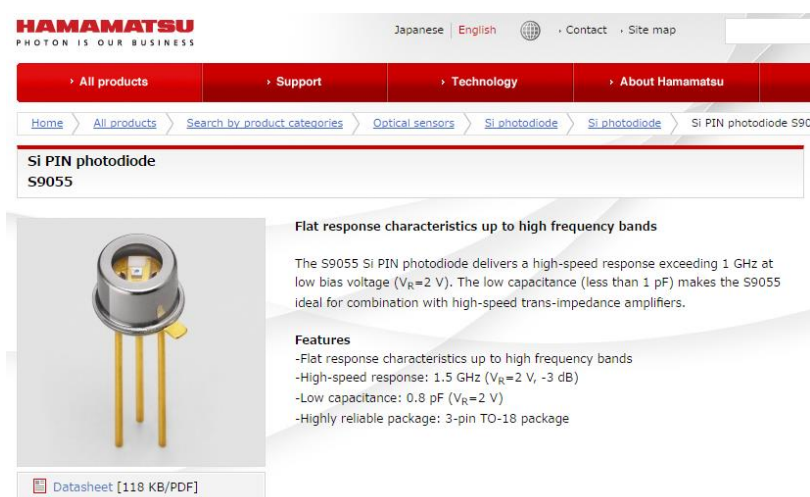
Image	Digi-Key Part Number		Manufacturer Part Number		Manufacturer		Description		Voltage - Supply		Power - Minimum Receivable		Current - Supply		Applications	
	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼
	<a href="#">516-2052-5-ND</a>		<a href="#">HFBR-2316TZ</a>		<a href="#">Broadcom Limited</a>		RECEIVER FIBER OPTIC ST 1300NM		4.75 V ~ 5.25 V		-45dBm		15mA			-
	<a href="#">385-1835-5-ND</a>		<a href="#">OPF2416TC</a>		<a href="#">TT Electronics/Optek Technology</a>		RCVR MOD FIBR OPTIC 125 MHZ DIP		4.75 V ~ 5.25 V		-7.6dBm		15mA			General Purpose
	<a href="#">516-2201-ND</a>		<a href="#">HFBR-2416MZ</a>		<a href="#">Broadcom Limited</a>		RCVR MOD FIBER OPTIC 125MHZ ST		4.75 V ~ 5.25 V		-		6.2mA			General Purpose
	<a href="#">FB137-ND</a>		<a href="#">IF-D08</a>		<a href="#">Industrial Fiberoptics</a>		DETECTOR PHOTOLOG FO 155MBPS		4.75 V ~ 5.25 V		-22dBm		40mA			General Purpose
	<a href="#">516-2413-ND</a>		<a href="#">HFBR-2406Z</a>		<a href="#">Broadcom Limited</a>		RCVR MOD FIBER OPT 125MHZ SMA		4.75 V ~ 5.25 V		-		-			General Purpose
	<a href="#">385-1025-5-ND</a>		<a href="#">OPF2416T</a>		<a href="#">TT Electronics/Optek Technology</a>		RECEIVER FIBER OPTIC 125MHZ		4.75 V ~ 5.25 V		-43dBm		15mA			General Purpose
	<a href="#">385-1845-ND</a>		<a href="#">OPF682</a>		<a href="#">TT Electronics/Optek Technology</a>		RECEIVER FIBER OPTIC 125MHZ		4.75 V ~ 5.25 V		-7.6dBm		15mA			General Purpose
	<a href="#">516-2200-ND</a>		<a href="#">HFBR-2414TZ</a>		<a href="#">Broadcom Limited</a>		RCVR MOD HP FIBER OPTIC ST		4.75 V ~ 5.25 V		-		6.2mA			General Purpose
	<a href="#">385-1844-ND</a>		<a href="#">OPF680</a>		<a href="#">TT Electronics/Optek Technology</a>		RECEIVR FIBER OPTIC 125MHZ TO-18		4.75 V ~ 5.25 V		-43dBm		15mA			General Purpose

Figura 3.14 Fotodíodos disponíveis pela Digi-Key<sup>15</sup>

A empresa *Hamamatsu* apresenta diversos fotodíodos, Figura 3.15. Contudo, nenhum dos produtos têm incorporado a ligação SMA, por isto descartou-se esta companhia.



**HAMAMATSU**  
PHOTON IS OUR BUSINESS

Japanese | English | Contact | Site map

[All products](#) | 
 [Support](#) | 
 [Technology](#) | 
 [About Hamamatsu](#)

[Home](#) > 
 [All products](#) > 
 [Search by product categories](#) > 
 [Optical sensors](#) > 
 [Si photodiode](#) > 
 [Si photodiode](#) > 
 Si PIN photodiode S9055

**Si PIN photodiode S9055**

**Flat response characteristics up to high frequency bands**

The S9055 Si PIN photodiode delivers a high-speed response exceeding 1 GHz at low bias voltage ( $V_R=2$  V). The low capacitance (less than 1 pF) makes the S9055 ideal for combination with high-speed trans-impedance amplifiers.

**Features**

- Flat response characteristics up to high frequency bands
- High-speed response: 1.5 GHz ( $V_R=2$  V, -3 dB)
- Low capacitance: 0.8 pF ( $V_R=2$  V)
- Highly reliable package: 3-pin TO-18 package

[Datasheet \[118 KB/PDF\]](#)

Figura 3.15 Sensor disponível pela Hamamatsu<sup>16</sup>

Das especificações pedidas há dois sensores de 820 nm disponíveis em mercado pela RS-Components, Figura 3.16<sup>8</sup>.

Descrição	Receptor de Fibra Óptica Broadcom, 5MBd, 820nm, Conector SMA	Receptor de Fibra Óptica Broadcom, 160MBd, 820nm, Conector SMA
		
	236-666 <a href="#">Visualização rápida</a>	236-688 <a href="#">Visualização rápida</a>
Fabricante	Broadcom	Broadcom
Referencia Fabricante	HFBR-2402Z	HFBR-2406Z
Info. téc.		
Tiempo de Subida Típico	-	6.3ns
Altura	10.2mm	10.2mm
Dimensiones	27.2 x 12.7 x 10.2mm	27.2 x 12.7 x 10.2mm
Velocidad Máxima de Datos	5MBd	160MBd
Tipo de Montaje	Montaje en orificio pasante	Montaje en orificio pasante
Anchura	12.7mm	12.7mm
Tipo de Conector	SMA	SMA
Número de Pines	8	8
Forma del Conector	Redondo	Redondo
Longitud	27.2mm	27.2mm
Longitud de Onda de la Sensibilidad de Pico	820nm	820nm

**Figura 3.16** Especificações dos recetores de 820 nm da Rs-Pro<sup>17</sup>

Os dois sensores apresentados têm as condições necessárias, mas a melhor escolha é o fotodíodo da HFBR-2406Z, pois apresenta uma melhor velocidade de sinalização de 160MBd enquanto o outro apresenta apenas 5MBd.

É importante destacar que o emissor possui um comprimento de onda menor que o fotodíodo escolhido. Porém, o varrimento do fotodíodo opera entre os 400nm e os 1000nm, ou seja, é capaz de detetar a luz emitida pelo gerador de luz. Apesar do fotodíodo apresentar um valor mais baixo de capacidade de absorção da luz para os 650nm (sua performance máxima é para os 820nm), aos 650nm ele apresenta uma fiabilidade de aproximadamente 90%, Figura 3.17<sup>18</sup>.

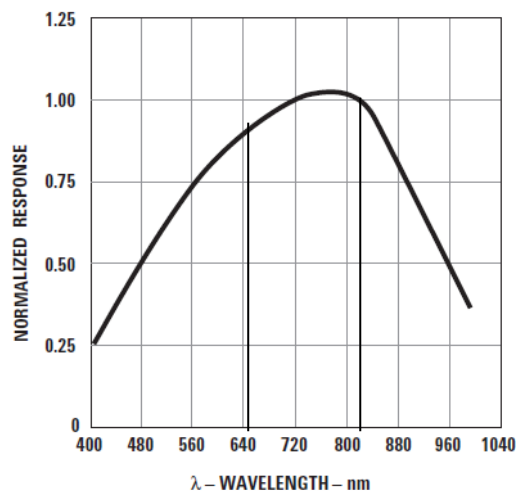


Figura 3.17 Resposta típica espectral para o Fotodíodo HFBR2406Z<sup>18</sup>

### 3.2.1.1. Montagem dos recetores

A radiação proveniente das fibras óticas é recebida pelo fotodíodo que a converte em sinal elétrico. Foi desenvolvido o conversor optoelectrónico analógico, como uma sensibilidade de 820nm. Os sensores foram montados consoante as especificações do fabricante, em placa de circuito impresso de dupla face e fotossensível. O circuito elétrico utilizado é o obtido através da *datasheet* disponível pelo fabricante do sensor HFBR-2406Z, Figura 3.18.

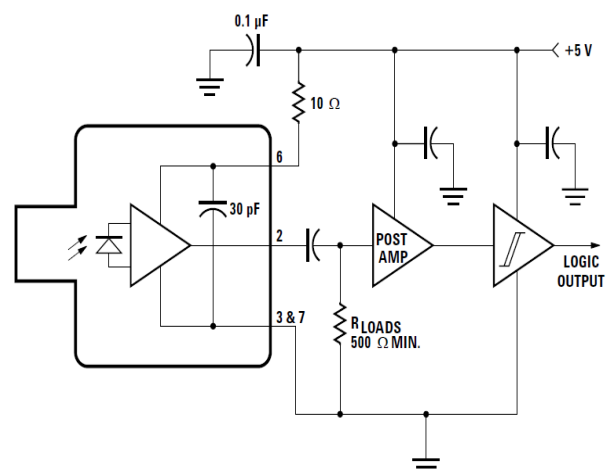
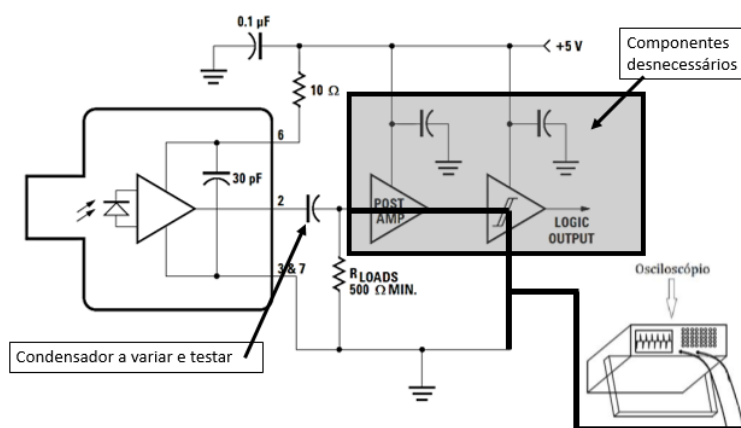


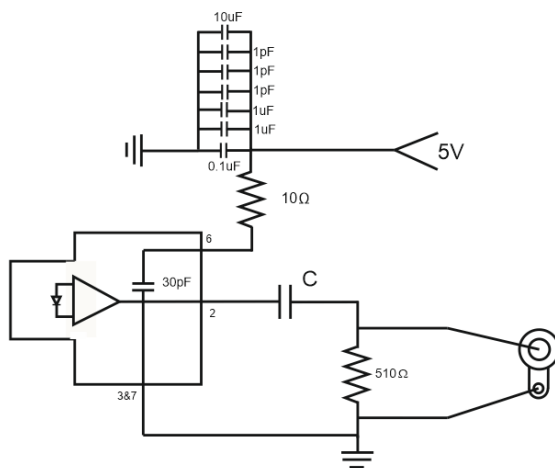
Figura 3.18 Esquema de circuito proposto do sensor HFBR2406Z<sup>18</sup>

Como base neste circuito é assim realizado uma reconfiguração, de modo a simplificar o circuito visto que a amplificação do sinal é feita pelo osciloscópio e deste modo este circuito transforma-se num circuito muito simples, RC.

Com base no *datasheet*, o circuito é redesenhado como se apresenta na Figura 3.19 e Figura 3.20, em que o sinal é lido entre o condensador e a resistência de 510Ω.



**Figura 3.19** Alteração do circuito proposto do HFBR2406Z



**Figura 3.20** Alteração do circuito proposto para o fotodiodo HFBR2406Z

A representação real na placa de circuito impresso de dupla face é demonstrada na Figura 3.21 que representa o circuito de fase positiva - parte de cima da placa. Já a Figura 3.22 representa a parte de trás da placa com o circuito de fase negativa, que faz a ligação à terra.

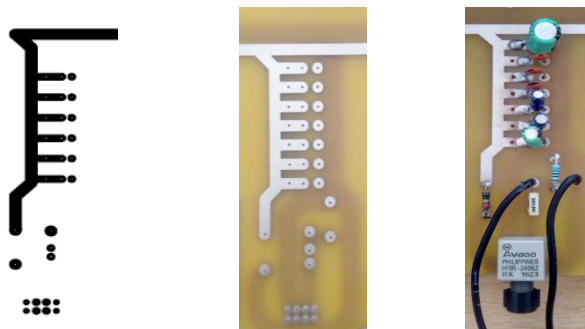


Figura 3.21 Circuito de fase positiva



Figura 3.22 Circuito de fase negativa

A Figura 3.23 apresenta a disposição de cada *pin* do fotodiodo, em que cada um dos fotodíodos é montado da seguinte forma o *pin* 6 é conectado a uma série de condensadores em paralelo entre si com diferentes capacidades. Três condensadores de 1pF, dois condensadores de 1μF, um condensador de 10μF e um condensador de 0,1μF, com uma resistência de 10Ω de modo tornar o sinal de energia gerada pela fonte de alimentação de 5V o mais estável possível. Ao *pin* 2 é adicionado um condensador em que se testou a sua capacidade pra que transmita o melhor tempo de resposta do sinal possível do fotodiodo, além de uma resistência de 510Ω para garantir a segurança do mesmo. Os *pin* 3 e 7 estão ligados à terra e os *pin* 1, 4, 5 e 8 são *pin* de fixação do sensor.

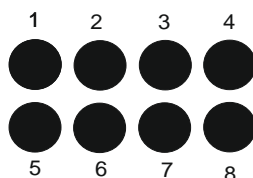


Figura 3.23 Pin – Fotodíodo

---

### 3.3. Equipamento Periférico - Osciloscópio

De modo a verificar e realizar os ensaios em laboratório recorreu-se ao uso de um osciloscópio. Este equipamento permite gravar um sinal elétrico através dos fotodíodos, como também tem a capacidade de gravar no momento exato que a radiação é detetada pelos sensores provenientes do fenómeno de detonação através da função *Trigger*.

O osciloscópio utilizado é o TektronixTDS2024C que é apresentado na Figura 3.24. Possui 4 canais e tem a vantagem do *Trigger* poder ser alternado em cada canal individualmente. No entanto, a característica mais relevante é a escala de sensibilidade máxima de 1ns, muito útil considerando que os sensores utilizados têm um tempo de resposta de 6,3ns. Os dados gerados podem ser gravados através de um dispositivo de memória *USB Flash drive*.



Figura 3.24 Osciloscópio TektronixTDS2024C

### 3.4. Gerador de luz pulsada

O gerador laser de pulsos já se encontra em laboratório, este é composto por um transmissor laser de 650nm que gera um pulso de luz com uma determinada frequência, efetuando a medição do tempo de subida e descida do recetor. Este equipamento é também constituído por um transmissor de radiação que está ligado a um mostrador analógico de modo a medir a intensidade da luz emitida pela fibra. Assim, permite a uma boa indicação da intensidade do sinal e indica se o sinal é suficiente para ser detetado pelo osciloscópio. É extremamente importante entender que um transmissor tem que emitir um comprimento de onda igual ao que irá ser detetado pelo recetor.

O transmissor utilizado para a montagem do gerador de luz é mostrado na Figura 3.25, que representa o circuito elétrico do transmissor HFBR-1404 Z em que se demonstra o circuito elétrico proposto pelo *datasheet* do fabricante, utilizado como base.

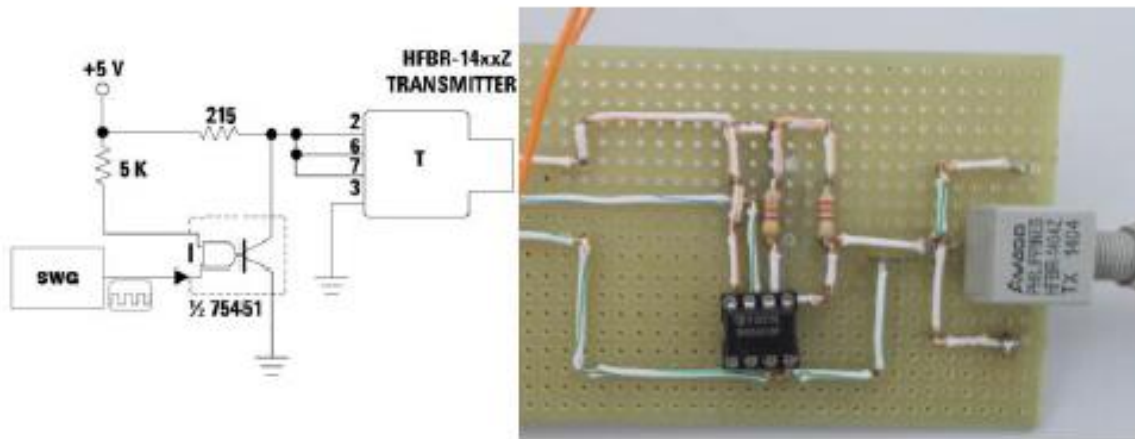


Figura 3.25 Transmissor selecionado para o gerador de luz<sup>6</sup>

O gerador de sinal de onda (SWG) é necessário para acoplar o circuito elétrico dos transmissores, este possui um componente principal do circuito integrado LMC 555, em que a sua frequência varia em função do valor das resistências do seu circuito. Deste modo, é utilizado valores de resistências que maximizassem a frequência do sinal gerado (a frequência dos impulsos). Assim, é discriminada a ligação com o SWG ao circuito integrado 75451. Este circuito elétrico permite que o emissor seja desligado quando o SWG transmite uma voltagem de 5V ao transístor. Este componente desvia a corrente para a “terra”, coloca o circuito integrado em curto-circuito e, portanto, permite que o transmissor não aqueça ao emitir luz pulsada<sup>6</sup>.

O gerador de sinal de onda utilizado já se encontra em laboratório, este possui as seguintes características: frequência de 3,59MHz, um tempo de subida e descida de 20ns 30ns respectivamente e corresponde a um pulso de 278,55ns<sup>6</sup>.



---

### 3.5. Montagem

Posteriormente foi realizada a montagem de conversores optoelectrónicos num equipamento de vários canais, Figura 3.26, de modo a se medir a velocidade e pressão de um ensaio de detonação com várias fibras. O gerador laser de impulsos existente no laboratório é composto por um transmissor laser de 650nm que gera um pulso de luz de determinada frequência, de modo a efetuar a medição do tempo de subida e descida do recetor. No equipamento onde se encontra o gerador de impulsos, existe também embutido um recetor de radiação ligado a um mostrador analógico para medir a intensidade da luz emitida pela fibra. Isto permite dar uma boa indicação da intensidade do sinal, podendo assim determinar se este é forte o suficiente para ser detetado pelo osciloscópio.

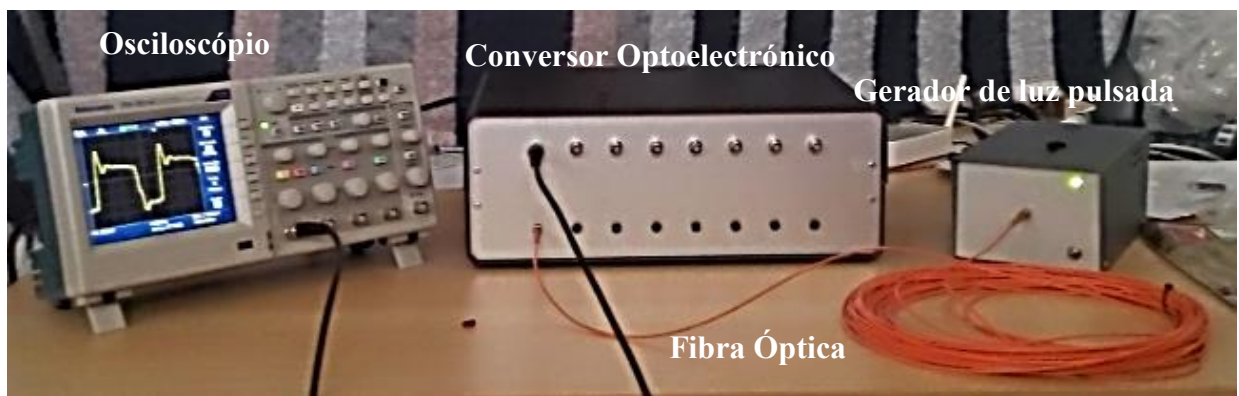


Figura 3.26 Esquema do conjunto do equipamento de medida.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS - GERADOR DE PULSOS E EXPLOSIVOS

### 4.1. Resultados com o gerador de pulsos

Após a escolha dos devidos componentes e montagem do sistema de medida, o mesmo foi testado de modo a validar o seu funcionamento, selecionado o condensador mais adequado para o menor tempo de resposta.

#### 4.1.1. Análise para cada condensador

Foram testados diferentes condensadores, numa escala crescente de valores. Com recurso ao osciloscópio obtém-se a resposta do conversor optoelectrónico em que se testa o circuito proposto pelo fabricante através de uma *breadboard* - placa de ensaio. Foi feito o estudo para três condensadores com as capacidades de 0,2 nF, 1nF e 100nF. Para cada condensador foram realizados cinco testes.

Com o condensador de 0,2nF para um campo de visão de 25ns e 10mV, nota-se que existe uma grande flutuação da onda, provocada pela resistência dos cabos e da resistência de RC introduzidos de modo a avaliar o sinal, ou seja, o circuito RC está demasiado sensível ao sinal, Figura 4.1.

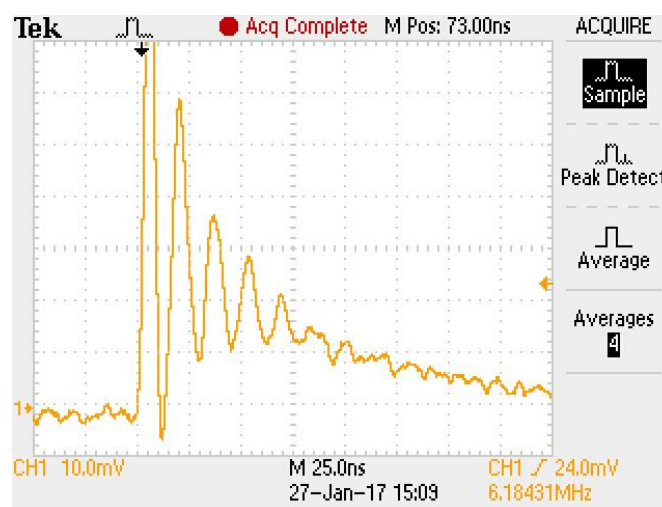
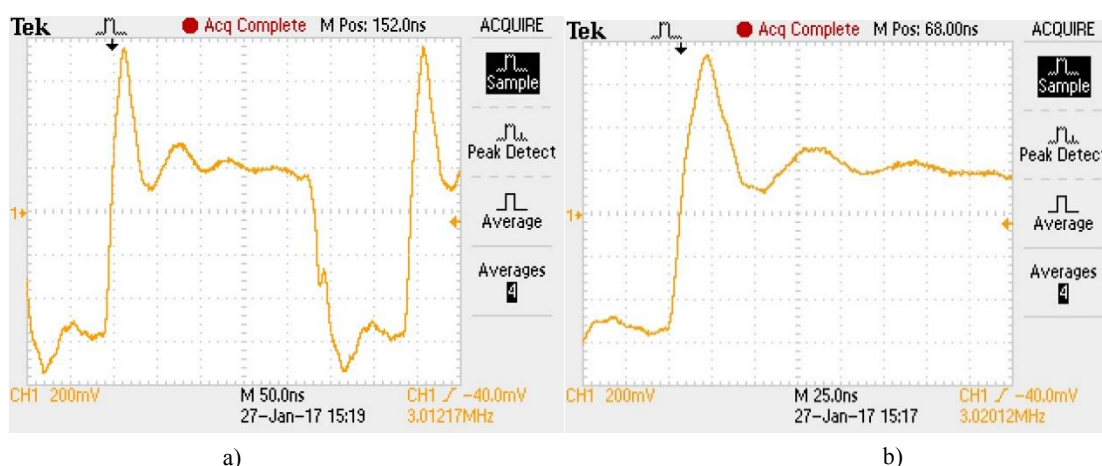


Figura 4.1 Sinal obtido para o condensador de 0.2nF

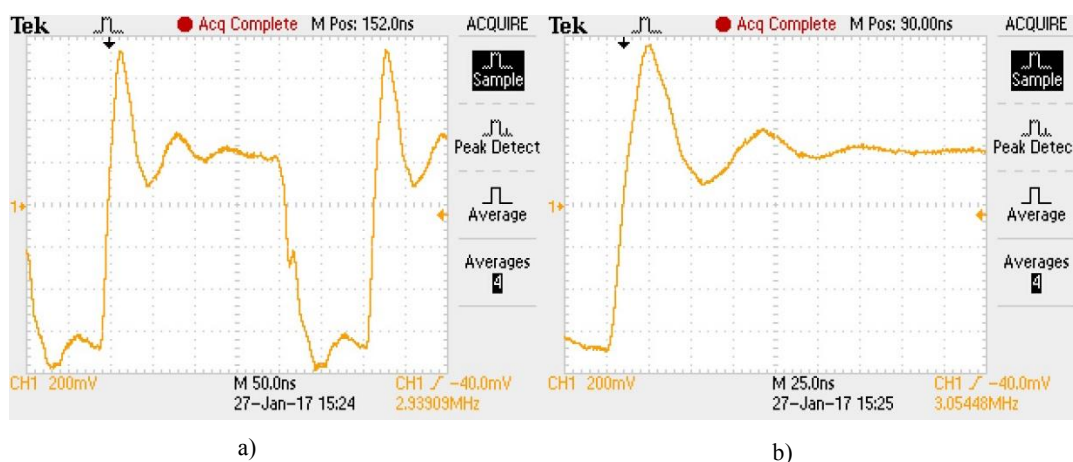
O condensador de 1 nF para um campo de visão de 200mV e 25ns, na figura 4.2a) visualiza-se os dois picos de sinais, a derivada positiva que representa o sinal quando o fotodíodo recebe luz e o condensador começa a carregar e a derivada negativa que demonstra o conjunto a descarregar.

A figura 4.2b) mostra apenas a fase positiva em que o sensor não se encontra tão saturado como para os 0,2nF. Neste condensador o sinal não fica tão sensível as flutuações da radiação, dando assim uma melhor descrição do fenómeno.



**Figura 4.2** Condensador de 1nF a)50ns de campo de visão b)25ns de campo de visão

O condensador de 100nF com uma escala de 200 mV e 50ns de campo de visão, o sinal obtido pelo osciloscópio está representado na figura 4.3 a), em que apresenta um sinal semelhante ao de 1nF, ou seja, esta é a capacidade que o sensor fica equilibrado. A Figura 4.3b) representa o mesmo condensador para 25 ns de campo de visão de modo a se visualizar a derivada positiva deste.



**Figura 4.3** Condensador de 0,1 µF a)50ns de campo de visão b)25ns de campo de visão

#### 4.1.2. Tratamento com recurso ao MS Excel

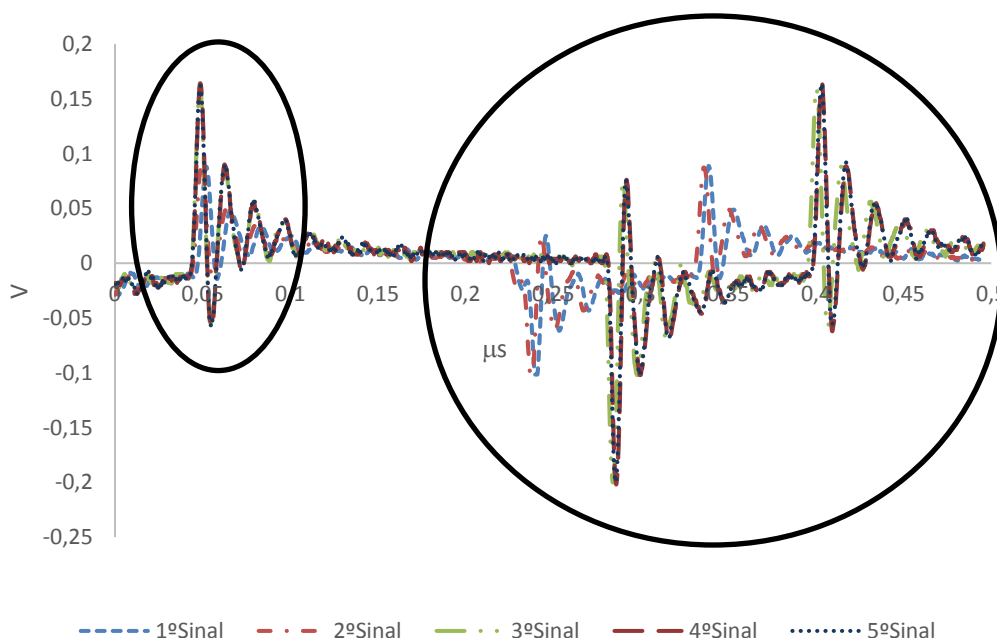
De modo a se compreender a variação do sinal em função da capacidade do condensador, foi feita uma comparação entre os dados fornecidos pelo *datasheet*.

Para cada condensador realizou-se cinco testes e é aqui apresentado o estudo da média de sinais para cada um, sendo este o valor médio de todos os dados obtidos nos cinco ensaios,  $\bar{x}$ . O desvio padrão é  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X-\mu)^2}{N}}$ , onde X representa cada um dos números da

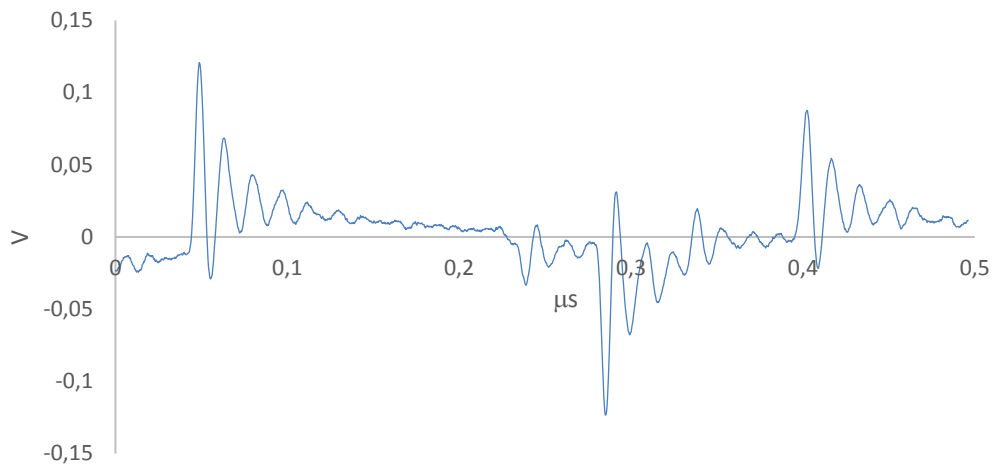
soma e N indica o tamanho da amostra. Por fim, é calculado o erro padrão associado, definido como  $SE = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ .

O eixo das abcissas, X, representa a variação do tempo em “ $\mu\text{s}$ ” e o eixo das ordenadas, Y, a variação do potencial em “V”.

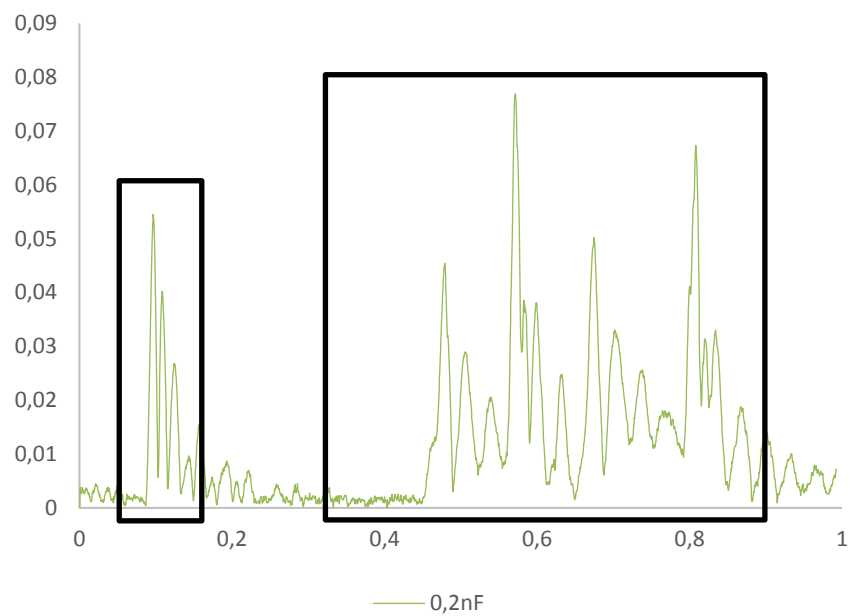
A Figura 4.4 mostra os cinco sinais obtidos sobrepostos para o condensador de 0.2nF, se visualiza facilmente uma grande discrepância entre os valores obtidos entre os ensaios. A média é representada na Figura 4.5, que levará a uma grande variação do desvio padrão, representado na Figura 4.6. O erro associado está representado na Figura 4.7. Analisando os resultados, pode-se perceber que este condensador é muito pequeno para o mecanismo em estudo.



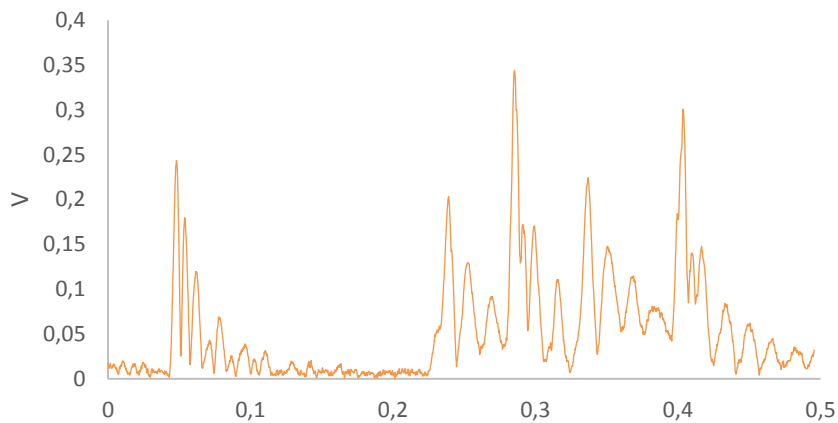
**Figura 4.4** Os 5 Ensaios para o condensador de 0,2nF



**Figura 4.5** Média  $\bar{x}$  - Condensador de 0,2nF

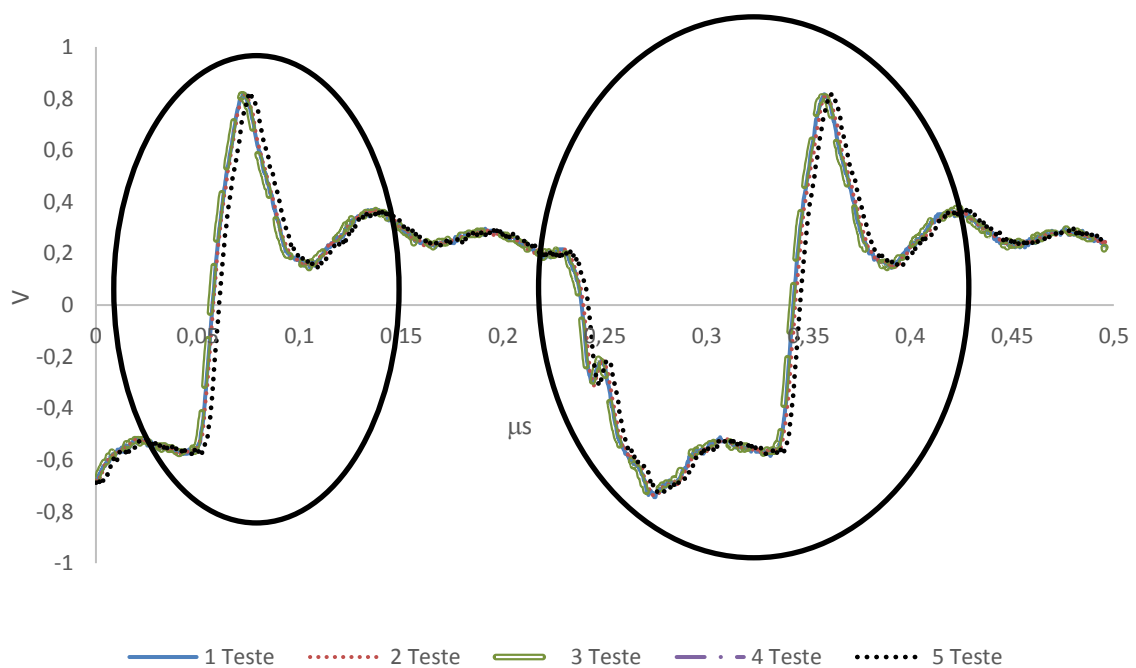


**Figura 4.6** Desvio Padrão,  $\sigma$  - Condensador de 0,2nF

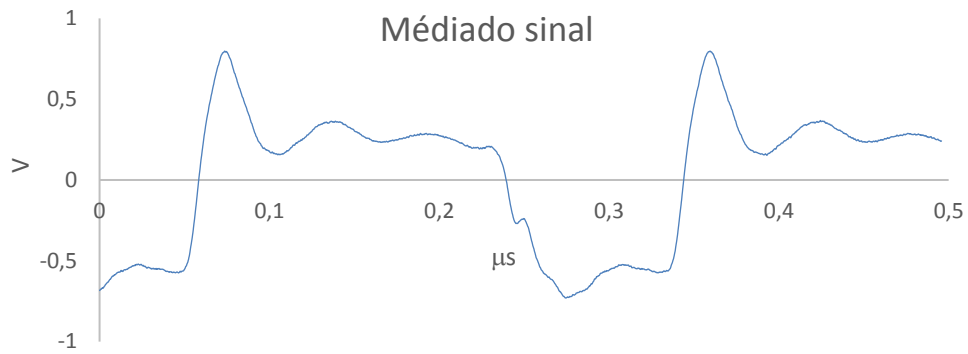


**Figura 4.7** Erro padrão – Condensador de 0,2nF

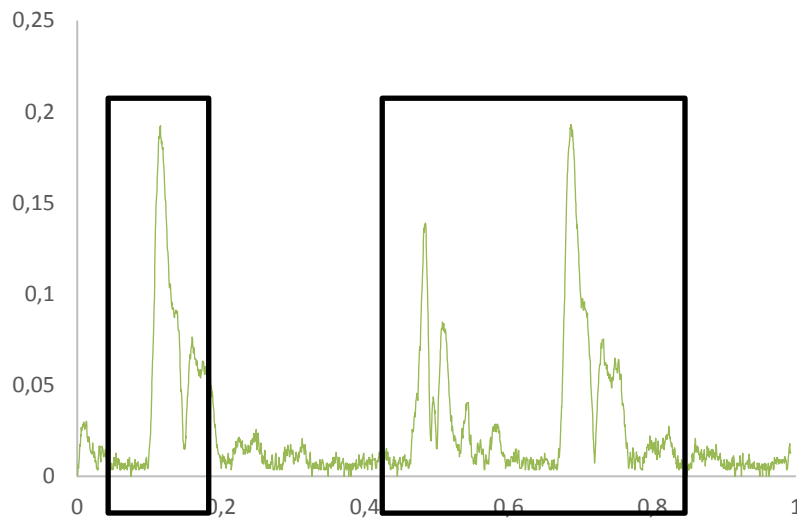
A Figura 4.8 mostra os 5 sinais obtidos sobrepostos para o condensador de 1nF. As áreas assinaladas representam as zonas onde se nota a diferença de sobreposição do sinal. A média dos 5 ensaios é mostrado na Figura 4.9. Observa-se que há pouca variação entre os valores gerados, o que leva a uma pouca variação do desvio padrão e do erro associado, Figura 4.10 e Figura 4.11, respetivamente.



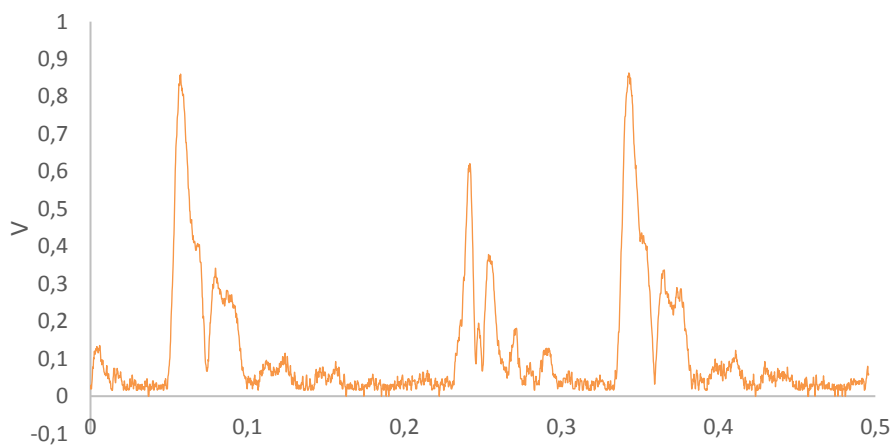
**Figura 4.8** 5 Ensaios para o condensador de 1nF



**Figura 4.9** Média  $\bar{x}$  - Condensador de 1nF

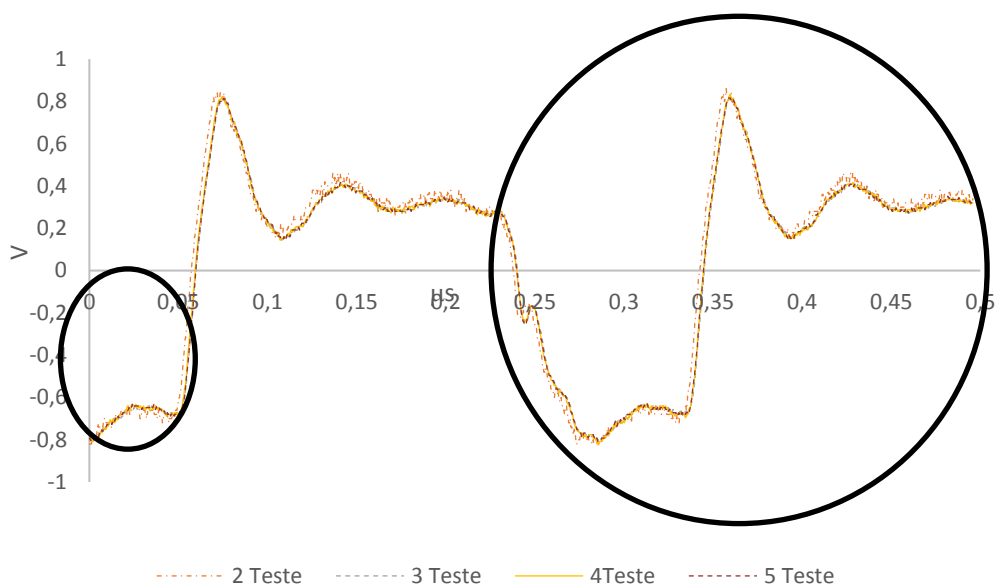


**Figura 4.10** Desvio Padrão,  $\sigma$  - Condensador de 1nF

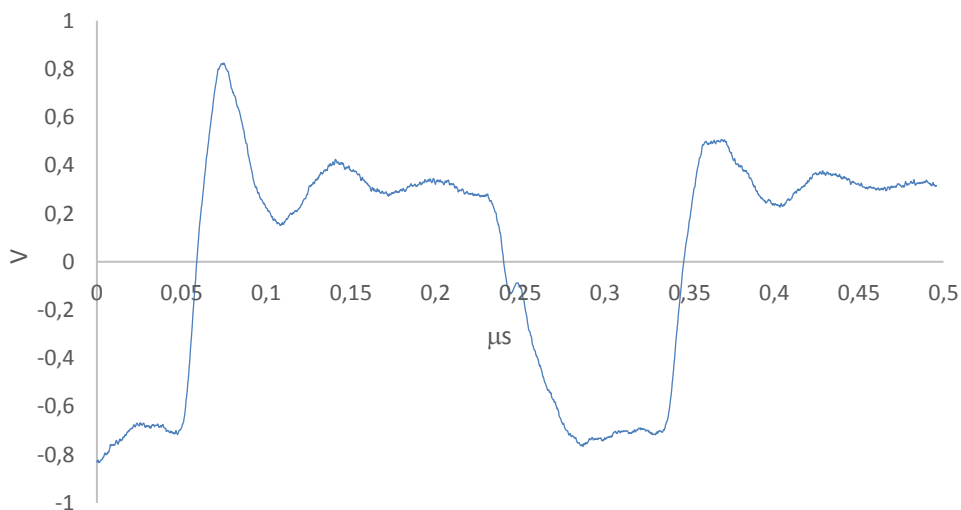


**Figura 4.11** Erro padrão, SE- Condensador de 1nF

Os 5 sinais obtidos sobrepostos para o condensador de 100nF estão apresentados na Figura 4.12. As áreas assinaladas representam as zonas onde se nota a diferença de sobreposição do sinal. No primeiro instante não há variação entre sinais, mas no restante período já se observa variação. Esta diferença entre os 5 testes leva a uma variação do desvio padrão e do erro associado, Figura 4.13 e Figura 4.14, trazendo o erro no calculo da média, Figura 4.15.

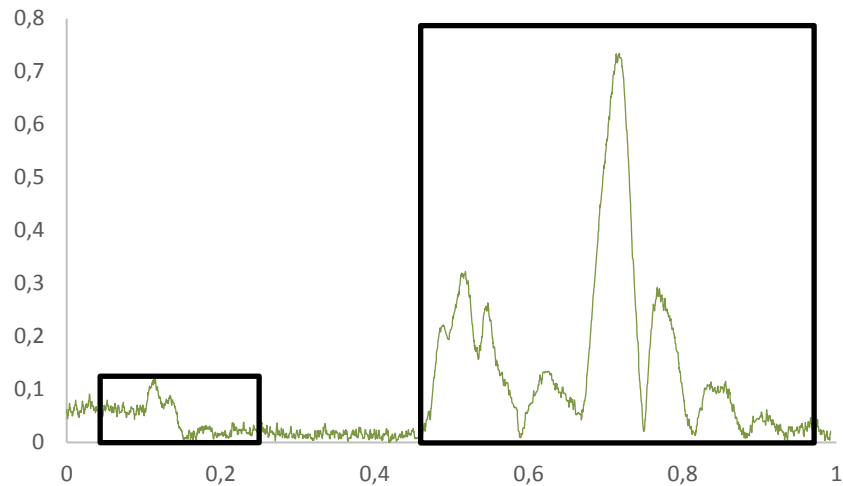


**Figura 4.12** 5 Ensaios para o condensador de 100nF

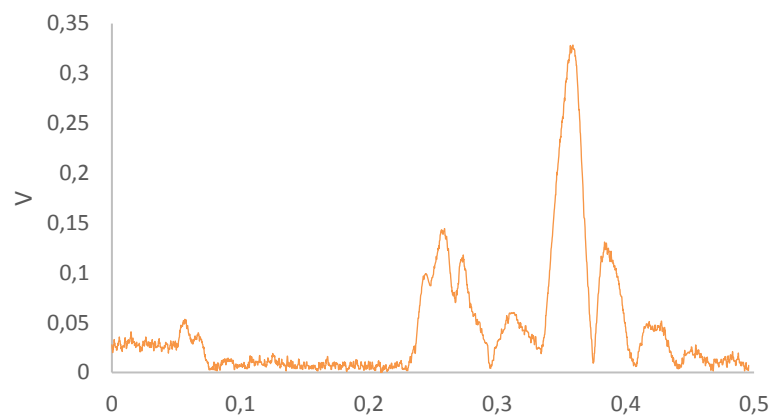


**Figura 4.13** Média  $\bar{x}$  - Condensador de 100nF





**Figura 4.14** Desvio Padrão,  $\sigma$  - Condensador de 100nF



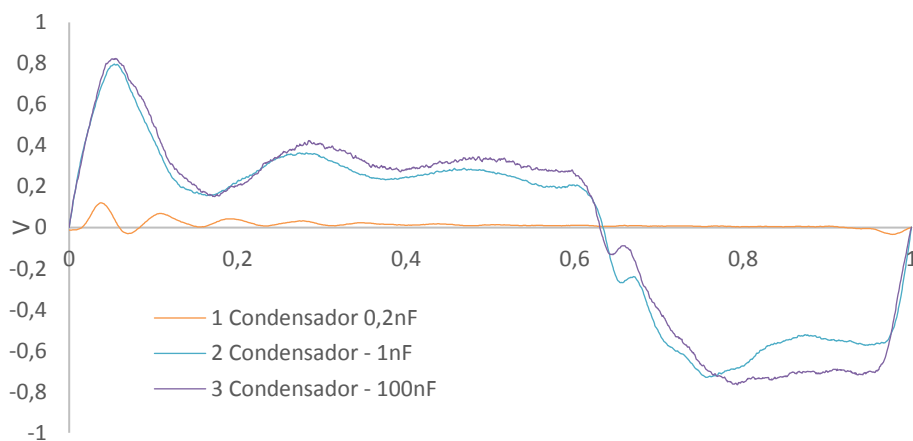
**Figura 4.15** Erro padrão, SE- Condensador de 100nF

A Figura 4.16 mostra os sinais obtidos pelos três condensadores, em que o tempo se encontra adimensional de modo a se comparar os valores gerados pelos 3 condensadores e a Figura 4.17 é o desvio padrão associado para a geração do valor média dos cinco ensaios. Em que a ordenada do desvio padrão do condensador de 0,2nF é vista no lado direito e a ordenada para o condensador 1nF e 100nF no eixo da esquerda, com o tempo adimensional.

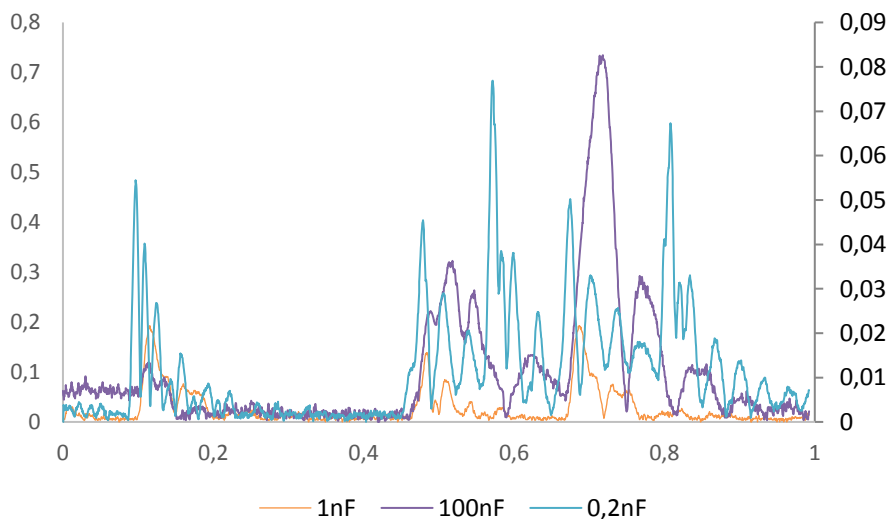
Com base na análise da média, desvio padrão e erro padrão, os condensadores com 1nF e 100nF já apresentam sinal desejado. Em que o condensador de 100nF, apresenta um melhor sinal na parte de descarga do sinal, os dois condensadores apresentam o mesmo tipo de carregamento quando há incidência de luz no fotodíodo. O melhor sinal é devido ao facto

de este ter um maior valor de carga, mas observa-se que apresenta um desvio padrão maior para os dados gerados, **o condensador de 1nF é mais coerente.**

As flutuações observadas podem ser atribuídas ao gerador de luz pulsada, pois este tem um circuito integrado LMC555 que introduz um atraso na corrente. Por isso procedeu-se à montagem do condensador de 1nF por este ser mais sensível ao efeito pretendido.



**Figura 4.16** Média do sinal com o tempo adimensional para os três condensadores



**Figura 4.17** Desvio padrão com tempo adimensional

Todos os dados obtidos pelo osciloscópio foram tratados em Excel e são apresentados no APÊNDICE B.

#### 4.1.2.1. Tempo de relaxação - teórico e valor experimental equivalente

Segundo as especificações do fabricante este indica que para uma ligação do *pin 2* com uma resistência de  $510\Omega$ , como demonstra a Figura 4.18, tem que estar acoplado a um condensador de pelo menos de  $5\text{pF}$ .

Dynamic Characteristics							
-40 °C to +85 °C; 4.75 V ≤ Supply Voltage ≤ 5.25 V; R <sub>LOAD</sub> = 511 Ω, C <sub>LOAD</sub> = 5 pF unless otherwise specified							
Parameter	Symbol	Min.	Typ. [2]	Max.	Units	Conditions	Reference
Rise/Fall Time 10% to 90%	t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub>		3.3	6.3	ns	P <sub>R</sub> = 100 μW peak	Figure 17
Pulse Width Distortion	PWD		0.4	2.5	ns	P <sub>R</sub> = 150 μW peak	Note 8, Figure 16
Overshoot			2		%	P <sub>R</sub> = 5 μW peak, t <sub>r</sub> = 1.5 ns	Note 9
Bandwidth (Electrical)	BW		125		MHz	-3 dB Electrical	

Figura 4.18 Características do fotodíodo HFBR 2406Z - *DataSheet* <sup>18</sup>

A frequência de reposta do fotodíodo é de  $125\text{MHz}$ , ou seja, possui um período de  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{125 \times 10^6} = 8 \times 10^{-9} \text{s} = 8 \text{ns}$ . Sabe-se que para um circuito RC a voltagem nos bordos da resistência varia da seguinte forma conforme a Equação 4.1,

$$V_R(t) = V_o \left( e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad 4.1$$

Em que V representa a tensão no circuito em função do tempo. Quando o tempo é igual ao instante  $t = RC$ , a corrente decresce para um fator igual a  $1/e$  em relação ao seu valor inicial. O produto  $RC$  é denominado tempo de relaxação do circuito,  $\tau$ , sendo assim,  $\tau = RC$ .

De modo a se entender a variação do tempo de relaxação com a capacidade de carregamento de cada condensador, procedeu-se a análise dos três condensadores. Estes gráficos são obtidos com base nos dados fornecidos pelo osciloscópio e formulações matemáticas. Com isso é possível prever o comportamento dos dados através do recurso do Excel e do suplemento “solver”. É realizada a comparação com os valores obtidos pelos ensaios realizados e o valor teórico encontrado que melhor aproxima a equação de tensão aos resultados obtidos.

Para o condensador de  $0,2\text{nF}$ , o valor teórico encontrado é de  $20\mu\text{F}$  com uma resistência de  $510\Omega$ , valor encontrado ao se usar o suplemento solver do Excel, Figura 4.19.

Na Figura 4.20 está apresentada uma a comparação entre o sinal teórico e o sinal equivalente (prático).

<b>V0</b>	<b>0,1</b>
<b>R</b>	<b>510</b>
<b>C</b>	<b>2,00E-05</b>

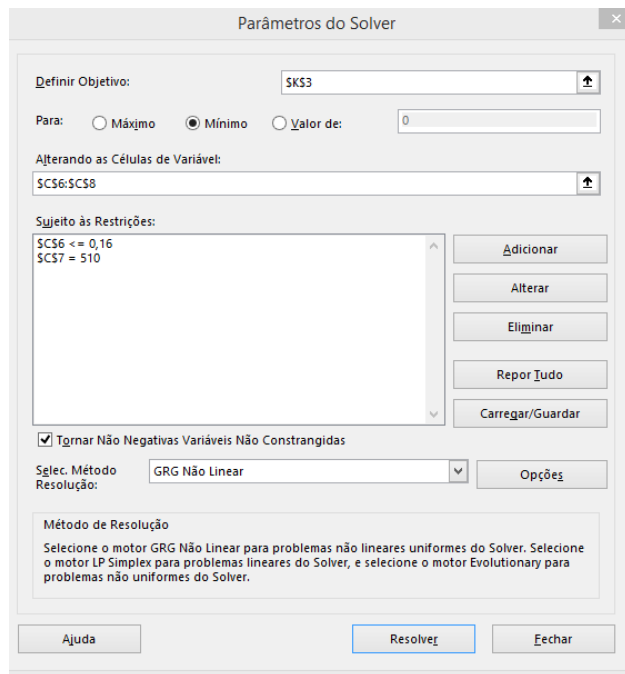


Figura 4.19 Suplemento Solver para o condensador de 0.2nF

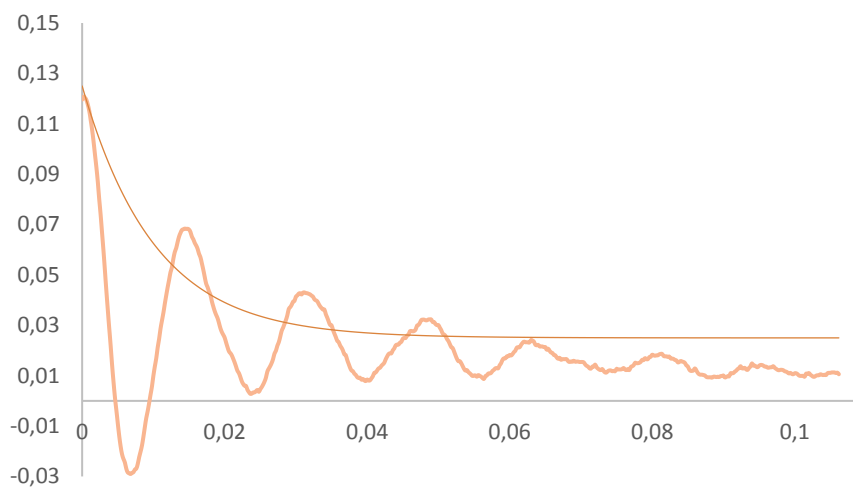


Figura 4.20 Sinal teórico e equivalente - Condensador de 0.2nF

Relativamente ao condensador de 1nF, o valor teórico encontrado é de 18 $\mu$ F com uma resistência de 510 $\Omega$ , também utilizado o suplemento solver do Excel, Figura 4.21. É feita a comparação entre o sinal teórico e o sinal equivalente, Figura 4.22.

<b>V<sub>o</sub></b>	0,72
<b>R</b>	510
<b>C</b>	1,8E-05

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo: SK\$2

Para:  Máximo  Mínimo  Valor de: 0

Alterando as Células de Variável: SK\$5:SK\$7

Sujeito às Restrições:

SK\$5 <= 1,2  
SK\$6 = 510

Tornar Não Negativas Variáveis Não Constringidas

Selec. Método Resolução: GRG Não Linear

Método de Resolução

Selecione o motor GRG Não Linear para problemas não lineares uniformes do Solver. Selecione o motor LP Simplex para problemas lineares do Solver, e selecione o motor Evolutionary para problemas não uniformes do Solver.

Ajuda Resolver Fechar

Figura 4.21 Suplemento solver para o condensador de 1nF

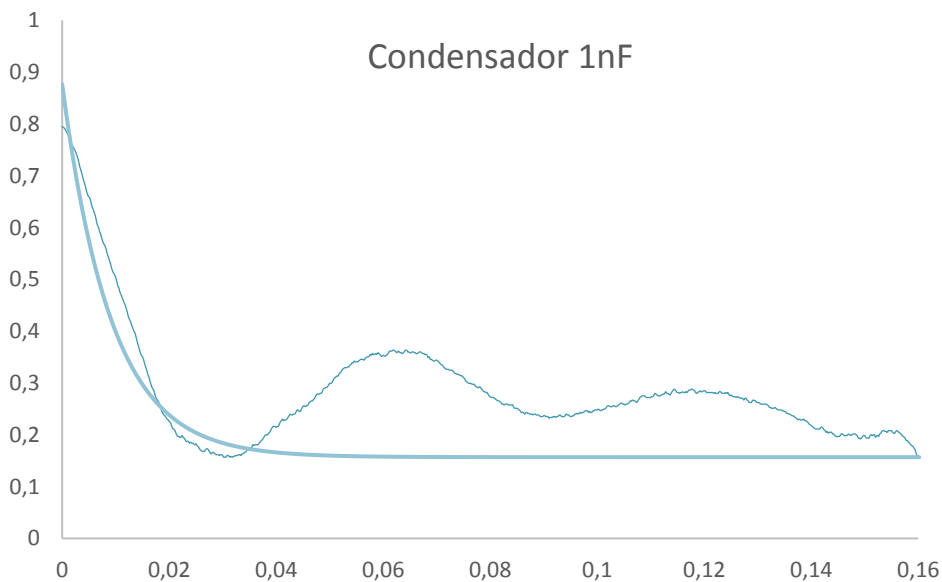


Figura 4.22 Sinal teórico e equivalente - Condensador de 1 nF

Já para o condensador de 100nF, o valor teórico encontrado é de 16 $\mu$ F com uma resistência de 510 $\Omega$ , valor encontrado ao se usar o suplemento Solver do Excel, Figura 4.23.

Foi então realizada a comparação entre o sinal teórico e o sinal equivalente, contida na Figura 4.24.

<b>V0</b>	0,9
<b>R</b>	510
<b>C</b>	1,60E-05

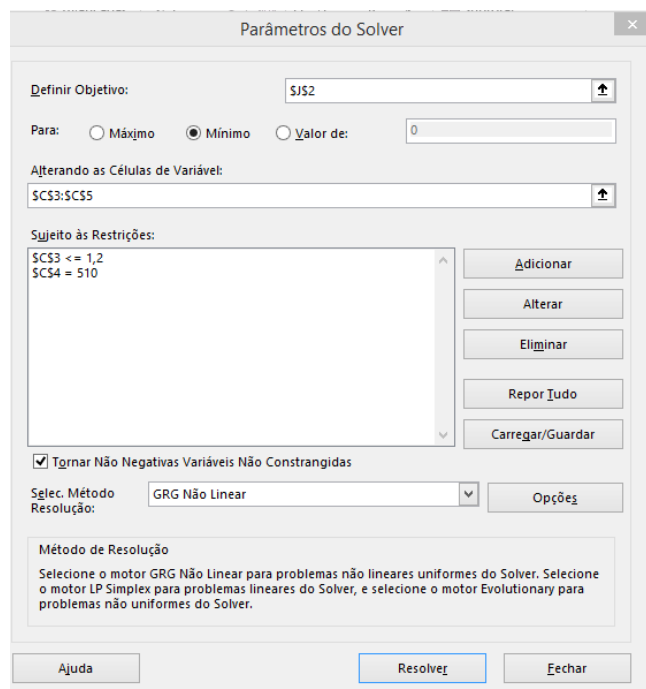


Figura 4.23 Excel c/ suplemento solver para o condensador de 100nF

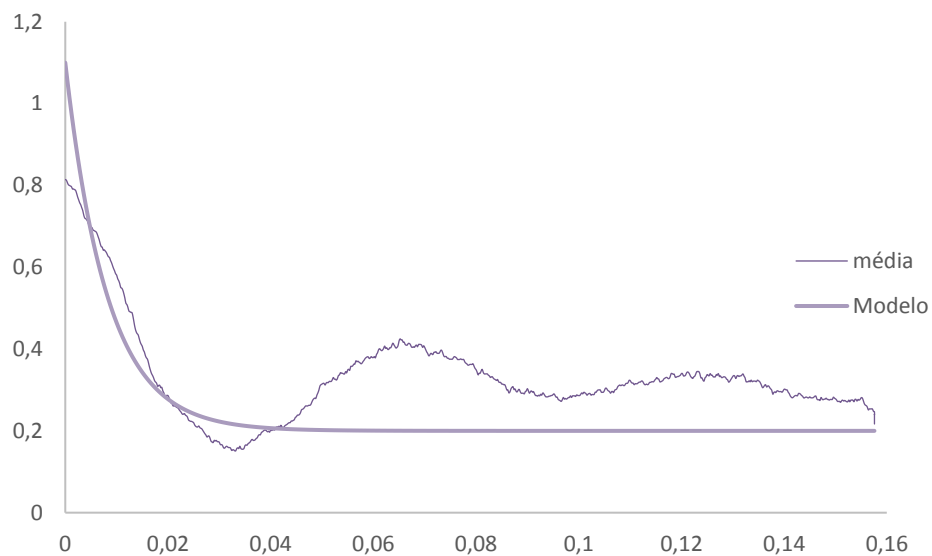


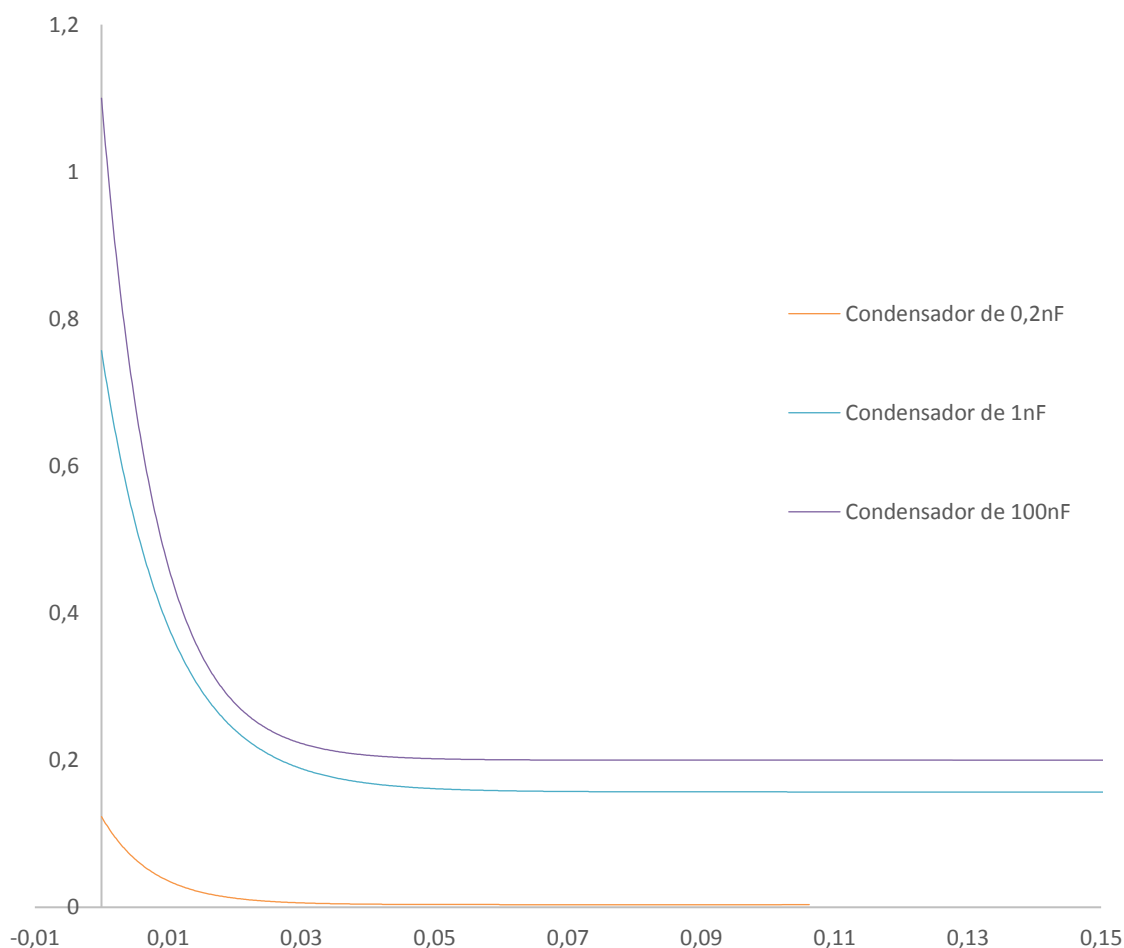
Figura 4.24 Sinal teórico e equivalente - Condensador de 100nF

É possível perceber que há uma discrepância entre os valores teóricos e os valores equivalentes encontrados através de testes. Isso deve-se ao facto de que a fiabilidade do

---

mecanismo nunca é 100%. Isso ocorre porque há sempre perdas de transmissão devido aos comprimentos dos cabos, além da fibra óptica não ter sempre a mesma densidade e, portanto, não transmite sempre com a mesma intensidade. Ademais, há o facto do fotodíodo não captar toda a luz incidente. É importante realizar sempre um estudo prático em que se apoie nos modelos teóricos para se obter as curvas típicas de carregamento.

A variação de carga do condensador representa a tensão sentida entre os terminais da resistência de  $510\Omega$ , compreende-se que o condensador de  $0,2\text{nF}$  produz um sinal com pouca oscilação, ou seja, é pouco sensível para o efeito pretendido. Os condensadores de  $1\text{nF}$  e de  $100\text{nF}$  apresentam uma amplitude do sinal pretendido, como se visualiza na Figura 4.25.



**Figura 4.25** Carregamento teórico do Condensador medido aos bornes da resistência

## 4.2. Resultados experimentais com explosivos

Todos os ensaios foram obtidos no Laboratório de Energética e Detónica- Associação de Apoio (LEDAP), onde foi testado um dos conversores optoelectrónicos existentes em laboratório com recurso a fibra óptica e obter assim a velocidade de detonação de cada ensaio.

Foram utilizados dois cartuchos diferentes, em que o comprimento é de 250mm, tem uma largura de 50 mm, apenas com a variação da altura de 10mm e 15mm. Este cartucho é feito de material *Medium-Density Fiberboard*, conhecido pelo acrónimo MDF, que é um derivado de madeira.

No cartucho criou-se uma barra que do situa-se na parte superior cartucho de modo a fixar as fibras ópticas. As fibras são posicionadas a uma distância de 15mm entre base e o primeiro furo e os espaçamentos seguintes são de 10mm, entre si, Figura 4.26 e Figura 4.27.

Testou-se 4 canais do conversor optoelectrónico, em que se insere duas fibras de PMMA com diâmetro 250µm e duas fibras de Sílica com 60µm de diâmetro. Em que foram dispostas da seguinte maneira, a fibra número 1 e 4 é a fibra de Sílica e a fibra número 2 e 3 é a de PMMA.

Introduziu-se um *Trigger* externo, com um 1mm de diâmetro, de modo a disparar o osciloscópio e registrar os dados gerados pelas fibras óticas. A introdução deste deve-se ao facto de após vários ensaios o osciloscópio não ter disparado. Este mecanismo é composto por dois cabos, o positivo e a massa, que estão enrolados um no outro sem contacto. Ao passar a onda de detonação, os mesmos fundem entrando em curto-circuito, disparando assim o sinal no osciloscópio.



**Figura 4.26** Configuração base do cartucho  
1 e 4- Fibras de Sílica, 2 e 3 -Fibras de PMMA, T-Trigger

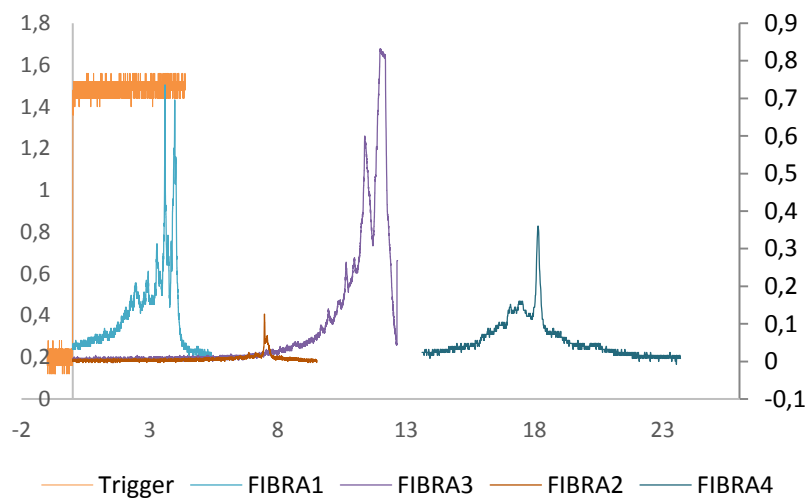




**Figura 4.27** Cartucho vista de lado, aberturas para inserir as fibras  
1 e 4- Fibras de Sílica, 2 e 3 -Fibras de PMMA, T-Trigger

O sinal gerado pelo *Trigger* é o primeiro sinal sensível ao osciloscópio que faz com que este depois receba os dados gerados pelo resto das fibras, Figura 4.28. Em que o sinal Trigger, linha laranja, é visto na ordenada da esquerda e os restantes sinais na ordenada da direita.

Na análise dos ensaios efetuados não se inseriu o valor do Trigger, pois este é o sinal quando o tempo é 0 segundos, ficando a ponto referência da origem dos dados, apenas se contabilizou este tempo para o cálculo da velocidade.



**Figura 4.28** Ensaio típico com o Trigger

O cartucho é preenchido por uma matriz sensibilizada com 1% e 2% esferas de poliestireno expandido (EPS) tendo uma densidade de  $0,036 \text{ g/cm}^3$ . A emulsão tem uma densidade de  $1,137 \text{ g/cm}^3$ , resultando numa mistura com uma densidade de  $0,86 \text{ g/cm}^3$  sensibilizada com 1% de EPS e  $0,7113 \text{ g/cm}^3$  quando a matriz é sensibilizada com 2% de EPS.

### 4.2.1. 1º Ensaio

No primeiro ensaio, foi utilizado o cartucho com 10mm de altura e a matriz sensibilizada com 1% de esferas de EPS. A Figura 4.29 representa os valores obtidos para o primeiro ensaio. Observa-se que para este ensaio os sinais obtidos estão completamente saturados. Não houve sinal da Fibra 2, pois na gravação dos dados cometeu-se o erro da sobreposição dos dados gerados da Fibra 1 nos da Fibra 2.

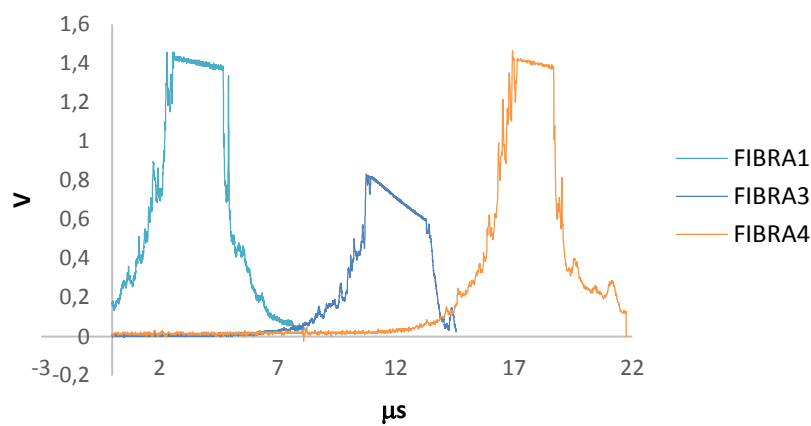
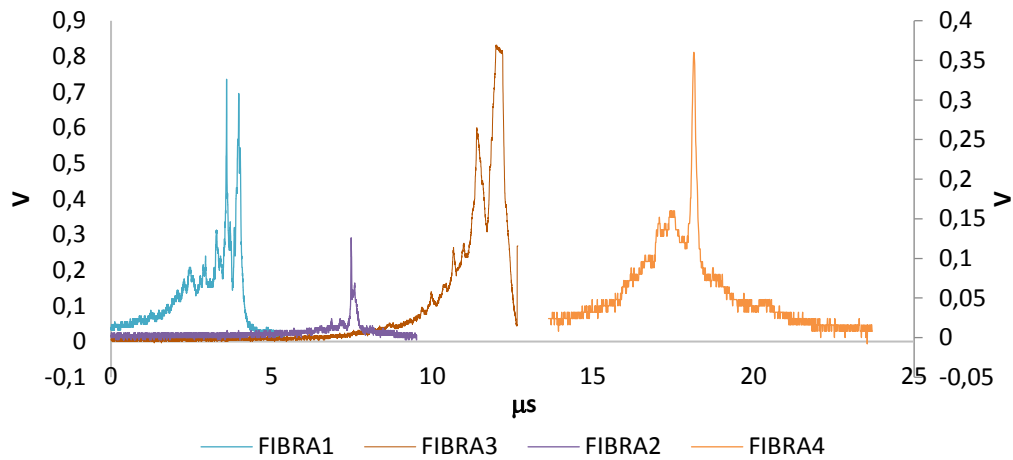


Figura 4.29 1ºEnsaio - 10mm de Altura e 1% EPS

Como no primeiro ensaio houve a saturação do sinal, optou-se pela colocação de um atenuador, dispositivo que reduz a potência do sinal transmitido na fibra óptica. Com a diminuição da intensidade da radiação imitada na fibra, a saturação do sinal é prevenida.

### 4.2.2. 2º Ensaio

No segundo ensaio realizado, utilizou-se o cartucho com 15mm de altura, com a mistura de matriz sensibilizada com 2% de esferas de EPS. A Figura 4.30 representa os valores obtidos para o segundo ensaio. É possível perceber que neste ensaio os sinais obtidos são válidos e nota-se uma diferença grande entre os valores gerados entre as fibras 1 e 4 e as fibras 2 e 3. Esta variação deve-se ao facto de as fibras de PMMA não terem uma boa atenuação do sinal. A fibra 3 ainda apresenta um valor saturado. Nas fibras 1 e 4 a variação de potencial é vista no eixo da esquerda, enquanto as fibras 2 e 3 a variação é vista no eixo da direita.

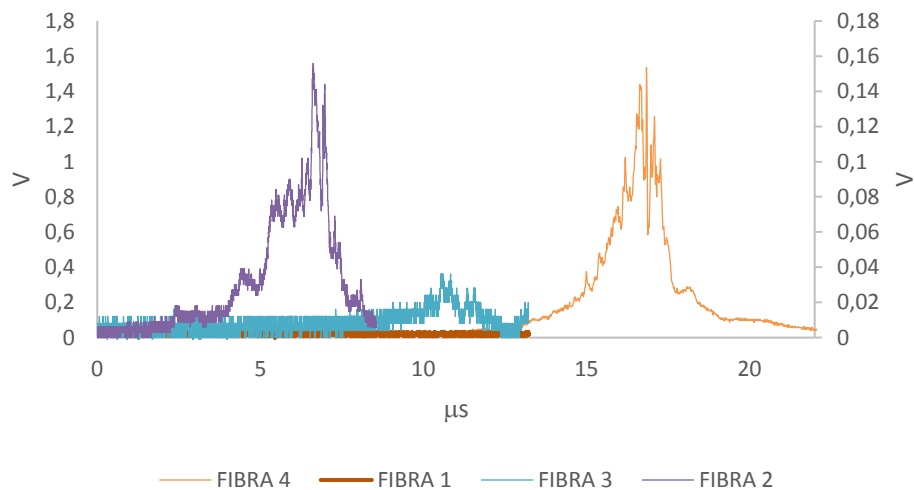


**Figura 4.30** 2ºEnsaio - 15mm de Altura e 2% EPS

### 4.2.3. 3º Ensaio

Este ensaio foi realizado utilizando um cartucho com 15mm de altura e a matriz da emulsão foi sensibilizada com 1% de esferas de EPS.

A Figura 4.31, representa os valores obtidos para o terceiro ensaio, este ensaio não apresenta os resultados esperados, a fibra 1 não apresenta sequer variação de sinal. A fibra 1 e 4 a variação de potencial é representada no eixo da esquerda e as fibras 2 e 3 é vista no eixo da direita.



**Figura 4.31** 3ºEnsaio - 15mm de Altura e 1% EPS

#### 4.2.4. 4º Ensaio

Este ensaio tem um cartucho com 15mm de altura e a matriz da emulsão foi sensibilizada com 1% de esferas de EPS. A Figura 4.32, representa os valores obtidos para o quarto experimento. Este ensaio apresenta bons resultados para todas as fibras. As fibras 2 e 3 possuem sempre valores de carregamento mais baixos do que as fibras 1 e 4. Isso deve-se ao facto de serem de PMMA e terem uma atenuação menor que as fibras de sílica. Para as fibras 1 e 4 a variação de potencial é representada no eixo da esquerda, enquanto que para as fibras 2 e 3 a variação está representada no eixo da direita.

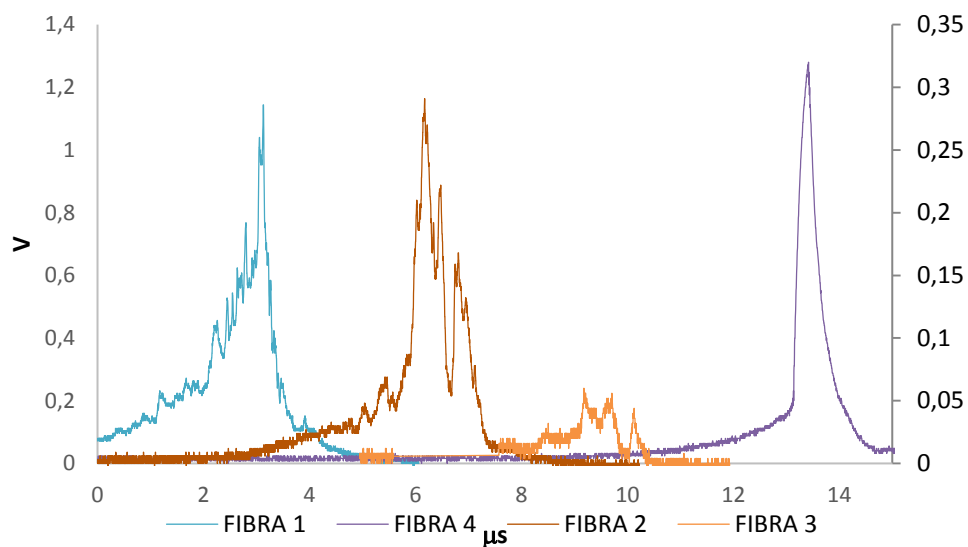


Figura 4.32 4ºEnsaio - 15mm de Altura e 1% EPS

#### 4.2.5. Medida de velocidade de detonação

De modo a se calcular a velocidade de detonação do explosivo, foram analisados o segundo e o quarto ensaio. A diferença de tempo entre as fibras é conseguida através do registo obtido pelo osciloscópio.

O cálculo da velocidade de detonação é dado pela Equação 4.2, em que  $\Delta x$  é igual a distância entre o centro do diâmetro interno da fibra ou *Trigger*, em estudo, mais o espaçamento entre estas, a dividir pelo intervalo de tempo,  $\Delta t$ .

$$D = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Onde  $v$  é a velocidade de detonação,  $x$  é o espaçamento entre as fibras e *Trigger*, e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre fibras, medido no eixo das abscissas da Figura 4.30 e Figura 4.32.

O diâmetro interno da fibra 1 e 4 de PMMA é de 250 $\mu$ m, do da fibra 2 e 3 de Sílica é de 60 $\mu$ m a e do *Trigger* é de 1mm, Tabela 4.1

**Tabela 4.1** Diâmetro e Raio

	Trigger	FIBRA 1	FIBRA 2	FIBRA 3	FIBRA 4
<b>diâmetro[m]</b>	1,00E-03	2,50E-04	6,00E-05	6,00E-05	2,50E-04
<b>Raio[m]</b>	0,0005	1,25E-04	3,00E-05	3,00E-05	1,25E-04

#### 4.2.5.1. Primeira medida da Velocidade – 2º Ensaio

Através da análise da Figura 4.30, elabora-se a Tabela 4.2. Esta tabela apresenta o valor do tempo em segundos quando a onda de detonação passa entre cada componente, com o espaçamento entre esses. A velocidade de detonação é aplicação da Equação 4.2.

**Tabela 4.2** Velocidade de detonação entre cada fibra -2º Ensaio

	Ponto de referência	L [m]	T[s]	D[m/s]
1	Fibra TRIGGER - Fibra 1	0,0140	3,60E-06	3893,14
2	Fibra TRIGGER - Fibra 2	0,0273	7,47E-06	3650,66
3	Fibra TRIGGER - Fibra 3	0,0406	1,22E-05	3333,20
4	Fibra TRIGGER - Fibra 4	0,0535	1,81E-05	2950,77
5	Fibra1 - Fibra 2	0,0134	3,88E-06	3457,82
6	Fibra1 - Fibra 3	0,0268	8,60E-06	3113,37
7	Fibra1 - Fibra 4	0,0396	1,45E-05	2726,05
8	Fibra2 - Fibra 3	0,0134	4,72E-06	2836,86
9	Fibra2 - Fibra 4	0,0262	1,07E-05	2462,70
10	Fibra3- Fibra 4	0,0129	5,94E-06	2170,23

Com a Tabela 4.2 constrói-se o gráfico da variação do tempo com a distância entre fibras e assim se obtém a velocidade média da emulsão sensibilizada com 2% de EPS com 15mm de altura de 2779,6 m/s, que representa o declive da recta.

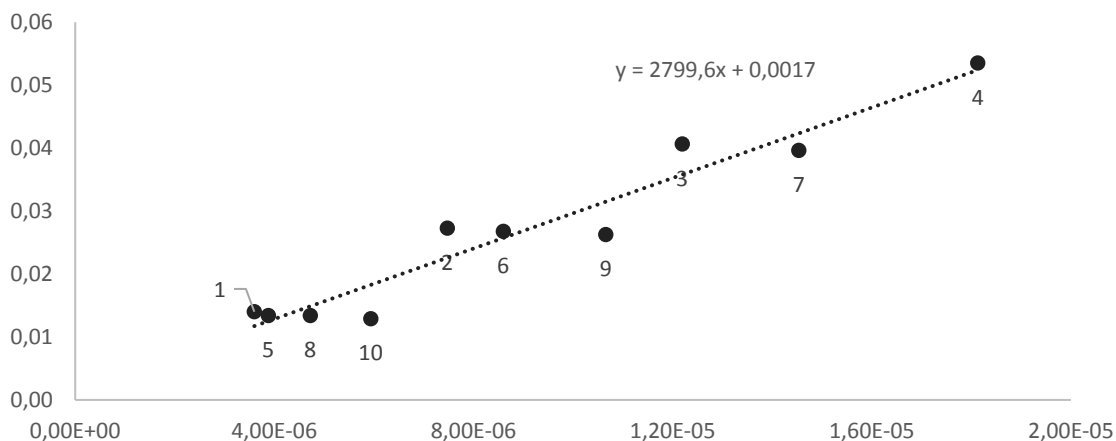


Figura 4.33 Velocidade média do 2ºEnsaio

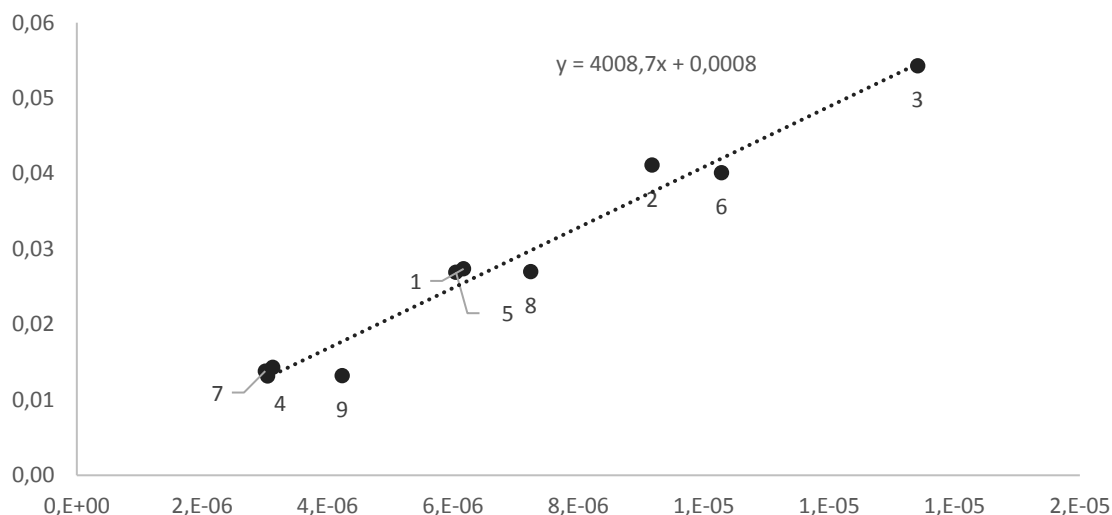
#### 4.2.5.2. Segunda Medida da Velocidade – 4ºEnsaio

Através da análise da Figura 4.32, elabora-se a Tabela 4.3. Esta tabela representa o valor do tempo em segundos quando a onda de detonação passa entre cada componente, com o espaçamento entre esses. A velocidade de detonação é aplicação da equação 4.2.

Tabela 4.3 Velocidade de detonação entre cada fibra -4º Ensaio

	Ponto de referência	L [m]	T[s]	D[m/s]
1	Fibra TRIGGER - Fibra 1	0,0143	3,13E-06	4574,01
2	Fibra TRIGGER - Fibra 2	0,0274	6,17E-06	4436,39
3	Fibra TRIGGER - Fibra 3	0,0411	9,18E-06	4479,62
4	Fibra TRIGGER - Fibra 4	0,0543	1,34E-05	4048,43
5	Fibra1 - Fibra 2	0,0131	3,04E-06	4320,35
6	Fibra1 - Fibra 3	0,0269	6,05E-06	4451,47
7	Fibra1 - Fibra 4	0,0401	1,03E-05	3900,72
8	Fibra2 - Fibra 3	0,0138	3,01E-06	4594,15
9	Fibra2 - Fibra 4	0,0270	7,24E-06	3728,60
10	Fibra3- Fibra 4	0,0132	4,24E-06	3121,46

Com a Tabela 4.3, constrói-se o gráfico da variação do tempo com a distância entre fibras e assim se obtém a velocidade média da emulsão sensibilizada com 1% de EPS com 15mm de altura de 4008,7m/s, que representa o declive da recta.



**Figura 4.34** Velocidade média do 4ºEnsaio

Os ensaios efetuados comprovam a reprodutibilidade do conversor optoelectrónico, um dos problemas detetado foi a saturação do sinal provocado pela emissão de radiação pela combustão da própria fibra ou pela emissão dos produtos da detonação depois da frente de detonação passar pela fibra óptica. Em que se introduzir um atenuador de modo a diminuir a intensidade da luz sentida na fibra óptica.

Para um ensaio com uma emulsão sensibilizada com 2% de EPS com 15mm de altura a velocidade de detonação é 2779,6 m/s. Para um ensaio com uma emulsão sensibilizada com 1% de EPS com 15mm de altura é de 4008,7m/s. Facilmente se compreende que o uso de emulsão com mais % de EPS reduz a velocidade de detonação, como é esperado.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o estudo sobre um método simples e eficaz para medição da velocidade de detonação. Para isto, o método conta com recurso das fibras ópticas e de um recetor que converte o sinal obtido emitido pela frente da detonação e transportado pela fibra óptica e que é lido pelo osciloscópio.

A construção do caixa optoelectrónica foi conseguida e sua configuração em relação aos trabalhos já existentes em laboratório é melhorada. Para a melhoria de seu circuito, se procedeu a alteração do seu circuito para um circuito impresso de dupla face fotossensível de modo a haver menos perdas no circuito.

Foram testados valores diferentes de condensadores de modo a se obter um melhor valor de carga deste que irá produzir um menor tempo de resposta do fotodíodo, que é analisado pelo osciloscópio, fixando assim o condensador do sensor em 1nF.

Todos os dados produzidos foram validados e tratados através do MS Excel, procedo a uma análise teórica dos dados transmitidos, validando assim os dados gerados pelo conversor optoelectrónico.

É valido o uso do conversor optoelectrónico para a medição da velocidade gerada pelos produtos de detonação, que futuramente poderá servir para caracterizar explosivos de modo a encontrar as suas curvas de EoS. Para uma emulsão sensibilizada com 2% de EPS com 15mm de altura a velocidade de detonação é 2779,6 m/s. Para um ensaio com uma emulsão sensibilizada com 1% de EPS com 15mm de altura esta é de 4008,7m/s.

Uma análise mais aprofundada tem de ser feita de modo a facilitar a preparação das fibras e tornar possível o utilizador preparar mais ensaios em menor espaço de tempo. Futuramente tem que ser pensando num meio de captar e analisar os dados gerados pelo conversor optoelectrónico através de uma placa de processamento rápido, como o Arduíno. Sendo uma placa programável, a base de dados ficaria logo feita, deixando assim de haver o tratamento dos dados gerados pelo osciloscópio. Outra melhoria é de incluir uma bateria, para que este fique com autónima e mobilidade.



---

Todos estes passos têm que ser tomados de modo a tornar o método ainda mais eficiente. Em suma este método de conversão óptica é bastante preciso e simples, que pode ser útil para diversas aplicações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. José Carlos Góis, António Carlos Galiza, António Viera, Pedro Bernardo, Hélder I. Chaminé Celeste Gomes, M. (2012) "Manual do operador de produtos explosivos" AP3E (Associação Portuguesa de Estudo de Engenharia de explosivos) e ANIT (Associação Nacional da Industria Extractiva e Transformadora)
2. MENDES, R. A. L. (2000) "Iniciação e detonação de explosivos plásticos de RDX" Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica - Universidade de Coimbra.
3. Fernandes, P. M. S. C. (2014) Sensibilidade ao Choque de Explosivos. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade de Coimbra
4. Cooper, P. W. (1996) "Explosives Engineering" 1º Edição.
5. Siegel, Robert e Howell, J. R. T. (1992) "Thermal radiation heat Transfer" 3º Edição. Pag.41-63-218
6. Anastácio, A. N. (2014) " Metrologia da detonação com o recurso a fibras ópticas" Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica
7. Schubert, E. F., (2016) "Light-Emitting Diodes" - Cambridge University Press
8. Pela RS-Componements, acedido em Setembro de 2016, <http://pt.rs-online.com/web/c/cables/cables-para-redes-comunicacion/latiguillos-para-fibra-optica/?applied-dimensions=4294745220,4294863334,4294856747>
9. Pela Thorlabs, acedido em Setembro de 2016 [https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide\\_id=2186](https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2186)
10. Pela Farnell, acedido em Setembro de 2016 em <http://pt.farnell.com/fibre-data/a10b5120a0/lead-fibre-optic-20m/dp/1208864>.
11. Pela RS-Componements, acedido em Setembro de 2016 em <http://pt.rs-online.com/web/c/cables/cables-para-redes-comunicacion/latiguillos-para-fibra-optica/?searchTerm=cable+fibra+optica+SMA>
12. Pela Thorlabs, acedido em Setembro de 2016 [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=351](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=351)
13. Pela Hamamatsu (2014) " Si photodiodes - Opto-semiconductor Handb".

- 
14. Pela Avago "Fiber, L. & Components -HFBR-14xxZ and HFBR-24xxZ Series". Acedido em Outubro 2016, em <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0a1f/0900766b80a1fe83.pdf>
  15. Pela Franell, acedido em Novembro de 2016 em <http://pt.farnell.com/c/optoelectronics-displays/fibre-optic-products?wavelength-tyt=820nm>
  16. Pela Hamamatsu (2013) " An optical pulse generator from a sinusoidal optical signal using Sagnac loop-Self-sampling" Acedido em Maio de 2017, em <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4001/4103/S1226-5BQ/index.html>
  17. Pela Rs- Componements, acedido em Novembro de 2016 <http://pt.rs-online.com/web/c/displays-y-optoelectronica/componentes-de-fibra-optica/receptores-de-fibra-optica/?searchTerm=hfbr#esid=4294872306&applied-dimensions=4294312698,4294371825>
  18. Pela Avago "Fiber, L. & Components -HFBR-14xxZ and HFBR-24xxZ Series". Acedido em Outubro 2016, em <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0a1f/0900766b80a1fe83.pdf>

## APÊNDICE A

O fenômeno da radiação foi primeiramente descrito matematicamente por Stefan Boltzmann (1879), que relaciona a potência radiativa,  $P$ , para um metro quadrado de uma superfície negra à temperatura,  $T$ , na quarta potência da temperatura absoluta, Equação 0.1,

$$P = \sigma T^4 \quad \text{com } \sigma = 1,381 \text{ J/K} \quad (0.1)$$

Mais tarde, foi introduzido o deslocamento de Wien que relaciona a variação da temperatura do corpo negro, com a frequência emitida da radiação. Ou seja, a frequência é diretamente proporcional à temperatura absoluta, Equação 0.2,

$$f \propto T \quad (0.2)$$

Sabe-se que este modelo de radiação de corpo negro tem que obedecer à condição de campo elétrico nulo nas paredes da cavidade. Assim, comprimento de onda curto tem um menor número modos de propagação dentro da cavidade.

Em 1900, Planck observa que a matéria só emite e absorve em pequenas quantidades (“Catástrofe ultravioleta” – observada por Rayleigh-Jeans), a estas quantidades chamou de quanta. Einstein verificou que a quantidade de energia quanta era a energia emitida por um fóton, que é a partícula elementar medidora da força eletromagnética. A troca de fótons entre as partículas, tal como a movimentação dos elétrons e o núcleo atômico levam ao efeito fotoelétrico, formando assim uma onda com um comprimento definido que pode ser classificada pelo espectro eletromagnético. A observação destes fenômenos são a causa do aparecimento da física quântica.

O comprimento de onda da radiação eletromagnética classifica o tipo de radiação. O espectro é subdividido em faixas que representam diferentes regiões que se distinguem consoante a frequência que da onda. Altas frequências representam zonas de comprimento de onda curto, da mesma forma que ondas com frequências baixas possuem comprimentos

de onda longos. Como se observa na Figura 0.1 a radiação do corpo negro está compreendida entre os pequenos comprimentos de onda da radiação ultravioleta ( $\lambda = 0,1 \mu m$ ) e os grandes comprimentos de onda da radiação infravermelha ( $\lambda = 1000 \mu m$ ). Entre estas duas regiões está o comprimento de onda da região visível detetada pelo olho humano –  $400 \mu m$  a  $700 \mu m$  (ROYGBIV – acrónimo inglês para a sequência de espectro visível formando as cores do arco-íris, vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, índigo e violeta).

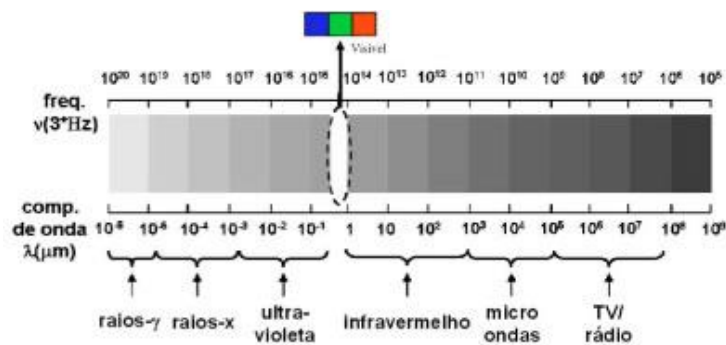


Figura 0.1 Espectro da radiação eletromagnética<sup>16</sup>

A Lei de Planck para a radiação do corpo negro, Equação 0.3, é uma melhoria da lei de Wilhelm Wien e de Stefan-Boltzmann, pois é uma dedução da Equação 0.1, em que relaciona a distribuição dos comprimentos de onda no espectro em função da temperatura do corpo negro,

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \times \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (0.3)$$

Em que "I" representa a radiância espectral medida em  $\frac{J}{s.m^2.sr.Hz}$ , "ν" é a frequência, "T" é a temperatura do corpo negro, "h" é a constante de Planck, "c" é a constante velocidade da luz e "k" é a constante de Boltzmann.

## **APÊNDICE B**

EXCEL e suplemento SLOVER

## CONDENSADOR 0,2nF

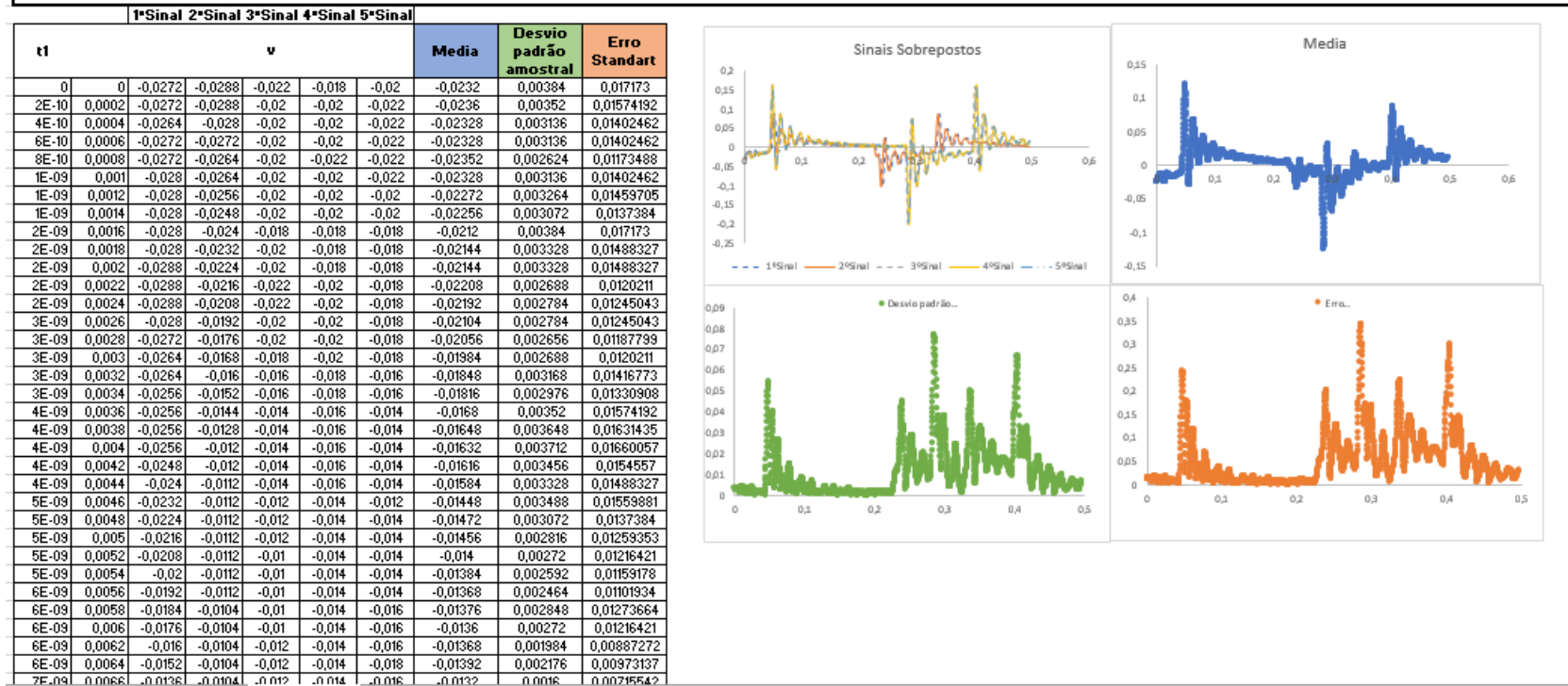


Figura 0.1 Excel dos 5 ensaios para o condensador com 0.2nF cálculo da média, desvio padrão e Erro

### Condensador com 1nF

t	w	w					Mediã	Desvio Padrão amostral	Erro Padrão
		1 Teste	2 Teste	3 Teste	4 Teste	5 Teste			
0	0	-0,68	-0,68	-0,68	-0,688	-0,688	-0,6832	0,00438178	0,019595918
2E-10	0,0002	-0,68	-0,68	-0,68	-0,688	-0,688	-0,6832	0,00438178	0,019595918
4E-10	0,0004	-0,68	-0,672	-0,672	-0,68	-0,688	-0,6784	0,00669328	0,029933259
6E-10	0,0006	-0,672	-0,672	-0,672	-0,68	-0,68	-0,6752	0,00438178	0,019595918
8E-10	0,0008	-0,672	-0,672	-0,672	-0,68	-0,688	-0,6768	0,00715548	0,032
1E-09	0,001	-0,672	-0,672	-0,664	-0,68	-0,688	-0,6752	0,009121403	0,040792156
1,2E-09	0,0012	-0,664	-0,672	-0,656	-0,68	-0,688	-0,672	0,01264911	0,056568542
1,4E-09	0,0014	-0,664	-0,664	-0,648	-0,688	-0,688	-0,6704	0,017343587	0,077562879
1,6E-09	0,0016	-0,656	-0,664	-0,648	-0,688	-0,68	-0,6672	0,016599153	0,074188948
1,8E-09	0,0018	-0,656	-0,664	-0,648	-0,688	-0,688	-0,6688	0,018417383	0,082365041
2E-09	0,002	-0,656	-0,672	-0,64	-0,696	-0,688	-0,6704	0,022908514	0,102449988
2,2E-09	0,0022	-0,648	-0,664	-0,64	-0,688	-0,688	-0,6656	0,022190999	0,099277389
2,4E-09	0,0024	-0,648	-0,664	-0,632	-0,688	-0,696	-0,6656	0,026773121	0,119732036
2,6E-09	0,0026	-0,64	-0,656	-0,632	-0,688	-0,688	-0,6608	0,026290683	0,117575508
2,8E-09	0,0028	-0,64	-0,648	-0,632	-0,68	-0,688	-0,6576	0,024915858	0,11427106
3E-09	0,003	-0,64	-0,648	-0,624	-0,68	-0,688	-0,656	0,02712932	0,121326007
3,2E-09	0,0032	-0,632	-0,648	-0,624	-0,688	-0,68	-0,6528	0,026290683	0,117575508
3,4E-09	0,0034	-0,632	-0,64	-0,616	-0,672	-0,68	-0,648	0,02712932	0,121326007
3,6E-09	0,0036	-0,624	-0,64	-0,616	-0,672	-0,68	-0,6464	0,028509647	0,127499902
3,8E-09	0,0038	-0,624	-0,632	-0,616	-0,664	-0,68	-0,6432	0,027480902	0,123983322
4E-09	0,004	-0,624	-0,632	-0,608	-0,664	-0,68	-0,6416	0,029610899	0,132423563
4,2E-09	0,0042	-0,624	-0,624	-0,608	-0,664	-0,672	-0,6384	0,027942799	0,124963995
4,4E-09	0,0044	-0,624	-0,616	-0,608	-0,664	-0,672	-0,6368	0,029175332	0,130476051
4,6E-09	0,0046	-0,616	-0,616	-0,608	-0,664	-0,664	-0,6328	0,027942799	0,124963995
4,8E-09	0,0048	-0,616	-0,616	-0,608	-0,656	-0,664	-0,632	0,028922963	0,118931014
5E-09	0,005	-0,616	-0,616	-0,608	-0,656	-0,664	-0,632	0,028922963	0,118931014
5,2E-09	0,0052	-0,608	-0,616	-0,608	-0,656	-0,664	-0,6304	0,02736421	0,122376468
5,4E-09	0,0054	-0,608	-0,608	-0,6	-0,648	-0,664	-0,6288	0,028509647	0,127499902
5,6E-09	0,0056	-0,6	-0,608	-0,6	-0,648	-0,656	-0,6224	0,02736421	0,122376468
5,8E-09	0,0058	-0,6	-0,6	-0,592	-0,648	-0,656	-0,6192	0,030252273	0,135292276
6E-09	0,006	-0,6	-0,6	-0,584	-0,648	-0,648	-0,616	0,029933259	0,133865604
6,2E-09	0,0062	-0,6	-0,6	-0,584	-0,648	-0,64	-0,6144	0,027942799	0,124963995
6,4E-09	0,0064	-0,608	-0,6	-0,584	-0,64	-0,64	-0,6144	0,024915858	0,11427106
6,6E-09	0,0066	-0,6	-0,6	-0,584	-0,632	-0,632	-0,6096	0,021466253	0,096
6,8E-09	0,0068	-0,6	-0,592	-0,584	-0,624	-0,632	-0,6064	0,020707487	0,092606695
7E-09	0,007	-0,592	-0,592	-0,584	-0,624	-0,632	-0,6048	0,02161481	0,096664368
7,2E-09	0,0072	-0,584	-0,592	-0,584	-0,616	-0,624	-0,6	0,018761663	0,083904709
7,4E-09	0,0074	-0,584	-0,584	-0,584	-0,616	-0,624	-0,5968	0,02161481	0,096664368
7,6E-09	0,0076	-0,584	-0,584	-0,576	-0,616	-0,616	-0,5952	0,019266551	0,086162637
7,8E-09	0,0078	-0,584	-0,584	-0,584	-0,616	-0,616	-0,5936	0,021466253	0,096
8E-09	0,008	-0,584	-0,584	-0,576	-0,616	-0,616	-0,5952	0,019266551	0,086162637
8,2E-09	0,0082	-0,584	-0,584	-0,576	-0,616	-0,608	-0,5936	0,017343587	0,077562879
8,4E-09	0,0084	-0,584	-0,576	-0,576	-0,608	-0,608	-0,5904	0,016395121	0,073321211
8,6E-09	0,0086	-0,576	-0,576	-0,584	-0,608	-0,6	-0,5888	0,014522722	0,064992307

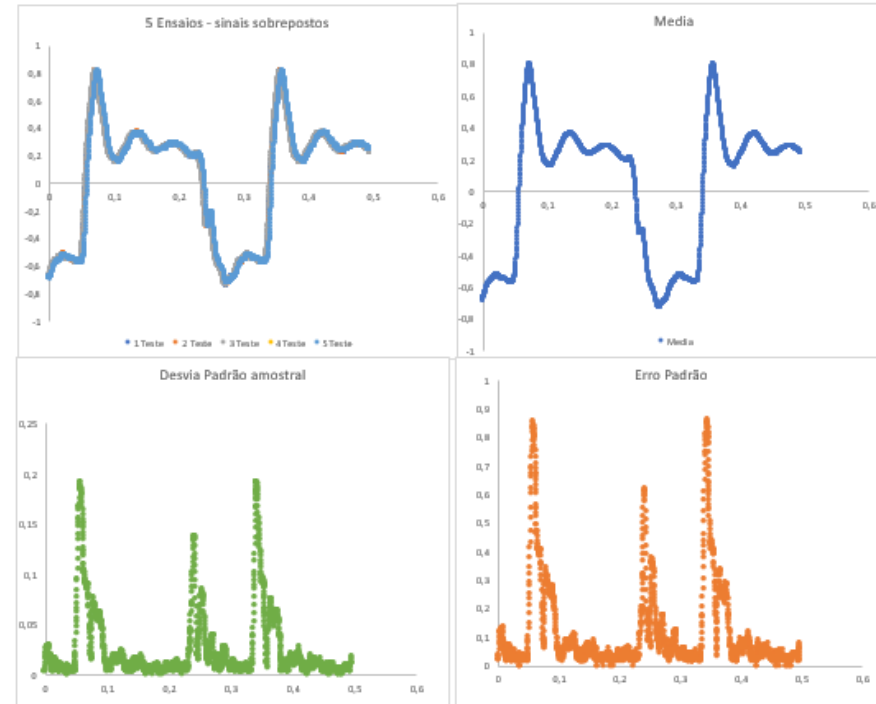


Figura 0.2 Excel dos 5 ensaios para o condensador com 1nF cálculo da média, desvio padrão e Erro



### Condensador com 100nF

t		1 Teste	2 Teste	3 Teste	4 Teste	5 Teste	Media	Desvia Padrão amostral	Erro Padrão
0	0	-0,94	-0,82	-0,8	-0,8	-0,792	-0,8304	0,062135336	0,027787767
2E-10	0,0002	-0,92	-0,82	-0,8	-0,8	-0,792	-0,8264	0,053336667	0,023852882
4E-10	0,0004	-0,92	-0,82	-0,8	-0,8	-0,8	-0,828	0,052153619	0,023323808
6E-10	0,0006	-0,9	-0,82	-0,792	-0,8	-0,8	-0,8224	0,044595964	0,019343921
8E-10	0,0008	-0,92	-0,82	-0,8	-0,8	-0,8	-0,828	0,052153619	0,023323808
1E-09	0,001	-0,92	-0,82	-0,8	-0,8	-0,808	-0,8296	0,05119375	0,022894541
1E-09	0,0012	-0,94	-0,82	-0,808	-0,8	-0,8	-0,8336	0,060039987	0,026850698
1E-09	0,0014	-0,94	-0,8	-0,808	-0,8	-0,8	-0,8296	0,06181262	0,027643444
2E-09	0,0016	-0,94	-0,8	-0,808	-0,808	-0,8	-0,8312	0,06095244	0,02725876
2E-09	0,0018	-0,96	-0,78	-0,808	-0,808	-0,792	-0,8296	0,073843077	0,033023628
2E-09	0,002	-0,94	-0,78	-0,808	-0,808	-0,792	-0,8256	0,065023224	0,029081953
2E-09	0,0022	-0,94	-0,78	-0,8	-0,808	-0,792	-0,824	0,065665821	0,029366648
2E-09	0,0024	-0,94	-0,78	-0,8	-0,8	-0,8	-0,824	0,065421703	0,029257478
3E-09	0,0026	-0,92	-0,78	-0,8	-0,8	-0,8	-0,82	0,056568542	0,025298221
3E-09	0,0028	-0,92	-0,78	-0,8	-0,8	-0,8	-0,82	0,056568542	0,025298221
3E-09	0,003	-0,92	-0,78	-0,8	-0,8	-0,8	-0,82	0,056568542	0,025298221
3E-09	0,0032	-0,92	-0,78	-0,8	-0,8	-0,8	-0,82	0,056568542	0,025298221
3E-09	0,0034	-0,92	-0,78	-0,8	-0,792	-0,792	-0,8168	0,058130887	0,025996923
4E-09	0,0036	-0,9	-0,78	-0,792	-0,792	-0,792	-0,8112	0,049911922	0,02232129
4E-09	0,0038	-0,9	-0,78	-0,792	-0,792	-0,792	-0,8112	0,049911922	0,02232129
4E-09	0,004	-0,9	-0,78	-0,792	-0,784	-0,792	-0,8096	0,050801575	0,022719155
4E-09	0,0042	-0,9	-0,76	-0,792	-0,784	-0,792	-0,8056	0,054376465	0,024317895
4E-09	0,0044	-0,9	-0,74	-0,784	-0,784	-0,784	-0,7984	0,059306594	0,026791043
5E-09	0,0046	-0,9	-0,74	-0,776	-0,784	-0,784	-0,7968	0,060491322	0,027052541
5E-09	0,0048	-0,9	-0,72	-0,776	-0,784	-0,784	-0,7928	0,065629262	0,029350296
5E-09	0,005	-0,9	-0,74	-0,768	-0,784	-0,784	-0,7952	0,061279687	0,027405109
5E-09	0,0052	-0,92	-0,74	-0,768	-0,792	-0,784	-0,8008	0,069535602	0,031097267
5E-09	0,0054	-0,92	-0,74	-0,768	-0,784	-0,776	-0,7976	0,070404545	0,03148587
6E-09	0,0056	-0,92	-0,74	-0,768	-0,784	-0,776	-0,7976	0,070404545	0,03148587
6E-09	0,0058	-0,94	-0,74	-0,776	-0,776	-0,768	-0,8	0,079649231	0,035620219
6E-09	0,006	-0,92	-0,74	-0,776	-0,768	-0,768	-0,7944	0,071531811	0,031983998
6E-09	0,0062	-0,92	-0,74	-0,776	-0,768	-0,768	-0,7944	0,071531811	0,031983998
6E-09	0,0064	-0,92	-0,76	-0,776	-0,76	-0,76	-0,7952	0,07108487	0,031353469
7E-09	0,0066	-0,9	-0,76	-0,768	-0,76	-0,76	-0,7896	0,06181262	0,027643444
7E-09	0,0068	-0,9	-0,76	-0,768	-0,76	-0,752	-0,788	0,062864935	0,028114053
7E-09	0,007	-0,9	-0,76	-0,768	-0,76	-0,76	-0,7896	0,06181262	0,027643444
7E-09	0,0072	-0,88	-0,76	-0,76	-0,768	-0,76	-0,7856	0,05288478	0,023650793
7E-09	0,0074	-0,88	-0,74	-0,752	-0,76	-0,76	-0,7784	0,057382924	0,025662424
8E-09	0,0076	-0,86	-0,74	-0,744	-0,76	-0,76	-0,7728	0,049590322	0,022177466
8E-09	0,0078	-0,86	-0,72	-0,744	-0,752	-0,752	-0,7656	0,054376465	0,024317895



Figura 0.3 Excel dos 5 ensaios para o condensador com 100nF cálculo da média, desvio padrão e Erro

Condensador 0,2nF		Condensado 1nF		Condensador 100nF	
T12	Media	T22	Media	T31	Media
0	-0,0232	0	-0,6832	0	-0,8304
0,0002	-0,0236	0,0002	-0,6832	200	-0,8264
0,0004	-0,02328	0,0004	-0,6784	400	-0,828
0,0006	-0,02328	0,0006	-0,6752	600	-0,8224
0,0008	-0,02352	0,0008	-0,6768	800	-0,828
0,001	-0,02328	0,001	-0,6752	1000	-0,8296
0,0012	-0,02272	0,0012	-0,672	1200	-0,8336
0,0014	-0,02256	0,0014	-0,6704	1400	-0,8296
0,0016	-0,0212	0,0016	-0,6672	1600	-0,8312
0,0018	-0,02144	0,0018	-0,6688	1800	-0,8296
0,002	-0,02144	0,002	-0,6704	2000	-0,8256
0,0022	-0,02208	0,0022	-0,6656	2200	-0,824
0,0024	-0,02192	0,0024	-0,6656	2400	-0,824
0,0026	-0,02104	0,0026	-0,6608	2600	-0,82
0,0028	-0,02056	0,0028	-0,6576	2800	-0,82
0,003	-0,01984	0,003	-0,656	3000	-0,82
0,0032	-0,01848	0,0032	-0,6528	3200	-0,82
0,0034	-0,01816	0,0034	-0,648	3400	-0,8168
0,0036	-0,0168	0,0036	-0,6464	3600	-0,8112
0,0038	-0,01648	0,0038	-0,6432	3800	-0,8112
0,004	-0,01632	0,004	-0,6416	4000	-0,8096
0,0042	-0,01616	0,0042	-0,6384	4200	-0,8056
0,0044	-0,01584	0,0044	-0,6368	4400	-0,7984
0,0046	-0,01448	0,0046	-0,6336	4600	-0,7968
0,0048	-0,01472	0,0048	-0,632	4800	-0,7928
0,005	-0,01456	0,005	-0,632	5000	-0,7952
0,0052	-0,014	0,0052	-0,6304	5200	-0,8008
0,0054	-0,01384	0,0054	-0,6256	5400	-0,7976
0,0056	-0,01368	0,0056	-0,6224	5600	-0,7976
0,0058	-0,01376	0,0058	-0,6192	5800	-0,8
0,006	-0,0136	0,006	-0,616	6000	-0,7944

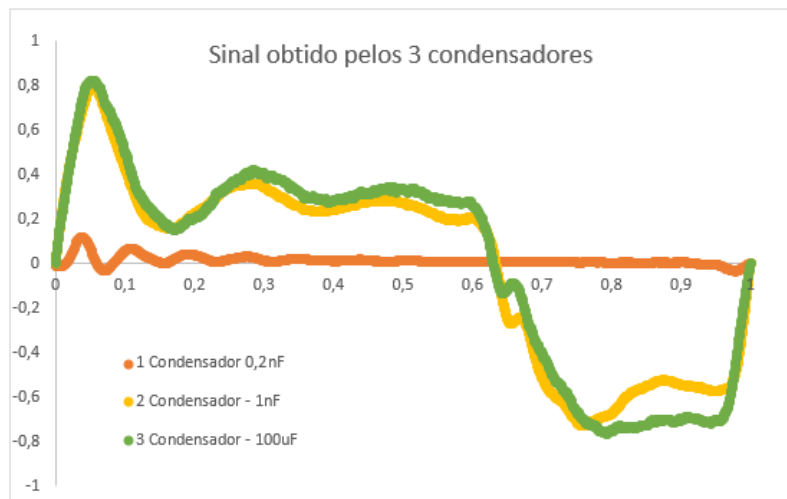


Figura 0.4 Tempo adimensional para os três condensadores

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1																	
2								soma dos erros	10,52013735								
3	A	0,9															
4	B	510															
5	C	1,6E-11															
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	

t	média	Modelo	square devi	
7,56E-08	0	0,8144	1,1	0,08156736
7,58E-08	2E-10	0,8128	1,07820931	0,070442102
7,6E-08	4E-10	0,8072	1,056946214	0,062373171
7,62E-08	6E-10	0,8016	1,036197937	0,055036192
7,64E-08	8E-10	0,8	1,015952015	0,046635273
7,66E-08	1E-09	0,7984	0,996196284	0,03912337
7,68E-08	1,2E-09	0,7968	0,976918877	0,03244281
7,7E-08	1,4E-09	0,7912	0,958108212	0,027858351
7,72E-08	1,6E-09	0,7912	0,939752989	0,022067991
7,74E-08	1,8E-09	0,7896	0,92184218	0,017487994
7,76E-08	2E-09	0,788	0,904365026	0,013540819
7,78E-08	2,2E-09	0,7808	0,887311026	0,011344599
7,8E-08	2,4E-09	0,772	0,870669935	0,009735756
7,82E-08	2,6E-09	0,7648	0,854431757	0,008033852
7,84E-08	2,8E-09	0,7576	0,838586735	0,006558851
7,86E-08	3E-09	0,7528	0,823125351	0,004945655
7,88E-08	3,2E-09	0,7456	0,808038317	0,003898543
7,9E-08	3,4E-09	0,7384	0,793316567	0,003015829
7,92E-08	3,6E-09	0,7272	0,778951259	0,002678193
7,94E-08	3,8E-09	0,72	0,764933762	0,002019043
7,96E-08	4E-09	0,7184	0,751255655	0,001079494
7,98E-08	4,2E-09	0,7152	0,73790872	0,000515686
8E-08	4,4E-09	0,7104	0,72488494	0,000209813
8,02E-08	4,6E-09	0,7032	0,71217649	8,05774E-05
8,04E-08	4,8E-09	0,704	0,699775736	1,78444E-05
8,06E-08	5E-09	0,6984	0,687675227	0,000115021
8,08E-08	5,2E-09	0,6968	0,675867694	0,000438161
8,1E-08	5,4E-09	0,6912	0,664346043	0,000721135
8,12E-08	5,6E-09	0,6896	0,653103354	0,001332005
8,14E-08	5,8E-09	0,688	0,642132871	0,002103794
8,16E-08	6E-09	0,6864	0,631428004	0,00302192

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:  ↑

Para:  Máximo  Mínimo  Valor de:

Alterando as Células de Variável:  ↑

Sujeito às Restrições:

Tornar Não Negativas Variáveis Não Constrangidas

Selec. Método Resolução:  Opções

Método de Resolução

Selecione o motor GRG Não Linear para problemas não lineares uniformes do Solver. Selecione o motor LP Simplex para problemas lineares do Solver, e selecione o motor Evolutionary para problemas não uniformes do Solver.

Ajuda  Fechar

Figura 0.5 Parâmetros do Solver – Variáveis células A, B, C e soma dos erros

soma 0,303643

a	0,1196
b	510
c	1,5E-11

t	média	modelo	Sqr
0	0,1196	0,1232	1,3E-05
2E-10	0,1208	0,120114	4,71E-07
4E-10	0,12032	0,117107	1,03E-05
6E-10	0,11944	0,114178	2,77E-05
8E-10	0,11752	0,111325	3,84E-05
1E-09	0,11512	0,108545	4,32E-05
1,2E-09	0,11152	0,105837	3,23E-05
1,4E-09	0,1076	0,103198	1,94E-05
1,6E-09	0,10304	0,100628	5,82E-06
1,8E-09	0,09776	0,098124	1,33E-07
2E-09	0,09272	0,095685	8,79E-06
2,2E-09	0,08688	0,093309	4,13E-05
2,4E-09	0,07992	0,090994	0,000123
2,6E-09	0,07376	0,088739	0,000224
2,8E-09	0,06648	0,086542	0,000402
3E-09	0,05944	0,084402	0,000623
3,2E-09	0,0516	0,082316	0,000944
1,04E-07	0,01024	0,0036	4,41E-05
1,04E-07	0,0104	0,0036	4,62E-05
1,04E-07	0,01024	0,0036	4,41E-05
1,05E-07	0,01096	0,0036	5,42E-05
1,05E-07	0,01112	0,0036	5,65E-05
1,05E-07	0,01112	0,0036	5,65E-05
1,05E-07	0,01128	0,0036	5,9E-05
1,05E-07	0,01128	0,0036	5,9E-05
1,06E-07	0,01128	0,0036	5,9E-05
1,06E-07	0,01104	0,0036	5,54E-05
1,06E-07	0,0112	0,0036	5,78E-05
1,06E-07	0,01056	0,0036	4,84E-05

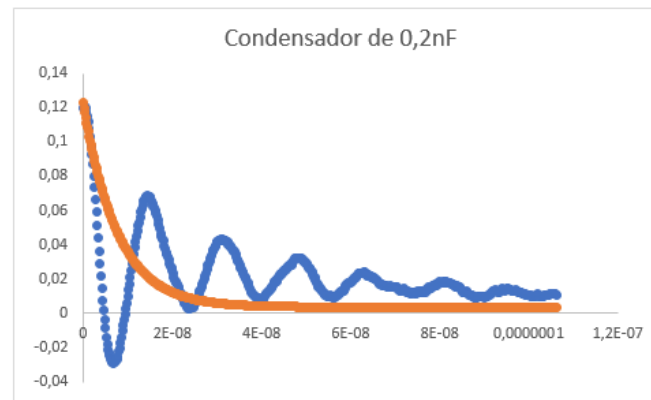


Figura 0.6 EXCEL suplemento solver para o ensaio com o condensador 0,2nF

a	0,72
b	2E-11
c	8,90856

t	média	modelo	Sqr
0	0	0,8768	0,00666
2E-10	0,00031	0,86282	0,00479
4E-10	0,00063	0,84911	0,00326
6E-10	0,00094	0,83567	0,0022
8E-10	0,00125	0,82249	0,00136
1E-09	0,00157	0,80956	0,00083
1,2E-09	0,00188	0,79689	0,00037
1,4E-09	0,00219	0,78446	0,00018
1,6E-09	0,00251	0,77227	1,8E-05
1,8E-09	0,00282	0,76032	1E-07
2E-09	0,00313	0,7486	6,7E-05
2,2E-09	0,00344	0,73711	0,00022
2,4E-09	0,00376	0,72584	0,00053
2,6E-09	0,00407	0,71479	0,00085
2,8E-09	0,00438	0,70396	0,00113
3E-09	0,00469	0,69334	0,00143
3,2E-09	0,005	0,68292	0,0015
3,4E-09	0,00532	0,6727	0,00167
3,6E-09	0,00563	0,66269	0,00198
1,6E-07	0,21267	0,1568	0,00124
1,6E-07	0,2129	0,1568	0,00102
1,6E-07	0,21313	0,1568	0,00102
1,6E-07	0,21336	0,1568	0,00083
1,6E-07	0,21359	0,1568	0,00074
1,6E-07	0,21382	0,1568	0,00058
1,6E-07	0,21405	0,1568	0,0005
1,6E-07	0,21428	0,1568	0,00043
1,6E-07	0,21451	0,1568	0,00031
1,6E-07	0,21474	0,1568	0,00021
1,6E-07	0,21497	0,1568	6,4E-05
1,6E-07	0,2152	0,1568	1E-05
1,6E-07	0,21542	0,1568	2,6E-06
1,6E-07	0,21565	0,1568	1,2E-14

a	0,72
b	2E-11
c	8,90856

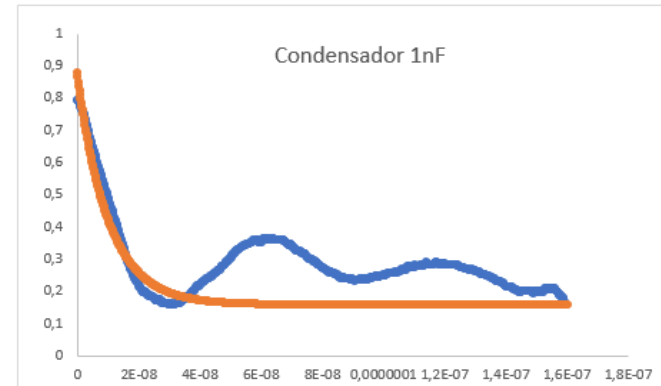


Figura 0.7 EXCEL suplemento solver para o ensaio com o condensador 1nF

soma dos erros 10,52013735

A	0,9
B	510
C	1,6E-11

t	média	Modelo	square devi	
7,56E-08	0	0,8144	1,1	0,08156736
7,58E-08	2E-10	0,8128	1,07820931	0,070442102
7,6E-08	4E-10	0,8072	1,056946214	0,062373171
7,62E-08	6E-10	0,8016	1,036197937	0,055036192
7,64E-08	8E-10	0,8	1,015952015	0,046635273
7,66E-08	1E-09	0,7984	0,996196284	0,03912337
7,68E-08	1,2E-09	0,7968	0,976918877	0,03244281
7,7E-08	1,4E-09	0,7912	0,958108212	0,027858351
7,72E-08	1,6E-09	0,7912	0,939752989	0,022067991
7,74E-08	1,8E-09	0,7896	0,92184218	0,017487994
7,76E-08	2E-09	0,788	0,904365026	0,013540819
7,78E-08	2,2E-09	0,7808	0,887311026	0,011344599
7,8E-08	2,4E-09	0,772	0,870669935	0,009735756
7,82E-08	2,6E-09	0,7648	0,854431757	0,008033852
7,84E-08	2,8E-09	0,7576	0,838586735	0,006558851
7,86E-08	3E-09	0,7528	0,823125351	0,004945655
2,32E-07	1,57E-07	0,2536	0,200000004	0,00287296
2,32E-07	1,57E-07	0,2536	0,200000004	0,00287296
2,33E-07	1,57E-07	0,2536	0,200000004	0,00287296
2,33E-07	1,57E-07	0,2536	0,200000004	0,00287296
2,33E-07	1,57E-07	0,248	0,200000004	0,002304
2,33E-07	1,58E-07	0,2464	0,200000004	0,00215296
2,33E-07	1,58E-07	0,2392	0,200000004	0,00153664
2,33E-07	1,58E-07	0,24	0,200000004	0,0016
2,33E-07	1,58E-07	0,2368	0,200000004	0,00135424
2,33E-07	1,58E-07	0,232	0,200000004	0,001024
2,33E-07	1,58E-07	0,2288	0,200000004	0,00082944
2,33E-07	1,58E-07	0,2232	0,200000004	0,00053824
2,33E-07	1,58E-07	0,22	0,200000004	0,0004
2,33E-07	1,58E-07	0,2168	0,200000004	0,00028224

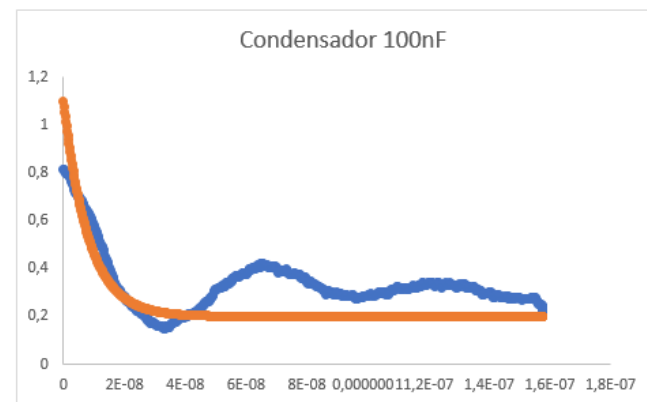


Figura 0.8 EXCEL suplemento solver para o ensaio com o condensador 1nF

Condensador de 0,2nF				Condensador de 1nF				Condensador de 100nF			
t		média	modelo	t		média	modelo	t		média	Modelo
0	0	0,1196	0,1232	0	0	0,7952	0,7568	0	0	0,8144	1,1
2E-10	0,0002	0,1208	0,12011	2E-10	0,0002	0,7936	0,74515	2E-10	0,0002	0,8128	1,07821
4E-10	0,0004	0,12032	0,11711	4E-10	0,0004	0,792	0,73373	4E-10	0,0004	0,8072	1,05695
6E-10	0,0006	0,11944	0,11418	6E-10	0,0006	0,7888	0,72252	6E-10	0,0006	0,8016	1,0362
8E-10	0,0008	0,11752	0,11132	8E-10	0,0008	0,7856	0,71154	8E-10	0,0008	0,8	1,01595
1E-09	0,001	0,11512	0,10854	1E-09	0,001	0,7808	0,70077	1E-09	0,001	0,7984	0,9962
1,2E-09	0,0012	0,11152	0,10584	1,2E-09	0,0012	0,7776	0,69021	1,2E-09	0,0012	0,7968	0,97692
1,4E-09	0,0014	0,1076	0,1032	1,4E-09	0,0014	0,7712	0,67985	1,4E-09	0,0014	0,7912	0,95811
1,6E-09	0,0016	0,10304	0,10063	1,6E-09	0,0016	0,768	0,66969	1,6E-09	0,0016	0,7912	0,93975
1,8E-09	0,0018	0,09776	0,09812	1,8E-09	0,0018	0,76	0,65973	1,8E-09	0,0018	0,7896	0,92184
2E-09	0,002	0,09272	0,09569	2E-09	0,002	0,7568	0,64997	2E-09	0,002	0,788	0,90437
2,2E-09	0,0022	0,08688	0,09331	2,2E-09	0,0022	0,752	0,64039	2,2E-09	0,0022	0,7808	0,88731
2,4E-09	0,0024	0,07992	0,09099	2,4E-09	0,0024	0,7488	0,631	2,4E-09	0,0024	0,772	0,87067
2,6E-09	0,0026	0,07376	0,08874	2,6E-09	0,0026	0,744	0,6218	2,6E-09	0,0026	0,7648	0,85443
2,8E-09	0,0028	0,06648	0,08654	2,8E-09	0,0028	0,7376	0,61277	2,8E-09	0,0028	0,7576	0,83859
3E-09	0,003	0,05944	0,0844	3E-09	0,003	0,7312	0,60391	3E-09	0,003	0,7528	0,82313
3,2E-09	0,0032	0,0516	0,08232	3,2E-09	0,0032	0,7216	0,59523	3,2E-09	0,0032	0,7456	0,80804
3,4E-09	0,0034	0,04368	0,08029	3,4E-09	0,0034	0,7136	0,58672	3,4E-09	0,0034	0,7384	0,79332
3,6E-09	0,0036	0,03616	0,07831	3,6E-09	0,0036	0,7072	0,57837	3,6E-09	0,0036	0,7272	0,77895
3,8E-09	0,0038	0,02888	0,07638	3,8E-09	0,0038	0,6992	0,57019	3,8E-09	0,0038	0,72	0,76493
4E-09	0,004	0,022	0,0745	4E-09	0,004	0,6912	0,56216	4E-09	0,004	0,7184	0,75126
4,2E-09	0,0042	0,01432	0,07267	4,2E-09	0,0042	0,6848	0,55429	4,2E-09	0,0042	0,7152	0,73791
4,4E-09	0,0044	0,00768	0,07089	4,4E-09	0,0044	0,6768	0,54657	4,4E-09	0,0044	0,7104	0,72488
4,6E-09	0,0046	0,00144	0,06915	4,6E-09	0,0046	0,6688	0,539	4,6E-09	0,0046	0,7032	0,71218
4,8E-09	0,0048	-0,0036	0,06746	4,8E-09	0,0048	0,6624	0,53158	4,8E-09	0,0048	0,704	0,69978
5E-09	0,005	-0,0088	0,06581	5E-09	0,005	0,6592	0,5243	5E-09	0,005	0,6984	0,68768

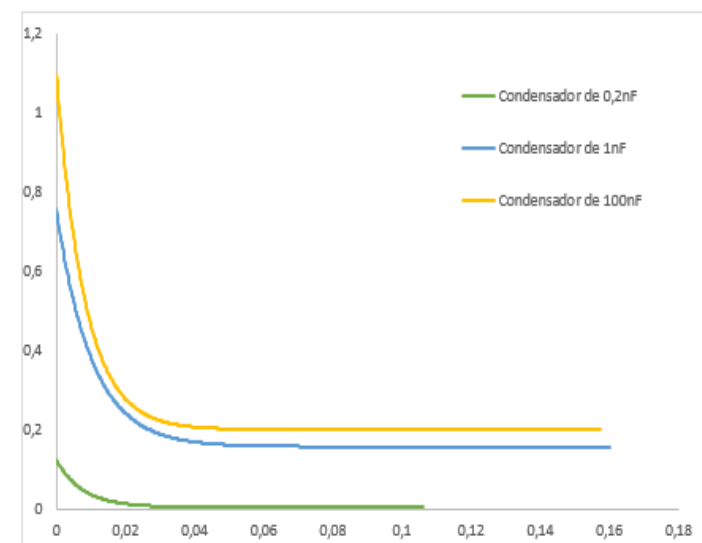


Figura 0.9 Análise do carregamento teórico do Condensador medida aos bornos da resistência

## **ANEXO A**

DataSheet – Transmissor HFBR2406z e Receptor-1404Z

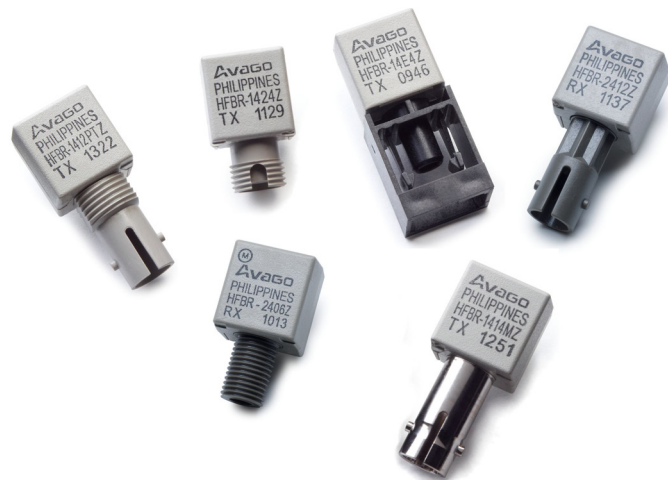


# HFBR-14xxZ and HFBR-24xxZ Series

## Low-Cost, 820 nm Miniature Link Fiber Optic Components with ST®, SMA, SC and FC Ports



## Data Sheet



### Description

The 820 nm Miniature Link Series of components is designed to provide cost-effective, high performance fiber optic communication links for information systems and industrial applications with link distances of several kilometers. With the HFBR-24x6Z, the 125 MHz analog receiver, data rates of up to 160 MBd can be attained.

Transmitters and receivers are directly compatible with popular "industry-standard" connectors: ST®, SMA, SC and FC. They are completely specified with multiple fiber sizes; including 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$ .

Products are available in various options. For example, transmitters with the improved protection option "P" show an increased ESD resistance to the pins. This "HFBR-141xPxZ" integrated solution is realized by including a Zener diode parallel to the LED.

The HFBR-14x4Z high power transmitter and HFBR-24x6Z 125 MHz receiver pair up to provide a duplex solution optimized for 100 Base-SX. 100Base-SX is a Fast Ethernet Standard (100 Mbps) at 850 nm on multimode fiber.

Evaluation kits are available for ST products, including transmitter, receiver, eval board and technical literature.

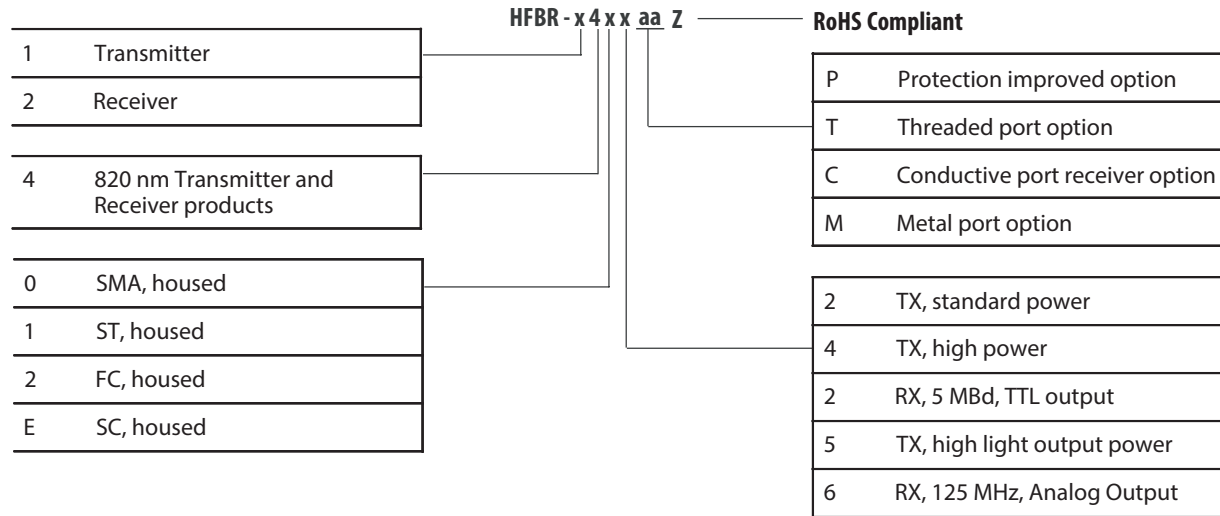
### Features

- RoHS compliant
- Meets IEEE 802.3 Ethernet and 802.5 token ring standards
- Meets TIA/EIA-785 100Base-SX standard
- Low-cost transmitters and receivers
- Choice of ST®, SMA, SC or FC ports
- 820 nm wavelength technology
- Signal rates up to 160 MBd
- Link distances up to several kilometers
- Compatible with 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$  Plastic-Clad Silica (PCS) Fiber
- Repeatable ST connections within 0.2 dB typical
- Unique optical port design for efficient coupling
- Pick and place, and wave solderable
- No board mounting hardware required
- Wide operating temperature range -40 °C to +85 °C
- Conductive port option

### Applications

- 100Base-SX Fast Ethernet on 850 nm
- Media/fiber conversion, switches, routers, hubs and NICs on 100Base-SX
- Local area networks
- Computer-to-peripheral links
- Computer monitor links
- Digital cross connect links
- Central office switch/PBX links
- Video links
- Modems and multiplexers
- Suitable for Tempest systems
- Industrial control links

## Part Number Guide



## Available Options

HFBR-1402Z	HFBR-1404Z	HFBR-1412PTZ	HFBR-1412PZ	HFBR-1412TMZ	HFBR-1412TZ
HFBR-1412Z	HFBR-1414PTZ	HFBR-1414PZ	HFBR-1414MZ	HFBR-1414TZ	HFBR-1414Z
HFBR-1415TZ	HFBR-1415Z	HFBR-1424Z	HFBR-14E4Z	HFBR-2402Z	HFBR-2406Z
HFBR-2412TCZ	HFBR-2412TZ	HFBR-2412Z	HFBR-2416MZ	HFBR-2416TCZ	HFBR-2416TZ
HFBR-2416Z	HFBR-2422Z	HFBR-24E2Z	HFBR-24E6Z		

**Note:**

For better readability of the electrical and optical specifications, all available options (P, T, C and M) are covered by the “HFBR-x4xxZ” product name; exceptions are explicitly noted.

## Link Selection Guide

Data rate (MBd)	Distance (m)	Transmitter	Receiver	Fiber Size (µm)	Evaluation Kit
5	1500	HFBR-14x2Z	HFBR-24x2Z	62.5/125	HFBR-0410Z
20	2700	HFBR-14x4Z/14x5Z	HFBR-24x6Z	62.5/125	HFBR-0416Z
32	2200	HFBR-14x4Z/14x5Z	HFBR-24x6Z	62.5/125	HFBR-0416Z
55	1400	HFBR-14x4Z/14x5Z	HFBR-24x6Z	62.5/125	HFBR-0416Z
125	700	HFBR-14x4Z/14x5Z	HFBR-24x6Z	62.5/125	HFBR-0416Z
155	600	HFBR-14x4Z/14x5Z	HFBR-24x6Z	62.5/125	HFBR-0416Z
160	500	HFBR-14x4Z/14x5Z	HFBR-24x6Z	62.5/125	HFBR-0416Z

For additional information about specific links, see the individual link descriptions.

The HFBR-1415Z can be used for increased power budget or for lower driving current for the same Data-Rates and Link-Distances.

## Options

In addition to the various port styles available for the HFBR- 0400Z series products, there are also several extra options that can be ordered. To order an option, simply place the corresponding option number at the end of the part number. See page 2 for available options.

### Option P (Protection improved option)

- Designed to withstand electrostatic discharge (ESD) of 2 kV (HBM) to the pins
- Available on TX with non-conductive ST and non-conductive threaded ST ports

### Option T (Threaded Port Option)

- Allows ST style port components to be panel mounted
- Compatible with all current makes of ST® multimode connectors
- Mechanical dimensions are compliant with MIL-STD- 83522/13
- Maximum wall thickness when using nuts and washers from the HFBR-4411Z hardware kit is 2.8 mm (0.11 inch)
- Available on all ST ports

### Option C (Conductive Port Receiver Option)

- Designed to withstand electrostatic discharge (ESD) of 25 kV to the optical port
- Significantly reduces effect of electromagnetic interference (EMI) on receiver sensitivity
- Allows designer to separate the signal and conductive port grounds
- Recommended for use in noisy environments
- Available on threaded ST port style receivers only
- The conductive port is connected to Pins 1, 4, 5 and 8 through the Port Grounding Path Insert

### Option M (Metal Port Option)

- Nickel plated aluminum connector receptacle
- Designed to withstand electrostatic discharge (ESD) of 15 kV to the optical port
- Significantly reduces effect of electromagnetic interference (EMI) on receiver sensitivity
- Allows designer to separate the signal and metal port grounds
- Recommended for use in very noisy environments
- Available on ST and threaded ST ports
- The metal port is connected to Pins 1, 4, 5 and 8 through the Port Grounding Path Insert

## Applications Support Guide

This section gives the designer information necessary to use the 820 nm Miniature Link Series components to make a functional optical transmission link.

Avago offers evaluation kits for hands-on experience with fiber optic products as well as a wide range of application notes complete with circuit diagrams and board layouts.

Furthermore, Avago's application support group is always ready to assist with any design consideration.

### Application Literature

Title	Description
Application Note 1065	Complete Solutions for IEEE 802.5J Fiberoptic Token Ring
Application Note 1121	DC to 32 MBd Fiberoptic Solutions
Application Note 1122	2 to 70 MBd Fiberoptic Solutions
Application Note 1123	20 to 160 MBd Fiberoptic Solutions
Application Note 1137	Generic Printed Circuit Layout Rules

### Evaluation Kits

Avago offers fiber optic kits that facilitate a simple means to evaluate and experience our products. These fiber optic kits contain all the components and tools required for customers to quickly evaluate and access the value of our products within their respective applications.

#### HFBR-0410Z ST Evaluation Kit DC to 5 MBd 820 nm Fiber Optic Eval Kit

Contains the following:

- One HFBR-1412Z transmitter
- One HFBR-2412Z receiver
- Eval board
- Related literature

#### HFBR-0416Z Evaluation Kit 125 MBd 820 nm Fiber Optic Eval Kit

Contains the following:

- One HFBR-1414Z transmitter
- One HFBR-2416Z receiver
- Eval board
- Related literature

## Package and Handling Information

### Package Information

All transmitters and receivers of the 820 nm Miniature Link Series are housed in a low-cost, dual-inline package that is made of high strength, heat resistant, chemically resistant, and UL 94V-O flame retardant plastic (UL File #E121562). The transmitters are easily identified by the light grey color connector port. The receivers are easily identified by the dark grey color connector port. (Black color for conductive port). The package is designed for pick and place and wave soldering so it is ideal for high volume production applications.

### Handling and Design Information

Each part comes with a protective port cap or plug covering the optics. Note: This plastic or rubber port cap is made to protect the optical path during assembly. It is not meant to remain on the part for a long period. These caps/plugs will vary by port style. When soldering, it is advisable to leave the protective cap on the unit to keep the optics clean. Good system performance requires clean port optics and cable ferrules to avoid obstructing the optical path.

Clean compressed air often is sufficient to remove particles of dirt; methanol on a cotton swab also works well.

### Recommended Chemicals for Cleaning/Degreasing 820 nm Miniature Link Products

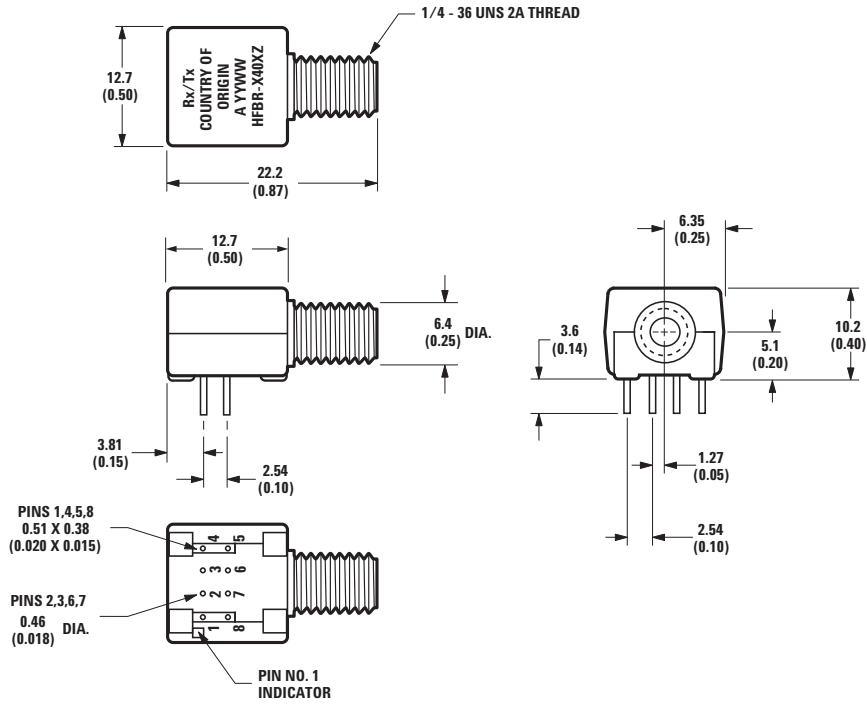
Alcohols: methyl, isopropyl, isobutyl.

Aliphatics: hexane, heptane, Other: soap solution, naphtha.

Do not use partially halogenated hydrocarbons (such as 1,1,1 trichloroethane), ketones (such as MEK), acetone, chloroform, ethyl acetate, methylene dichloride, phenol, methylene chloride, or N-methylpyrrolidone. Also, Avago does not recommend the use of cleaners that use halogenated hydrocarbons because of their potential environmental harm.

## Mechanical Dimensions - SMA Port

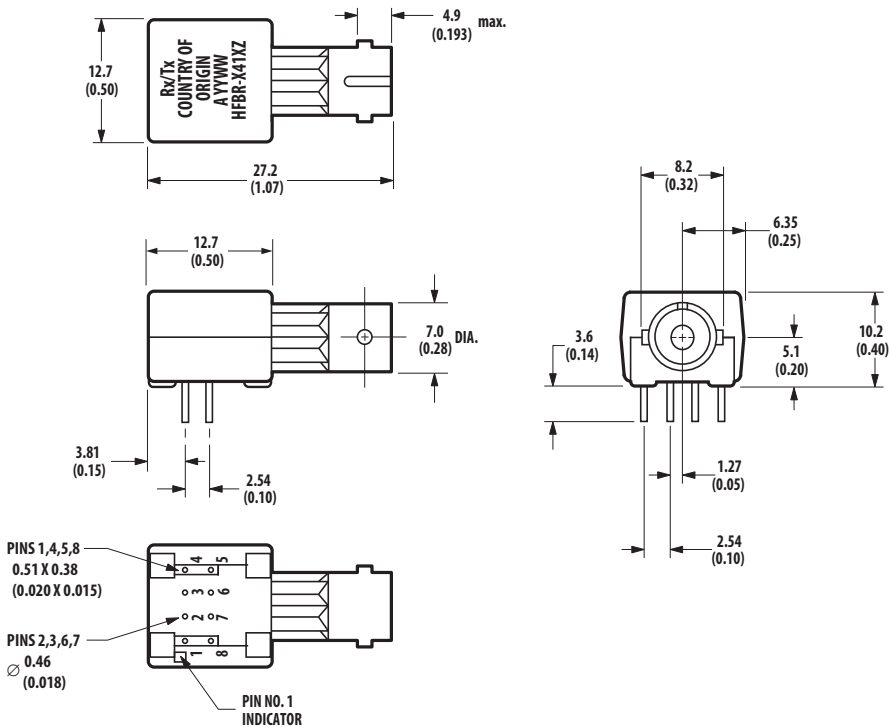
### HFBR-x40xZ



Dimensions in mm (inches)

## Mechanical Dimensions - ST Port

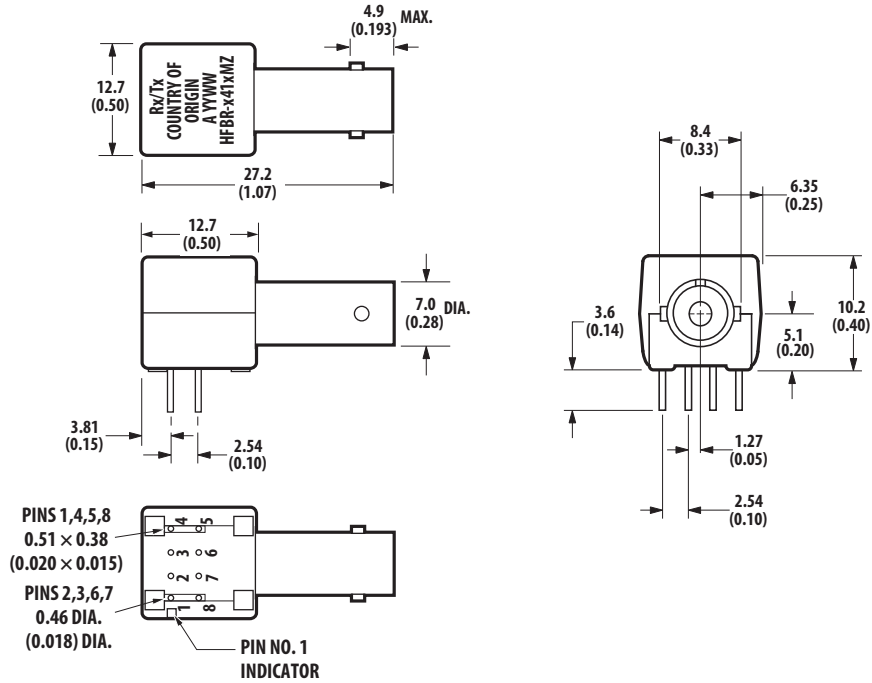
### HFBR-x41xZ



Dimensions in mm (inches)

## Mechanical Dimensions - Metal ST Port

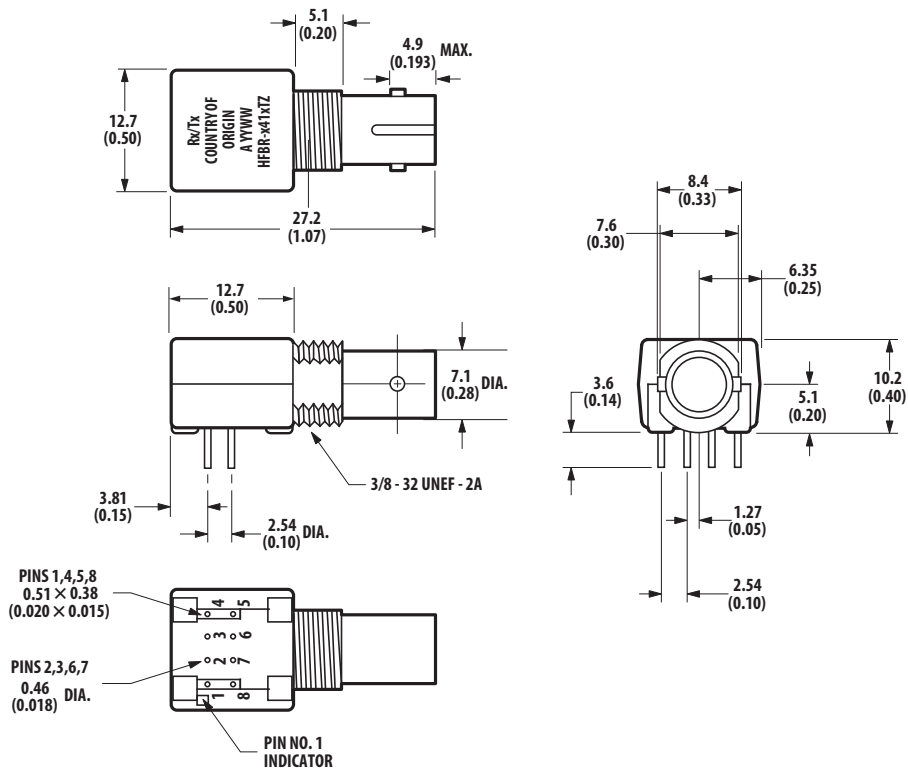
### HFBR-x41xMZ



Dimensions in mm (inches)

## Mechanical Dimensions - Threaded ST Port

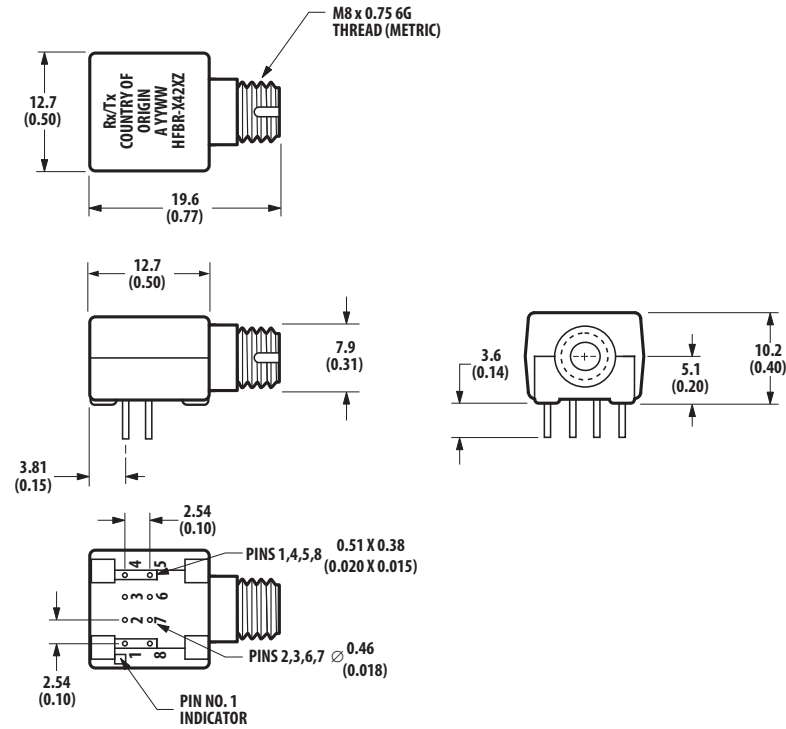
### HFBR-x41xTZ



Dimensions in mm (inches)

## Mechanical Dimensions - FC Port

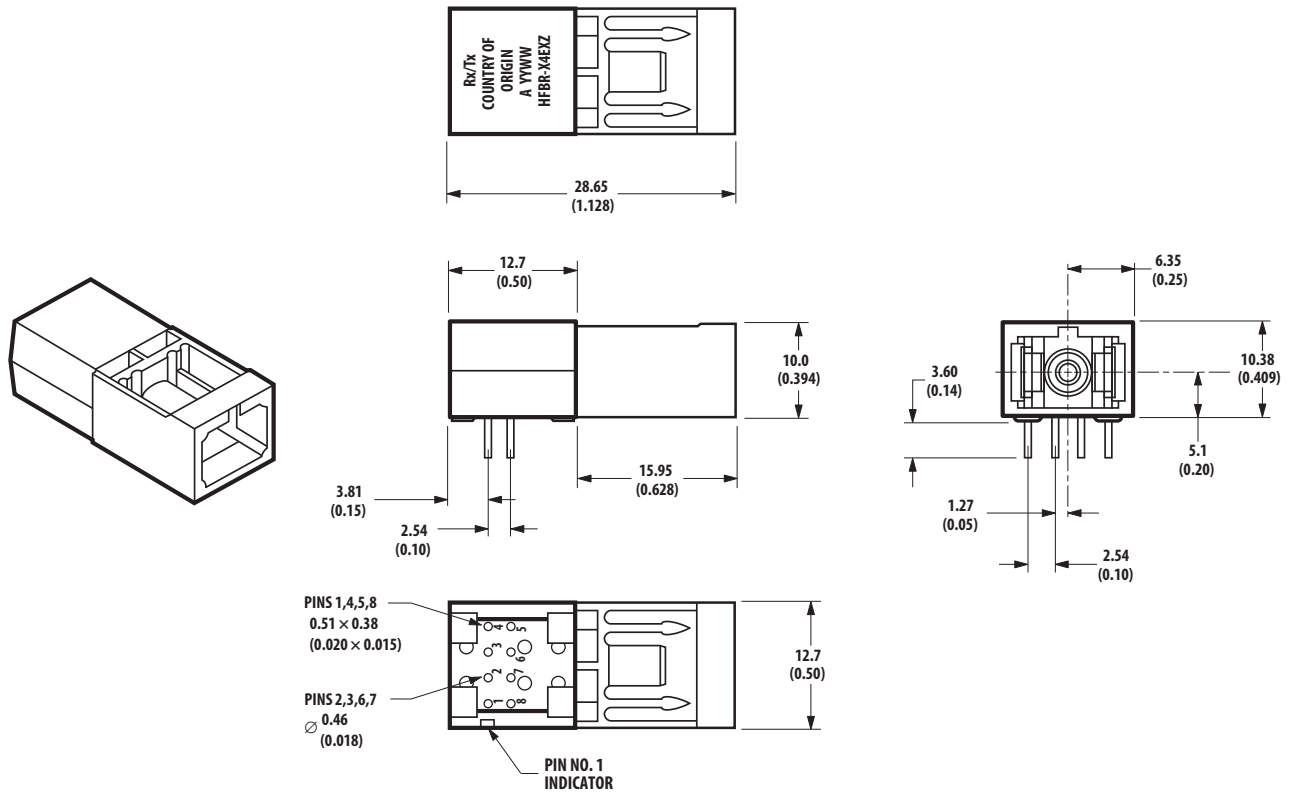
### HFBR-x42xZ



Dimensions in mm (inches)

## Mechanical Dimensions - SC Port

### HFBR-x4ExZ



Dimensions in mm (inches)



## Cross-Sectional View

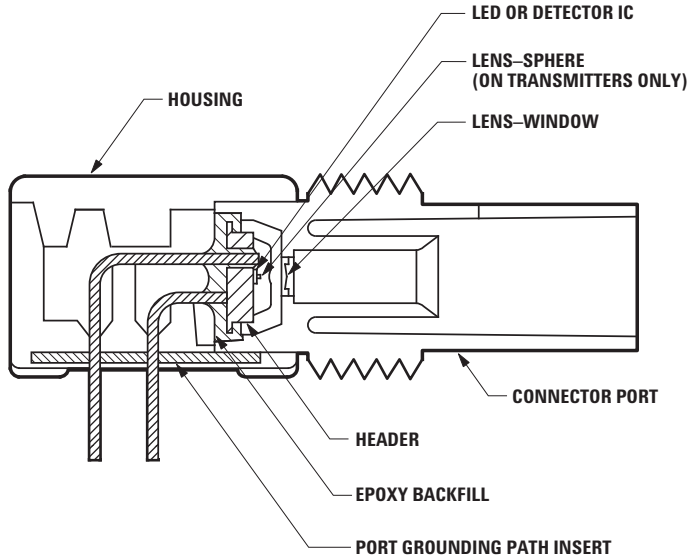
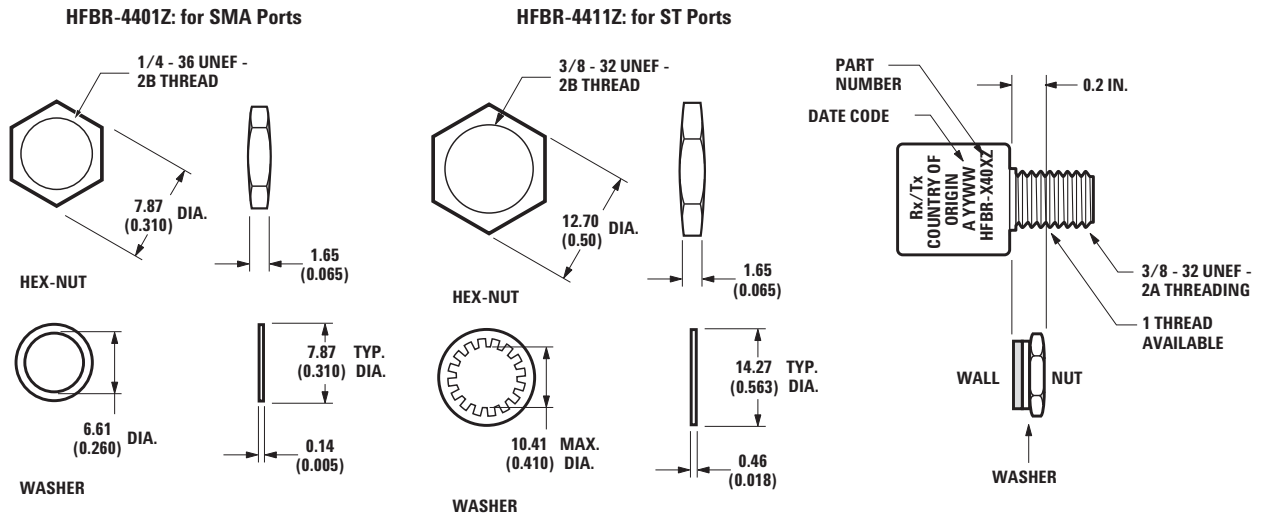


Figure 1. HFBR-x41xTZ ST Series Cross-Sectional View

## Panel Mount Hardware



(Each HFBR-4401Z and HFBR-4411Z kit consists of 100 nuts and 100 washers).

Dimensions in mm (inches)

## Port Cap Hardware

HFBR-4402Z: 500 SMA Port Caps

HFBR-4120Z: 500 ST Port Plugs

## Typical Link Data

The following technical data is taken from 5MBd and 155MBd link using the 820nm Miniature Link Series. This data is meant to be regarded as an example of typical link performance for a given design and does not call out any link limitations.

### 5 MBd Link (HFBR-14xxZ/24x2Z)

Link Performance -40 °C to +85 °C unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions	Reference
Optical Power Budget with 50/125 μm fiber	OPB <sub>50</sub>	4.2	9.6		dB	HFBR-14x4Z/24x2Z NA = 0.2	Note 1
Optical Power Budget with 62.5/125 μm fiber	OPB <sub>62.5</sub>	8.0	15		dB	HFBR-14x4Z/24x2Z NA = 0.27	Note 1
Optical Power Budget with 100/140 μm fiber	OPB <sub>100</sub>	8.0	15		dB	HFBR-14x2Z/24x2Z NA = 0.30	Note 1
Optical Power Budget with 200 μm fiber	OPB <sub>200</sub>	13.0	20		dB	HFBR-14x2Z/24x2Z NA = 0.37	Note 1
Data Rate		dc		5	MBd		Note 2
Propagation Delay LOW to HIGH	t <sub>PLH</sub>		72		ns		
Propagation Delay HIGH to LOW	t <sub>PHL</sub>		46		ns	T <sub>A</sub> = +25 °C P <sub>R</sub> = -21 dBm peak Fiber cable length = 1 m	Figures 6, 7, 8
System Pulse Width Distortion	t <sub>PLH</sub> - t <sub>PHL</sub>		26		ns		
Bit Error Rate	BER			10 <sup>-9</sup>		Data rate < 5 MBd P <sub>R</sub> > -24 dBm peak	

#### Notes:

- Optical Power Board at T<sub>A</sub> = -40 to +85 °C, V<sub>CC</sub> = 5.0 V dc, I<sub>F ON</sub> = 60 mA. P<sub>R</sub> = -24 dBm peak.
- Data rate limit is based on these assumptions:
  - 50% duty factor modulation, e.g., Manchester I or BiPhase Manchester II
  - Continuous data
  - PLL Phase Lock Loop demodulation
  - TTL threshold.

## 5 MBd Logic Link Design

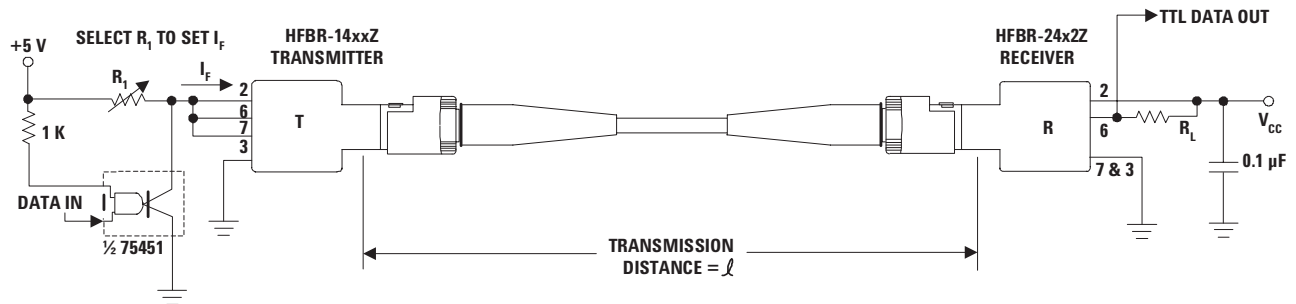
The resistor R1 is the only significant element in the drive circuit (see Figure 2) that limits the current through the LED, apart from the gate's output port. Depending on the actual gate used, the voltage drop on the output port  $V_{port}$  could be neglected. The forward voltage value,  $V_F$ , of the LED depends on the desired LED current and on the temperature (see Figure 9). Make sure you take this behavior into account for the calculations.

The curves in Figure 3, Figure 4, and Figure 5 are constructed assuming no inline splice or any additional system loss. Besides fiber attenuation, for correct power budget calculation, make sure you take into account the effect of bending, humidity, ambient temperature, aging and other relevant influences. All these additional losses reduce the achievable link distance accordingly.

For calculating the LED's aging effect, an additional loss of about 1.5 dB is recognized.

The following example will illustrate the technique for selecting the appropriate value of  $I_F$  and R1:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$



Note:

A bypass capacitor (0.01  $\mu$ F to 0.1  $\mu$ F ceramic) must be connected from pin 2 to pin 7 of the receiver. Total lead length between both ends of the capacitor and the pins should not exceed 20 mm.

**Figure 2. Typical Circuit Configuration**

The following diagrams (Figure 3 to Figure 5) serve as an aid in Link Design and are based on theoretical calculations. For broad use, no additional effects such as aging were taken into account. The additional losses and the individual safety buffer values should be added separately. These diagrams reflect the pure viewing of power budget and do not allow conclusions about the actual link quality.

Maximum distance required = 2000 meters by using HFBR-14x4Z/24x2Z logic link with 62.5/125  $\mu$ m fiber.

Figure 4 shows the "worst-case" drive current of about 43 mA for reaching a distance of about 2000 meters.

Figure 9 shows the transmitter forward voltage of about  $V_F = 1.62$  V. If the typical circuit configuration (Figure 2) is used at  $V_{CC} = 5.0$  V, the resistor value "R1" should be chosen to 78.6  $\Omega$  (3.38 V/43 mA) for reaching driver current of about 43 mA.

Page 16 shows the guaranteed HFBR-14x4Z's optical output power limit of -16.0 dBm (for driver current of 60 mA) over the entire temperature range.

Figure 10 shows the normalized typical output power. When the transmitter will be driven with 43 mA the optical output power is about 0.70 or -1.55 dB lower than at 60 mA.

With an assumed fiber attenuation of 3.2 dB/km and the reduced driver current of 43 mA, the minimum optical output power at fiber end is about -24 dBm, which is equal to the receiver sensitivity over the entire temperature range.

For balancing the individual additional system losses, the driver current must be increased accordingly.

**Overdrive:** Maximum optical output power of Tx combined with receiver sensitivity of -10 dBm over the entire temperature range.

**Typical 25 °C:** Typical optical output power of Tx combined with receiver sensitivity of -25.4 dBm at  $T_A = 25$  °C.

**Worst Case:** Minimum optical output power of Tx combined with receiver sensitivity of -24 dBm over the entire temperature range.

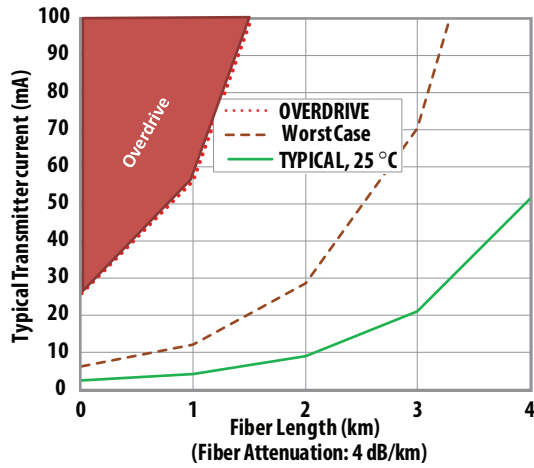


Figure 3. Typical HFBR-14x4xZ/HFBR-24x2xZ Link with 100/140  $\mu\text{m}$  Fiber

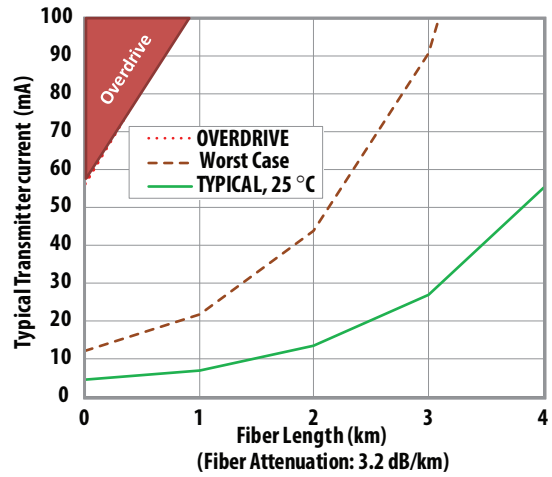


Figure 4. Typical HFBR-14x4xZ/HFBR-24x2xZ Link with 62.5/125  $\mu\text{m}$  Fiber

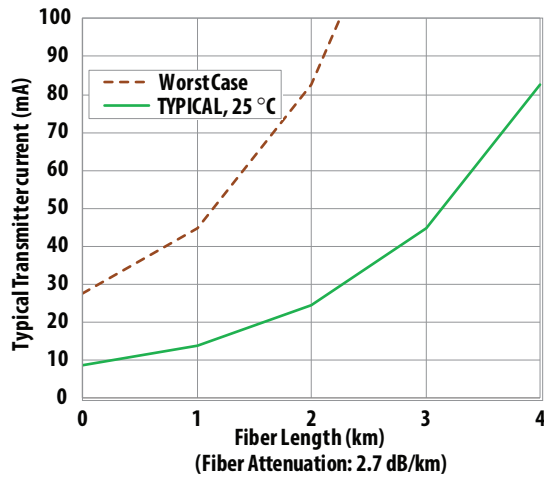


Figure 5. Typical HFBR-14x4xZ/HFBR-24x2xZ Link with 50/125  $\mu\text{m}$  Fiber

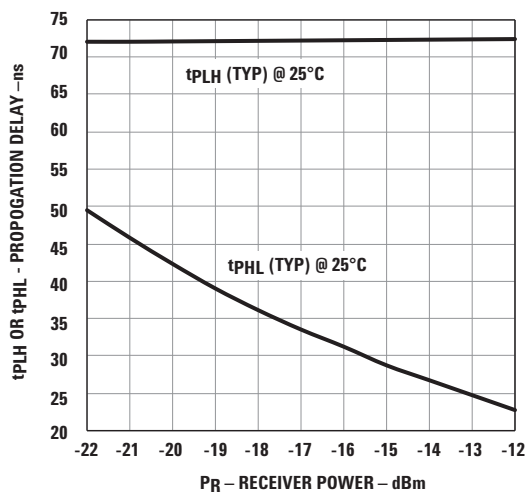


Figure 6. Typical Propagation Delay Times of Link (HFBR-14x4Z/HFBR-24x2Z) measured at  $T_A=25^\circ\text{C}$ , 5 MBd and with 1 m of Cable

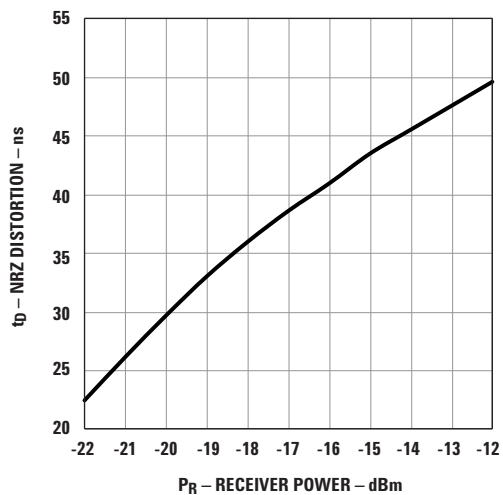


Figure 7. Typical Pulse Width Distortion of Link (HFBR-14x4Z/HFBR-24x2Z) measured at  $T_A=25^\circ\text{C}$ , 5 MBd and with 1 m of Cable

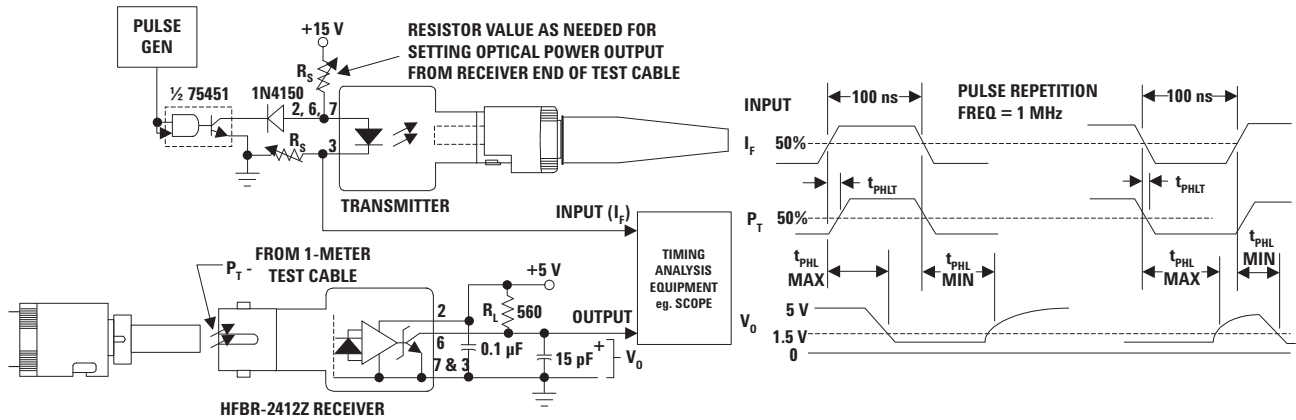


Figure 8. System Propagation Delay Test Circuit and Waveform Timing Definitions

## 155 MBd Link (HFBR-14x4Z/24x6Z)

### Typical Link Performance

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [1,2]	Max.	Units	Conditions	Reference
Optical Power Budget with 50/125 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>50</sub>		13.9		dB	NA = 0.2	Note 2
Optical Power Budget with 62.5/125 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>62</sub>		17.7		dB	NA = 0.27	
Optical Power Budget with 100/140 $\mu\text{m}$ fiber	OPB <sub>100</sub>		17.7		dB	NA = 0.30	
Optical Power Budget with 200 $\mu\text{m}$ PCS fiber	OPB <sub>200</sub>		22.0		dB	NA = 0.35	
Data Format 20% to 80% Duty Factor		20		160	MBd		
System Pulse Width Distortion	$ t_{PLH} - t_{PHL} $		1		ns	PR = -7 dBm peak 1 m 62.5/125 $\mu\text{m}$ fiber	
Bit Error Rate	BER		$10^{-9}$			Data rate < 100 MBd PR > -31 dBm peak	Note 2

#### Notes:

1. Typical data at  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5.0 V_{dc}$ , PECL serial interface.
2. Typical OPB was determined at a probability of error (BER) of  $10^{-9}$ . Lower probabilities of error can be achieved with short fibers that have less optical loss.

## HFBR-14x2Z/14x4Z/14x5Z Low-Cost High-Speed Transmitters

### Description

The HFBR-14xxZ fiber optic transmitter contains an 820 nm AlGaAs emitter capable of efficiently launching optical power into four different optical fiber sizes: 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$  Plastic-Clad Silica (PCS). This allows the designer flexibility in choosing the fiber size. The HFBR-14xxZ is designed to operate with the Avago Technologies HFBR-24xxZ fiber optic receivers.

The HFBR-14xxZ transmitter's high coupling efficiency allows the emitter to be driven at low current levels resulting in low power consumption and increased reliability of the transmitter. The HFBR-14x4Z high power transmitter is optimized for small size fiber and typically can launch -15.8 dBm optical power at 60 mA into 50/125  $\mu\text{m}$  fiber and -12 dBm into 62.5/125  $\mu\text{m}$  fiber. The HFBR-14x2Z standard transmitter typically can launch -12 dBm of optical power at 60 mA into 100/140  $\mu\text{m}$  fiber cable. It is ideal for large size fiber such as 100/140  $\mu\text{m}$ . The high launched optical power level is useful for systems where star couplers, taps, or inline connectors create large fixed losses.

For 820 nm Miniature Link transmitters with protection improved option "P" a Zener diode parallel to the LED was implemented. Therefore, a higher ESD capability could be attained.

Note: Parameters "reverse input voltage" and "diode capacitance" for "HFBR-141xPxZ" transmitters deviate from the non P-parts.

### Regulatory Compliance - Targeted Specifications

Feature	Performance	Reference
Electrostatic Discharge (ESD)	Class 1B (>500 V, <1000 V) - Human Body Model	Note 1, 2

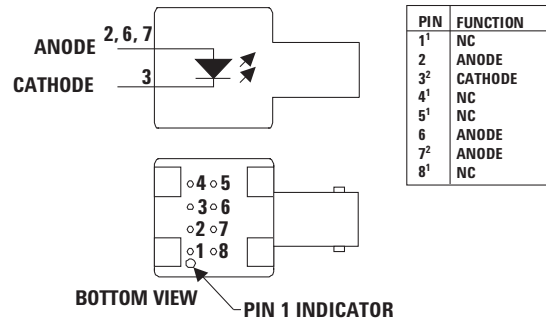
### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Reference
Storage Temperature	$T_S$	-55	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Operating Temperature	$T_A$	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Lead Soldering Cycle					
Temp			+260	$^{\circ}\text{C}$	
Time			10	sec	
Forward Input Current					
Peak	$I_{FPK}$		200	mA	Note 3
dc	$I_{Fdc}$		100	mA	
Reverse Input Voltage	VBR		1.8	V	
			0.3	V	Note 4
ESD (Human-body model)	ESD		2000	V	Note 1, 4

#### Notes:

- ESD capability for all pins HBM (Human Body Model) according JEDEC JESD22-A114.
- Valid for not protection improved transmitter option
- For  $I_{FPK} > 100$  mA, the time duration should not exceed 2 ns.
- Only valid for HFBR-141xPxZ (Protection improved option).

### Housed Product



#### NOTES:

- PINS 1, 4, 5 AND 8 ARE ELECTRICALLY CONNECTED.
- PINS 2, 6 AND 7 ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO THE HEADER.

Consistent coupling efficiency is assured by the double-lens optical system (Figure 1 on page 9). Power coupled into any of the three fiber types varies less than 5 dB from part to part at a given drive current and temperature. Consistent coupling efficiency reduces receiver dynamic range requirements, which allows for longer link lengths.

**Electrical/Optical Specifications** -40 °C to +85 °C unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [2]	Max.	Units	Conditions	Reference
Forward Voltage	$V_F$	1.48	1.70	2.09	V	$I_F = 60 \text{ mA dc}$	Figure 9
			1.84			$I_F = 100 \text{ mA dc}$	
Forward Voltage Temperature Coefficient	$\Delta V_F/\Delta T$		-0.22		mV/K	$I_F = 60 \text{ mA dc}$	Figure 9
			-0.18			$I_F = 100 \text{ mA dc}$	
Reverse Input Voltage	$V_{BR}$	1.8	3.8		V	$I_F = -100 \mu\text{A dc}$	Note 10
		0.3	0.7		V	$I_F = -100 \mu\text{A dc}$	
Peak Emission Wavelength	$\lambda_P$	792	820	865	nm		
Diode Capacitance	$C_T$		55		pF	$V = 0, f = 1 \text{ MHz}$	Note 10
			70		pF	$V = 0, f = 1 \text{ MHz}$	
Optical Power Temperature Coefficient	$\Delta P_T/\Delta T$		-0.006		dB/K	$I = 60 \text{ mA dc}$	
			-0.010			$I = 100 \text{ mA dc}$	
Thermal Resistance	$\theta_{JA}$		490		K/W		Notes 3, 8
14x2Z Numerical Aperture	NA		0.49				
14x4Z Numerical Aperture	NA		0.31				
14x2Z Optical Port Diameter	D		290		$\mu\text{m}$		Note 4
14x4Z Optical Port Diameter	D		150		$\mu\text{m}$		Note 4

**HFBR-14x2Z Output Power Measured Out of 1 Meter of Cable**

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions	Reference
50/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable	$P_{T50}$	-21.8	-18.8	-16.8	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	Notes 5, 6, 9
				-15.8	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
		-20.3	-16.8	-14.4	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	Figure 10
		-21.9		-13.8	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	
62.5/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable	$P_{T62}$	-19.0	-16.0	-14.0	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
				-13.0	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
		-17.5	-14.0	-11.6	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	
		-19.1		-11.0	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	
100/140 $\mu\text{m}$ Fiber Cable	$P_{T100}$	-15.0	-12.0	-10	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
				-9.0	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
		-13.5	-10.0	-7.6	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	
		-15.1		-7.0	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	
200 $\mu\text{m}$ PCS Fiber Cable	$P_{T200}$	-10.0	-7.0	-5.0	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
				-4.0	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 60 \text{ mA}$	
		-8.5	-5.0	-2.6	dBm peak	$T_A = +25 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	
		-10.1		-2.0	dBm peak	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C to } +85 \text{ }^\circ\text{C}, I_F = 100 \text{ mA}$	

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

### HFBR-14x4Z Output Power Measured out of 1 Meter of Cable

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [2]	Max.	Units	Conditions	Reference
50/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.2	P <sub>T50</sub>	-18.8	-15.8	-13.8	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	Notes 5, 6, 9
		-19.8		-12.8	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
		-17.3	-13.8	-11.4	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	Figure 10
		-18.9		-10.8	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	
62.5/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.275	P <sub>T62</sub>	-15.0	-12.0	-10.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60mA	
		-16.0		-9.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
		-13.5	-10.0	-7.6	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	
		-15.1		-7.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	
100/140 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.3	P <sub>T100</sub>	-11.5	-8.5	-6.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
		-12.5		-5.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
		-10.0	-6.5	-4.1	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	
		-11.6		-3.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	
200 $\mu\text{m}$ PCS Fiber Cable NA = 0.37	P <sub>T200</sub>	-7.5	-4.5	-2.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60mA	
		-8.5		-1.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
		-6.0	-2.5	-0.1	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	
		-7.6		0.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C, I <sub>F</sub> = 100 mA	

### HFBR-14x5Z Output Power Measured out of 1 Meter of Cable

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions	Reference
50/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.2	P <sub>T50</sub>	-16.5	-14.3	-11.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	Notes 5, 6, 9
		-17.5		-10.5	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to 85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
62.5/125 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.275	P <sub>T62</sub>	-12.0	-10.5	-8.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	Figure 10
		-13.0		-7.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to 85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
200 $\mu\text{m}$ Fiber Cable NA = 0.37	P <sub>T200</sub>	-6.0	-3.6	0.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = +25 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	
		-7.0		1.0	dBm peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to 85 °C, I <sub>F</sub> = 60 mA	

### 14x2Z/14x4Z/14x5Z Dynamic Characteristics

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [2]	Max.	Units	Conditions	Reference
Rise Time, Fall Time (10% to 90%)	t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub>		4.0	6.5	ns	I <sub>F</sub> = 60 mA No pre-bias Figure 11	Note 7
Rise Time, Fall Time (10% to 90%)	t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub>		3.0		ns	I <sub>F</sub> = 10 to 100 mA	Figure 12
Pulse Width Distortion	PWD		0.5		ns		Figure 12

#### Notes:

- For I<sub>FPK</sub> > 100 mA, the time duration should not exceed 2 ns.
- Typical data at T<sub>A</sub> = +25 °C.
- Thermal resistance is measured with the transmitter coupled to a connector assembly and mounted on a printed circuit board.
- D is measured at the plane of the fiber face and defines a diameter where the optical power density is within 10 dB of the maximum.
- P<sub>T</sub> is measured with a large area detector at the end of 1 meter of mode stripped cable, with an ST® precision ceramic ferrule (MILSTD-83522/13) for HFBR-141xZ, and with an SMA 905 precision ceramic ferrule for HFBR-140xZ.
- When changing mW to dBm, the optical power is referenced to 1 mW. Optical Power P(dBm) = 10log (P(mW) / 1mW)
- Pre-bias is recommended if signal rate > 10 MBd, see recommended drive circuit in Figure 11.
- Pins 2, 6 and 7 are welded to the anode header connection to minimize the thermal resistance from junction to ambient. To further reduce the thermal resistance, the anode trace should be made as large as is consistent with good RF circuit design.
- Fiber NA is measured at the end of 2 meters of mode stripped fiber, using the far-field pattern. NA is defined as the sine of the half angle, determined at 5% of the peak intensity point. When using other manufacturer's fiber cable, results will vary due to differing NA values and specification methods.
- Only valid for HFBR-141xPxZ (Protection improved option).



All HFBR-14XXZ LED transmitters are classified as IEC 825-1 Accessible Emission Limit (AEL) Class 1 based upon the current proposed draft scheduled to go in to effect on January 1, 1997. AEL Class 1 LED devices are considered eye safe. Contact your Avago Technologies sales representative for more information.

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## Recommended Drive Circuits

The circuit used to supply current to the LED transmitter can significantly influence the optical switching characteristics of the LED. The optical rise/fall times and propagation delays can be improved by using the appropriate circuit techniques. The LED drive circuit shown in Figure 11 uses frequency compensation to reduce the typical rise/fall times of the LED and a small pre-bias voltage to minimize propagation delay differences that cause pulse-

width distortion. The circuit will typically produce rise/fall times of 3 ns, and a total jitter including pulse-width distortion of less than 1 ns. This circuit is recommended for applications requiring low edge jitter or high-speed data transmission at signal rates of up to 155 MBd. Component values for this circuit can be calculated for different LED drive currents using the equations shown as follows.

$$R_Y = \frac{(V_{CC} - V_F) + 3.97(V_{CC} - V_F - 1.6V)}{I_{F\ ON} (A)}$$

$$R_{X1} = \frac{1}{2} \left( \frac{R_Y}{3.97} \right)$$

$$R_{EQ2} (\Omega) = R_{X1} - 1$$

$$R_{X2} = R_{X3} = R_{X4} = 3(R_{EQ2})$$

$$C(pF) = \frac{2000\ ps}{R_{X1}(\Omega)}$$

Example for  $I_{F\ ON} = 100\ mA$ :  
 $V_F$  can be obtained from Figure 9 (= 1.84 V).

$$R_Y = \frac{(5 - 1.84) + 3.97(5 - 1.84 - 1.6)}{0.100}$$

$$R_Y = \frac{3.16 + 6.19}{0.100} = 93.5\ \Omega$$

$$R_{X1} = \frac{1}{2} \left( \frac{93.5}{3.97} \right) = 11.8\ \Omega$$

$$R_{EQ2} = 11.8 - 1 = 10.8\ \Omega$$

$$R_{X2} = R_{X3} = R_{X4} = 3(10.8) = 32.4\ \Omega$$

$$C = \frac{2000\ ps}{11.8\ \Omega} = 169\ pF$$

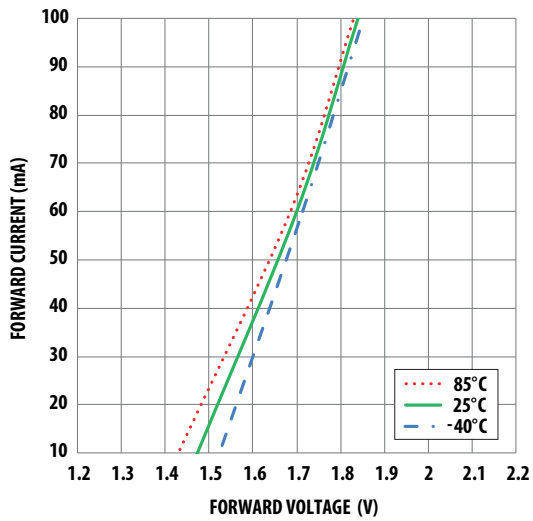


Figure 9. Typical Forward Voltage and Current Characteristics

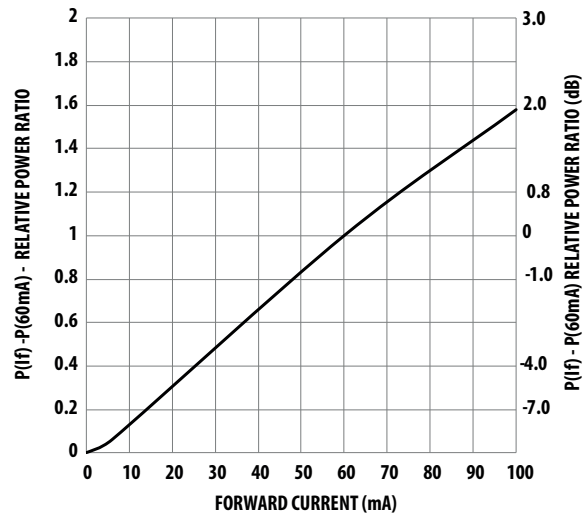


Figure 10. Normalized Typical Transmitter Output vs. Forward Current

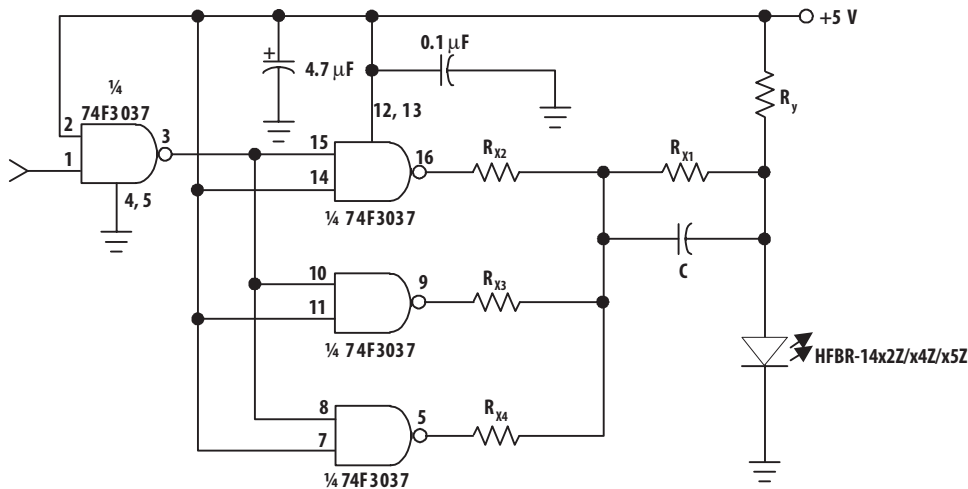


Figure 11. Recommended Drive Circuit

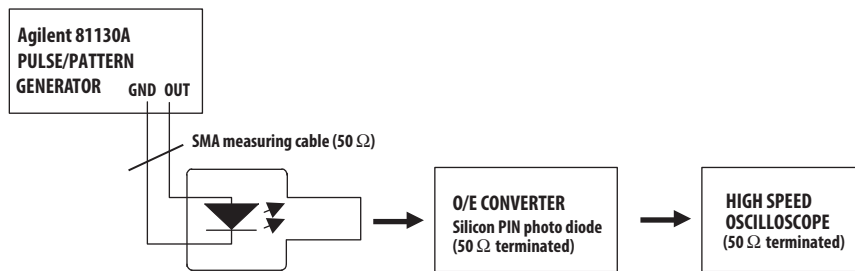


Figure 12. Test Circuit for Measuring  $t_r$ ,  $t_f$

## HFBR-24x2Z Low-Cost 5 MBd Receiver

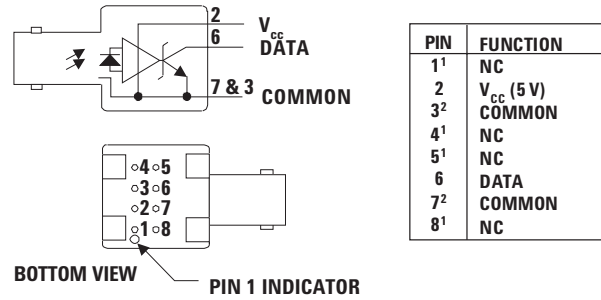
### Description

The HFBR-24x2Z fiber optic receiver is designed to operate with the Avago Technologies HFBR-14xxZ fiber optic transmitter and 50/125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/ 140  $\mu\text{m}$ , and 200  $\mu\text{m}$  Plastic-Clad Silica (PCS) fiber optic cable. Consistent coupling into the receiver is assured by the lensed optical system (Figure 1). Response does not vary with fiber size  $\leq 0.100 \mu\text{m}$ .

The HFBR-24x2Z receiver incorporates an integrated photo IC containing a photodetector and dc amplifier driving an open-collector Schottky output transistor. The HFBR-24x2Z is designed for direct interfacing to popular logic families. The absence of an internal pull-up resistor allows the open-collector output to be used with logic families such as CMOS requiring voltage excursions much higher than  $V_{CC}$ .

Both the open-collector "Data" output Pin 6 and  $V_{CC}$  Pin 2 are referenced to "Com" Pin 3, 7. The "Data" output allows busing, strobing and wired "OR" circuit configurations. The transmitter is designed to operate from a single +5 V supply. It is essential that a bypass capacitor (100 nF ceramic) be connected from Pin 2 ( $V_{CC}$ ) to Pin 3 (circuit common) of the receiver.

### Housed Product



#### NOTES:

- PINS 1, 4, 5 AND 8 ARE ELECTRICALLY CONNECTED.
- PINS 3 AND 7 ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO THE HEADER.

### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Reference
Storage Temperature	$T_S$	-55	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Operating Temperature	$T_A$	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$	
Lead Soldering Cycle Temp Time			+260 10	$^{\circ}\text{C}$ sec	Note 1
Supply Voltage	$V_{CC}$	-0.5	7.0	V	
Output Current	$I_O$		25	mA	
Output Voltage	$V_O$	-0.5	18.0	V	
Output Collector Power Dissipation	$P_{OAV}$		40	mW	
Fan Out (TTL)	N		5		Note 2

#### Notes:

- 2.0 mm from where leads enter case.
- 8 mA load (5 x 1.6 mA),  $R_L = 560 \Omega$ .

**Electrical/Optical Characteristics** -40 °C to + 85 °C unless otherwise specifiedFiber sizes with core diameter  $\leq 100 \mu\text{m}$  and  $\text{NA} \leq 0.35$ ,  $4.75 \text{ V} \leq V_{\text{CC}} \leq 5.25 \text{ V}$ 

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [3]	Max.	Units	Conditions	Reference
High Level Output Current	$I_{\text{OH}}$		5	250	$\mu\text{A}$	$V_{\text{O}} = 18$ , $P_{\text{R}} < -40 \text{ dBm}$	
Low Level Output Voltage	$V_{\text{OL}}$		0.4	0.5	V	$I_{\text{O}} = 8 \text{ m}$ , $P_{\text{R}} > -24 \text{ dBm}$	
High Level Supply Current	$I_{\text{CCH}}$		3.5	6.3	mA	$V_{\text{CC}} = 5.25 \text{ V}$ , $P_{\text{R}} < -40 \text{ dBm}$	
Low Level Supply Current	$I_{\text{CCL}}$		6.2	10	mA	$V_{\text{CC}} = 5.25 \text{ V}$ , $P_{\text{R}} > -24 \text{ dBm}$	
Equivalent NA	NA		0.50				
Optical Port Diameter	D		400		$\mu\text{m}$		Note 4

**Dynamic Characteristics**-40 °C to + 85 °C unless otherwise specified;  $4.75 \text{ V} \leq V_{\text{CC}} \leq 5.25 \text{ V}$ ;  $\text{BER} \leq 10^{-9}$ 

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [3]	Max.	Units	Conditions	Reference
Peak Optical Input Power Logic Level HIGH	$P_{\text{RH}}$			-40 0.1	dBm peak $\mu\text{W}$ peak	$\lambda_{\text{p}} = 820 \text{ nm}$	Note 5
Peak Optical Input Power Logic Level LOW	$P_{\text{RL}}$	-25.4		-9.2	dBm peak	$T_{\text{A}} = +25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $I_{\text{OL}} = 8 \text{ mA}$	Note 5
		2.9		120	$\mu\text{W}$ peak		
Propagation Delay LOW to HIGH	$t_{\text{PLHR}}$	-24.0		-10.0	dBm peak	$T_{\text{A}} = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $I_{\text{OL}} = 8 \text{ mA}$	Note 6
		4.0		100	$\mu\text{W}$ peak		
Propagation Delay HIGH to LOW	$t_{\text{PHLR}}$		49		ns	$T_{\text{A}} = +25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $P_{\text{R}} = -21 \text{ dBm}$ , Data Rate = 5 MBd	

**Notes:**

- 2.0 mm from where leads enter case.
- 8 mA load (5 x 1.6 mA),  $R_{\text{L}} = 560 \Omega$ .
- Typical data at  $T_{\text{A}} = +25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{\text{CC}} = 5.0 \text{ V}_{\text{dc}}$ .
- D is the effective diameter of the detector image on the plane of the fiber face. The numerical value is the product of the actual detector diameter and the lens magnification.
- Measured at the end of 100/140  $\mu\text{m}$  fiber optic cable with large area detector.
- Propagation delay through the system is the result of several sequentially-occurring phenomena. Consequently it is a combination of data-rate-limiting effects and of transmission-time effects. Because of this, the data-rate limit of the system must be described in terms of time differentials between delays imposed on falling and rising edges. As the cable length is increased, the propagation delays increase at 5 ns per meter of length. Data rate, as limited by pulse width distortion, is not affected by increasing cable length if the optical power level at the receiver is maintained.

*CAUTION: The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.*

## HFBR-24x6Z Low-Cost 125 MHz Receiver

### Description

The HFBR-24x6Z fiber optic receiver is designed to operate with the Avago Technologies HFBR-14xxZ fiber optic transmitters and 50/ 125  $\mu\text{m}$ , 62.5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$  and 200  $\mu\text{m}$  Plastic-Clad Silica (PCS) fiber optic cable. Consistent coupling into the receiver is assured by the lensed optical system (Figure 1). Response does not vary with fiber size for core diameters of 100  $\mu\text{m}$  or less.

The receiver output is an analog signal which allows follow-on circuitry to be optimized for a variety of distance/data rate requirements. Low-cost external components can be used to convert the analog output to logic compatible signal levels for various data formats and data rates up to 175 MBd. This distance/data rate trade-off results in increased optical power budget at lower data rates which can be used for additional distance or splices.

The HFBR-24x6Z receiver contains a PIN photodiode and low noise transimpedance preamplifier integrated circuit. The HFBR-24x6Z receives an optical signal and converts it to an analog voltage. The output is a buffered emitter

follower. Because the signal amplitude from the HFBR-24x6Z receiver is much larger than from a simple PIN photodiode, it is less susceptible to EMI, especially at high signaling rates. For very noisy environments, the conductive or metal port option is recommended. A receiver dynamic range of 23 dB over temperature is achievable, assuming a Bit Error Rate (BER) of  $10^{-9}$ .

The frequency response is typically dc to 125 MHz. Although the HFBR-24x6Z is an analog receiver, it is compatible with digital systems.

The recommended ac coupled receiver circuit is shown in Figure 14. A  $10\ \Omega$  resistor must be connected between pin 6 and the power supply, and a 100 nF ceramic bypass capacitor must be connected between the power supply and ground. In addition, pin 6 should be filtered to protect the receiver from noisy host systems. Refer to AN 1065 for details.

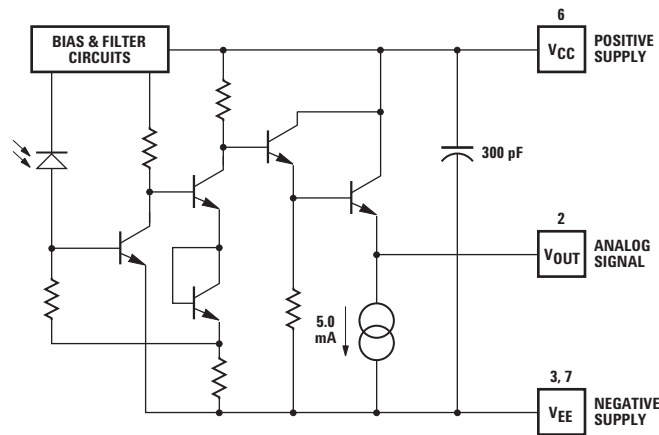
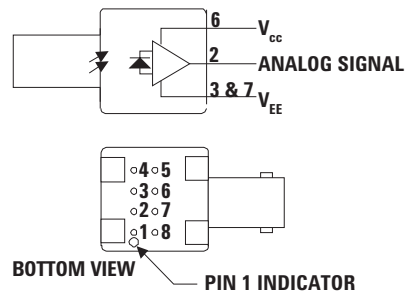


Figure 13. Simplified Schematic Diagram.

### Housed Product



PIN	FUNCTION
1 <sup>1</sup>	NC
2	SIGNAL
3 <sup>2</sup>	V <sub>EE</sub>
4 <sup>1</sup>	NC
5 <sup>1</sup>	NC
6	V <sub>CC</sub>
7 <sup>2</sup>	V <sub>EE</sub>
8 <sup>1</sup>	NC

#### NOTES:

1. PINS 1, 4, 5 AND 8 ARE ISOLATED FROM THE INTERNAL CIRCUITRY, BUT ARE CONNECTED TO EACH OTHER.
2. PINS 3 AND 7 ARE ELECTRICALLY CONNECTED TO THE HEADER.

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units	Reference
Storage Temperature	T <sub>S</sub>	-55	+85	°C	
Operating Temperature	T <sub>A</sub>	-40	+85	°C	
Lead Soldering Cycle Temp Time			+260 10	°C sec	Note 1
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	-0.5	6.0	V	
Output Current	I <sub>O</sub>		25	mA	
Signal Pin Voltage	V <sub>SIG</sub>	-0.5	V <sub>CC</sub>	V	

## Electrical/Optical Characteristics -40 °C to +85 °C; 4.75 V ≤ Supply Voltage ≤ 5.25 V,

R<sub>LOAD</sub> = 511 Ω, Fiber sizes with core diameter ≤ 100 μm, and N.A. ≤ 0.35 unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [2]	Max.	Units	Conditions	Reference
Responsivity	R <sub>P</sub>	5.3	7	9.6	mV/μW	T <sub>A</sub> = +25 °C @ 820 nm, 50 MHz	Note 3, 4 Figure 18
		4.5		11.5	mV/μW	T <sub>A</sub> = -40°C to +85°C @ 820nm, 50MHz	
RMS Output Noise Voltage	V <sub>NO</sub>		0.40	0.59	mV	Bandwidth filtered @ 75 MHz P <sub>R</sub> = 0 μW	Note 5 Figure 15
				0.70	mV	Unfiltered bandwidth P <sub>R</sub> = 0 μW	
Equivalent Input Optical Noise Power (RMS)	PN		-43.0 0.050	-41.4 0.065	dBm μW	Bandwidth filtered @ 75 MHz	
Optical Input Power (Overdrive)	P <sub>R</sub>			-7.6 175	dBm peak μW peak	T <sub>A</sub> = +25 °C	Note 6 Figure 16
				-8.2 150	dBm peak μW peak	T <sub>A</sub> = -40 °C to +85 °C	
Output Impedance	Z <sub>O</sub>		30		Ω	Test Frequency = 50 MHz	
dc Output Voltage	V <sub>O dc</sub>	V <sub>CC</sub> - 4.2	V <sub>CC</sub> - 3.1	V <sub>CC</sub> - 2.4	V	P <sub>R</sub> = 0 μW	
Power Supply Current	I <sub>EE</sub>		9	15	mA	R <sub>LOAD</sub> = 510 Ω	
Equivalent NA	NA		0.35				
Equivalent Diameter	D		324		μm		Note 7

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

## Dynamic Characteristics

-40 °C to +85 °C; 4.75 V ≤ Supply Voltage ≤ 5.25 V; R<sub>LOAD</sub> = 511 Ω, C<sub>LOAD</sub> = 5 pF unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Min.	Typ. [2]	Max.	Units	Conditions	Reference
Rise/Fall Time 10% to 90%	t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub>		3.3	6.3	ns	P <sub>R</sub> = 100 μW peak	Figure 17
Pulse Width Distortion	PWD		0.4	2.5	ns	P <sub>R</sub> = 150 μW peak	Note 8, Figure 16
Overshoot			2		%	P <sub>R</sub> = 5 μW peak, t <sub>r</sub> = 1.5 ns	Note 9
Bandwidth (Electrical)	BW		125		MHz	-3 dB Electrical	
Bandwidth - Rise Time Product			0.41		Hz • s	Note 10	

### Notes:

- 2.0 mm from where leads enter case.
- Typical specifications are for operation at T<sub>A</sub> = +25 °C and V<sub>CC</sub> = +5 V dc.
- For 200 μm PCS fibers, typical responsivity will be 6 mV/mW. Other parameters will change as well.
- Pin #2 should be ac coupled to a load 510 Ω. Load capacitance must be less than 5 pF.
- Measured with a 3 pole Bessel filter with a 75 MHz, -3 dB bandwidth.
- Overdrive is defined at PWD = 2.5 ns.
- D is the effective diameter of the detector image on the plane of the fiber face. The numerical value is the product of the actual detector diameter and the lens magnification.
- Measured with a 10 ns pulse width, 50% duty cycle, at the 50% amplitude point of the waveform.
- Percent overshoot is defined as:

$$\left( \frac{V_{PK} - V_{100\%}}{V_{100\%}} \right) \times 100\%$$

- The conversion factor for the rise time to bandwidth is 0.41 since the HFBR-24x6Z has a second order bandwidth limiting characteristic.

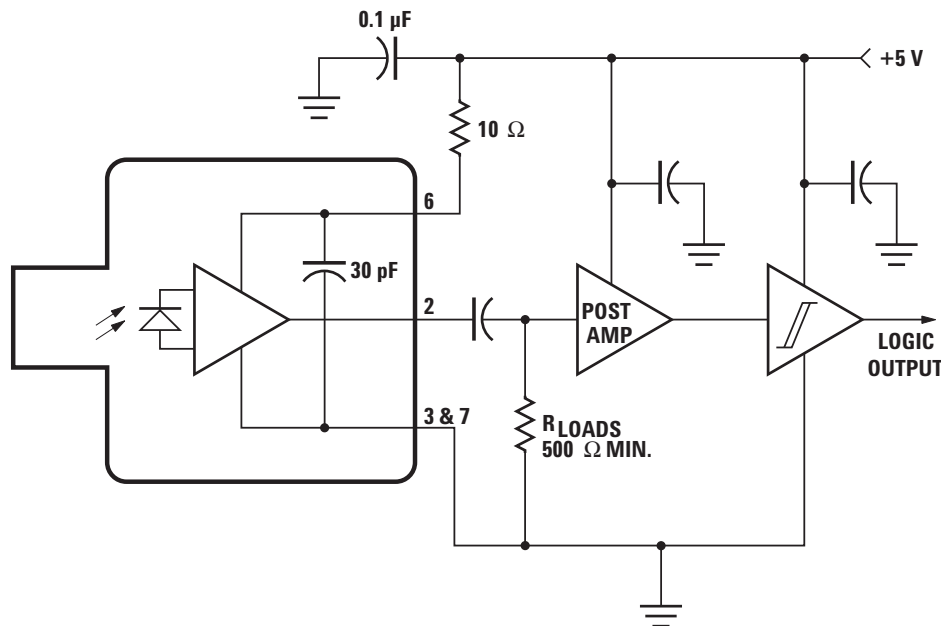


Figure 14. Recommended AC Coupled Receiver Circuit

**CAUTION:** The small junction sizes inherent to the design of these components increase the components' susceptibility to damage from electrostatic discharge (ESD). It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of these components to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

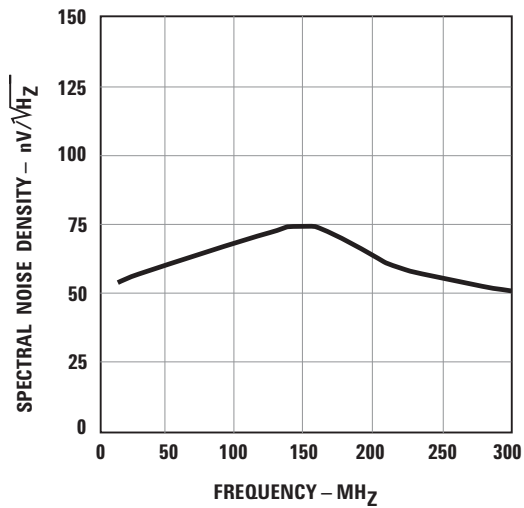


Figure 15. Typical Spectral Noise Density vs. Frequency

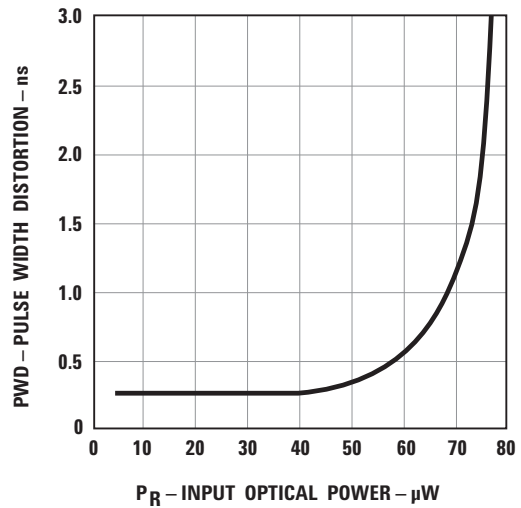


Figure 16. Typical Pulse Width Distortion vs. Peak Input Power

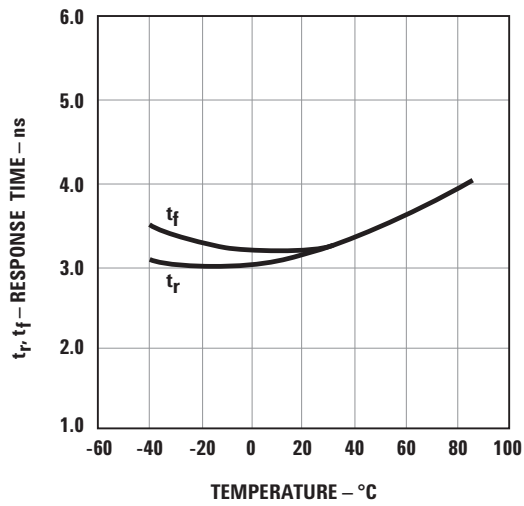


Figure 17. Typical Rise and Fall Times vs. Temperature

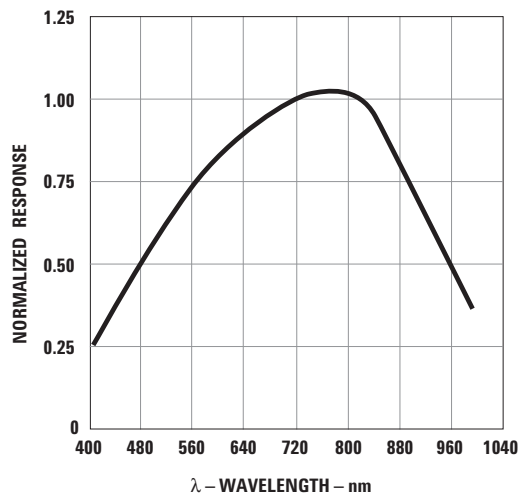


Figure 18. Typical Receiver Spectral Response Normalized to 820 nm

For product information and a complete list of distributors, please go to our web site: [www.avagotech.com](http://www.avagotech.com)

Avago, Avago Technologies, and the A logo are trademarks of Avago Technologies in the United States and other countries. Data subject to change. Copyright © 2005-2013 Avago Technologies. All rights reserved. Obsoletes AV01-0264EN AV02-0176EN - December 9, 2013

