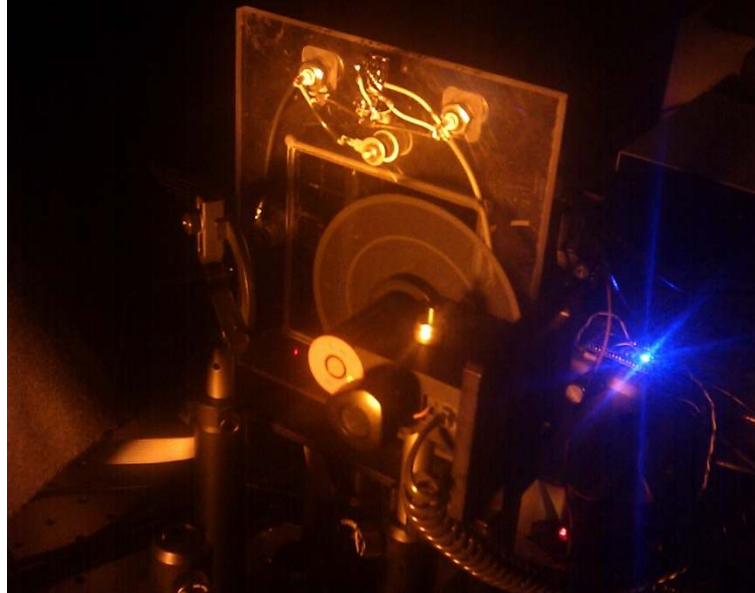


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Electrónica e de
Telecomunicações e de Computadores



Sinalização Semafórica com Transmissão de Informação Integrada (S2TI2)

Ricardo Jorge Sá Feliciano de Almeida
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Electrónica e Telecomunicações

Orientador(es):

Prof. Doutora Paula Louro
Prof. Doutora Manuela Vieira

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Manuela Vieira
Vogais:

Prof. Doutora Paula Louro
Prof. Doutor Manuel Barata

Dezembro de 2013

Agradecimentos

Os meus agradecimentos são o melhor que posso dar para quem contribuiu para esta fase da minha vida. É importante que se saiba que não estamos sozinhos no que fazemos, e que tudo se torna mais agradável com o apoio de quem nos é querido e por quem temos carinho e estima. Sinto a necessidade de expressar a minha gratidão e desta forma fazer com que a tese que aqui apresento seja também de quem me ajudou.

Em primeiro lugar agradecer aos meus pais Isabel e Mário, que sempre, mas sempre me apoiaram incondicionalmente em toda e qualquer situação, com todo o amor e carinho que têm por este filho tantas vezes foi inconstante e tantas vezes insuportável, pelo menos a meu ver. Eles que sabem e souberam ter a paciência, a arte e o engenho de ao final destes anos todos continuarem a saber como me ensinar e inspirar todos os dias, transmitindo sempre que hoje foi melhor que ontem e amanhã será melhor que hoje, e que tudo o que queremos podemos alcançar, basta sonhar... forçar... trabalhar... e banir a palavra não. Agradeço-vos muito do que sou hoje em dia, sabendo que me deixaram escolher o caminho e o par de asas aconselhando o melhor em cada situação.

À namorada Andreia Mouta que me deu sempre o seu apoio e carinho em todo este percurso e esta aventura da aprendizagem e descobrimento. Agradeço os dias de paciência, os dias do disparate, as vezes em que fui motivado e as vezes em que discutimos, tudo isso contribui para este momento.

Aos meus amigos Luís Figueiredo e Pedro Soares, que sempre em todo o percurso feito nesta instituição foram incansáveis no seu apoio e amizade, em que souberam sempre ter a melhor palavra e as melhores discussões em inúmeras horas de trabalho em todas as frentes. Amigos de festas e de aulas são amizades a guardar e para fazer com que os nossos caminhos se voltem a intersectar, seja a norte ou a sul, onde vocês se encontrem estarão sempre por perto.

Agradeço aos orientadores Paula Louro, Manuela Vieira e Manuel Vieira pela disponibilidade, o material facultado e pela hipótese que me deram de poder dar o meu contributo para este trabalho. Um agradecimento também para o professor Vítor Silva que sempre ajudou em todas as situações e deu ainda suporte em todas as questões do PiscalEd, e em todos os aparelhos à obtenção das medidas.

Quero ainda agradecer ao Sr. Manuel Ramos da Eyssa-Tesis que gentilmente disponibilizou o semáforo que foi usado durante o trabalho para poder ter medidas reais e fazer algum estudo sobre o aparelho e como ele funciona.

Resumo

Esta dissertação teve como objectivo fazer um estudo sobre a comunicação através da luz entre os elementos da estrutura rodoviária, neste caso foi considerada a comunicação entre o semáforo e um automóvel.

Os semáforos são usados desde há muito tempo apenas para controlar o tráfego rodoviário. Pretende-se com esta trabalho começar a dar passos para uma abordagem diferente do tradicional onde se pretende que o semáforo a LED transmita informação para o condutor do automóvel. Para que se possa pensar numa solução deste tipo utilizou-se um semáforo de LEDs laranja e um sensor com sensibilidade a todo o espectro luminoso.

A tese de dissertação focou-se sobretudo nas potências ópticas envolvidas e fizeram-se diversos testes com LEDs com as cores vermelha, amarela e verde. Foram feitos ensaios experimentais, primeiro com LEDs e depois com o semáforo a LEDs. Para ambos os ensaios foram usados fundos ópticos que fazem alterar o comportamento do sensor consoante a zona que iluminam.

Os fundos ópticos provocam ganho ou atenuações na resposta do sensor perante os diferentes comprimentos de onda e consoante se ilumina a parte frontal ou a parte posterior. Os ambientes envolventes também foram alterados para tentar provocar distúrbios no sinal interpretado pelo fotorreceptor. Os ambientes envolventes usados para os testes foi com luz fluorescente e de halogéneo. Estes provocaram realmente alterações no comportamento do sensor.

Pretende-se que se consiga transmitir a informação através de uma tecnologia que cada vez mais se tem vindo a estudar, denominada VLC Visible Light Communication onde a luz visível ao olho humano é usada para transmitir informação.

Palavras-chave: VLC, Semáforos LED, fotorreceptor

Índice

Índice.....	I
Índice de figuras	III
Lista de Tabelas	IX
Lista de acrónimos	XI
Capítulo 1. Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objectivo	2
1.3 Enquadramento histórico / Estado de arte.....	2
Capítulo 2. Visible Light Communication.....	5
Capítulo 3. Tecnologia LED em semáforos	9
3.1 Abordagem à cor e características	9
3.2 Emissão de Luz	12
3.3 Olho humano.....	13
3.4 Vantagens e desvantagens de semáforos LED	15
3.5 Semaforização	17
3.5.1 Sinalização luminosa.....	17
3.5.2 Tipos de Semáforo com LED	20
3.5.3 Regulamentação	22
3.5.4 Controladores	24

Capítulo 4.	Caracterização Opto Dispositivos Ópticos	25
4.1	Configuração e caracterização do dispositivo fotorreceptor.....	25
4.1.1	Sensor de LUZ	25
4.2	Metodologia	28
4.3	Utilização de LED's para simulação de semafórica	31
4.4	Semáforo LED Laranja	35
4.4.1	Características de Luz do Semáforo.....	35
4.5	Análise e Discussão de resultados.....	36
4.5.1	Medidas em ambiente controlado do canal vermelho.	37
4.5.2	Medidas em ambiente de Luz fluorescente.	53
4.5.3	Medidas em ambiente de Luz halogéneo.....	68
4.6	Comparação de canais	82
4.7	Semáforo Laranja	85
Capítulo 5.	Conclusão	91
Bibliografia	95

Índice de figuras

Figura 1 - Atenuações numa fibra óptica de sílica para as 3 janelas de transmissão na região dos IR.....	6
Figura 2 – Curvas de atenuação para fibras POF. [15]	7
Figura 3 - Soma espectral das cores. [6]	10
Figura 4 - Diagrama de cores obtido por um método aditivo.	11
Figura 5 - Espectro visível e suas características [7].....	11
Figura 6 - Cor branca formada de 3 comprimentos de onda. [2]	12
Figura 7 - Resposta dos diversos cones e bastonetes à luz.	14
Figura 8 - Resposta espectral do olho humano.....	15
Figura 9 - Semáforo em Viseu com auxiliar de temporização de luz LED.	16
Figura 10 - Sinal vertical com SLAC. A – [22] B – [21]	18
Figura 11 – Painel de mensagem variável com mensagem alfanumérica e simbólica. [9].....	19
Figura 12 - Semáforo ilustrativo – LED 1.....	20
Figura 13 - Semáforo ilustrativo – LED 2. [12]	20
Figura 14 – Lente exterior à cor do sinal.....	21
Figura 15 – Lente de convergência luminosa.....	21
Figura 16 – Placa emissora de luz.....	21
Figura 17 - Placa do transformador para baixa tensão.	21
Figura 18 – Caixa estanque.	22
Figura 19 - Gráfico CRI com os limites de cada cor.	24
Figura 20 - Estrutura PIN-PIN do receptor óptico.	26

Figura 21 - Esquema de camadas do sensor perante a incidência da luz.	27
Figura 22 - Resposta do sensor em corrente polarizado com -5V variando a frequência entre 15Hz e 2000Hz.	27
Figura 23 - Variação da fotocorrente com o comprimento de onda e diferentes tensões de polarização.	28
Figura 24 - Diagrama de blocos da topologia com leds utilizada.	29
Figura 25 - Programa de interface para o controlador dos LEDs.	30
Figura 26 - Diagrama de blocos da topologia de testes com o semáforo.	31
Figura 27 - Diagrama de Blocos do sistema.	31
Figura 28 – Bloco emissor do ensaio experimental constituído por LEDs.	32
Figura 29 – Resposta espectral do sensor de potência óptica.....	33
Figura 30 - Medidor Óptico.	33
Figura 31 - Comprimento de Onda central da luz amarela.	35
Figura 32 - Variação da potência óptica do semáforo laranja à medida que a distância aumenta.	36
Figura 33 – Canal vermelho em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.	37
Figura 34 - Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização frontal.	39
Figura 35 – Canal laranja em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.	40
Figura 36 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente controlado com polarização frontal.	41
Figura 37 – Canal verde em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.	42
Figura 38 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente controlado com polarização frontal.	43

Figura 39 – Média de ganhos da polarização frontal com fundo violeta para os 3 canais em ambiente controlado.....	44
Figura 40 – Canal vermelho em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.	45
Figura 41 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização posterior.....	46
Figura 42 – Canal laranja em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.	47
Figura 43 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização posterior.....	48
Figura 44 – Canal verde em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico. .	49
Figura 45 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização posterior.....	50
Figura 46 – Média de ganhos da polarização posterior com fundo violeta para os 3 canais em ambiente controlado.....	51
Figura 47 – Comportamento do sensor em ambiente controlado.	51
Figura 48 – Canal vermelho em ambiente de luz fluorescente com diversas intensidades de corrente no gráfico.	53
Figura 49 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz fluorescente com polarização frontal.	54
Figura 50 – Canal laranja em ambiente de luz fluorescente com diversas intensidades de corrente no gráfico.	55
Figura 51 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz fluorescente com polarização frontal.	56
Figura 52 – Canal verde em ambiente de luz fluorescente com diversas intensidades de corrente no gráfico.	57
Figura 53 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz fluorescente com polarização frontal.	58

Figura 54 – Média de ganhos da polarização frontal com fundo violeta para os 3 canais em ambiente fluorescente.	59
Figura 55 – Canal vermelho em ambiente de luz fluorescente com diversas intensidades de corrente no gráfico.	60
Figura 56 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz fluorescente com polarização posterior.....	61
Figura 57 – Canal laranja em ambiente de luz fluorescente com diversas intensidades de corrente no gráfico.	62
Figura 58 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz fluorescente com polarização posterior.....	63
Figura 59 – Canal verde em ambiente de luz fluorescente com diversas intensidades de corrente no gráfico.	64
Figura 60 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz fluorescente com polarização posterior.....	65
Figura 61 – Média de ganhos da polarização posterior com fundo violeta para os 3 canais em ambiente de luz fluorescente.	66
Figura 62 – Comportamento do sensor em ambiente de luz fluorescente.....	66
Figura 63 – Canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.	68
Figura 64 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com polarização frontal.	69
Figura 65 – Canal laranja em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.	70
Figura 66 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz de halogéneo com polarização frontal.	71
Figura 67 – Canal verde em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.	72

Figura 68 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz de halogéneo com polarização frontal.	73
Figura 69 – Média de ganhos da polarização frontal com fundo violeta para os 3 canais em ambiente de luz de halogéneo.	74
Figura 70 – Canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.	75
Figura 71 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com polarização posterior.....	76
Figura 72 – Canal laranja em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.	77
Figura 73 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz de halogéneo com polarização posterior.....	78
Figura 74 – Canal verde em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.	79
Figura 75 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz de halogéneo com polarização posterior.....	80
Figura 76 – Média de ganhos da polarização posterior com fundo violeta para os 3 canais em ambiente de luz de halogéneo.	81
Figura 77 – Comportamento do sensor em ambiente de luz de halogéneo.	81
Figura 78 – Comportamento do canal vermelho para os vários ambientes sem fundos de polarização.	82
Figura 79 – Comportamento do canal laranja para os vários ambientes sem fundos de polarização. ..	83
Figura 80 – Comportamento do canal verde para os vários ambientes sem fundos de polarização.	84
Figura 81 – Canal do semáforo laranja em vários ambientes de luz com fundo frontal.	85
Figura 82 – Evolução do ganho de polarização óptica frontal perante os diversos ambientes envolventes.....	86
Figura 83 – Canal do semáforo laranja em vários ambientes de luz com fundo posterior.	87

**Figura 84 – Evolução do ganho de polarização óptica frontal perante os diversos ambientes
envolventes.....88**

**Figura 85 – Variação do ganho óptico para cada comprimento de onda com a evolução da potência em
ambiente controlado a) fundo frontal b) fundo posterior.....89**

**Figura 86 – Variação do ganho óptico para cada comprimento de onda com a evolução da potência em
ambientes de luz fluorescente e de luz de halógeno a) fundo frontal b) fundo posterior.89**

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características das cores.....	23
Tabela 2 - Cantos que definem a fronteira da cor.	23
Tabela 3 – Potência óptica do canal vermelho para diferentes correntes com um cdo 645nm.....	34
Tabela 4 – Potência óptica do canal laranja para diferentes correntes com um cdo de 595nm.	34
Tabela 5 – Potência óptica do canal verde para diferentes correntes com um cdo de 525nm.....	34
Tabela 6 – Potência óptica do canal violeta para diferentes correntes com um cdo de 400nm.	34

Lista de acrónimos

LED	<i>Light emitting diode</i>
lm	Lumén
W	Watt
c.d.o.	Comprimento de Onda
VLC	<i>Visible Light Communication</i>
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i>
WWRF	<i>WorldWide Wireless Research Forum</i>
VLCC	<i>Visible Light Communication Consortium</i>
SLAC	Sinalização Luminosa de Aviso e Código
SLAT	Sinalização Luminosa Automática de Trânsito
PMV	Painel de Mensagem Variável

Capítulo 1. Introdução

A tecnologia LED ao longo dos últimos anos tem sido adaptada em todo o tipo de luz. A principal razão para este facto é a substancial poupança de energia conseguida com esta tecnologia em relação a todas as outras. Adicionando a esta característica, a possibilidade de se poder ligar e desligar sem ter preocupações com o seu tempo de vida ou com a sua intensidade máxima, este tipo de iluminação consegue ser muito versátil em todo o tipo de ambientes em que se encontre.

A versatilidade deste tipo de luz é tal que pode ser usada para transmitir informação através de um meio onde se propague a luz. Não é uma novidade uma vez que já há vários anos que isto se usa em aplicações tão banais como os comandos dos televisores. Nos dias que correm, a tecnologia a nível de materiais permitiu que o espectro visível consiga ser reproduzido, e como tal não é novidade nenhuma leds do vermelho ao azul que são usados em televisões e telemóveis entre muitos outros dispositivos.

O mundo rodoviário e as empresas responsáveis pela manutenção e gestão dos sistemas semaforicos também têm interesse nesta tecnologia, sobretudo devido à elevada poupança na factura energética. Actualmente diversas cidades encontram-se a fazer a migração das lâmpadas incandescentes para iluminações a led.

Hoje em dia aborda-se muito o tema das cidades sustentáveis e qual a melhor maneira de aproveitar os recursos delas, do meio ambiente, e com a qualidade de vida nas cidades de ambiente urbano, que por norma têm associada uma pegada ecológica e energética muito grande.

1.1 Motivação

A motivação para este trabalho parte muito da comunicação entre os elementos rodoviários. As entidades da rede rodoviária têm como objectivo comunicar entre elas, neste caso aplica-se entre semáforo → veículo. Aumentar a segurança de todos os intervenientes é o grande objectivo, actuando de forma pró-activa para conseguir evitar por exemplo congestionamentos e/ou acidentes.

Este projecto é para já uma área de estudo mas com boas perspectivas de inovação e de interesse. Com o tema da poupança energética cada vez mais em voga a iluminação LED é claramente a solução certa face às tecnologias actuais. Sendo

temas actuais e de interesse constituem uma clara motivação para a realização deste projecto.

A possibilidade de existir um projecto com parte prática em que se pode pensar em desenvolver trabalho real e com aplicabilidade nos nossos dias, faz com que o interesse pelo projecto seja cada vez maior ao mesmo tempo que este vai crescendo.

1.2 Objectivo

O objectivo deste projecto é estudar a viabilidade de poder implementar nas luzes dos semáforos um sistema de comunicação óptico, onde a luz emitida pelo semáforo transporta informação. Por exemplo, mensagens diferentes em cada cor com informações de trânsito ou alertas, podendo até fornecer indicações dos locais de interesse de determinado sítio, etc.

A sua implementação pretende-se fazer com uma fonte de luz real e usada para fazer a sinalização, um sensor que opera na gama do visível, e que é possível de moldar a sua sensibilidade espectral de forma a se poder ajustar da melhor forma à luz incidente.

A fase inicial tem como finalidade detectar as transições dos semáforos LEDs de modo a perceber-se que há informação a chegar ao sensor. Esta fase é feita com um semáforo cujo comprimento de onda usado, é sabido, que o sensor o detecta em boas condições.

Seguidamente pretende-se que para as três cores do semáforo o sensor também as consiga detectar, e, devido às características do sensor usado, podem ser seguidas duas abordagens à detecção da informação em cada cor do semáforo.

A primeira alternativa passa por assumir que apenas uma cor emite informação em cada momento, por exemplo se for o verde a emitir, apenas essa cor é considerada e tudo o que for detectado será interpretado como sendo verde. Outra abordagem possível de se fazer é que todas as cores possam ser emitidas ao mesmo tempo e o sensor as detecte em simultâneo.

1.3 Enquadramento histórico / Estado de arte

Os semáforos e o controlo rodoviário remontam ao século XIX, e são conceitos importados dos comboios e do controlo que lhes era feito. Numa altura em que o carro

a motor ainda não era uma realidade, os veículos que circulavam nas estradas existentes eram de tracção animal. Nessa altura começava a existir uma preocupação com a segurança dos peões devido aos atropelamentos que iam acontecendo.

Em Londres, o engenheiro John Peake Knight propôs um sistema de sinalização para os comboios. Este sistema utilizava a posição de um braço mecânico para assinalar o comportamento a adoptar pelos condutores. Caso o braço estivesse na horizontal bloqueava a circulação se o braço estivesse levantado dava passagem aos comboios.

Para as estradas, a intenção foi usar o mesmo sistema durante o dia, e à noite, o sistema semafórico usaria a cor vermelha para parar e a cor verde para avançar. As lâmpadas usadas para os semáforos eram lâmpadas a gás. O sinal era operado por um polícia sinaleiro.

O semáforo rodoviário foi instalado numa estrada movimentada perto do parlamento inglês no ano de 1868. Foi um projecto que demorou três anos a ser concretizado entre burocracias e partes técnicas. Quando foi instalado, funcionou ininterruptamente durante um mês. O sistema teve grande sucesso, até que uma fuga de gás das lâmpadas provocou uma explosão e queimou o polícia que operava o semáforo, ferindo-o mortalmente. O projecto da sinalização semafórica foi extinto imediatamente a fim de evitar mais acidentes trágicos.

Foram precisos cerca de 45 anos até se retomar a semaforização rodoviária. Este capítulo da história passa-se no outro lado do Atlântico, no estado de Ohio nos Estados Unidos da América.

Foi em 1914 que surge o primeiro semáforo eléctrico. Este semáforo surge já com lâmpadas eléctricas e de filamento. Até aos dias de hoje, na parte semafórica não há muitas diferenças. A grande diferença na sinalização foi sobretudo nos controladores e nas funcionalidades que foram sendo adicionadas, desde adaptar a semaforização às condições da via quando tem muito tráfego ou não, entre outras evoluções.

Agora com a tecnologia LED implementada em grande escala, os semáforos podem ganhar um novo conceito na luz de sinalização de trânsito.

Capítulo 2. Visible Light Communication

O VLC (Visible Light Communication) é um protocolo que tem sido desenvolvido principalmente desde a grande explosão do domínio óptico nas tecnologias de telecomunicações.

Até à década de 1960, sempre se privilegiou a comunicação através de ondas rádio e de radar. Nesta década começou-se a dar relevância à luz amplificada por emissão estimulada de radiação, vulgarmente conhecido como LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Começa aqui a grande revolução que deu origem às comunicações ópticas actuais.

Na década de 1960 é inventado o Díodo Laser.

Nos anos 70 são desenvolvidas fibras ópticas com atenuações muito baixas. Actualmente é o meio de transmissão maioritariamente usado para a transmissão de luz guiada.

Na década de 80 os amplificadores ópticos nas fibras são criados, bem como a grelha de Bragg nos anos 90.

Estas invenções levam-nos à grande capacidade de comunicação que assistimos hoje em dia através de meio óptico. Nos nossos dias esta forma é a mais eficiente de transmitir informação.

Os LEDs já servem para transmitir informação, como por exemplo nos IRDA usado para fazer troca de ficheiros entre telemóveis. A diferença está sobretudo na aplicação que se dá à tecnologia e na banda espectral usada.

Os comprimentos de onda visíveis não são os mais utilizados nas comunicações ópticas. As fibras ópticas usam as janelas de IRDA por terem as atenuações mais baixas. Observe-se a Figura 1.

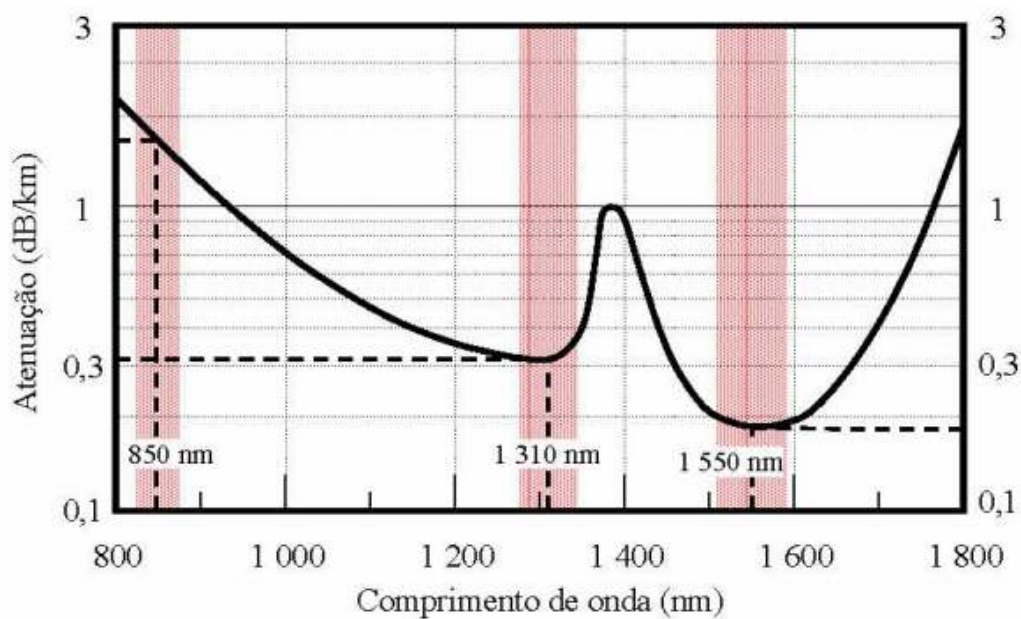


Figura 1 - Atenuações numa fibra óptica de sílica para as 3 janelas de transmissão na região dos IR. [1]

Uma análise simplista pode ser feita à imagem, pode ver-se que nos comprimentos mais baixos (a caminho da zona do visível) a atenuação é mais elevada.

Nos comprimentos de onda do visível, cada vez mais se dá importância às POF (*Plastic Optical fiber*). [1] Na actualidade o melhor desempenho é das fibras CYTOP.

Na Figura 2 podem ver-se curvas para a zona visível do espectro. Actualmente têm um mercado em expansão e diversas aplicações em que podem ser utilizadas. Neste caso em concreto a imagem ilustra a atenuação de fibras de plástico de dois fabricantes, a azul a *Chromis FiberOptics* e a encarnado *AGC Asahi Glass*.

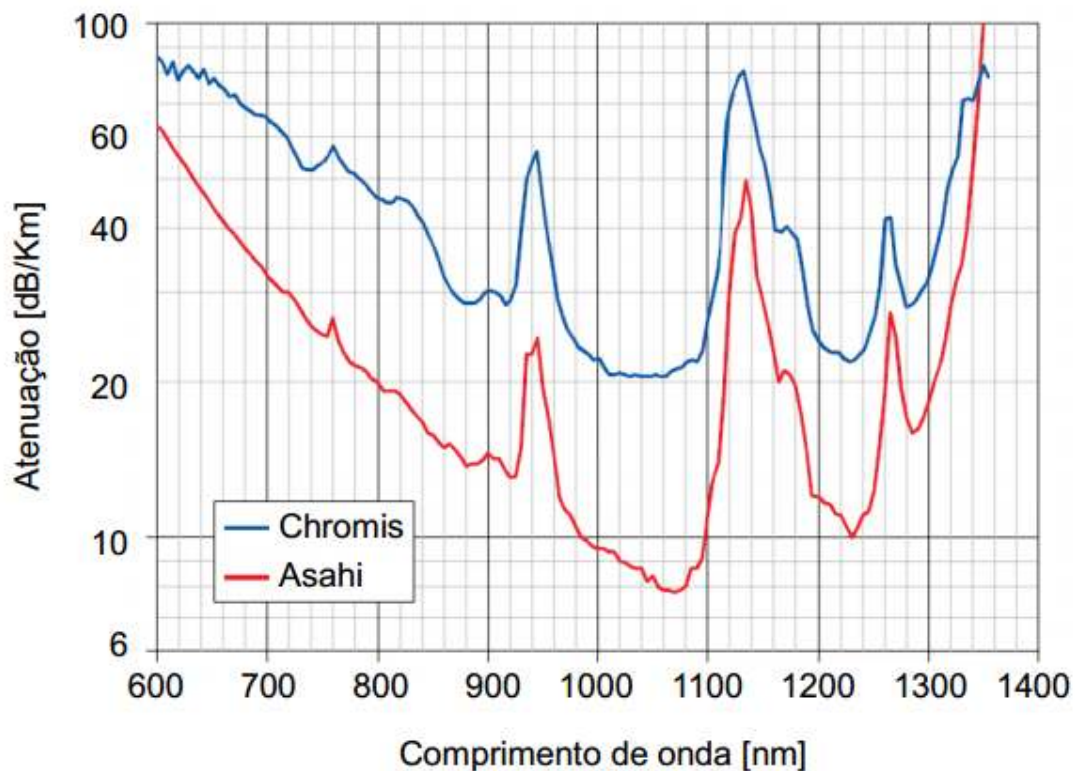


Figura 2 – Curvas de atenuação para fibras POF. [1]

Numa breve comparação, pode ver-se que as fibras de sílica têm uma atenuação muito mais baixa na zona dos IR, mas na zona do visível da observação destes dois gráficos nada se pode concluir. Apenas se sabe que a região dos vermelhos para estas fibras as atenuações são elevadas. Como se pode ver para já ainda não são uma opção viável para grandes distâncias devido à sua atenuação.

Pretende-se neste trabalho explorar as comunicações ópticas, mas com foco nos comprimentos de onda visíveis e em que o meio de propagação é o espaço livre. Para o efeito, neste trabalho não se vai quantificar a atenuação entre emissor e receptor, visto que dependerá muito do ambiente de teste e das condições externas envolventes, e saindo também do foco e do objectivo deste estudo.

O VLC é um protocolo que usa a Luz visível como meio de comunicação preferencial. Imagine-se por exemplo, que em vez de usar uma antena com frequências de emissão na zona de rádio, usar-se uma lâmpada com frequências na zona da luz, visível ou não.

Mais recentemente foram premiados alguns cientistas pelo contributo na modernização das comunicações ópticas [2]. As modernizações são, por exemplo, o

desenvolvimento dos dispositivos ópticos como os LED's ou os fotodíodos PIN (P-intrínseco-N) ou os fotodíodos APD (Avalanche). Estes dispositivos são fundamentais para o crescimento e desenvolvimento da comunicação óptica sem fios (OWC – Optical Wireless Communications).

Em 1979 foi feita a primeira comunicação óptica *indoor* que ligou um *cluster* de terminais ligados numa sala a um controlador comum a eles todos. Foi o primeiro sistema de OWC apresentado por Gfeller e Bapst [3].

Os LED's cada vez mais são usados em salas, como luz de conforto ou mesmo de trabalho. São essencialmente preferidas devido à sua longevidade e a redução de custos a longo prazo. A sua manutenção é diminuta. Este tipo de iluminação é possível de ser controlada de uma forma que vai mais além do ligar e desligar banal do interruptor. É possível transmitir informação através de LED's comuns, por isso porque não usá-los?

Actualmente o sistema de transmitir informação através da Luz dos semáforos está patenteado pelo menos no Japão e nos Estados Unidos da América [4]. É comum designar-se um sistema de transmissão de informação através da luz LED visível como *iLight* [5].

Existem pelo menos dois grupos de investigação, VLCC (*Visible Light Communication Consortium*) e WWRF (*WorldWide Wireless Research Forum*).

O VLCC surge no Japão de onde é originária esta ideia tecnológica. Para esta comunicação é sugerido como grande vantagem a segurança e pouca interferência. Na cidade de Tokushima, no Japão foram feitos diversos testes com os semáforos a LED's.

O tema da segurança é cada vez mais abordado, principalmente, no que toca à troca de dados sensíveis por redes inseguras, nomeadamente palavras passe ou chaves de acesso, ou até informações bancárias. A segurança é maior principalmente porque não existe propagação de luz através das paredes, ao contrário do sinal em rádio frequência. A pouca interferência também se deve a este facto, como não existe propagação para além das paredes não vai haver sobreposição de dados, logo não existirá interferência entre portadoras RF. [2]

Capítulo 3. Tecnologia LED em semáforos

3.1 Abordagem à cor e características

A tecnologia LED tem um conjunto de características muito apetecíveis e muito exploradas nos dias de hoje. O LED é um díodo semiconductor constituído por materiais radiativos como por exemplo uma liga ternária de GaAsP (Gálio – Arsénico – Fósforo).

O semiconductor de silício é amplamente conhecido, mas no mundo das tecnologias LED não é o mais usado. Ainda assim para todos os efeitos os LED's são criados com uma junção PN tal como os díodos de silício, mas ao contrário destes, ao polarizar-se um LED, esta junção devido às suas características emite luz.

A luz LED é considerada, nos dias correntes, como a luz do futuro. A sua grande vantagem para o futuro é a economia resultante do seu baixo consumo. Para o efeito da luz em si, a sua economia não é característica porque depende muito da sua aplicação, do tempo que está ligada, da temperatura a que opera entre outros factores. A luz LED não é monocromática e isso é uma característica que pode ser uma vantagem ou desvantagem consoante a aplicação. No entanto para o olho humano cada LED corresponde apenas a uma cor. A luz LED, normalmente, é usada sem se ter esse tipo de preocupação.

A maioria das aplicações que usavam LED's até há pouco tempo serviam-se deles para sinalizar, tome-se por exemplo um despertador ou a luz de *stand-by* dos televisores. Nos dias de hoje os LEDs são usados em todo o tipo de visores, desde os *tablets* aos televisores, passando pelos telemóveis, todos usam LEDs.

A versatilidade e facilidade de manuseamento permitem a esta tecnologia instalar-se no mercado cada vez com mais visibilidade. A luz LED consegue gerar, para o olho humano, todas as cores do espectro visível. Este processo consegue-se não criando um LED para cada cor do espectro luminoso visível, mas sim usando o processo de mistura de cores, neste caso por subtração. Desta forma, para criar o espectro necessário são precisos pelo menos 3 LEDs. Habitualmente usa-se um LED vermelho, um verde e um azul, que designam a tão usada sigla de RGB (*Red, Green e Blue*).

Existem diversos processos de obter cores a partir de outras. Será brevemente abordado o processo de adição.

Este processo caracteriza-se por fazer a adição espectral das cores. Na Figura 3 pode observar-se um esquema da adição de cores a nível espectral. Repare-se que todas as amplitudes dos diferentes canais são adicionadas no mesmo cdo.

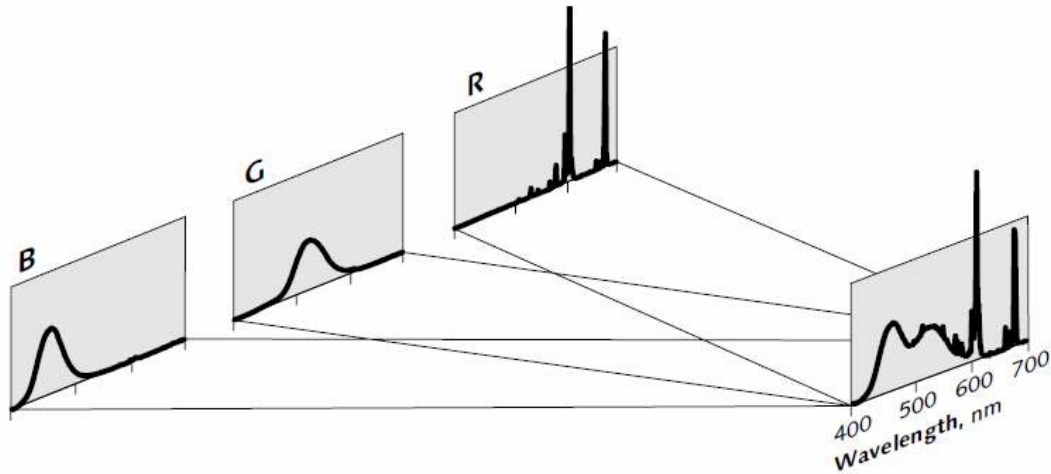


Figura 3 - Soma espectral das cores. [6]

A nível físico, pode ver-se a soma espectral resultante, na projecção do lado direito. Na realidade o que nosso olho observa é uma nova cor. Observe-se a Figura 4, ilustra o comportamento do olho humano. Tome-se como exemplo que se pretende obter a cor amarela, são precisas duas fontes luminosas, neste caso verde e vermelho para que se crie a luz amarela.

Os dois comprimentos de onda emitidos podem ser detectados em separado, e cada um transmitir o seu tipo de informação.

Este comportamento do olho humano pode servir para fazer a transmissão de informação através da luz, através de diversos tipos de modulações.

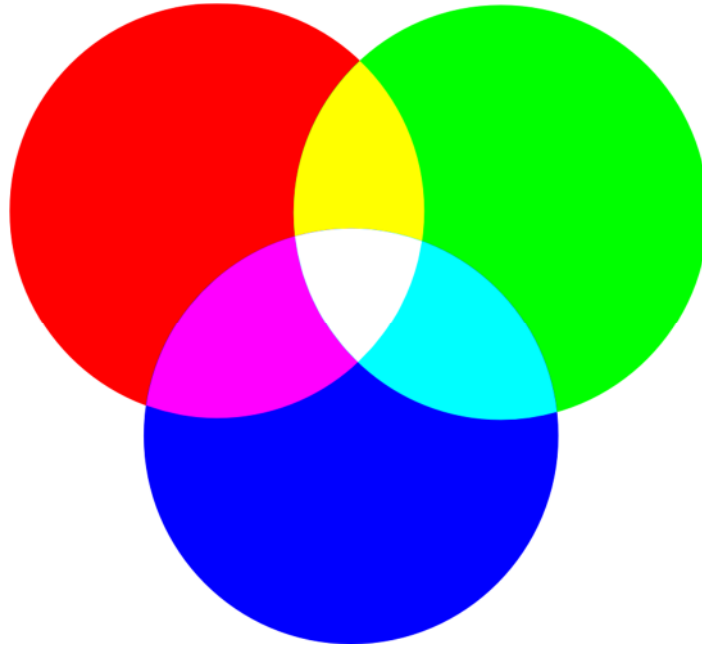


Figura 4 - Diagrama de cores obtido por um método aditivo.

Na Figura 5 pode ver-se o espectro de cores visível pelo olho humano. A luz presente no espectro varia entre os 400 nm e os 780 nm. Pode ver-se a luz definida com três grandezas diferentes a linha superior apresenta a frequência (em THz) correspondente a diversas cores, a linha do meio representa o comprimento de onda (em nm) associado a diferentes pontos do espectro, e por último a linha inferior representa as diversas cores em unidades de energia (em eV).

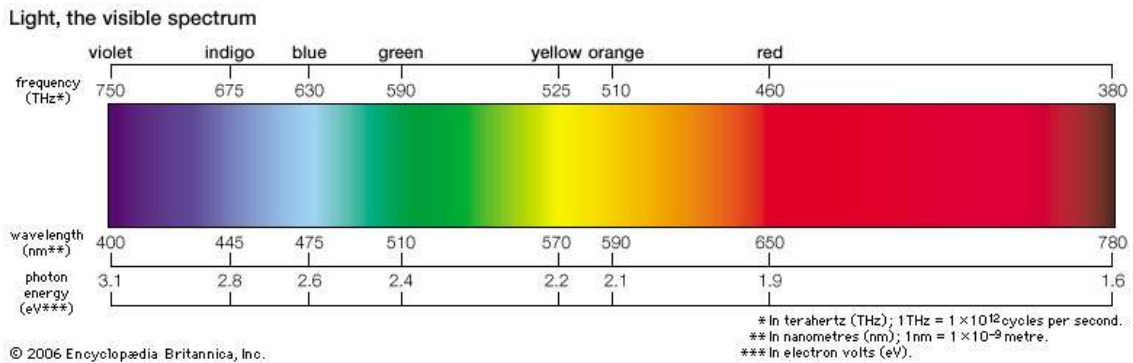


Figura 5 - Espectro visível e suas características [7].

A maneira mais usual de se abordar os comprimentos de onda de luz é através do comprimento de onda e através da energia.

3.2 Emissão de Luz

Uma modulação que pode tirar partido destas características do olho humano é o OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*). Visto que a luz branca desta forma tem vários comprimentos de onda, podem ser aplicadas diversas técnicas para transmitir, usando por exemplo um cdo de onda para transmitir a parte real do sinal OFDM e um dos outros para transmitir a parte imaginária. [8]

Observe-se a Figura 6 que ilustra uma luz branca com os três comprimentos de onda a serem emitidos. O olho humano apenas se apercebe das cores geradas entre as combinações dos três cdo. Podendo usar por exemplo o cdo azul e o verde para transmitir informação, no caso da cor vermelha serviria para garantir a cor branca aos nossos olhos.

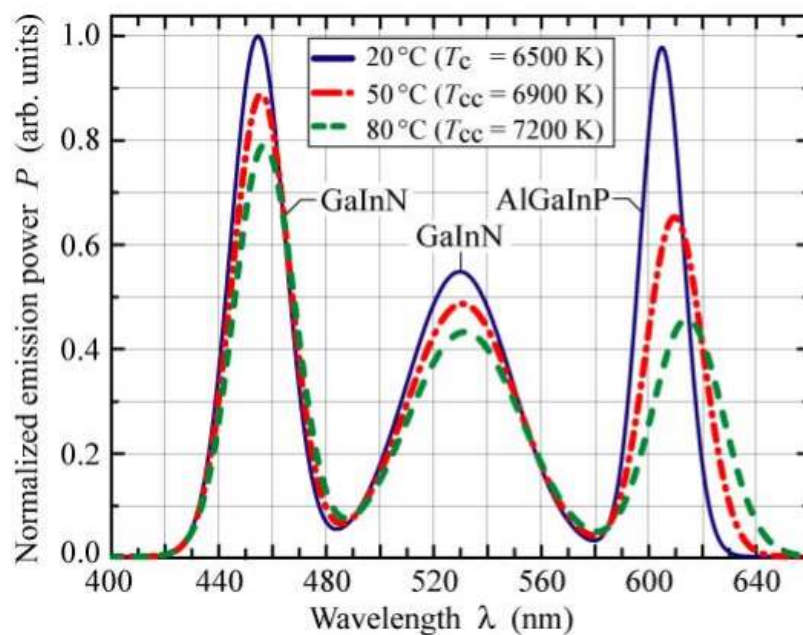


Figura 6 - Cor branca formada de 3 comprimentos de onda. [2]

(1 Azul – 450nm; 2 Verde – 530nm; 3 vermelho – 610nm).

Outra maneira de poder fazer a emissão do sinal é através de uma modulação IM (*Intensity Modulation*). É uma modulação semelhante à OOK (*On-Off Keying*) mas no domínio óptico. [10]

No entanto existem mais maneiras e mais simples de abordar a transmissão da luz. Para o caso, em estudo estão bem definidos os comprimentos de onda a emitir.

Observe-se também na Figura 6 que as curvas existentes reflectem temperaturas de operação diferentes. Verifica-se que à medida que a temperatura aumenta a potência de emissão baixa, levando assim a uma eficiência mais baixa nos LEDs. Repare-se ainda que o comprimento de onda central de cada cor se desvia, e também que a largura de banda de cada LED é afectada fazendo-se reflectir mais na zona de cor dos vermelhos em torno dos 600nm. A temperatura de operação faz com que a luz emitida pelo led seja afectada, alterando as suas propriedades.

A eficiência luminosa dos LEDs é muito superior às outras tecnologias de iluminação usadas nos semáforos, para além da sua versatilidade. Conseguem-se eficiências espectrais neste tipo de tecnologia entre 60 a 130 lm/W (iluminação LED), para as usadas actualmente têm-se eficiências de 8 a 15 lm/W (iluminação incandescente).

3.3 Olho humano

O olho humano não tem uma resposta igual em todas cores e comporta-se como um fotorreceptor de luz que tem sensibilidade à gama visível do espectro luminoso.

Para que haja sensibilidade à cor o olho tem três cones que são por assim dizer os receptores de cor. Estes cones são sensíveis a três pontos do espectro luminoso, ao vermelho, ao verde e ao azul. A recepção da cor envolve ainda um quarto componente designado por bastonete. Este é mais usado para ambientes de pouca luz onde não se consegue distinguir uma grande gama de cores, sendo sensível sobretudo às sombras. Repare-se na Figura 7 onde está um esquema ilustrativo das gamas de sensibilidade dos cones e bastonetes. Observe-se ainda que os três cones que nos definem a cor intersectam-se entre eles o que faz com que se consiga observar uma grande quantidade de cores. Devido a este facto, usa-se o esquema de cores RGB que ao combinar a intensidade de cada uma das cores, faz o olho humano ter percepção de determinada cor que não tem um cone para ela.

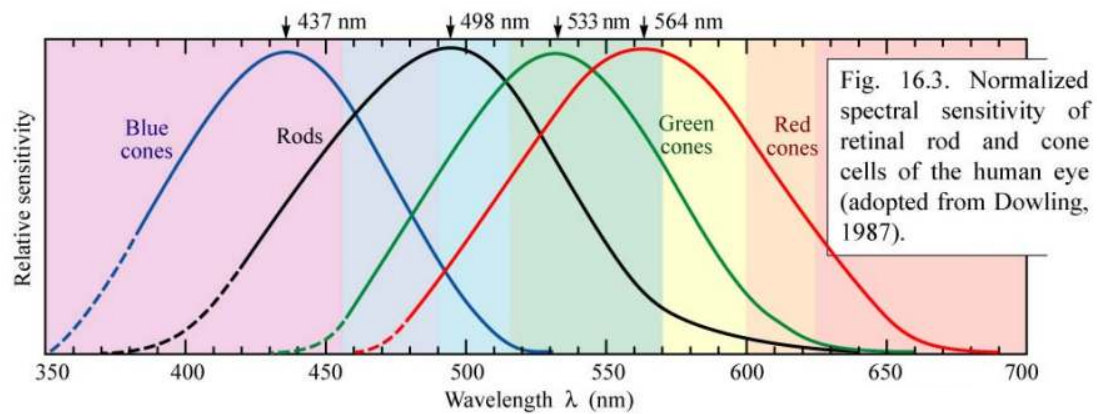


Figura 7 - Resposta dos diversos cones e bastonetes à luz. [11]

Observe-se a Figura 8, mostra uma função que representa a sensibilidade à luz do olho humano. Embora não seja uma versão *standard* esta função tem sido usada em diversos estudos, e é a que se considera mais precisa a descrever o comportamento do olho humano. [11]

Pode ver-se a sensibilidade normalizada no eixo dos yy do lado esquerdo e a eficácia luminosa em lm/W do lado direito. No eixo das abcissas em baixo está representado o comprimento de onda e em cima o valor do hiato energético.

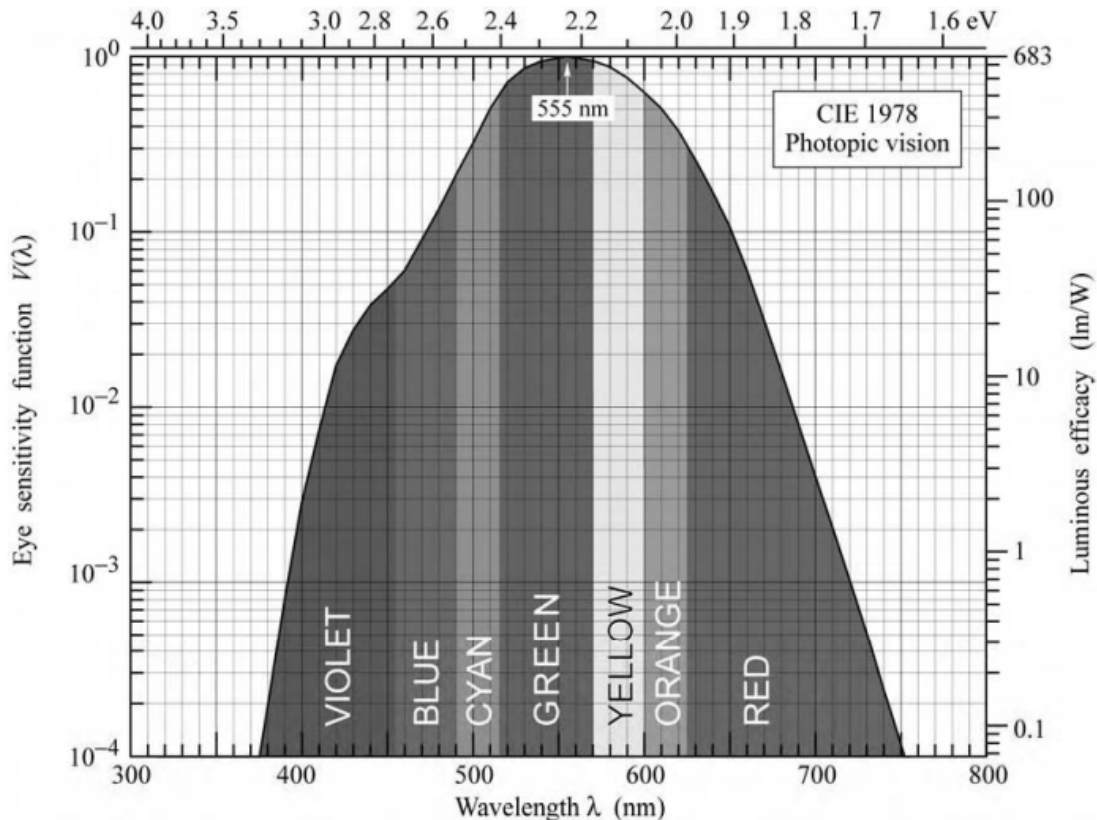


Figura 8 - Resposta espectral do olho humano. [11]

Pode ver-se que aos 555nm o olho tem o seu máximo na função que o representa, tendo uma largura espectral compreendida entre 380 e 750 nm (370nm). [11]

Sabe-se que os olhos humanos a partir dos 24Hz já não conseguem separar as imagens, ou seja, qualquer luz pulsada acima desta frequência, para o olho a luz está efectivamente acesa. [6]

3.4 Vantagens e desvantagens de semáforos LED

A grande vantagem em termos globais dos semáforos LED é a sua economia energética e também o longo prazo de vida útil, em comparação com as lâmpadas de filamento. Este é o grande factor que faz com que as câmaras municipais tenham interesse em implementar estas semaforizações. Para além da redução de custos devido ao seu consumo reduzido, as iluminações a LED têm uma eficiência luminosa mais alta do que as lâmpadas de filamento.

As lâmpadas de filamento convencionais apresentam rendimentos na ordem de 15 a 20 lm/W, as de iluminações LED conseguem rendimentos superiores entre 50 a 100 lm/W. Desta forma consegue-se para a mesma potência um rendimento superior e uma luminosidade maior.

Outro factor a ter em conta é o tempo de vida útil da iluminação. Para as lâmpadas tradicionais de filamento conseguem-se tempos de vida útil na ordem das 1000 horas de funcionamento, enquanto nas lâmpadas LED conseguem-se tempos de vida até 50000 horas. Este é um factor a ter em conta, ou seja, cada iluminação a LED consegue mais de 5 anos de funcionamento. Para além de poupar mão-de-obra na troca de lâmpadas, permite explorar as características deste tipo de iluminação, podendo facilmente ser adaptada a painéis de mensagens com informações de tempo real, ou por exemplo, fazer a contagem decrescente de tempos de “verde” para os peões, na hora de atravessar a estrada, ou mesmo para os condutores saberem quanto tempo têm até o sinal mudar de cor. Esta situação encontra-se por exemplo na cidade de Viseu. Na Figura 9 pode observar-se um exemplo dos painéis LEDs para auxílio dos condutores.



Figura 9 - Semáforo em Viseu com auxiliar de temporização de luz LED.

O sistema semafórico é essencialmente visual e baseado nas cores, mas actualmente vêm-se em diversos semáforos instalados também com indicação sonora do tempo verde do peão para as pessoas invisuais.

Por outras palavras: a sua versatilidade neste meio permite criar novas infraestruturas que aumentam a segurança rodoviária.

Para além das vantagens em termos energéticos, a sua resistência também é muito superior, visto que não precisam de um bolbo de vidro a envolver o elemento que irradia a luz, sendo resistente a vibrações e choques.

Devido à natureza da sua tecnologia, os semáforos a LED conseguem muito maior directividade que as lâmpadas incandescentes tradicionais, o que no caso deste projecto pode ser uma mais-valia significativa, visto que a direcção de propagação da luz tem um papel relevante na transmissão de informação.

3.5 Semaforização

Os semáforos sofreram uma evolução muito pequena em todo o seu historial. Este tópico aborda a sua evolução nos últimos anos com a introdução da tecnologia LED até à constituição de um, nos dias actuais.

3.5.1 Sinalização luminosa

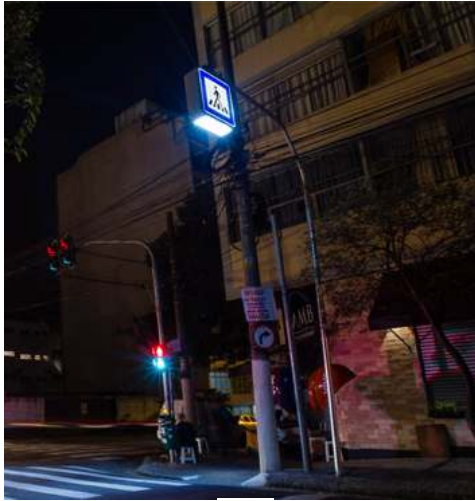
Existem diversos tipos de sinalizações luminosas divididos em dois grupos de semáforos.

- Os semáforos de mensagem constante não variável;
- Os semáforos de mensagens variantes.

3.5.1.1 Sinais não variáveis SLAC – Sinalização Luminosa de Aviso e Código

Este tipo de sinalização existe sobretudo em ambiente urbano e serve sobretudo para reforçar a sinalização já existente. Esta sinalização é constituída normalmente por um sinal tradicional de chapa pintada e com material reflector.

Estes sinais são mais associados às cidades, devido às limitações de energia que possam existir em locais remotos. São designados de aviso e código porque a sua função é reforçar o significado da sinalização vertical. Tome-se como exemplo a Figura 10. Observe-se que no sinal vertical estão dois focos de luz de forma a reforçar a atenção do condutor.



A



B

Figura 10 - Sinal vertical com SLAC.

A – [22]

B – [21]

Existe também este tipo de sinalização no chão para ajudar a reforçar a presença da passadeira.

3.5.1.2 Sinais variáveis SLAT – Sinalização Luminosa Automática de Trânsito

Este tipo de sinais são essencialmente os semáforos que fazem a regulação do trânsito. São eles que através de uma convenção simples e universal regulam o trânsito pelos vários países existentes, com as suas mensagens coloridas.

Tem um conceito simples: uma caixa, três mensagens distintas, uma em cada cor e não gera confusão entre elas. Este tipo de sinalização é regulado na Europa pela norma BS EN12368:2006 [8], sendo mais abordado mais adiante este tema.

Esta sinalização existe associada não só aos carros como a comboios, nas suas linhas, ou a barcos, nos portos. São universais e transversais a diversas situações do dia-a-dia.

3.5.1.3 Sinais variáveis PMV – Painel de Mensagem Variável

Este tipo de sinais são mais recentes e destinam-se sobretudo a informar o condutor do meio rodoviário envolvente. Actualmente, é recorrente encontrar nas vias que mais tráfego concentram este tipo de sinais. Eles são usados sobretudo para dar informações em tempo real (o mais possível), sendo usados para informar da congestão em determinado sítio ou acidente ou até mensagens de aviso meteorológico.

Com esta sinalização permite-se passar informação aos condutores através de mensagens alfanuméricas ou através de mensagens simbólicas. A mensagem varia consoante o tipo e o painel em causa.

Existem painéis que apenas têm texto em que apresentam, por exemplo, a mensagem “Trânsito condicionado - circule com precaução”. Outros painéis já simbólicos, também de mensagem variável servem, por exemplo, para informar dos radares e da velocidade de circulação no local.

Pode observar-se este tipo de sinal, neste caso com os dois tipos de mensagens anteriores na Figura 11.



Figura 11 – Painel de mensagem variável com mensagem alfanumérica e simbólica. [9]

Este tipo de semáforos é versátil na forma como comunica com o trânsito. Pode interagir-se com ele remotamente fazendo a monitorização através de um circuito fechado de câmaras e com um operador a fazer supervisão. Outra forma de se poder interagir com este tipo de sinalização é usar diversos sensores externos que reportem o estado do trânsito, do ambiente envolvente como as condições atmosféricas.

Este tipo de sinalização ganhou tal relevância que a nível europeu existe um projecto denominado de EasyWay que tem como objectivo causar impacto no fluxo e na segurança de tráfego rodoviário, melhorando o ambiente. [14] Este projecto começou em 2007 e espera atingir resultados positivos até 2020 no campo da mobilidade sustentada. O INIR (Instituto nacional de infraestruturas rodoviárias) representa a comitiva portuguesa neste projecto, e participa no grupo de estudo e harmonização para este género semafórico mais recente. Esse grupo de estudo é designado de *European Study Group 4 (ESG4) – Mare Nostrum*, e tem como objectivo harmonizar o sistema VMS na rede de estradas transeuropeia. [15]

3.5.2 Tipos de Semáforo com LED

Os semáforos com LEDs não são apenas de um tipo, existem diferentes abordagens e diferentes arquitecturas. As topologias encontradas fazem variar a forma de se transmitir informação.

Os LED's são o elemento fulcral neste tipo de semáforos. Existem diversas topologias de semáforos com LED's. No estudo efectuado existem pelo menos três tipos de semáforos com LED's com configurações bastante diferentes. Tome-se como exemplo o primeiro tipo de semáforo [16], em que o semáforo tem várias circunferências em torno do centro como exemplo ilustrativo observe-se a Figura 12. Este tipo de semáforo pode usar uma comunicação por exemplo como é descrito em [16].



Figura 12 - Semáforo ilustrativo – LED 1.

Outra configuração encontrada está presente na Figura 13, em que o semáforo é constituído por uma matriz de LED's. O controlo dos LEDs depende do fabricante.



Figura 13 - Semáforo ilustrativo – LED 2. [12]

As topologias apresentadas têm vantagens e desvantagens entre elas, embora o comparativo não seja esse e saia do foco do trabalho.

No caso em estudo, o semáforo é constituído por uma lente colorida de acordo com o sistema rodoviário, uma lente que faz da convergência da luz toda para a mesma direcção espalhando-a o mais uniformemente possível, e uma caixa estanque com borrachas para isolar das humidades e poeiras. No interior do semáforo existe uma placa de circuito impresso com os LED's de alto brilho montados, e a respectiva fonte de alimentação.

O semáforo em estudo é apresentado da Figura 14 à Figura 18 exibindo as várias partes que o constituem.



Figura 14 – Lente exterior à cor do sinal.

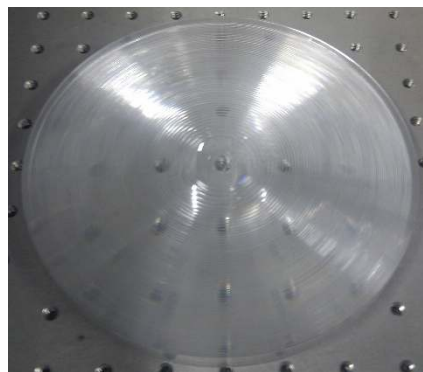


Figura 15 – Lente de convergência luminosa.

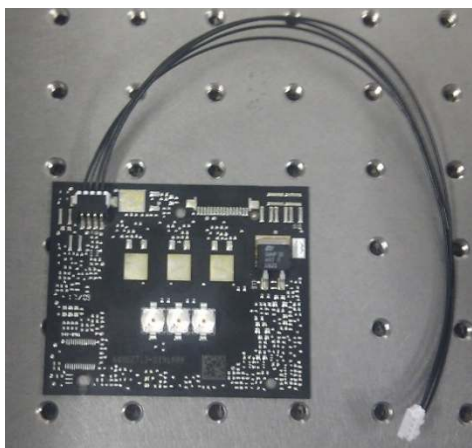


Figura 16 – Placa emissora de luz.

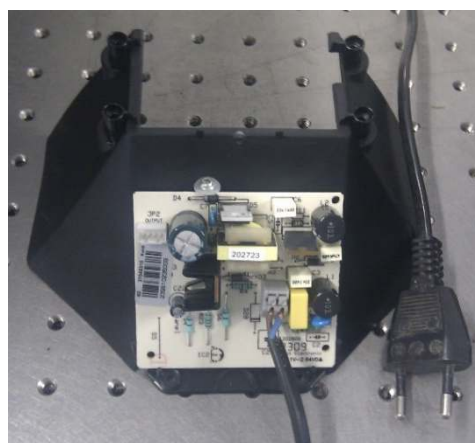


Figura 17 - Placa do transformador para baixa tensão.



Figura 18 – Caixa estanque.

Pode observar-se que a constituição deste semáforo em relação aos LED's não é em nada parecida com as anteriores. Observe-se que este semáforo é constituído por três grandes LED's de alto brilho ligados em série à placa que lhe dá a alimentação. Este tipo de semáforo é o utilizado neste estudo por já ser aquele que se encontra em trabalho nas vias rodoviárias, e por ser bastante fiável, foi gentilmente cedido para a elaboração desta tese pela empresa Eyssa Tesis.

Em relação aos anteriores semáforos, neste tipo quando se fundir um dos LEDs o semáforo deixa de emitir luz visto que estão ligados em série. Já nas outras topologias presentes o semáforo vai ficando com alguns LEDs apagados à medida que se vai fundindo. Certos fabricantes garantem que com 80% de LEDs apagados ainda assim se tem melhor luz e mais perceptível que as luzes convencionais.

3.5.3 Regulamentação

Qualquer uma das arquitecturas de construção dos semáforos pode ser ligada à rede eléctrica, visto que trabalham a 110 V ou a 230 V dependendo do país onde for implementado. Para o caso Europeu os semáforos são regulados pela norma europeia BS EN12368:2006 [12].

Não existe nenhuma restrição ou exigência na forma de como é elaborada a parte eléctrica do semáforo, desde que cumpra determinados requisitos, nomeadamente de cor, de intensidades luminosas e de ângulos de visão.

Os semáforos que existem como medida *standard* são apenas as lentes de 200mm e de 300mm. Existem diversas medidas que são usadas e não são *standard*, como por exemplo as dos semáforos mais pequenos que são colocados a meio do suporte.

A luz do semáforo, para além do vermelho, amarelo e verde que é conhecido mundialmente, é bem definida em termos de comprimento de onda.

Estas definições são requisitos da norma europeia. Na Figura 19 pode observar-se um esquema de cores pedido na norma, as áreas delimitadas na imagem pertencem às cores dos sinais que estão identificadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das cores.

Legenda – Cor	Comprimento de onda (central)
1 – Verde	500 nm
2 – Amarelo	590 nm
3 – Vermelho	650 nm

A Tabela 2 indica os cantos que definem as regiões da cor no gráfico da Figura 19.

Tabela 2 - Cantos que definem a fronteira da cor.

Cor	Canto 1		Canto 2		Canto 3		Canto 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Verde	0.660	0.320	0.680	0.320	0.710	0.290	0.690	0.290
Amarelo	0.536	0.444	0.547	0.452	0.613	0.387	0.593	0.387
Vermelho	0.009	0.720	0.284	0.520	0.209	0.400	0.028	0.400

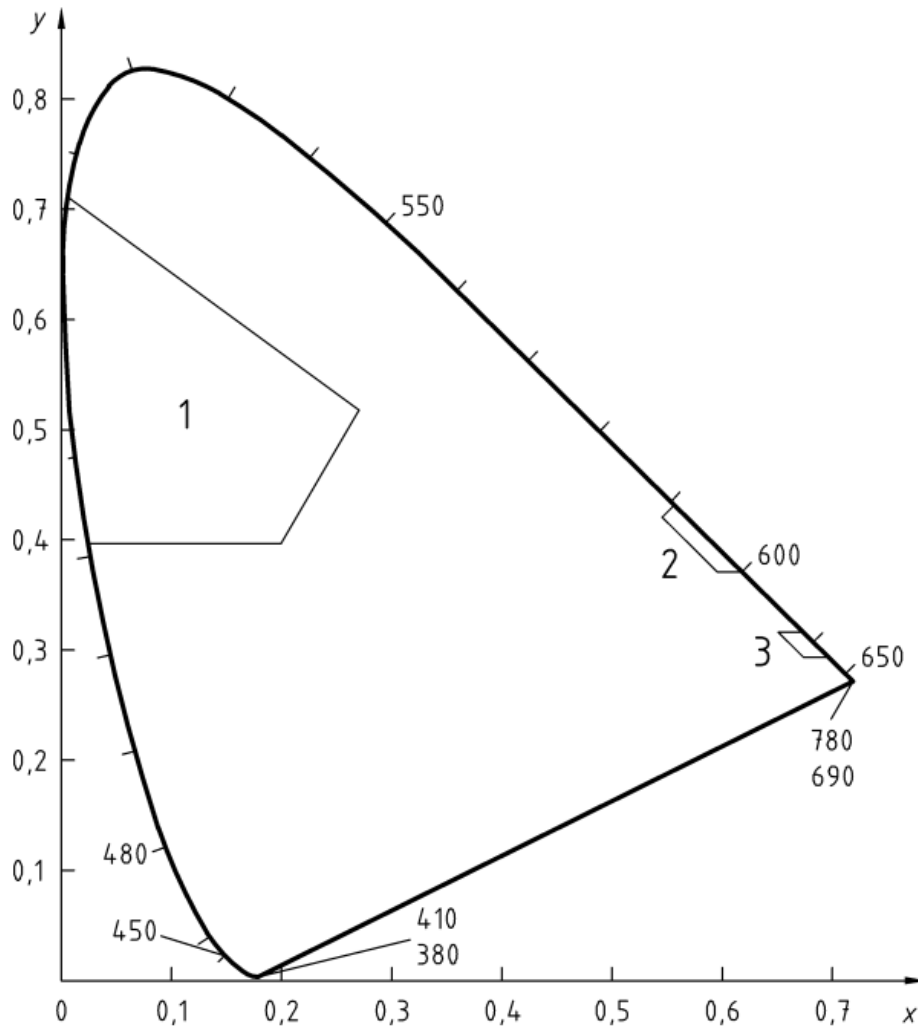


Figura 19 - Gráfico CRI com os limites de cada cor. [13]

3.5.4 Controladores

A evolução que houve nos controladores é até aos dias de hoje maior do que os semáforos propriamente ditos. É perceptível que assim seja, visto que acaba por ser o “cérebro” do controlo de um conjunto de semáforos. Mas com a adaptação de uma tecnologia diferente nas luzes de trânsito, como a introdução de LEDs, conseguem-se pensar em inúmeras melhorias e vantagens para esse mesmo trânsito. Ainda assim, também teria de se dotar as iluminações com mais capacidade de processamento, inteligência, em sentido figurado, de modo a conseguir fazer a emissão da informação. Ainda que esta parte do conjunto rodoviário e de sinalização seja importante, este projecto necessita de compreender o seu funcionamento mas não é o tema principal, daí que não seja um tema de grande incidência.

Capítulo 4. Caracterização Opto Dispositivos Ópticos

4.1 Configuração e caracterização do dispositivo fotorreceptor.

4.1.1 Sensor de LUZ

O sensor de luz usado para o projecto foi também já utilizado no âmbito de outros projectos realizados anteriormente no ISEL [17].

Este sensor tem como principal figura de mérito conseguir separar comprimentos de onda distintos e conseguir recuperar a informação de cada cor separadamente. Para fazer esta selecção de comprimento de onda são usadas luzes de fundo que fazem realçar e/ou atenuar os comprimentos de onda incidentes no sensor.

Este sensor é controlado pela sua tensão de polarização e/ou polarização óptica, através dos fundos incidentes, afinando o comprimento de onda a centrar. O sensor pode ter imenso interesse em aplicações por exemplo a nível de multiplexagem / desmultiplexagem óptica aplicado a WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [17] [10].

O fotodetector é composto por dois fotodíodos PIN. Cada fotodíodo tem dimensões e hiatos energéticos diferentes para poderem ser sensíveis aos diferentes comprimentos de onda incidentes. A sua resposta espectral pode ser reforçada em determinados comprimentos de onda para que haja uma maior sensibilidade nessa zona.

A Figura 20 ilustra a estrutura por camadas do foto-receptor. A primeira camada (esquerda para a direita) é mais estreita, e é sensível aos comprimentos de onda mais curtos e mais energéticos. A segunda camada consegue sentir os comprimentos de onda superiores. A dimensão do dispositivo está descrita na imagem, sendo que o primeiro tem 200 nm e o segundo fotodíodo 1µm.

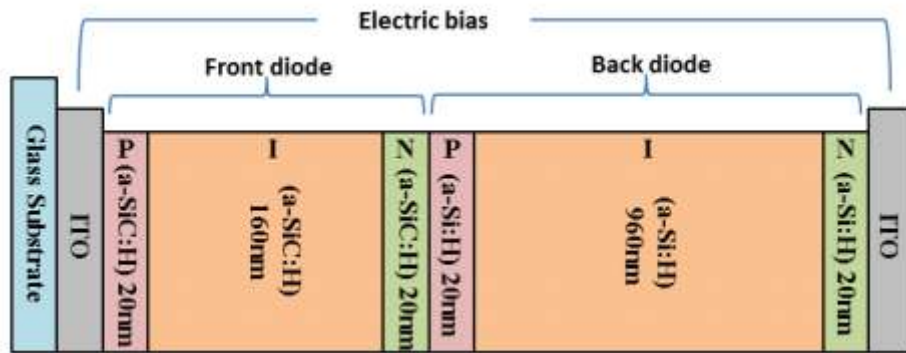


Figura 20 - Estrutura PIN-PIN do receptor óptico. [19]

O fotorreceptor é constituído por um vidro, um contacto eléctrico transparente da parte da frente, o primeiro fotodíodo PIN é composto por uma liga de a-SiC:H, e o segundo fotodíodo de a-Si:H, e outro contacto eléctrico transparente na parte de trás do sensor.

O sensor frontal tem uma resposta espectral entre os 400 nm e os 550 nm, (zona dos roxos aos azuis e verdes), devido à sua espessura fina e com um hiato energético de 2.1eV. O díodo posterior opera na restante região do espectro visível dos 520 nm aos 700nm, e tem um hiato energético de 1.8eV.

Este sensor face às abordagens mais usuais com câmaras de alta velocidade pode ser uma mais-valia, visto que o algoritmo para detectar as transições e todo o *hardware* à volta, será mais complexo de implementar do que com o sensor de PIN-PIN.

Este sensor comporta-se como um filtro de cor activo, em que é preciso conciliar as tensões de polarização e as luzes estacionárias de polarização, para se conseguir fazer a distinção do comprimento de onda pretendido. Com este comportamento consegue-se fazer duas coisas bem distintas e muito importantes

1. Ter capacidade sensorial perante a luz incidente;
2. Inibir/permitir comprimentos de onda.

Ao juntar estes dois pontos, incorporamos as funções de *multiplexer* óptico e de um sensor de cor. Na Figura 21 pode observar-se um esquema ilustrativo das camadas e como o sensor reage à luz incidente.

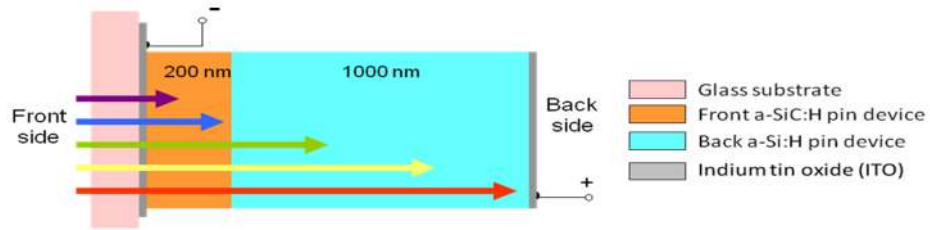


Figura 21 - Esquema de camadas do sensor perante a incidência da luz. [19]

A resposta em corrente do sensor varia consoante o cdo incidente, a luz ambiente, a luz de polarização, a tensão de polarização, e a frequência a que opera. Observe-se a Figura 22 e o seu comportamento perante a variação da frequência.

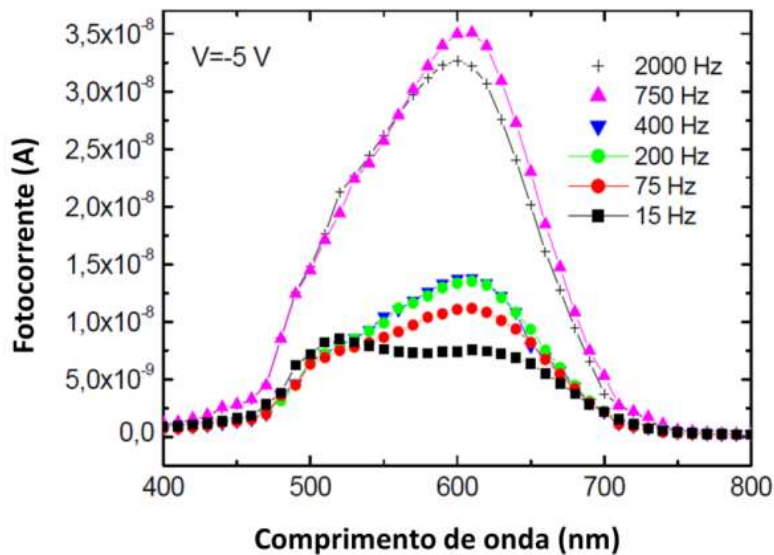


Figura 22 - Resposta do sensor em corrente polarizado com -5V variando a frequência entre 15Hz e 2000Hz. [19]

Repare-se que o sensor reage sobretudo aos comprimentos de onda a partir dos 450nm até ao pico situado nos 600nm, e depois desce até ao final do espectro visível. Note-se também que com o aumento da frequência o sensor tem melhor desempenho. Actualmente os testes efectuados têm usado uma frequência máxima de 6000Hz.

A Figura 23 mostra a fotocorrente gerada perante diferentes tensões de polarização.

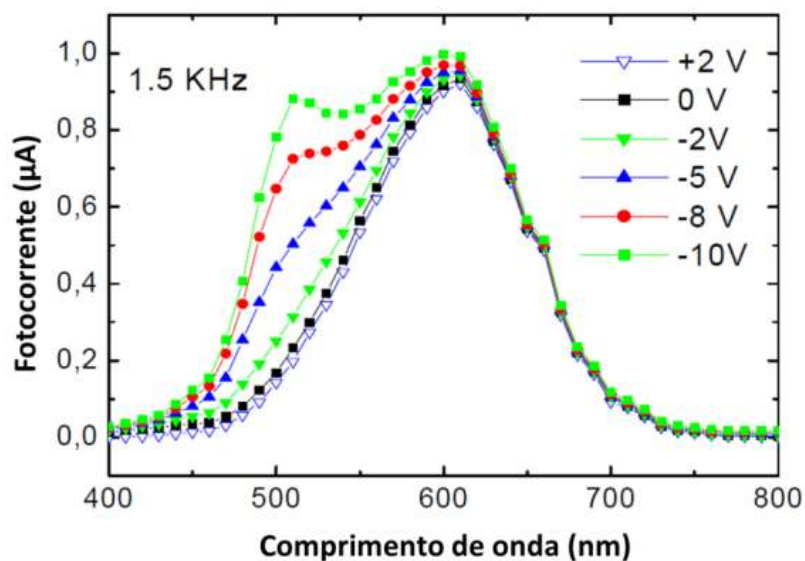


Figura 23 - Variação da fotocorrente com o comprimento de onda e diferentes tensões de polarização. [19]

Ao analisar o gráfico, verifica-se que a resposta varia consoante a tensão aplicada, sobretudo nos comprimentos de onda mais pequenos. Repare-se que uma tensão de polarização negativa faz com que sejam gerados valores de corrente maiores na zona dos azuis. Já para a zona dos vermelhos a curva da corrente segue o mesmo comportamento independentemente da tensão aplicada.

4.2 Metodologia

A montagem efectuada foi feita no laboratório de optoelectrónica do ISEL. Primeiro, fez-se uma abordagem com LEDs de modo a poder fazer um ensaio experimental, depois, desses valores usou-se outra abordagem com um semáforo, em que se alterou o esquema da configuração de teste.

O esquema encontra-se no diagrama de blocos representado na Figura 24. Este esquema ilustra o diagrama de blocos do ensaio experimental com o sistema semafórico com os LEDs e o sensor de luz que recebe o sinal juntamente com o amplificador óptico.

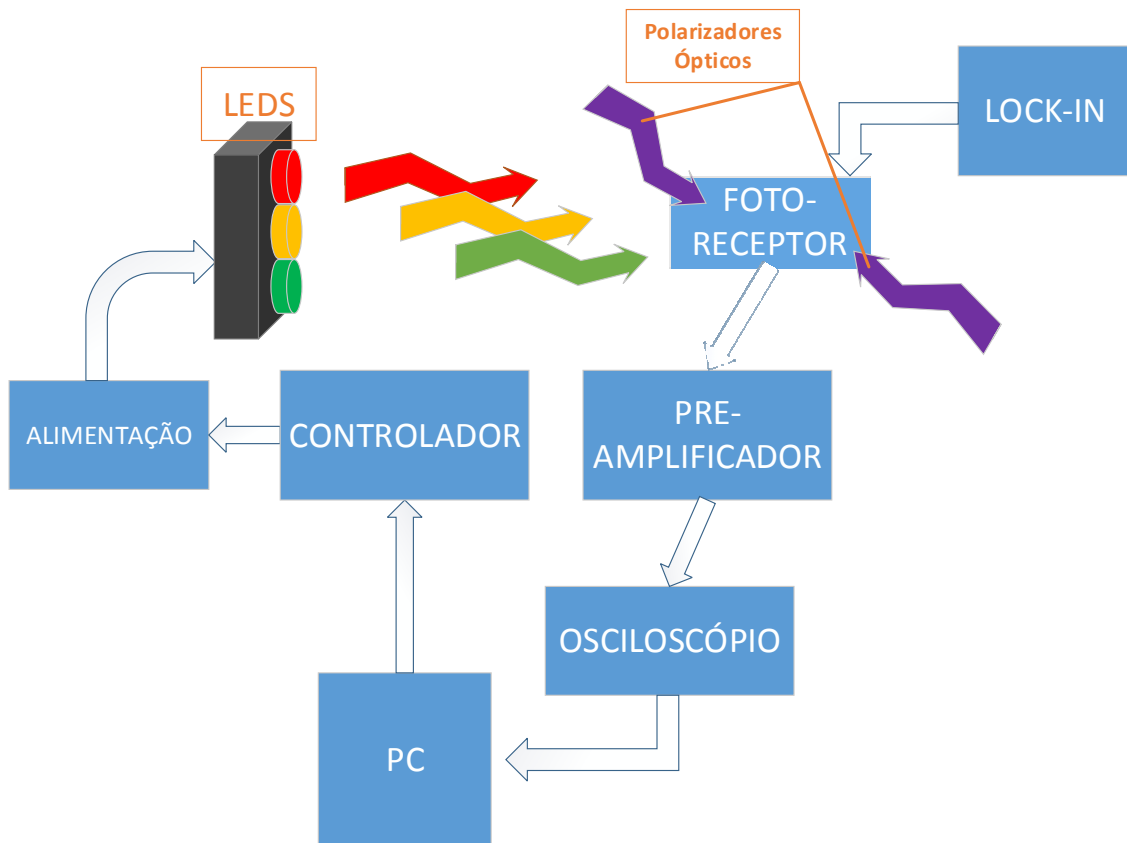


Figura 24 - Diagrama de blocos da topologia com leds utilizada.

Observe-se os blocos presentes, o *Lock-in* é usado para polarizar electricamente o sensor com uma tensão de -8V, de modo a que ele fique a operar em condições favoráveis.

O pré amplificador faz a amplificação do sinal gerado pelo sensor, e converte o sinal de corrente para um sinal em tensão, para que deste modo o osciloscópio consiga ler os valores gerados. A escala aferida é de um 1V de 1 μ A.

O computador é usado para que se possa dar instruções ao controlador dos LEDs e ler os resultados do osciloscópio.

O controlador dos LEDs tem uma interface gráfica que permite controlar os três canais de forma independente, e controlar os fundos ópticos frontais e posterior.

Na Figura 25 pode ver-se uma imagem do programa de controlo para os LEDs. As tabelas presentes destinam-se a escolher a sequência binária de teste que será efectuada pelo controlador.



Figura 25 - Programa de interface para o controlador dos LEDs.

Pode ver-se na parte superior da aplicação os LEDs que podem ser controlados (cor), a sua intensidade de corrente e o modo como é emitido. Nos modos a emitir podem escolher-se quatro: uma sequência aleatória; tabelada escolhida pelo operador do programa; tabelada pela máscara onde os valores que aparecem são aleatórios e só existem onde estão os “1s” da tabela; ou pode emitir-se a luz de forma fixa não fazendo os LEDs pulsar a luz.

Para o trabalho foi considerado sobretudo o modo de “Tabela” onde foi escolhida a sequência a emitir. Para a luz dos fundos ópticos foi usado o modo fixo.

O controlador dos LEDs não fornece a corrente aos LEDs directamente. Os LEDs são alimentados de forma externa, visto que o microcontrolador usado não consegue fornecer toda a corrente necessária ao circuito. O controlador também dá os comandos aos fundos, a diferença é que a luz dos polarizadores ópticos é estacionária ao contrário dos LEDs do sinal que é pulsada.

Quando se passa a utilizar o semáforo a topologia é ligeiramente alterada na parte do emissor. Ao utilizar-se o semáforo laranja passou-se a usar a roda *chopper* e o controlador dela para que se possa fazer a luz pulsar à frequência pretendida.

A Figura 26 mostra a topologia utilizada com o semáforo.

O emissor é constituído pelo Semáforo e pela roda de *chopper*. A roda *chopper* tem como função fazer a luz pulsar a uma frequência. A roda *chopper* é perfurada para que a sua rotação em frente ao sensor produza a frequência pretendida. A roda tem várias perfurações caso sejam pretendidas diferentes frequências.

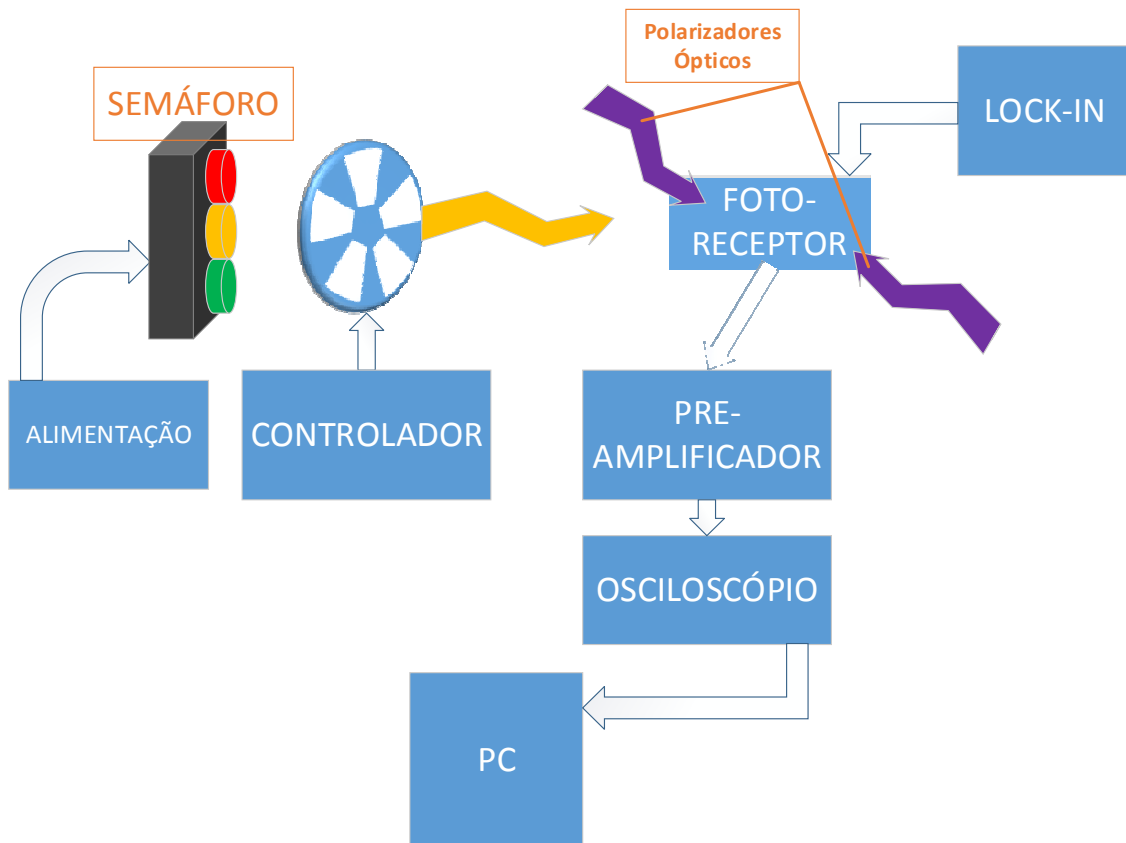


Figura 26 - Diagrama de blocos da topologia de testes com o semáforo.

Repare-se que o computador agora neste esquema só recebe os dados. A roda à frente do semáforo é o que faz pulsar a luz.

4.3 Utilização de LED's para ensaio experimental do sistema semafórico

A abordagem que será seguida neste trabalho é representada pela Figura 27.



Figura 27 - Diagrama de Blocos do sistema.

Começou-se por fazer uma montagem em hardware com os LEDs correspondentes à cor dos semáforos de modo a que se pudesse ter uma noção de como o sensor iria responder.

O canal usado é o meio ambiente de espaço livre. O receptor usado é o sensor desenvolvido no grupo de investigação GIAMOS e os respectivos aparelhos sensíveis para capturar o sinal.

O bloco do emissor para este ensaio experimental foi constituído por três LEDs. Observe-se a Figura 28. Pode reparar-se que estão vários LEDs montados com os cdos das diferentes cores do semáforo.



Figura 28 – Bloco emissor do ensaio experimental constituído por LEDs.

Foram medidos os canais Vermelho, Laranja e Verde usados como fonte de luz para o ensaio experimental com os LEDs. Para representar o fundo óptico usou-se um LED violeta para representar o fundo frontal e o fundo posterior.

Para se medir a sua potência usou-se um sensor de potência óptica da ThorLabs S120A, é um sensor de silício que opera dos 400 nm até aos 1100 nm e tem uma amplitude de potência de 5nW até aos 50mW. Pode ver-se a resposta espectral do sensor usado para medira a potência na Figura 29. As unidades de potência óptica incidente são dadas em W/cm^2 , que é a área incidente do sensor.



Figura 29 – Resposta espectral do sensor de potência óptica.

Na Figura 30 pode ver-se o medidor usado com um valor aleatório no mostrador. Em baixo pode ver-se “um olho” que é o sensor de silício.



Figura 30 - Medidor Óptico.

Encontra-se representada a aferição da potência óptica para os vários canais de cores utilizados entre a Tabela 3 e Tabela 6. A primeira coluna representa o valor de

corrente usado para controlar o LED, a segunda coluna a frequência à qual foi tirada a potência e a terceira foi tirada a potência com luz estacionária.

Tabela 3 – Potência óptica do canal vermelho para diferentes correntes com um cdo 645nm.

Canal Vermelho	Luz a 750Hz	Luz estacionária
1mA	1.24 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	2.12 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
5mA	7.64 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	14.62 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
10mA	16.20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	31.56 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
15mA	24.46 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	46.82 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
20mA	30.86 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	60.02 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Tabela 4 – Potência óptica do canal laranja para diferentes correntes com um cdo de 595nm.

Canal Laranja	Luz a 750Hz	Luz estacionária
1mA	3.59 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	7.07 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
5mA	17.55 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	33.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
10mA	32.59 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	62.01 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
15mA	44.42 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	84.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
20mA	53.55 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	100.01 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Tabela 5 – Potência óptica do canal verde para diferentes correntes com um cdo de 525nm.

Canal Verde	Luz a 750Hz	Luz estacionária
1mA	4.22 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	8.079 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
5mA	13.49 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	26.62 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
10mA	21.36 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	42.05 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
15mA	26.91 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	53.92 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
20mA	31.53 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	61.82 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Tabela 6 – Potência óptica do canal violeta para diferentes correntes com um cdo de 400nm.

Canal Violeta	Luz a 750Hz	Luz estacionária
1mA	39.21 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	75.78 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
5mA	161.4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	316.7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
10mA	285 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	550.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
15mA	379.8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	726.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
20mA	461 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	842 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Analisando as tabelas pode ver-se que para o canal violeta as potências ópticas são substancialmente mais elevadas que os demais canais para as mesmas correntes de polarização.

4.4 Semáforo LED Laranja

Os semáforos usados para os testes foram cedidos pela empresa Eyssa-tesis e são da FuturLed.

Os testes feitos incidiram sobre o semáforo cor de laranja, e focaram-se em saber qual o seu comprimento de onda central, e qual a potência óptica emitida. A potência eléctrica consumida é de 8W para 230V e 50 Hz.

O emissor é constituído por um semáforo real usado nas ruas de Lisboa e está de acordo com a Norma Europeia de tráfego rodoviário.

4.4.1 Características de Luz do Semáforo

O gráfico apresentado na Figura 31 mostra que o comprimento central da luz é nos 600nm, onde é o pico de emissão do Laranja.

Pode verificar-se que está de acordo com a norma BS EN 12368:2006 [18] que rege os sinais de tráfego na Europa.

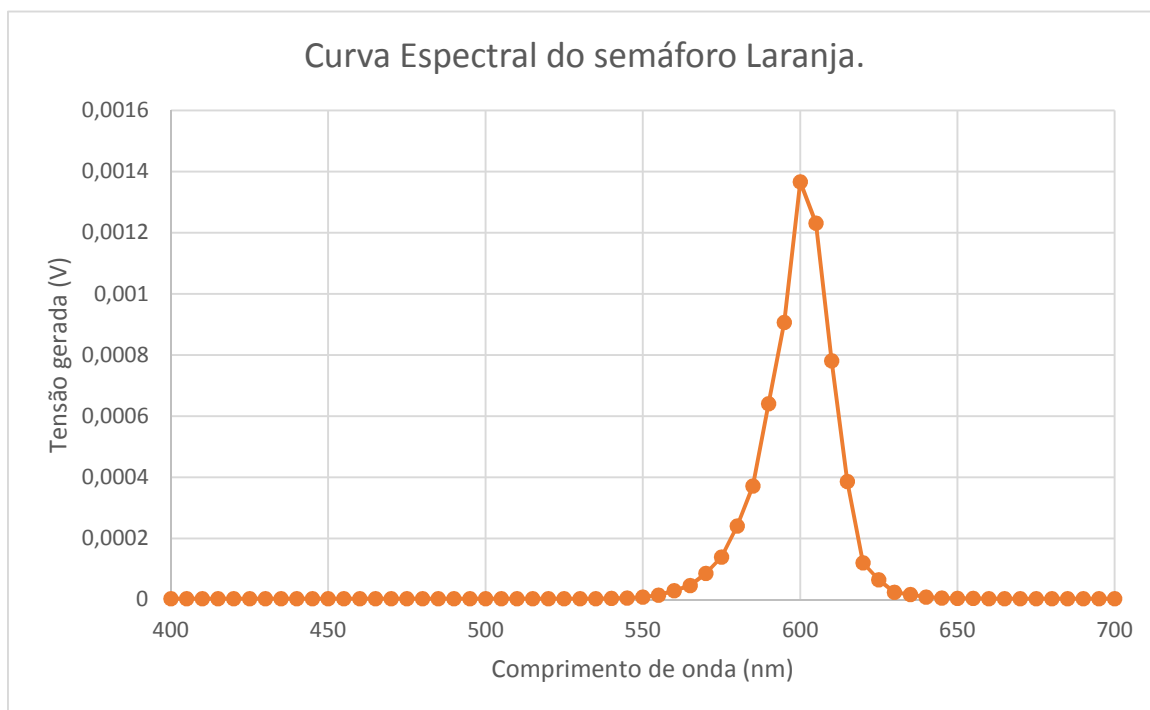


Figura 31 - Comprimento de Onda central da luz amarela.

Analisando a Figura 32 pode ver-se o decaimento da potência óptica à medida que a distância aumenta.

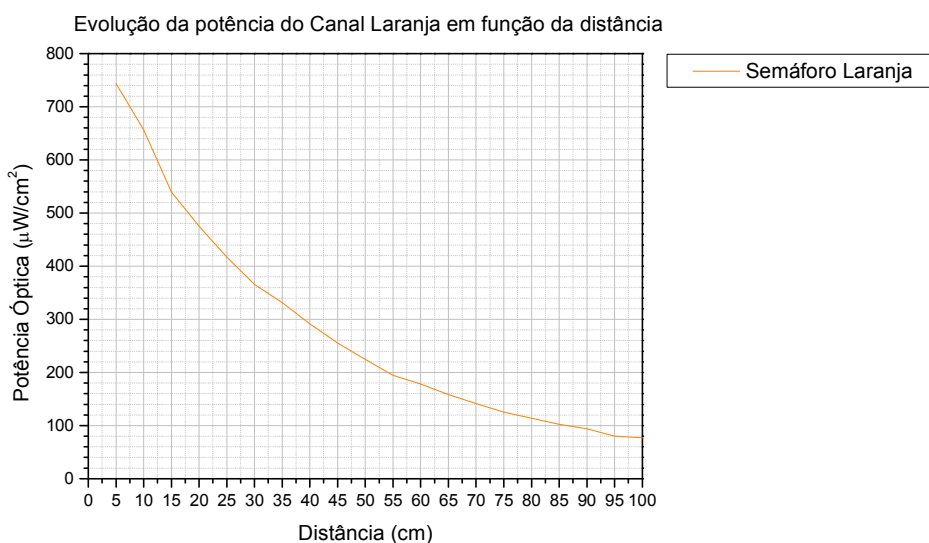


Figura 32 - Variação da potência óptica do semáforo laranja à medida que a distância aumenta.

Pode ver-se que a um metro a potência é muito superior aos LEDs, ainda assim o fundo violeta à distância de 10 cm que foi medida consegue atingir valores na ordem de grandeza do semáforo. Veja-se que na Tabela 6 para a coluna da luz estacionária as condições usadas nos testes com os LEDs mantêm-se, ou seja, a sua potência óptica do fundo de polarização é superior à potência do canal de luz. Apenas numa situação não se verificou esta condição, ainda assim será analisado se se encontra diferença. Para o fundo de polarização óptico de 1mA a potência é mais baixa que a potência do semáforo.

As medidas foram feitas a 750Hz e 1500Hz, mas já foram testadas frequências mais altas, e até aos 6000 Hz o sensor consegue receber os dados sem distorcer.

4.5 Análise e Discussão de resultados

As medidas base foram efectuadas em ambiente controlado (no escuro sem influência de luz externa). Posteriormente testou-se diferentes ambientes de luz, fluorescente e de halogéneo, para os três comprimentos de onda. Observe-se os gráficos seguintes que ilustram o comportamento do sensor perante a luz incidente e envolvente.

4.5.1 Medidas em ambiente controlado do canal vermelho.

Observe-se a Figura 33.

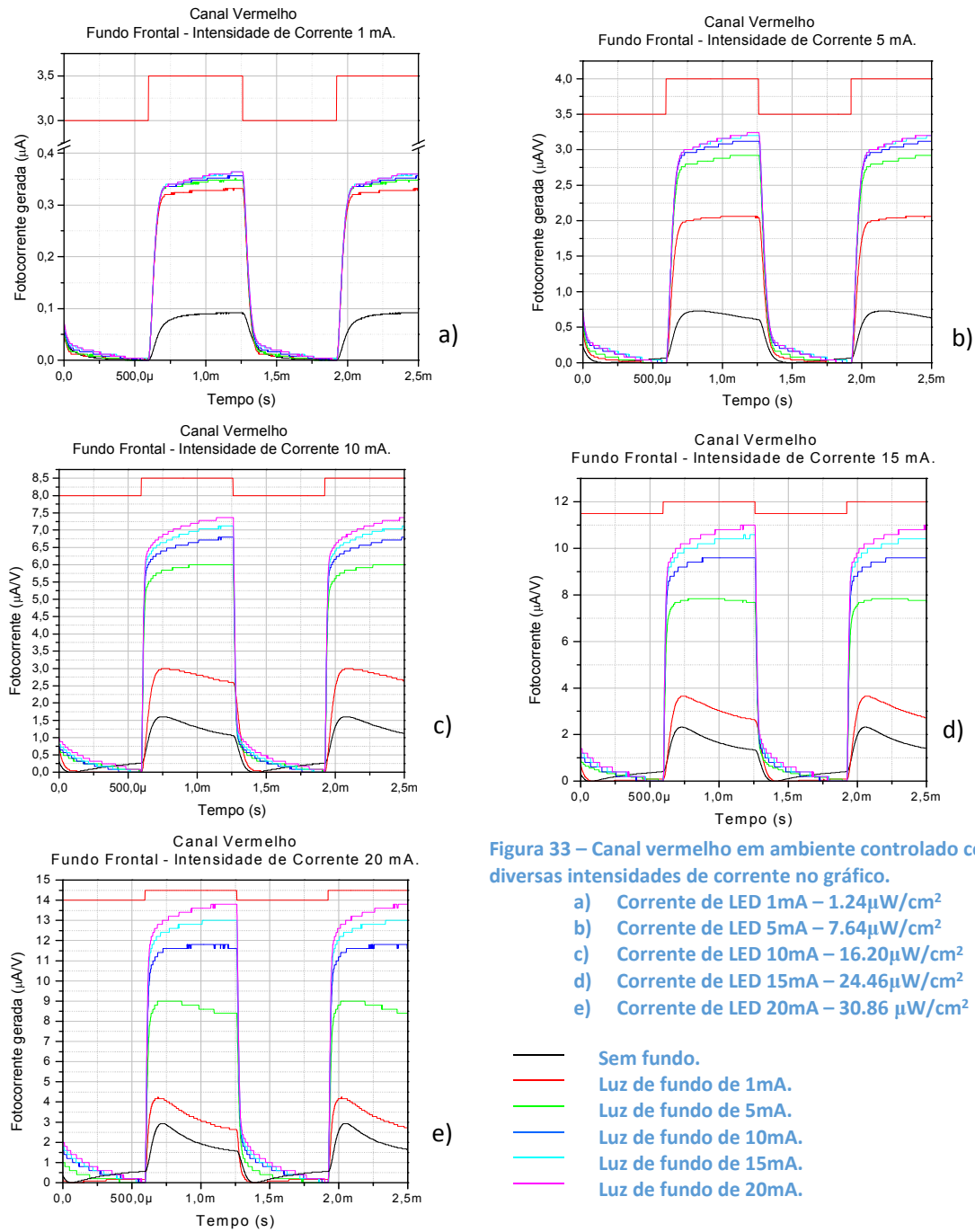


Figura 33 – Canal vermelho em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.

- a) Corrente de LED 1mA – $1.24\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- b) Corrente de LED 5mA – $7.64\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- c) Corrente de LED 10mA – $16.20\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- d) Corrente de LED 15mA – $24.46\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- e) Corrente de LED 20mA – $30.86\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Na Figura 33, pode observar-se o efeito da luz do canal incidente pulsada no fotorreceptor para diferentes intensidades de corrente e potências ópticas.

O sinal lógico usado encontra-se sempre no topo de cada gráfico e é feito à cor de cada canal, ou seja, o canal vermelho será analisado com um sinal lógico vermelho, o sinal lógico laranja com a cor laranja e o sinal lógico associado ao verde com a cor verde.

Existem 6 curvas em cada gráfico. Cada uma delas corresponde a um fundo de polarização óptico. Por convenção e de modo a facilitar a sua interpretação o canal sem nenhum fundo de polarização é representado pela cor preta. Quando usado o fundo de polarização de 1mA a curva tem a cor vermelha, para o fundo de 5mA é usado a cor verde, para 10mA de intensidade usa-se o azul, ao usar 15mA a cor que se observa é o azul ciano e por último ao usar-se 20mA no fundo de polarização observa-se a cor magenta.

A Figura 34 ilustra o ganho da polarização óptica para o canal vermelho. A corrente I_{LED} presente na legenda representa a corrente que flui no LED que simula o canal vermelho.

O gráfico do ganho foi obtido em relação à corrente gerada no escuro de cada canal.

Observe-se que para qualquer uma das correntes do canal a sua resposta tende a estabilizar. Pode ver-se também que quanto mais elevada é a corrente do canal mais elevada precisa de ser a corrente de polarização. Observe-se que para as correntes mais baixas a 1 e a 5 mA, a partir dos 5mA de polarização ficam estagnadas.

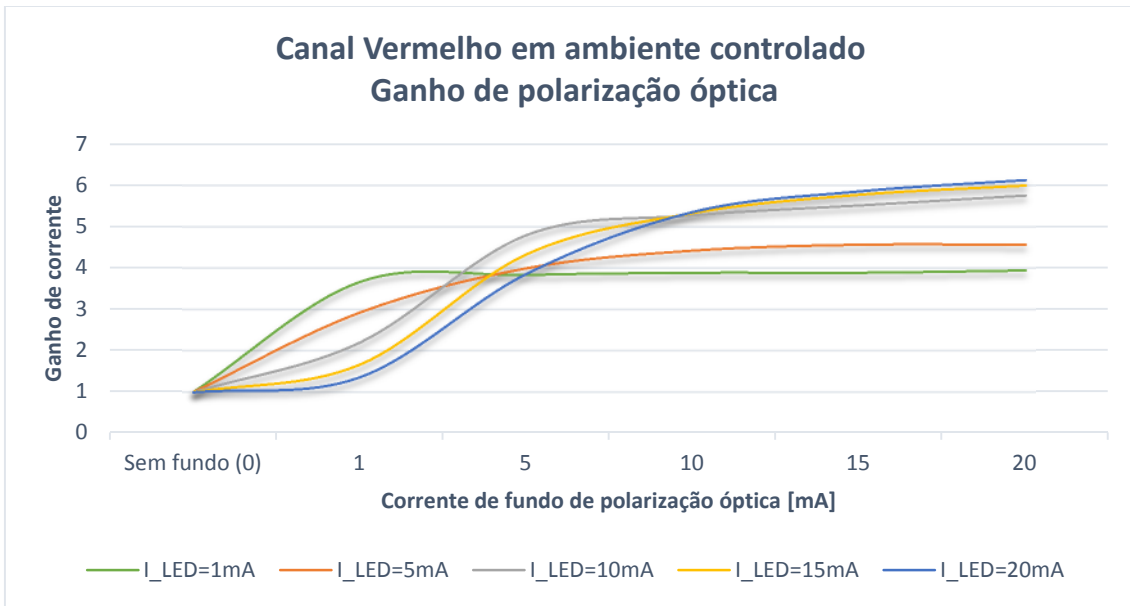
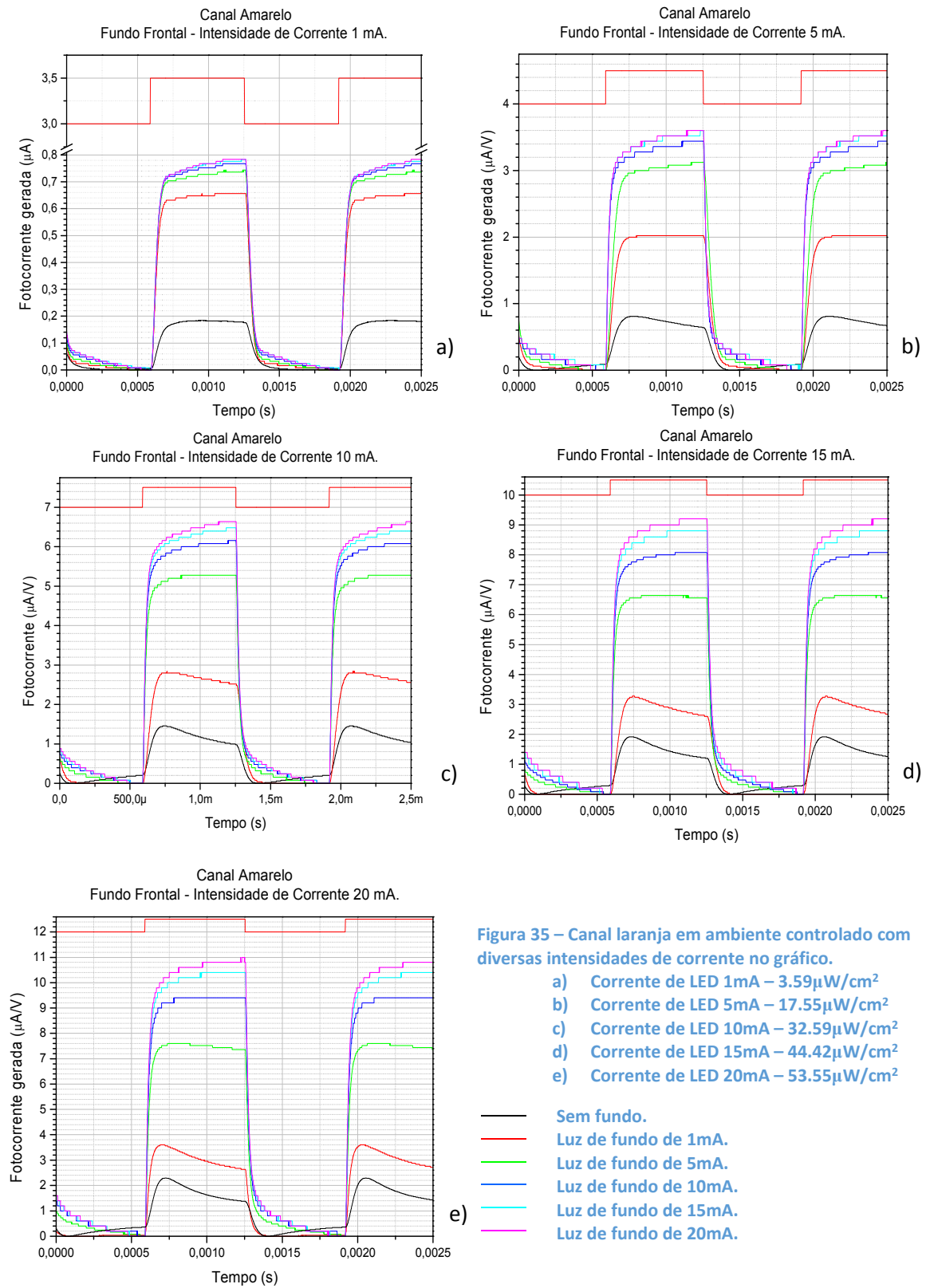


Figura 34 - Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização frontal.

A curva gerada pela corrente de canal de 20 mA tem um ganho de 6, e muito próximo deste estão as curvas de 10 mA e de 15 mA. Para as situações de correntes mais baixas o ganho é de 4 vezes a corrente de canal sem polarização óptica e de 4.6.

O fundo frontal amplifica claramente o sinal proveniente do canal a ser transmitido.

Observe-se a Figura 35 que ilustra o comportamento do canal do LED laranja com a influência do fundo frontal.



Observando os gráficos vê-se que em todos os casos existe amplificação perante a presença do fundo frontal violeta. Para a Figura 35a repare-se que a partir do fundo de 5mA quase não se nota diferença no ganho dos diferentes canais.

Observe-se a Figura 36 onde está representada a evolução do ganho de polarização óptica para o canal laranja.

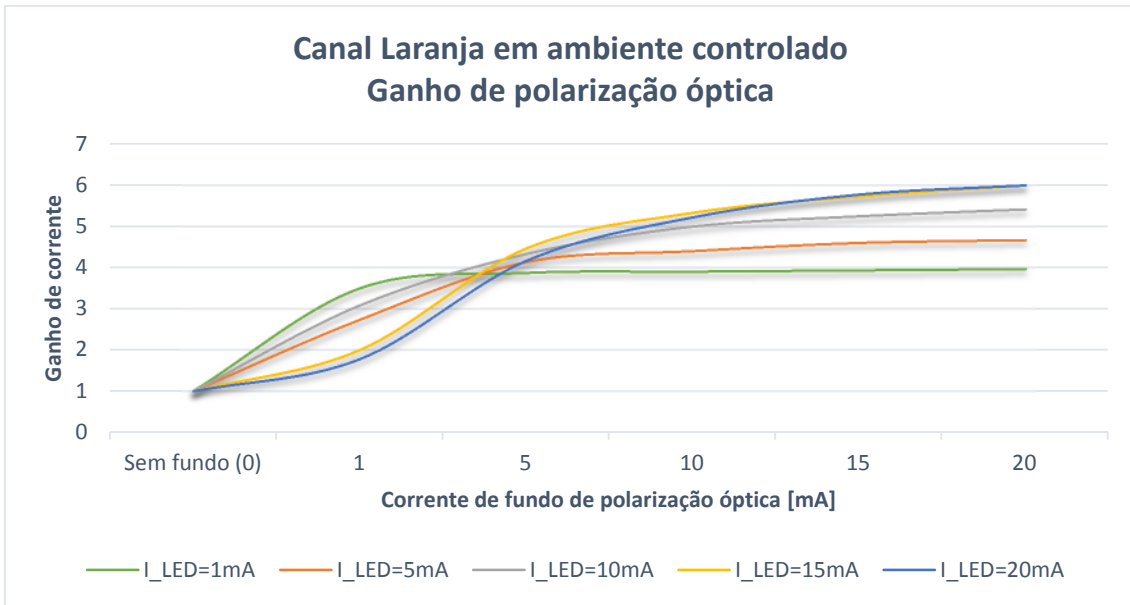
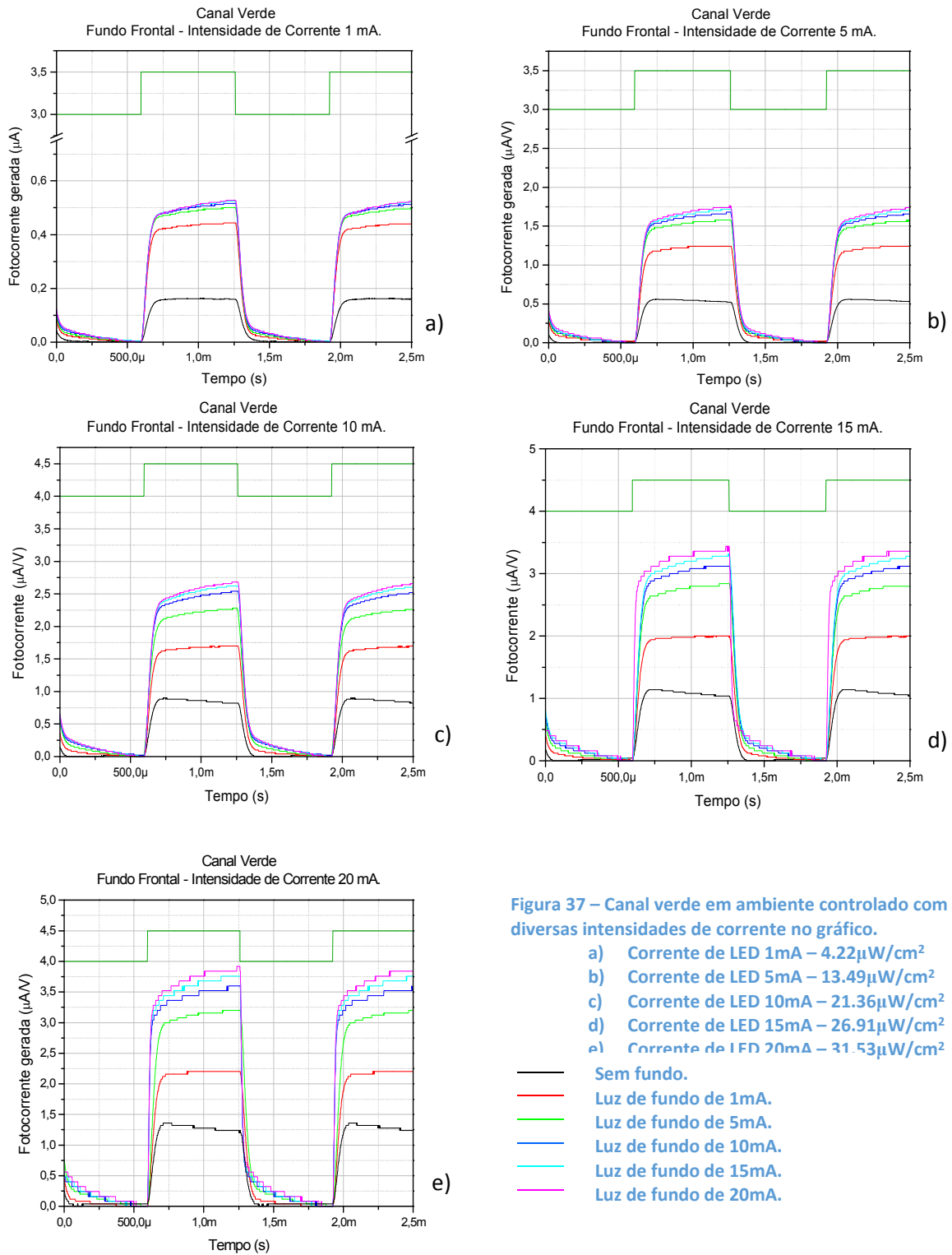


Figura 36 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente controlado com polarização frontal.

Pode ver-se que todas as curvas, para as diferentes situações, o ganho tende a estabilizar. Repare-se que para as curvas de 15 e 20 mA as curvas são praticamente iguais. A curva de 1mA é a que apresenta menor ganho de corrente, igual a 4, e a de 20mA tem um ganho de 6 vezes em relação ao valor no escuro.

O fundo violeta consegue amplificar o canal Laranja utilizado.

Observe-se a Figura 37 que ilustra o comportamento do canal verde.



Observando o comportamento do canal verde pode ver-se que o sensor quando tem um fundo frontal violeta tem um ganho em qualquer uma das situações, embora se verifique que a amplitude gerada é mais baixa que nos canais anteriores.

A Figura 38 ilustra a evolução dos vários casos testados para o canal verde em ambiente controlado. Pode ver-se que os gráficos tendem todos para o mesmo valor independentemente dos valores de corrente do canal. O comportamento não difere muito entre as várias correntes aplicadas e o ganho entre o canal escuro e as várias curvas com os fundos de polarização também não são muito diferentes.

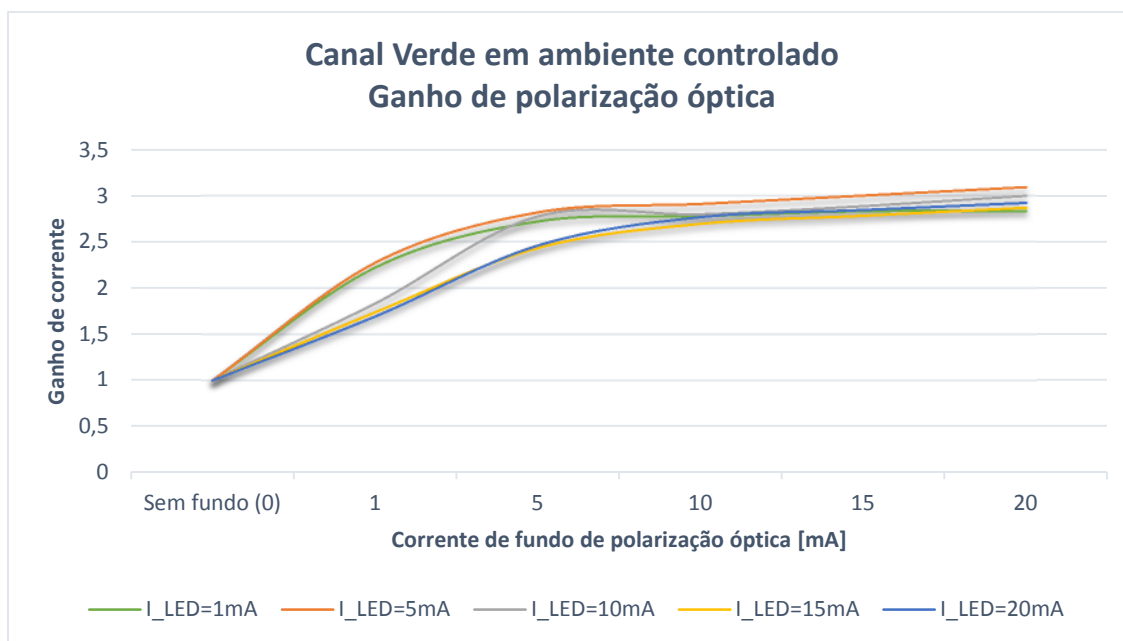


Figura 38 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente controlado com polarização frontal.

Para o canal verde o ganho no melhor caso é 3 quando o LED é percorrido por uma corrente de 5mA. Esta diferença é muito pequena para o valor mais baixo que é de 2.8 para a corrente de fundo de polarização de 1mA.

Observe-se a Figura 39 que ilustra as médias de ganho para os 3 canais do semáforo.

Esta média é calculada a partir dos valores de patamar de cada um dos canais. Para o canal vermelho obteve-se o valor de patamar para todas as curvas presentes em cada um dos gráficos da Figura 33 (a), b), c), d) e e)). Estes valores de patamar são usados em relação ao patamar de escuro.

Como em diversos gráficos os valores são transientes e tendem estabilizar depois da transição de nível lógico. Nessas situações tirou-se um ponto médio em relação ao mínimo e ao máximo.

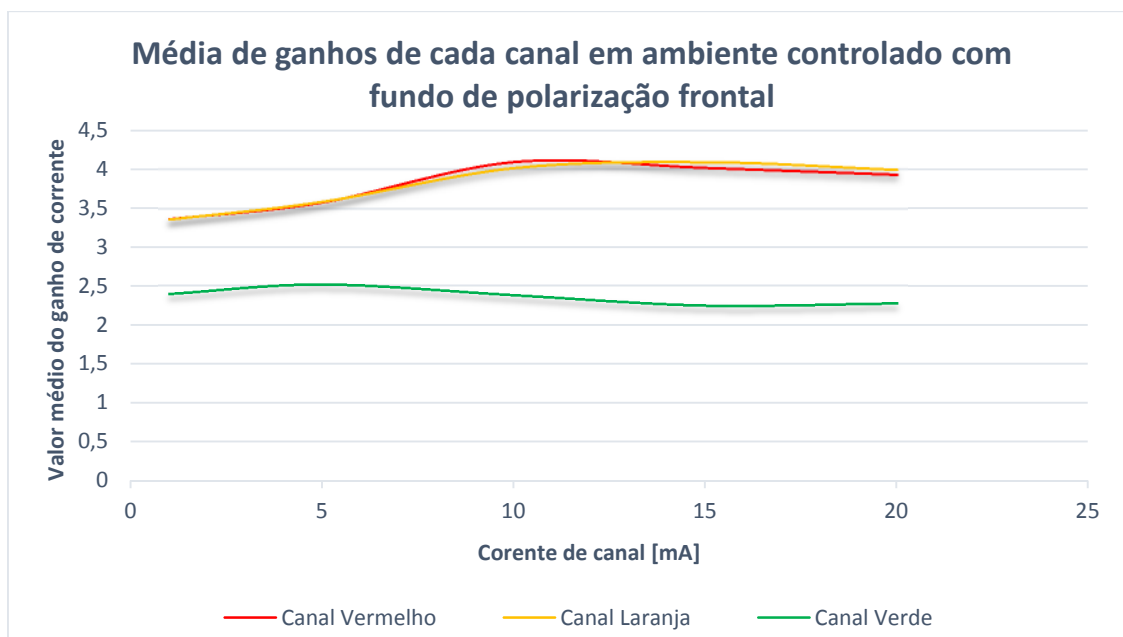
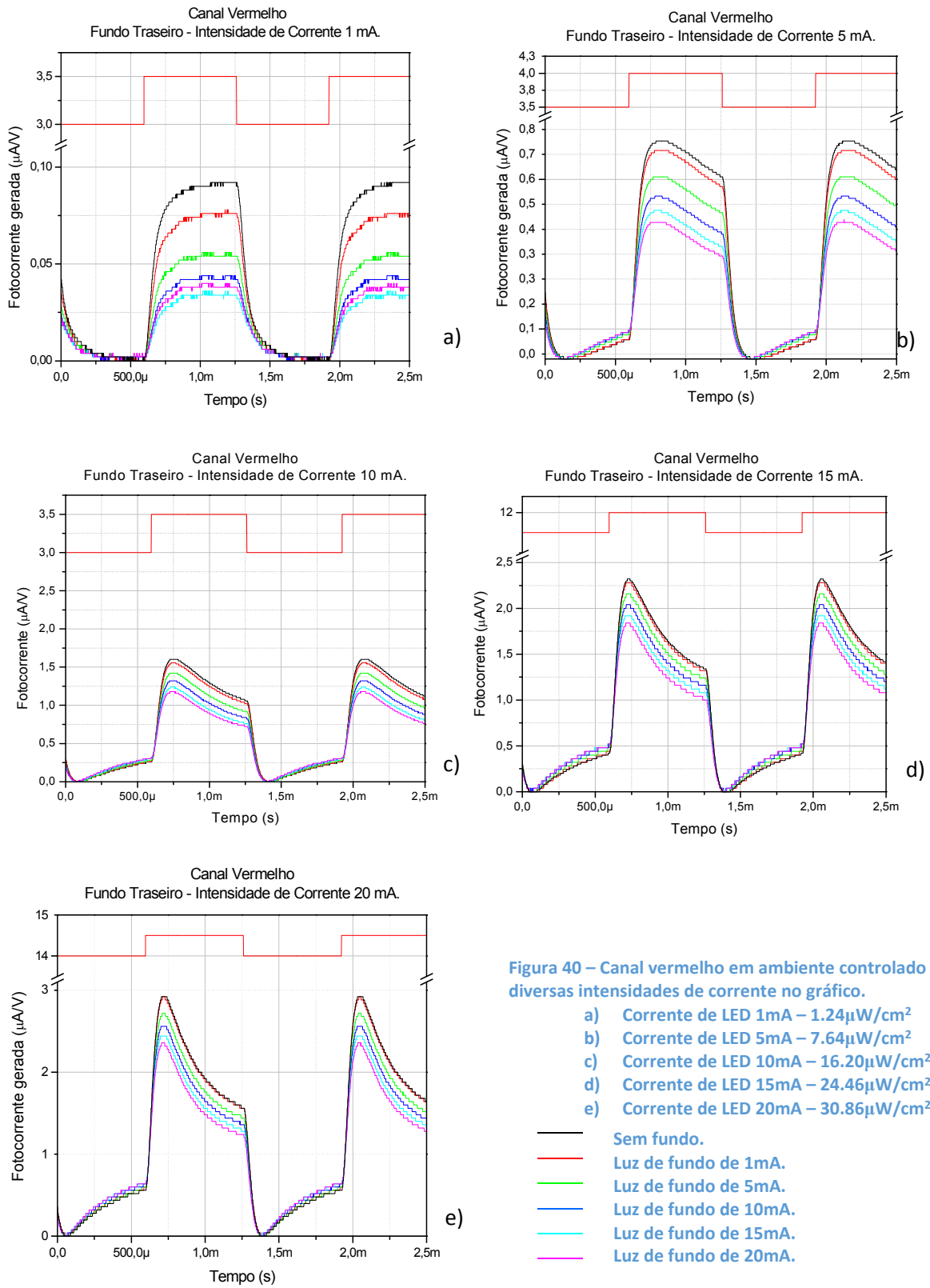


Figura 39 – Média de ganhos da polarização frontal com fundo violeta para os 3 canais em ambiente controlado.

Pode ver-se que o comprimento de onda do canal vermelho e do canal laranja são muito semelhantes. Ambos têm o ganho mais elevado, 4,01, quando o valor da corrente do canal é de 10 mA, após esse valor tende a ficar estável não varia muito, ficando com 3,99.

Para o canal verde observa-se que os seus valores são mais baixos. O ganho máximo é para 5mA de corrente de canal e consegue obter-se um ganho de 2,5. Após esse valor existe uma ligeira atenuação na média dos ganhos ficando em 2,28.

Observe-se a Figura 40 onde é analisado o canal vermelho com fundo posterior e em ambiente controlado.



Pode observar-se nos gráficos anteriores a resposta do canal vermelho perante as correntes incidentes pela parte posterior do fundo violeta.

Observa-se um comportamento diferente do fundo frontal. O fundo frontal fez amplificar a resposta do sensor, já o fundo posterior faz atenuar a sua resposta. As várias cores presentes nos gráficos da Figura 40 (a), b), c), d) e e)) têm o mesmo significado que na situação de fundo frontal.

Observe-se Figura 41. Esta ilustra o comportamento do ganho do sensor perante os fundos ópticos aplicados. Pode ver-se que o comportamento do sensor é completamente oposto ao fundo frontal no canal vermelho. Em vez do fundo posterior produzir um ganho provoca uma atenuação do sinal transmitido.

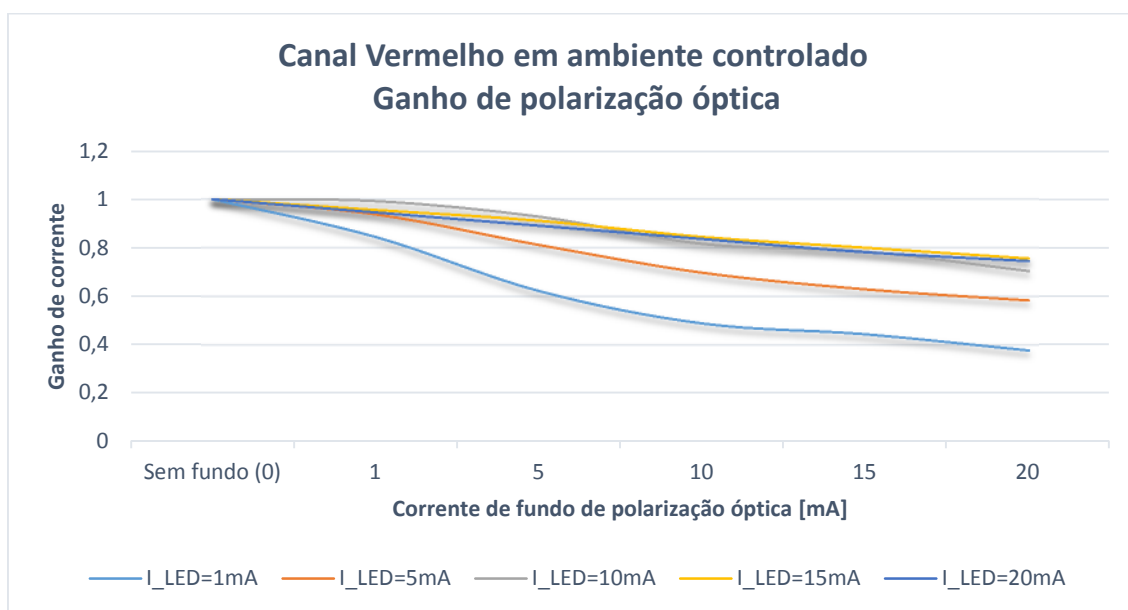
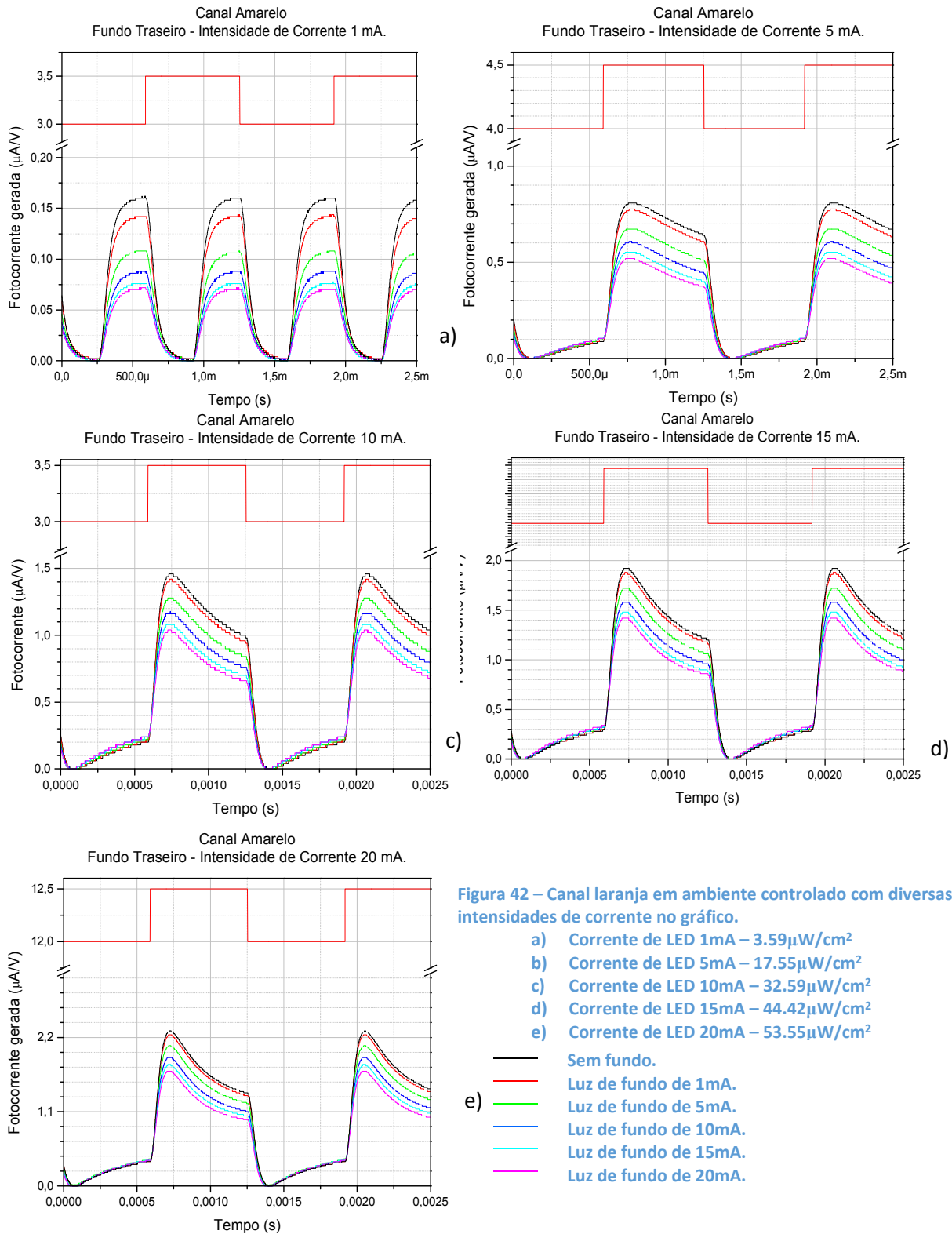


Figura 41 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização posterior.

O canal que tem pior resposta à presença do fundo posterior é o de intensidade mais baixa, onde a corrente do canal é de 1mA. O valor de atenuação é de 0.37 é o valor mais alto das 5 curvas. Para uma corrente de LED maior como por exemplo 20mA ou 15mA pode ver-se que o valor é de 0.8.

Observe-se a Figura 42 e o comportamento do canal laranja e do fundo posterior.



O canal laranja em ambiente controlado tem um comportamento parecido ao canal vermelho, tem uma atenuação em relação ao sinal que incide no sensor.

Observe-se a Figura 43. Verifica-se que à medida que a intensidade do fundo óptico aumenta maior é a atenuação causada no sensor e menor é a corrente gerada. Pode verificar-se também que a atenuação se faz sentir sobretudo para as correntes mais baixas que percorre o canal laranja.

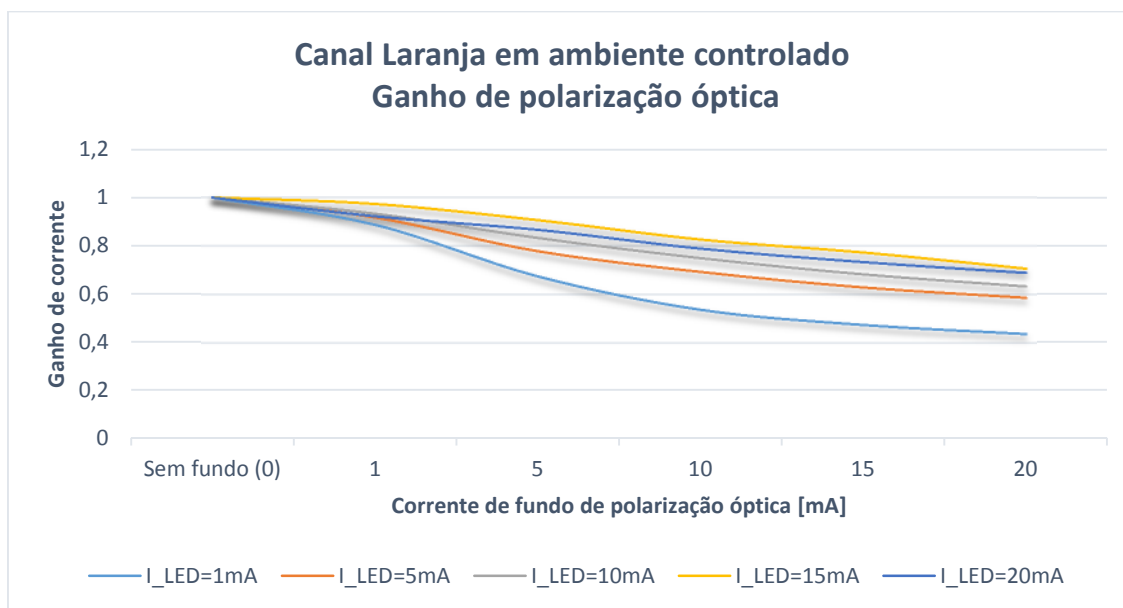


Figura 43 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização posterior.

O canal laranja quando percorrido por 1mA o ganho é de 0.43, é o valor mais baixo. O valor mais alto do ganho é de 0.7 para o canal de 15 mA e 0.68 para a corrente de 20mA no canal. São valores muito próximos e curvas muito semelhantes.

Observe-se a Figura 44, onde é analisada a influência do fundo óptico pela parte posterior do sensor no canal verde.

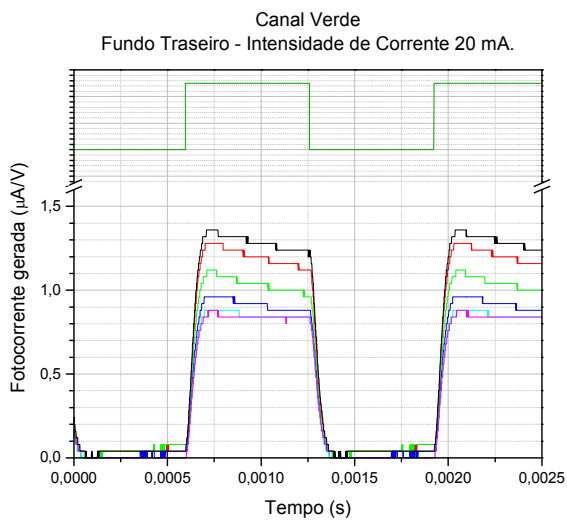
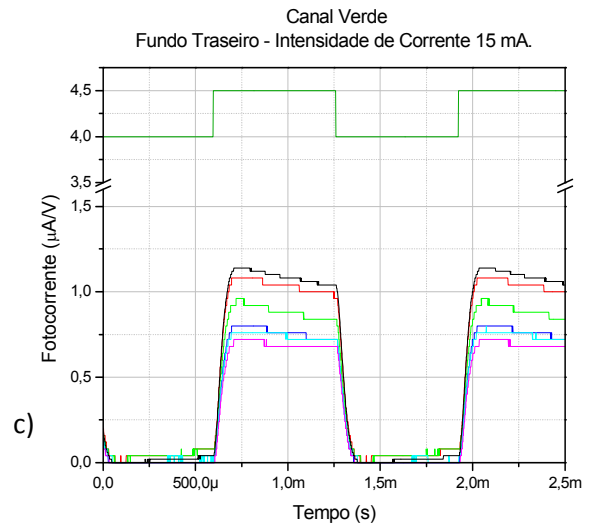
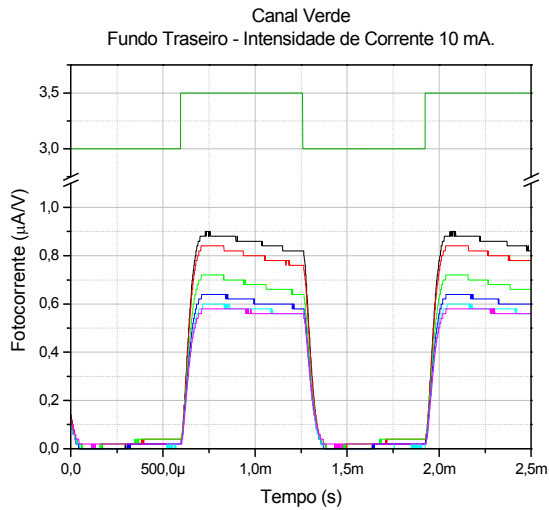
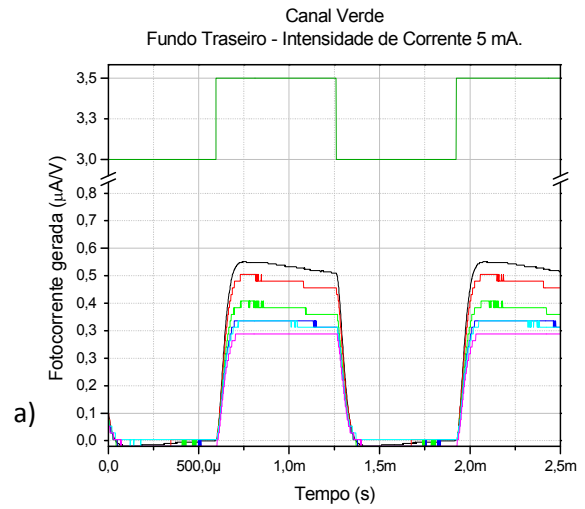
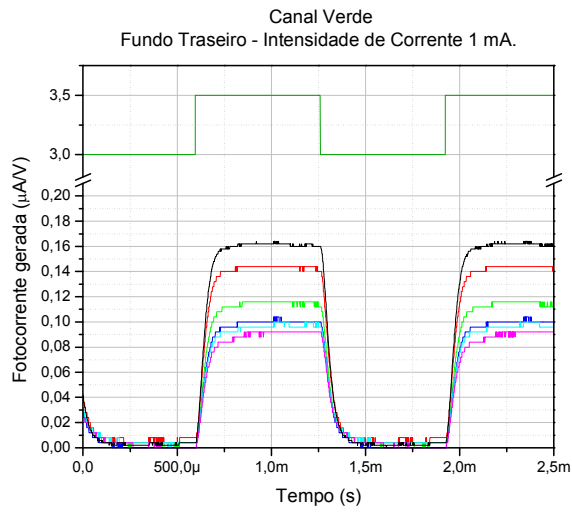


Figura 44 – Canal verde em ambiente controlado com diversas intensidades de corrente no gráfico.

- a) Corrente de LED 1mA – $4.22\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- b) Corrente de LED 5mA – $13.49\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- c) Corrente de LED 10mA – $21.36\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- d) Corrente de LED 15mA – $26.91\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- e) Corrente de LED 20mA – $31.53\mu\text{W}/\text{cm}^2$

- Sem fundo.
- Luz de fundo de 1mA.
- Luz de fundo de 5mA.
- Luz de fundo de 10mA.
- Luz de fundo de 15mA.
- Luz de fundo de 20mA.

Olhando aos gráficos do canal pode ver-se que quanto mais elevado o valor da corrente do fundo mais atenuado está o sinal original. Observa-se o mesmo comportamento em todas as situações, em que o fundo de 20mA provoca maior atenuação.

Observando a Figura 45 pode ver-se que o comportamento é sempre decrescente, quanto maior o valor do fundo de polarização mais elevada é a atenuação provocada. Independentemente da corrente que percorre o canal todos eles são atenuados.

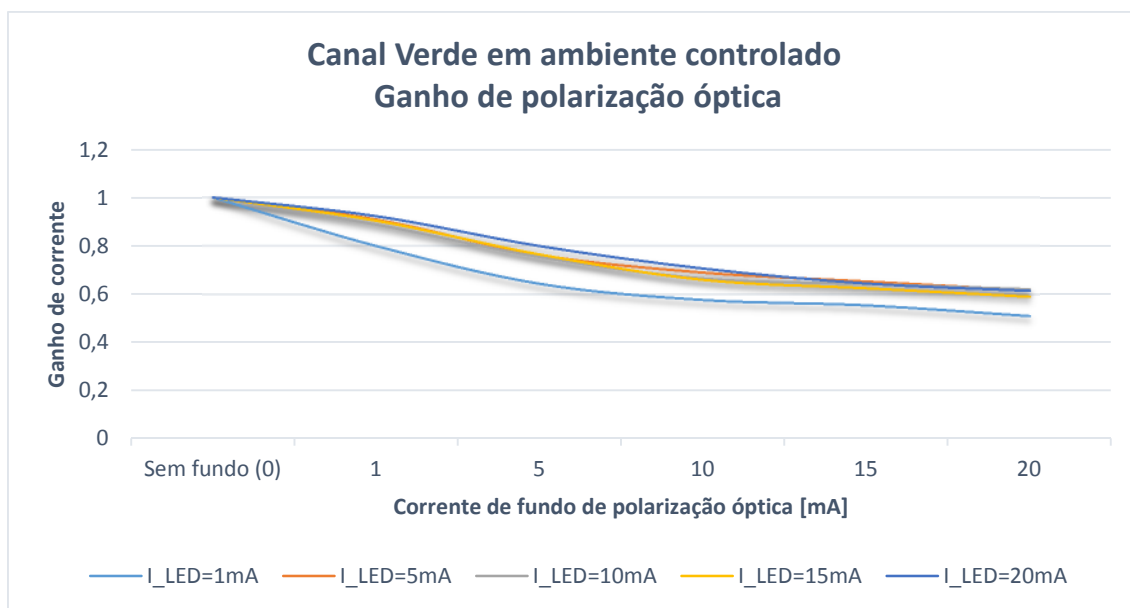


Figura 45 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente controlado com polarização posterior.

O valor mais baixo verifica-se para a curva de 1mA com 0.51 de ganho, para a curva dos 20mA o valor é de 0.61.

Ao analisar a Figura 46 pode ver-se a média dos canais em ambiente controlado com fundo posterior incidente. Verifica-se que todos os canais não têm ganho, ou seja todas as curvas estão abaixo do valor da unidade.

Observe-se que o canal verde é o mais atenuado tendo um valor médio de 0.75 e o canal vermelho é o que tem o valor de ganho médio mais alto com 0.8, já o canal laranja apresenta um valor médio de 0.78.

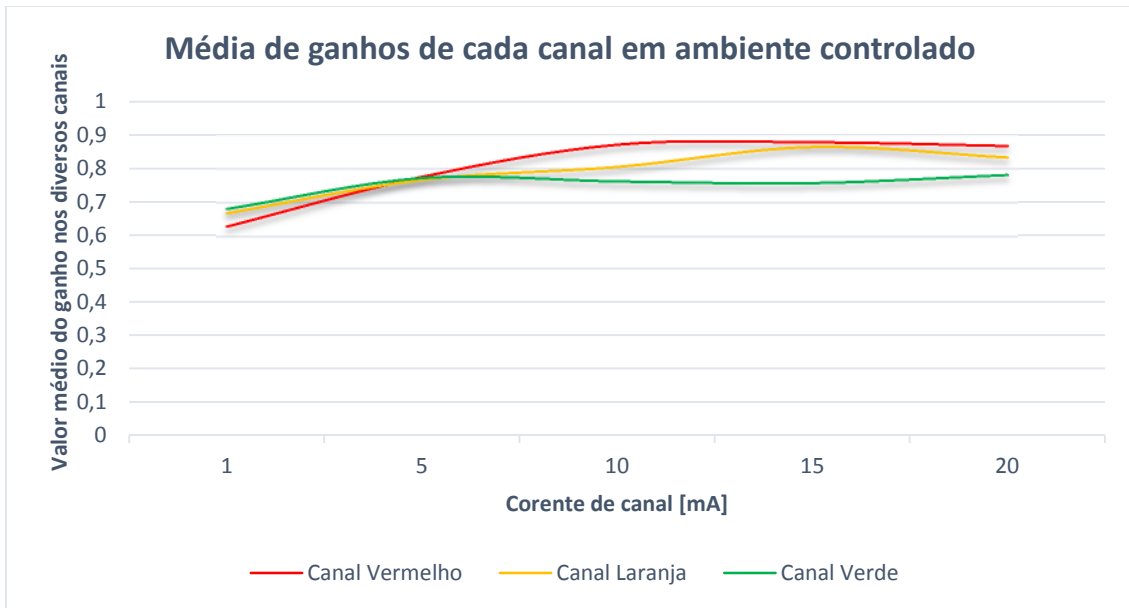


Figura 46 – Média de ganhos da polarização posterior com fundo violeta para os 3 canais em ambiente controlado.

Verifica-se também que para a corrente de canal mais baixa de 1mA o canal verde é o que tem menos atenuação, para uma corrente de canal de 5mA os valores são iguais e a partir daí o vermelho e o laranja tem maior ganho que o verde.

Considere-se agora o ambiente controlado sem influência dos fundos de polarização. Observe-se Figura 47 que ilustra a fotocorrente gerada perante a luz do LED incidente.

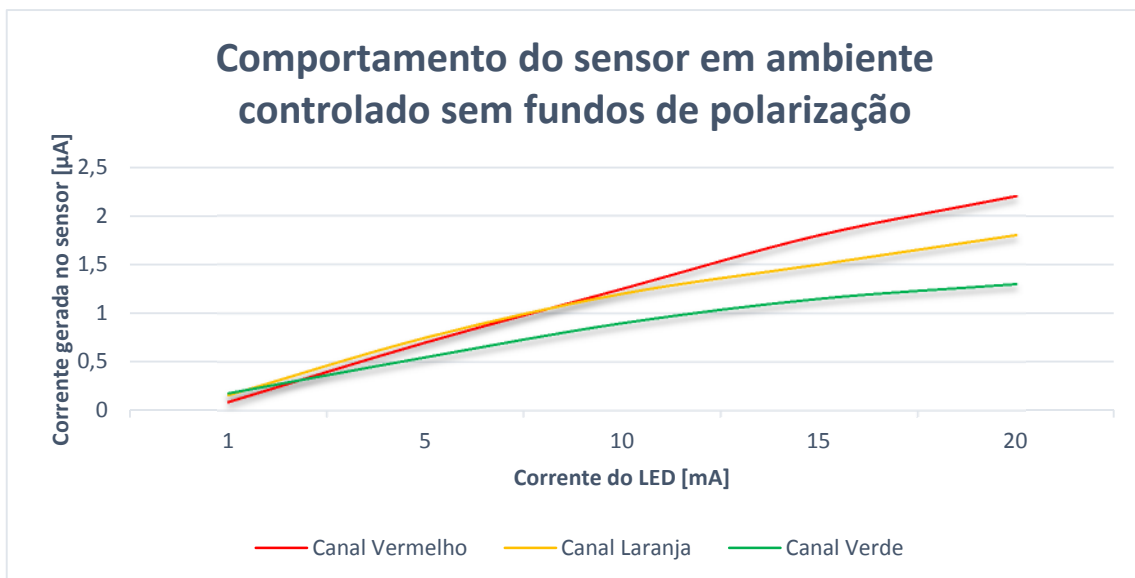


Figura 47 – Comportamento do sensor em ambiente controlado.

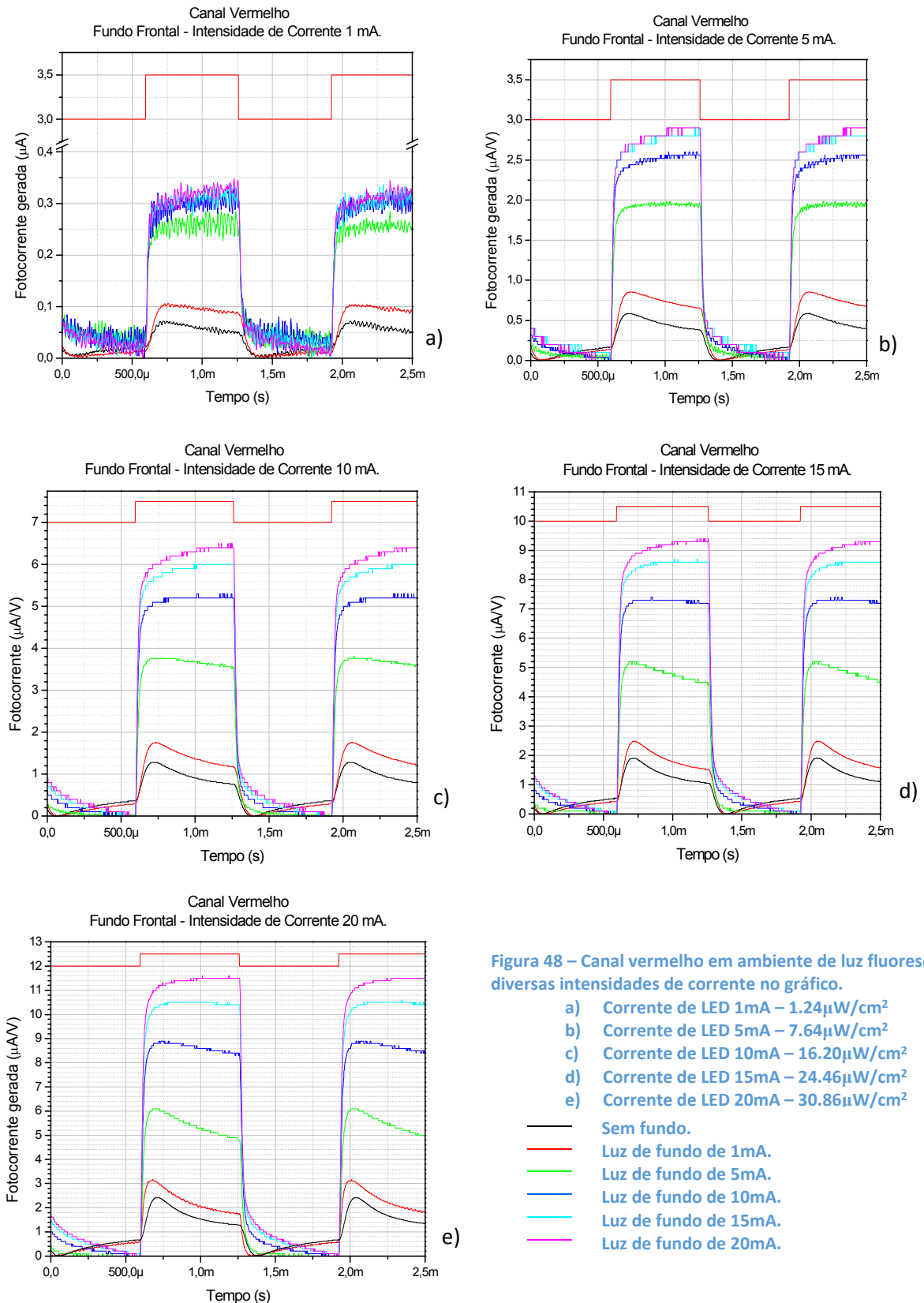
Pode ver-se que o sensor tem uma resposta melhor ao comprimento de onda vermelho, e o canal verde tem o pior desempenho. Observe-se que à medida que a

corrente do LED aumenta, o sensor gera uma fotocorrente maior. Qualquer um dos canais tem uma resposta quase linear, e fazendo-se uma aproximação a uma recta de cada um canal, o canal vermelho em média tem um salto de 0.52, o canal laranja tem um salto de 0.41 por cada valor de corrente de canal. Já para o canal verde o salto é de 0.28.

O canal vermelho é o que mais corrente produz no sensor sem nenhum fundo. O fotorreceptor no ambiente controlado apresenta menos sensibilidade ao comprimento de onda verde.

4.5.2 Medidas em ambiente de Luz fluorescente.

Observe-se agora o comportamento do sensor quando envolvido pela luz fluorescente. A Figura 48 ilustra o canal vermelho em ambiente fluorescente.



Analisando os gráficos pode ver-se que quando o fundo frontal é aplicado ao sensor, o sinal de saída tem um ganho associado. Pode verificar-se que nos gráficos da Figura 48 a) e b) que o nível de patamar do sinal está contaminado com ruído, ainda assim não põe em causa a definição do nível lógico correcto. Observando ainda o gráfico a) pode ver-se que a partir dos 10mA de fundo de polarização óptica não se nota diferença praticamente entre eles, sobretudo devido ao ruído presente no patamar. Para o b) vê-se que o ruído também aparece nos patamares embora neste caso não tenha a mesma influência, sobretudo porque os valores de patamar são maiores. Apenas para os fundos de 15mA e 20mA se vê que não existe praticamente nenhuma porque as curvas têm um comportamento semelhante.

Observe-se a Figura 49 onde se pode ver o ganho médio para cada uma das correntes de canal aplicadas.

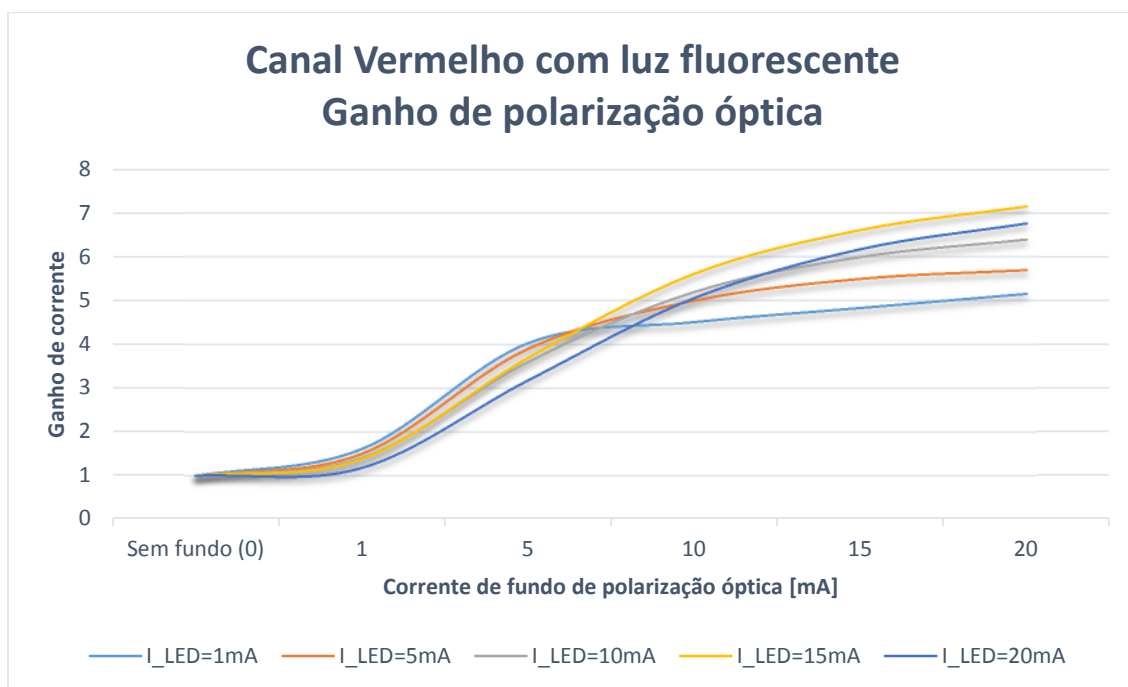
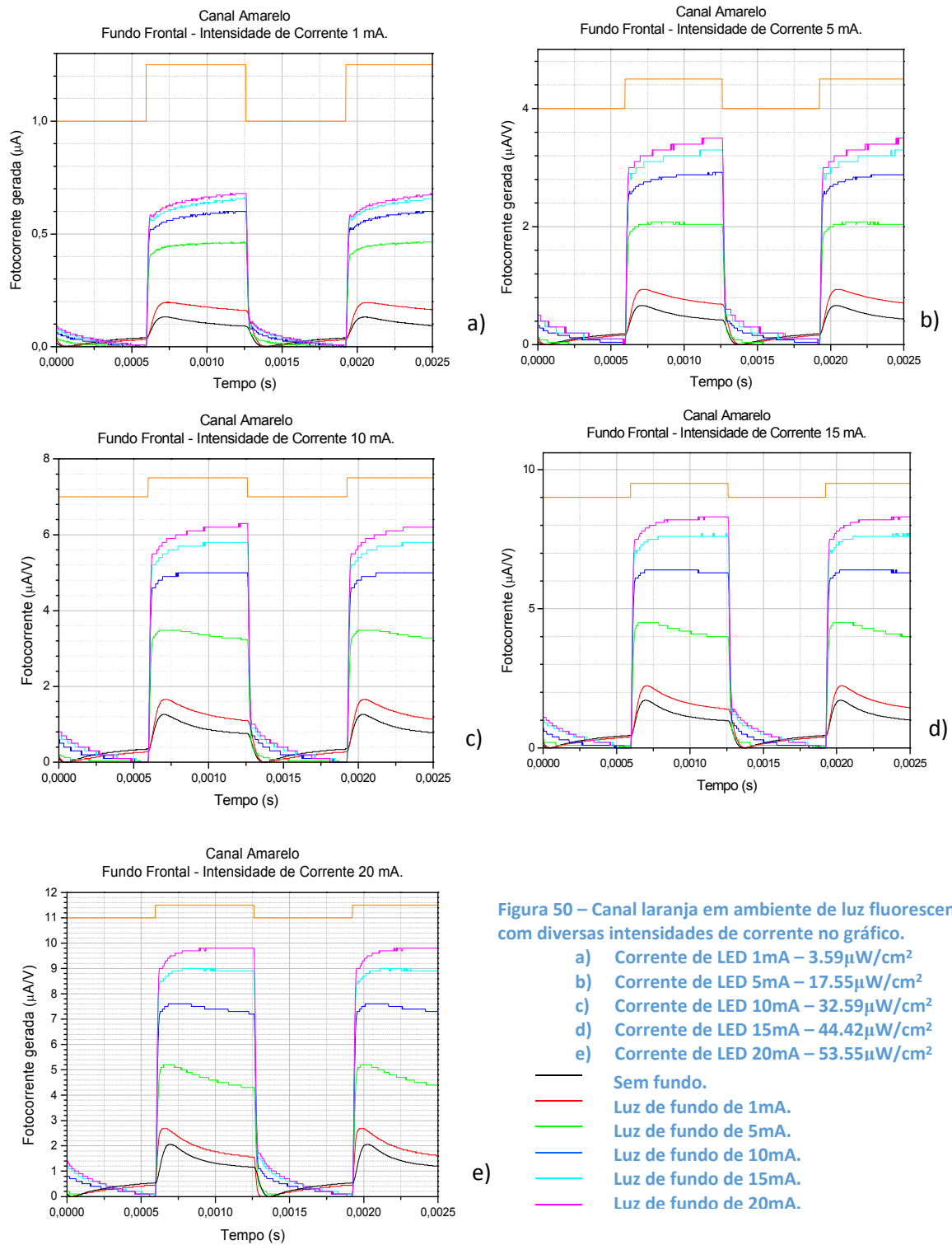


Figura 49 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz fluorescente com polarização frontal.

À medida que a corrente de polarização aumenta o ganho da corrente também. O valor mais alto de ganho de corrente é para a corrente de canal de 15mA e é de 7.15 quando o fundo de polarização aplicado é o mais alto. Para o mesmo fundo óptico de polarização o canal de 1mA tem o valor de 5.16 para o ganho de corrente.

Pode verificar-se que todos os canais tendem para um valor de ganho não tendo um crescimento tão acentuado após a corrente de fundo de 10mA.

Observe-se a Figura 50 onde está representada a emissão do canal laranja quando o sensor está envolvido por luz fluorescente.



Observe-se a Figura 51, pode ver-se nos gráficos do canal laranja que a luz fluorescente afecta o comportamento do sensor quando ele está exposto. O ganho máximo é 7 para a curva de 20mA e o mínimo para a de 1mA com 5.81.

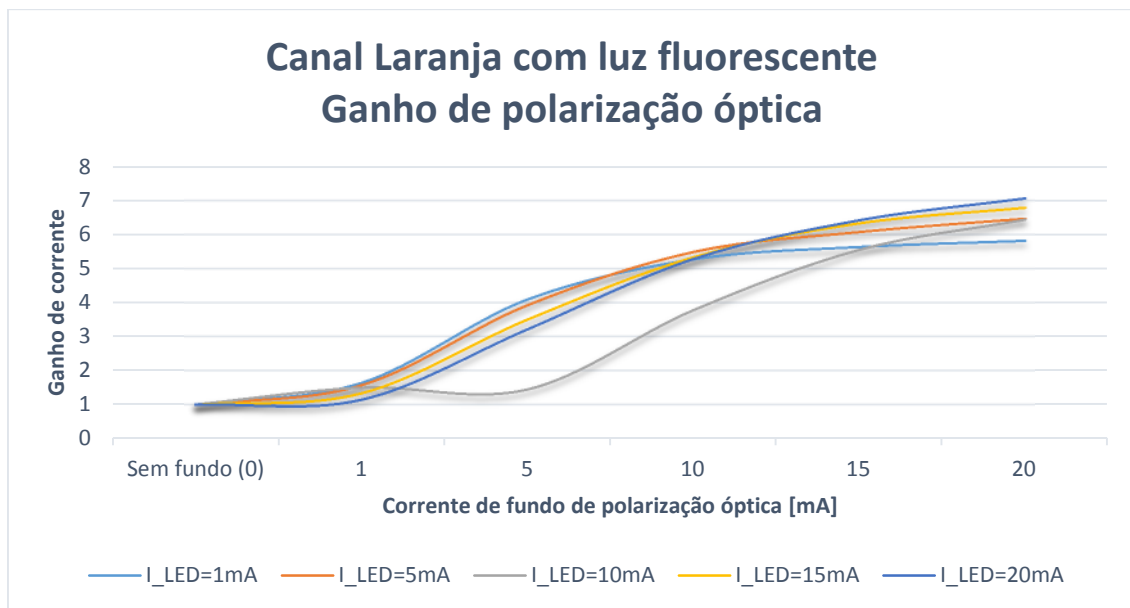
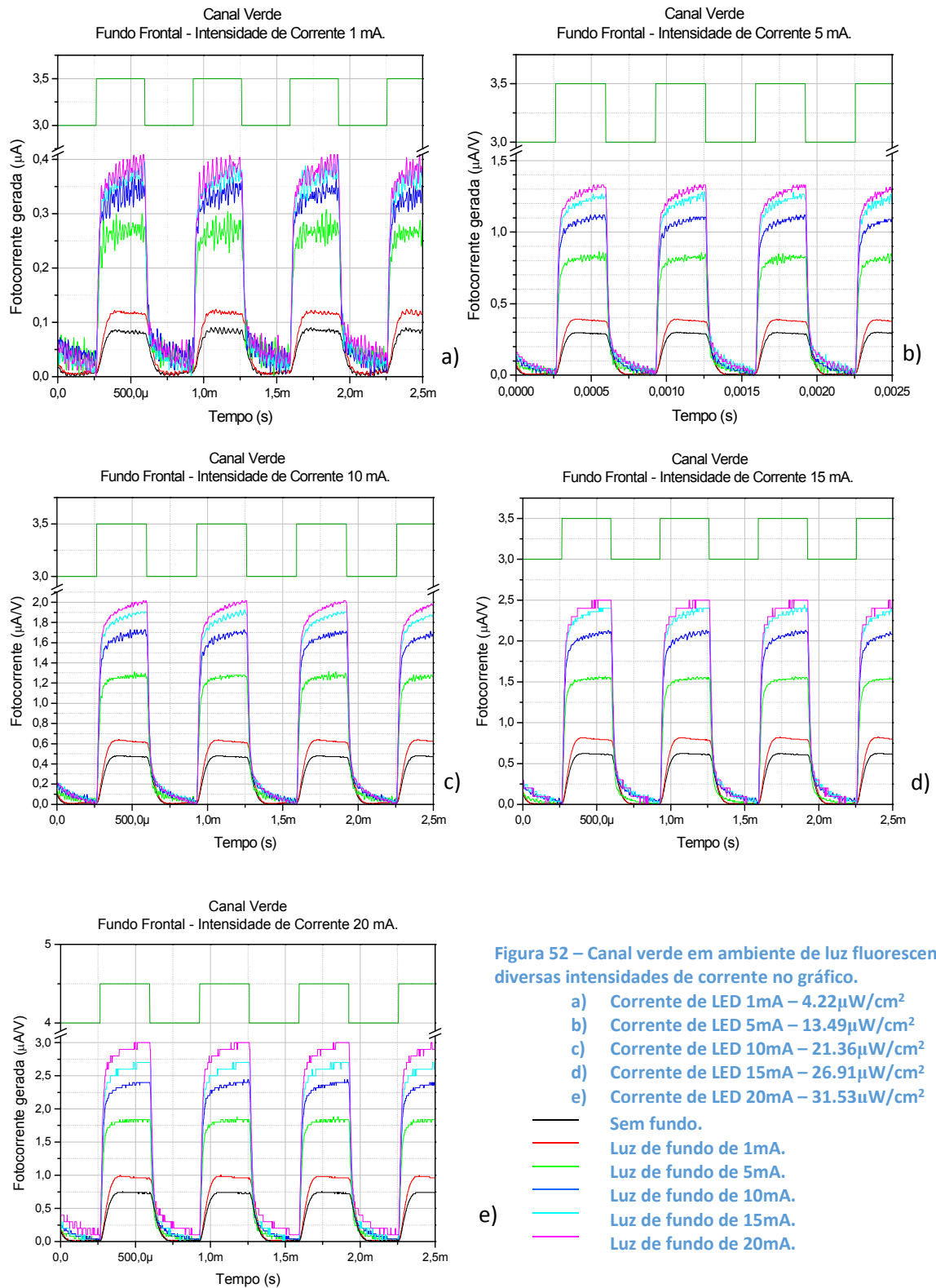


Figura 51 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz fluorescente com polarização frontal.

Observe-se a Figura 52 onde está representado o canal verde com polarização óptica frontal e com o sensor em ambiente de luz fluorescente.



Analisando o canal verde pode ver-se que o sensor também apresenta ganho de corrente em todas as situações. E em todas as curvas é notório algum ruído de patamar mas é sobretudo acentuado nas correntes mais baixas, sobretudo na situação de a) onde se vê que para os fundos ópticos de 10mA, 15mA e 20mA o sinal é sobreposto por ação do ruído que se somou ao canal.

Observe-se a Figura 53. Esta representa o ganho de corrente resultante do fundo óptico aplicado para cada intensidade de corrente de canal.

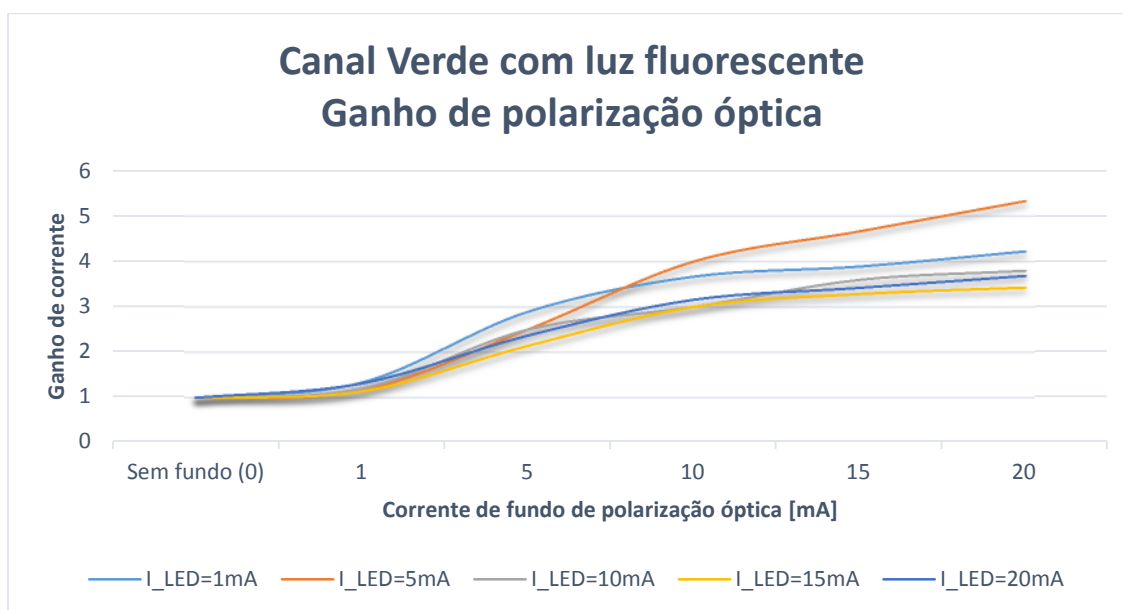


Figura 53 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz fluorescente com polarização frontal.

Todas as curvas tendem para um valor de ganho, entre 3 e 4. A curva do canal verde para 5mA apresenta um ganho de 5.3 o que é ligeiramente superior às outras curvas.

Embora o ganho de corrente de canal de 5mA seja maior, o canal de 20mA é quem gera valores de corrente mais altos no sensor na ordem dos 3 μ A, enquanto no canal de 15mA são de 2.5 μ A, para o de 10mA são 2 μ A, para o de 5mA conseguem-se gerar 1.5 μ A e o canal de 1mA é o que gera correntes mais pequenas na ordem dos 0.3-0.4 μ A.

Observe-se a Figura 54. Esta mostra a média dos ganhos de corrente para cada canal vermelho, laranja e verde.

Pode ver-se que à medida que a corrente de canal aumenta no canal vermelho e no laranja a resposta é parecida, tendo o canal laranja para as correntes mais baixas uma resposta ligeiramente superior para 1mA tem 3.9 de ganho corrente, para o vermelho é de 3.5. Com uma corrente de 5mA tem 4 vezes o valor no escuro com ambiente fluorescente enquanto o vermelho apresenta um ganho de 3.7. Já para os 10mA o canal laranja tem um ganho de 4.18 e o canal vermelho de 3.9. A partir desta corrente de canal o comportamento é quase idêntico.

Para o comprimento de onda verde pode ver-se que quando as correntes são mais baixas apresenta um valor médio de ganho mais alto, ainda assim o seu valor máximo é de 3.11 para 5mA de corrente de canal. O sinal verde é o que se comporta pior neste caso de ambiente de luz fluorescente. Ainda assim repare-se que o canal verde perante a presença da luz ambiente fluorescente tem um valor de ganho mais alto do que em ambiente controlado.

Já para o canal laranja e o vermelho a luz fluorescente também provoca um ganho mas nas correntes mais baixas de 1mA e 5mA, a partir desse valor predomina a polarização óptica sobre o canal não fazendo diferença a ambiência do sensor.

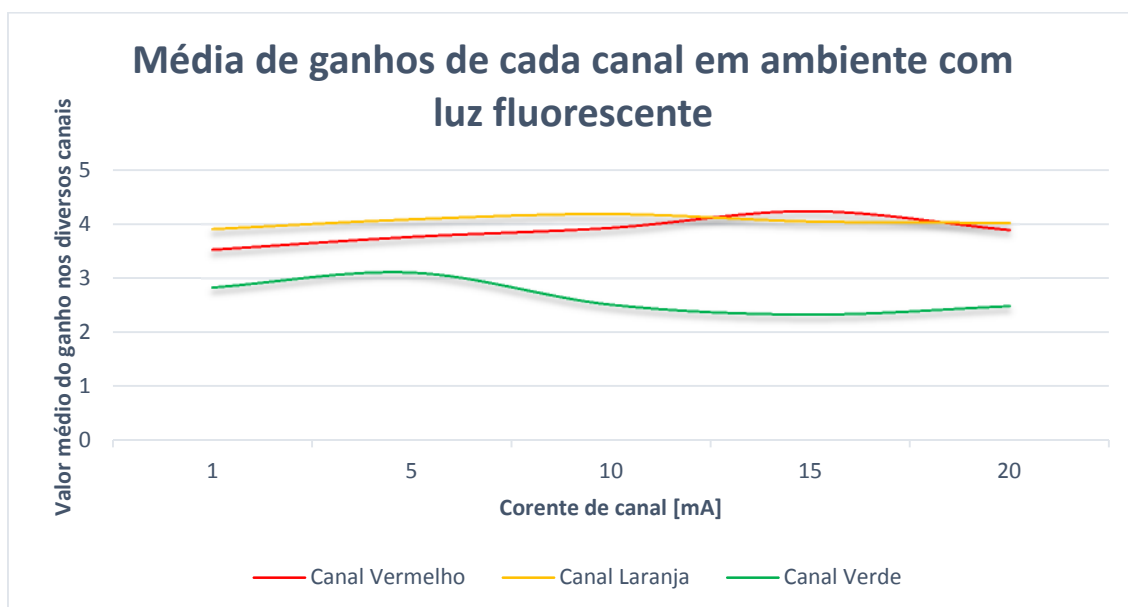
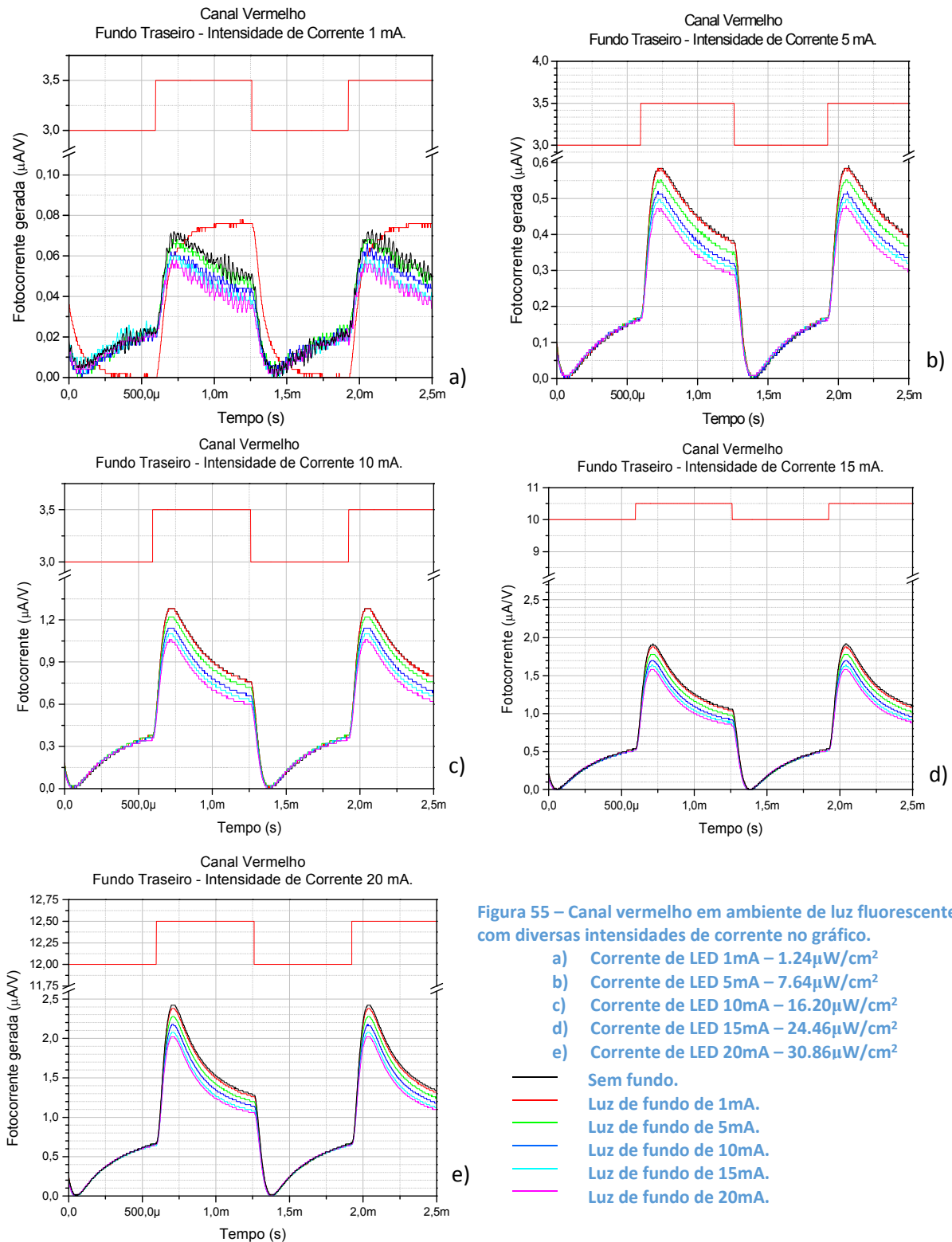


Figura 54 – Média de ganhos da polarização frontal com fundo violeta para os 3 canais em ambiente fluorescente.

Observe-se agora a Figura 55, onde está representado o canal vermelho com polarização óptica posterior e luz fluorescente de ambiente.



O canal vermelho quando tem luz fluorescente e o fundo óptico posterior aplicado comporta-se como quando não tinha luz ambiente e sofre uma atenuação devido ao fundo óptico.

Observe-se a Figura 56. Esta demonstra a evolução do ganho de corrente associado ao canal com as diversas correntes aplicadas. Pode ver-se que o canal vermelho independentemente da corrente que flui no LED o comportamento do sensor é semelhante apresentado todas as cores o mesmo decaimento e não tendo muita diferença entre as várias curvas. Ficam entre 0.6 e 0.8 de ganho, o que na prática significa que a polarização posterior em vez de realçar o canal atenua-o.

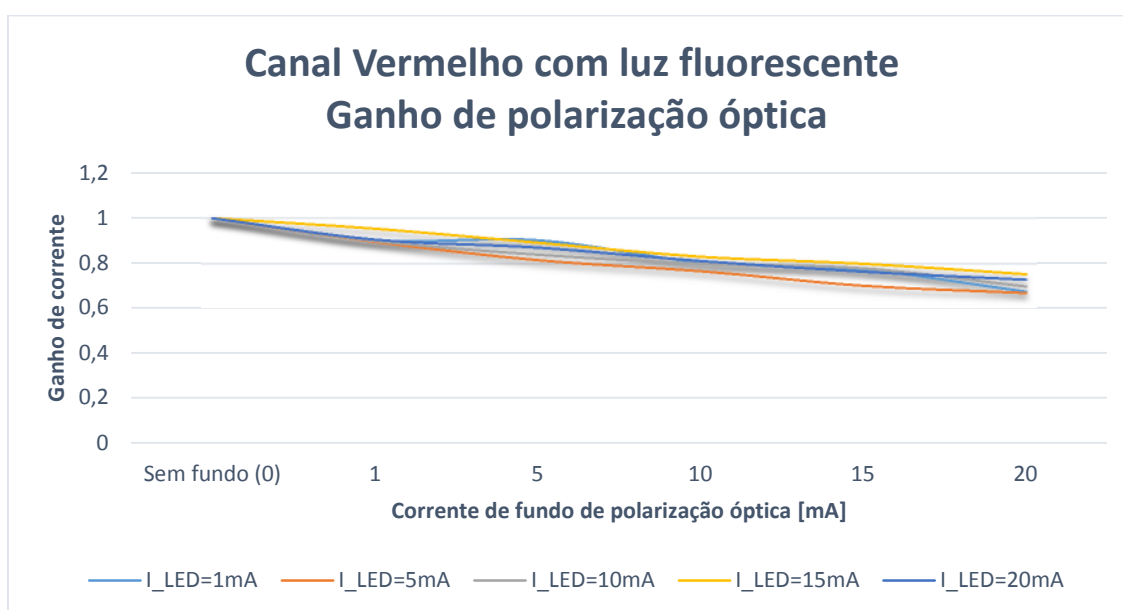
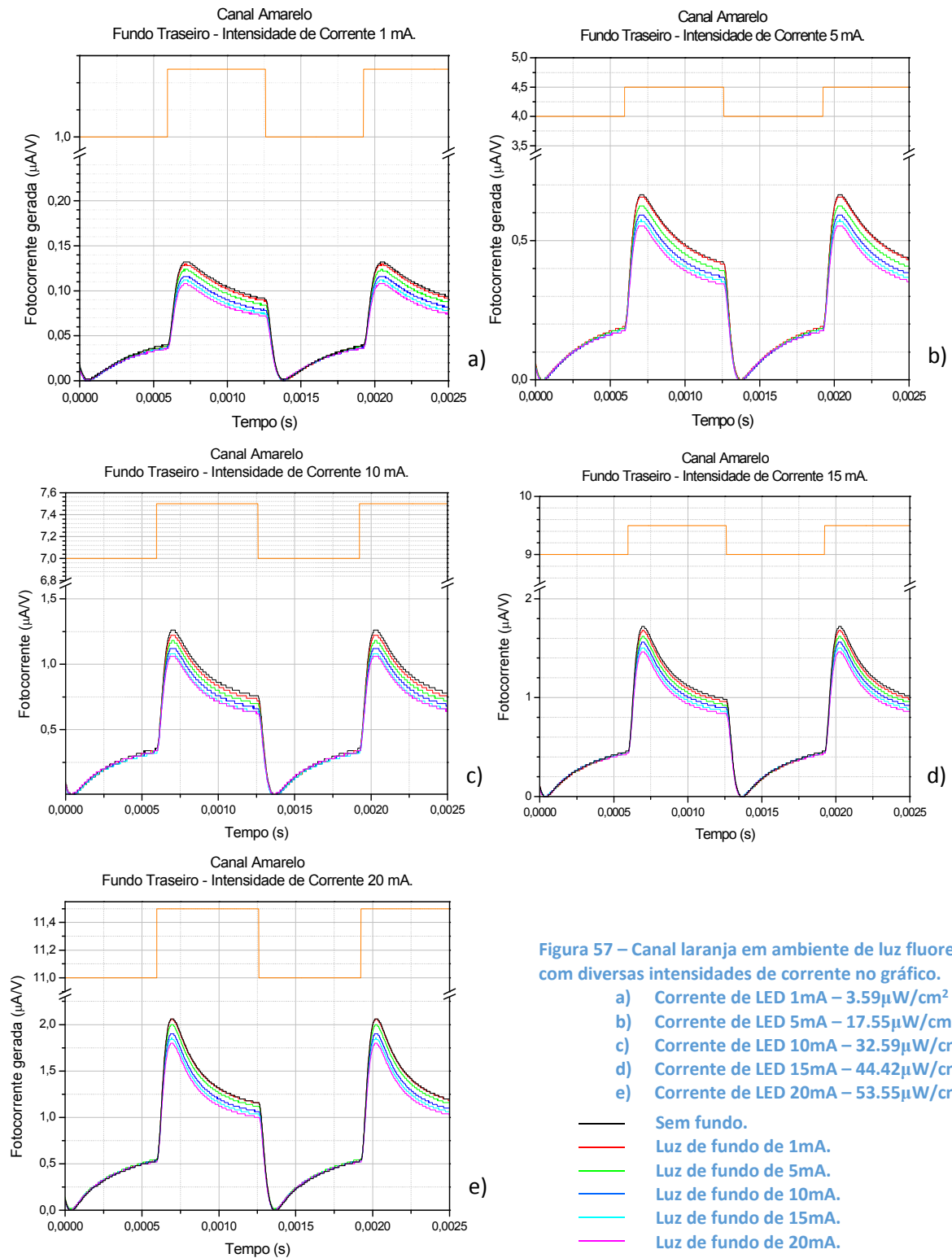


Figura 56 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz fluorescente com polarização posterior.

Se se observar a curva do ganho para o ambiente de luz controlada pode verificar-se que a presença da luz ambiente fluorescente não torna tão acentuadas as atenuações do canal vermelho. O pior caso para o ambiente controlado era de 0.37 para 1mA de corrente de canal e para o mesmo caso com a luz ambiente o valor é de 0.7.

Observe-se o canal laranja com fundo posterior aplicado e com a influência da luz ambiente fluorescente na Figura 57.



O canal Laranja perante o fundo posterior e a luz ambiente também atenua o canal. Pode ver-se que, tal como o canal vermelho, seja qual for a corrente aplicada ao LED do canal o comportamento é semelhante e todas as curvas são atenuadas.

Observando a Figura 58 pode ver-se que as curvas tendem a ser atenuadas da mesma forma. Repare-se, por exemplo, que para uma corrente de canal de 20mA a atenuação é em todos os canais aproximadamente 0.8.

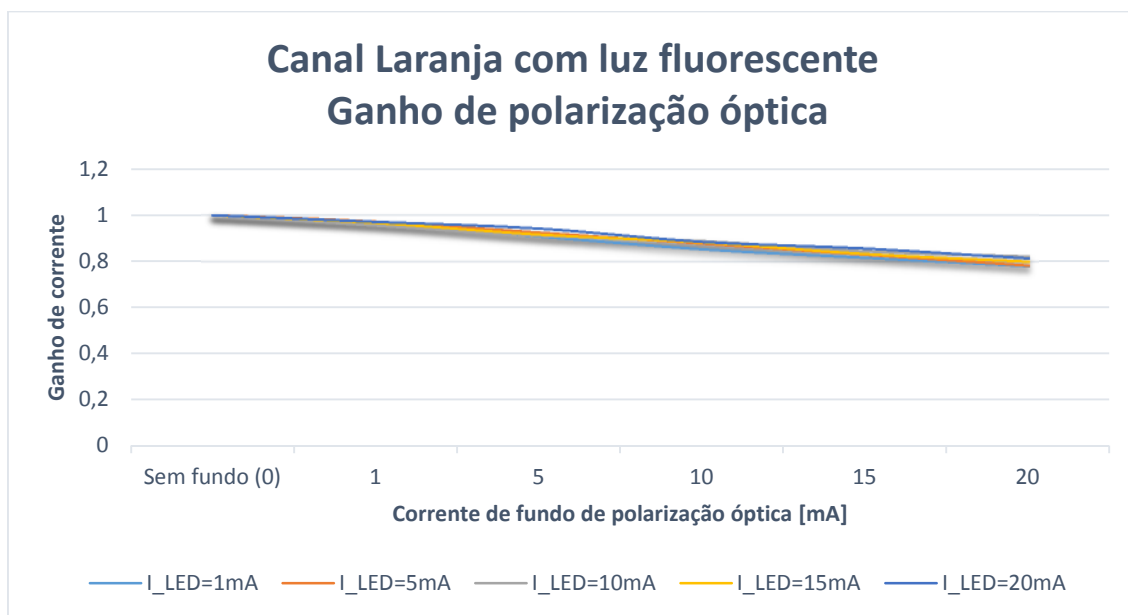
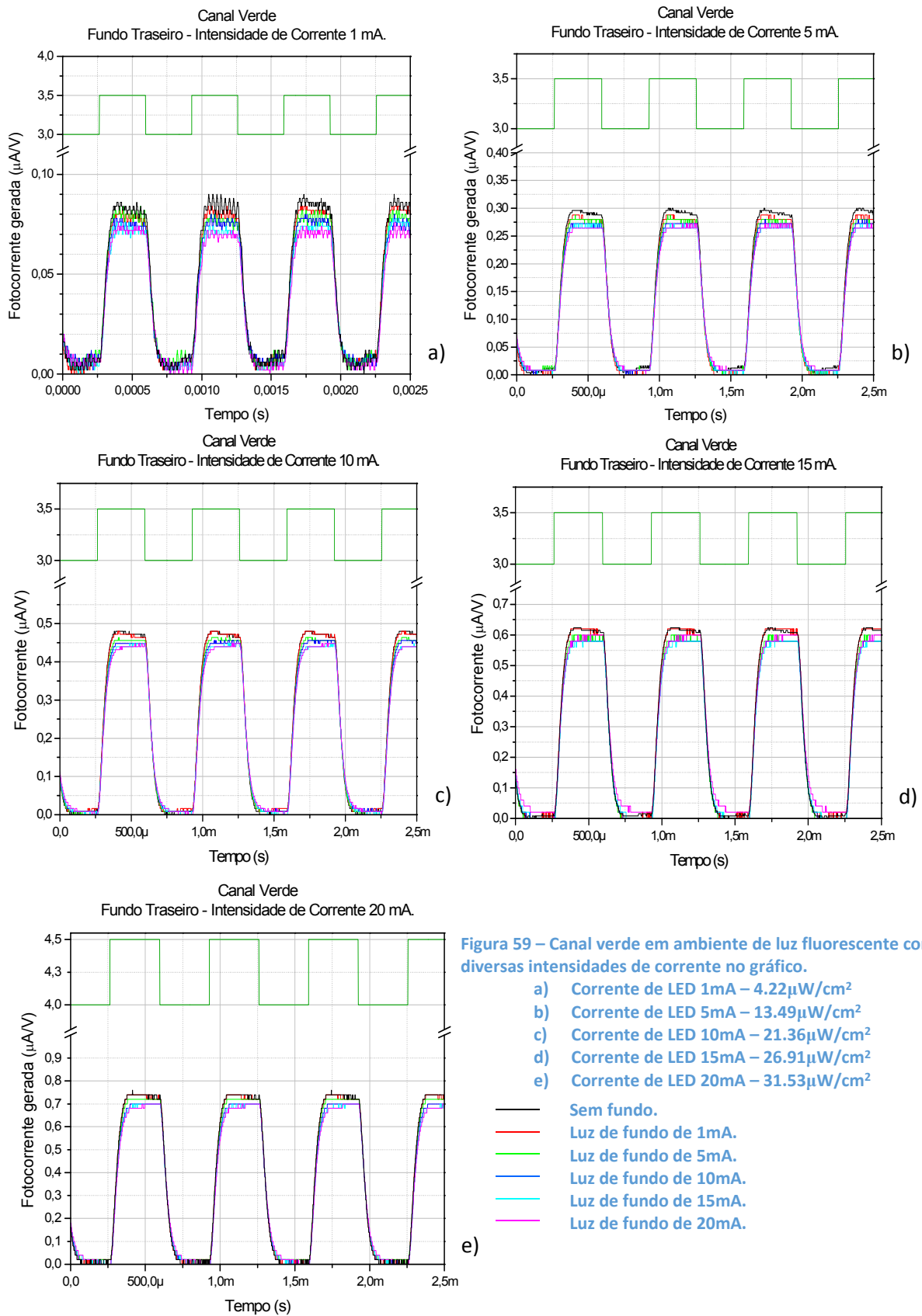


Figura 58 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz fluorescente com polarização posterior.

Se se comparar as curvas de ganho de corrente para o fundo posterior em ambiente controlado e o ambiente de luz fluorescente, vê-se que a luz ambiente acaba por moldar a resposta do sensor. O sensor em ambiente controlado no pior dos casos apresenta um ganho de 0.43 para a curva de 1mA e quando o sensor está com esta luz ambiente o valor do ganho é de 0.8. Embora nas duas situações o fundo óptico atenua o sinal neste caso consegue-se quase um ganho de duas vezes entre as luzes ambientes envolventes.

Observe-se agora a Figura 59 onde está representado o canal verde com luz ambiente fluorescente e fundo óptico posterior aplicado.



Pode ver-se que para o canal verde os fundos aplicados atenuam o sinal como nos casos anteriores em que se aplica o fundo óptico posterior, mas no canal verde as correntes de fundo aplicadas não fazem atenuações tão acentuadas como no canal vermelho ou laranja.

Observando a Figura 60 e repare-se o canal verde com o fundo posterior aplicado é o canal que menos atenuação apresenta. A luz ambiente comporta-se da mesma forma para os três canais evitando uma atenuação tão abrupta, para este ambiente o ganho mais baixo é de 0.75 para uma corrente de canal de 1mA e com um fundo óptico aplicado de 20mA.

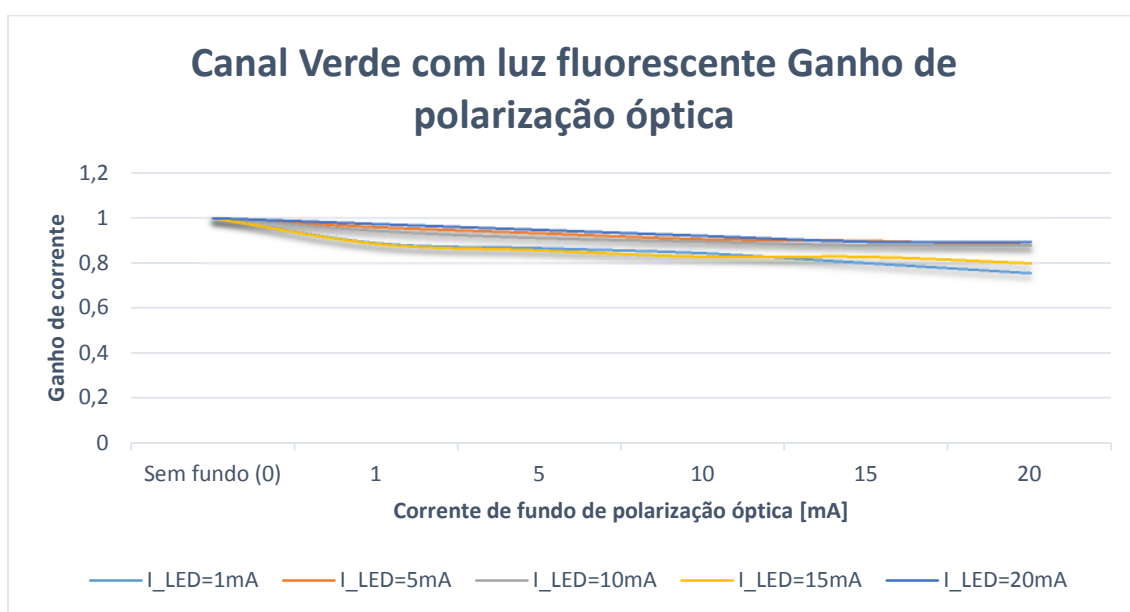


Figura 60 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz fluorescente com polarização posterior.

A Figura 61 mostra a evolução da média dos ganhos ópticos para as diversas correntes de canal. Pode ver-se que devido à presença de luz ambiente os ganhos dos canais deixaram de ser tão estáveis. O canal laranja mantém-se mais estável que os outros dois. Ainda que haja variações nos ganhos não são assim variações tão grandes, para o canal verde o valor mais baixo é para a corrente de 1mA de canal à qual corresponde um ganho de 0.859 e o ganho máximo é de 0.939 para uma corrente de canal de 20mA. Para o canal vermelho o comportamento é semelhante. O valor mais pequeno é de 0.809 para uma corrente de 5mA no canal e o valor máximo é de 0.866 quando a corrente é de 15mA, ainda é uma diferença mais pequena. Comparando com o ambiente controlado esta variação é menor.

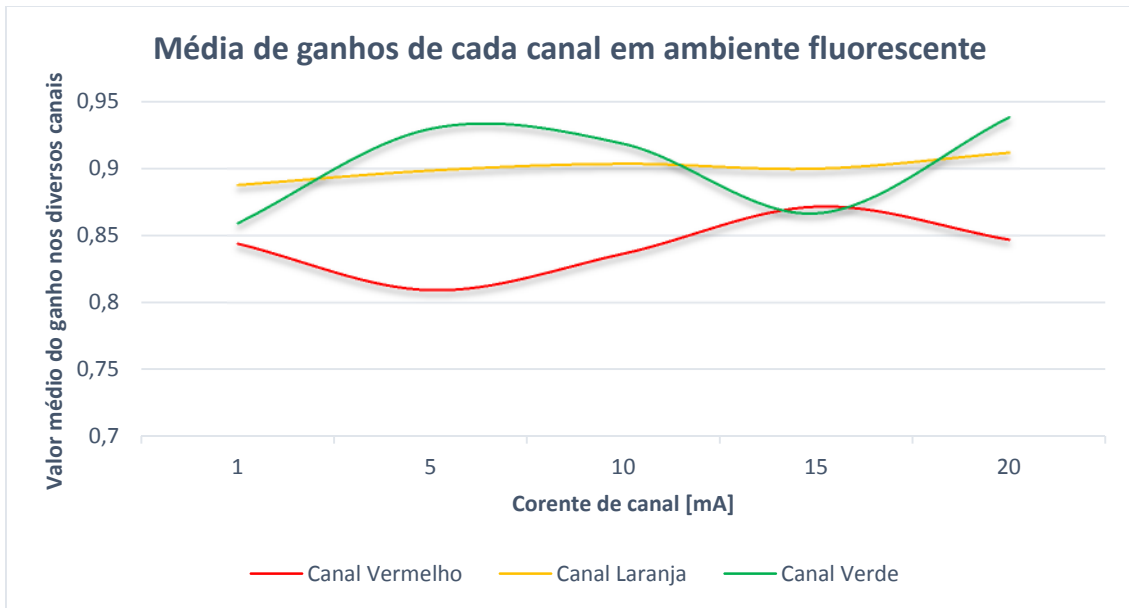


Figura 61 – Média de ganhos da polarização posterior com fundo violeta para os 3 canais em ambiente de luz fluorescente.

Na Figura 62 observa-se o comportamento do sensor perante os 3 comprimentos de onda mas com luz ambiente de fundo fluorescente. Repare-se que o canal vermelho continua a ser o que tem melhor recepção por parte do sensor gerando valores de $1.7\mu\text{A}$. O canal verde continua a ser o que provoca menor resposta com uma corrente máxima de $0.76\mu\text{A}$. O canal laranja tem valores muito perto do vermelho, ainda assim inferiores com $1.4\mu\text{A}$ no valor mais alto.

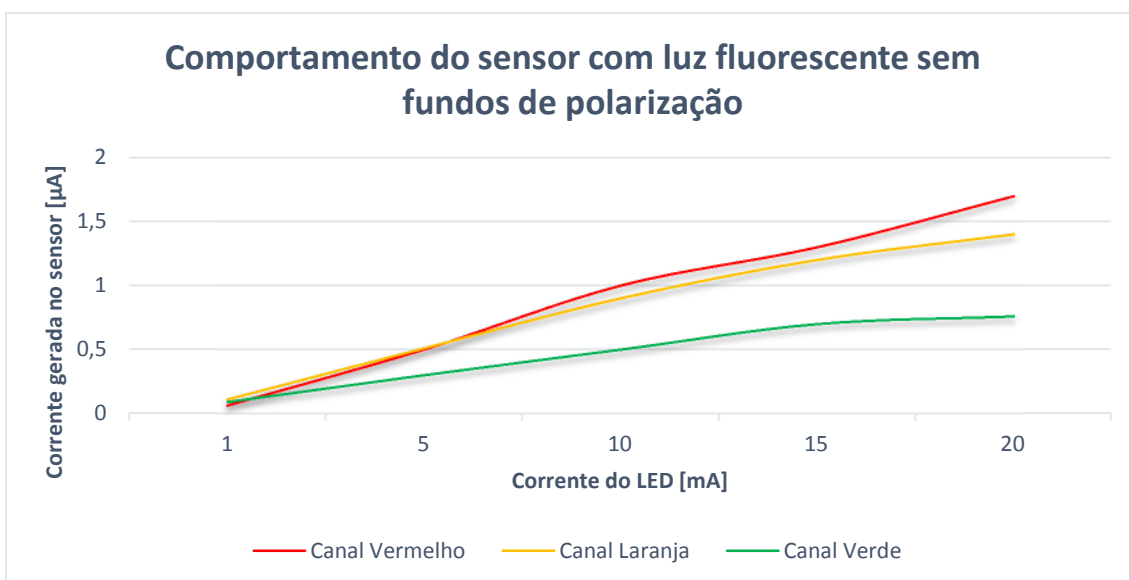


Figura 62 – Comportamento do sensor em ambiente de luz fluorescente.

Comparando o comportamento do sensor em ambiente de luz fluorescente com o comportamento em condições controladas todos os canais são atenuados. Tomando como exemplo a corrente de canal de 20 mA o canal vermelho em ambiente controlado tem um valor de $2.2\mu\text{A}$ e para o ambiente em luz fluorescente são gerados apenas $1.7\mu\text{A}$. Para o canal laranja em condições controladas obteve-se uma corrente de $1.8\mu\text{A}$ enquanto para o ambiente fluorescente o sensor consegue gerar $1.4\mu\text{A}$. Para o canal verde o comportamento é semelhante, para o ambiente controlado consegue gerar-se $1.3\mu\text{A}$ já com a luz fluorescente apenas se consegue obter $0.76\mu\text{A}$.

4.5.3 Medidas em ambiente de Luz halogéneo.

Observe-se a Figura 63.

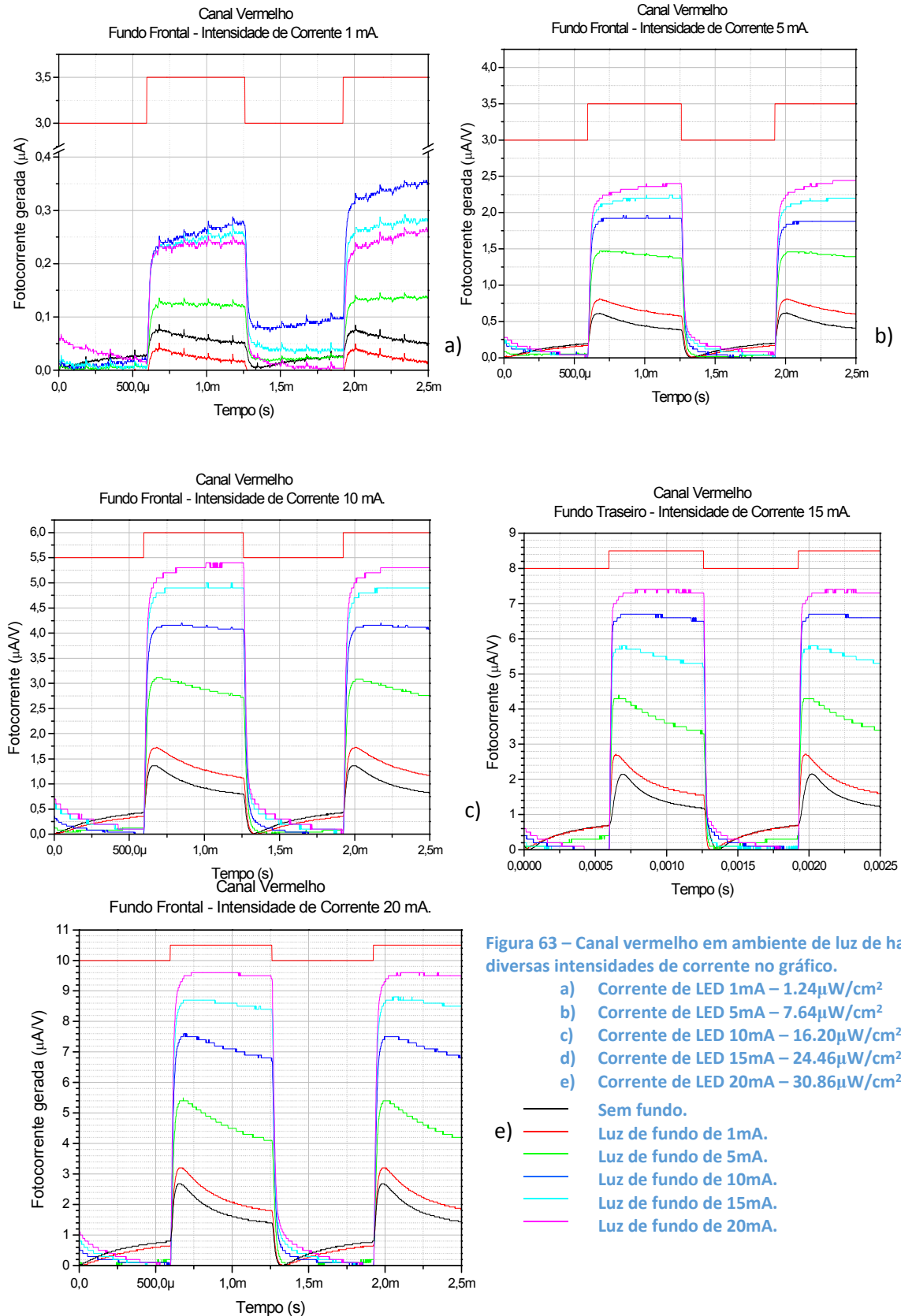


Figura 63 – Canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.

- a) Corrente de LED 1mA – $1.24\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- b) Corrente de LED 5mA – $7.64\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- c) Corrente de LED 10mA – $16.20\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- d) Corrente de LED 15mA – $24.46\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- e) Corrente de LED 20mA – $30.86\mu\text{W}/\text{cm}^2$

A Figura 63 representa o canal vermelho com uma luz ambiente de halogéneo e com a presença do fundo óptico frontal. Repare-se no gráfico presente em a) em que a luz incidente do canal não se comporta como nos canais anteriores. O fundo de halogéneo para o canal vermelho e com correntes baixas tornava a resposta do sensor muito imprevisível e muito flutuante, não se conseguindo arranjar uma medida de patamar certa. De realçar que cada valor de todas as curvas obtidas a partir do osciloscópio, foram calculadas a partir de 128 amostras fazendo a média delas, e ainda assim para este caso não conseguia estabilizar o sinal obtido. Ainda assim foi feita a mesma a análise que nas situações envolventes anteriores.

Para os valores mais altos de corrente de canal de 10mA, 15mA e 20mA a influência da luz ambiente deixava de ser tão notória. Ao contrário do canal de luz fluorescente a luz de halogéneo não adicionou ruído aos patamares dos níveis lógicos

Observe-se a Figura 64 onde está representado o ganho de polarização óptica frontal para o canal vermelho.

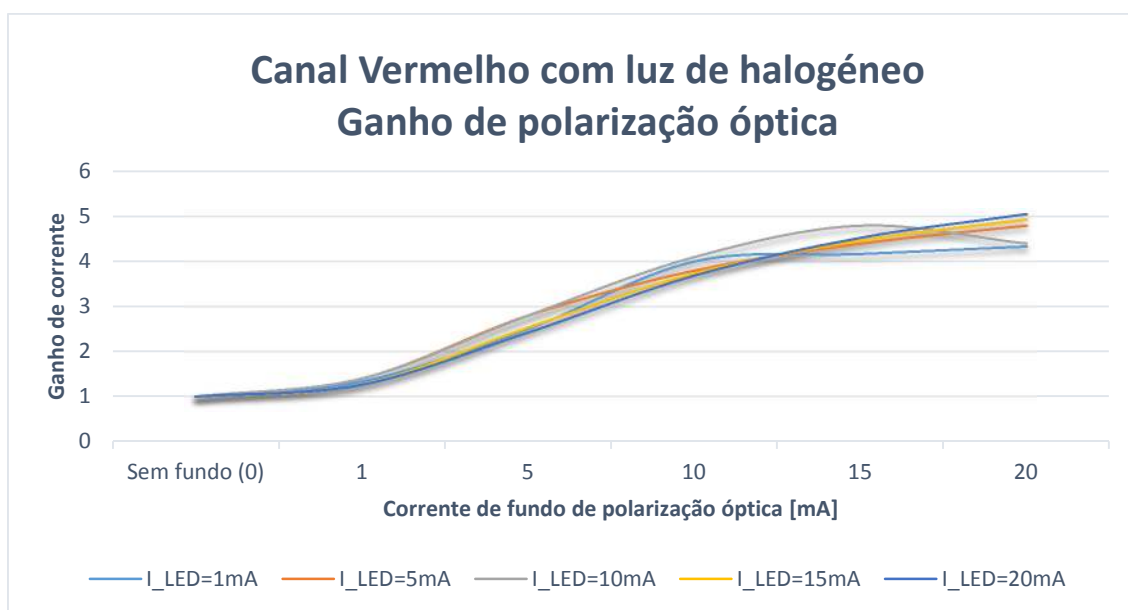
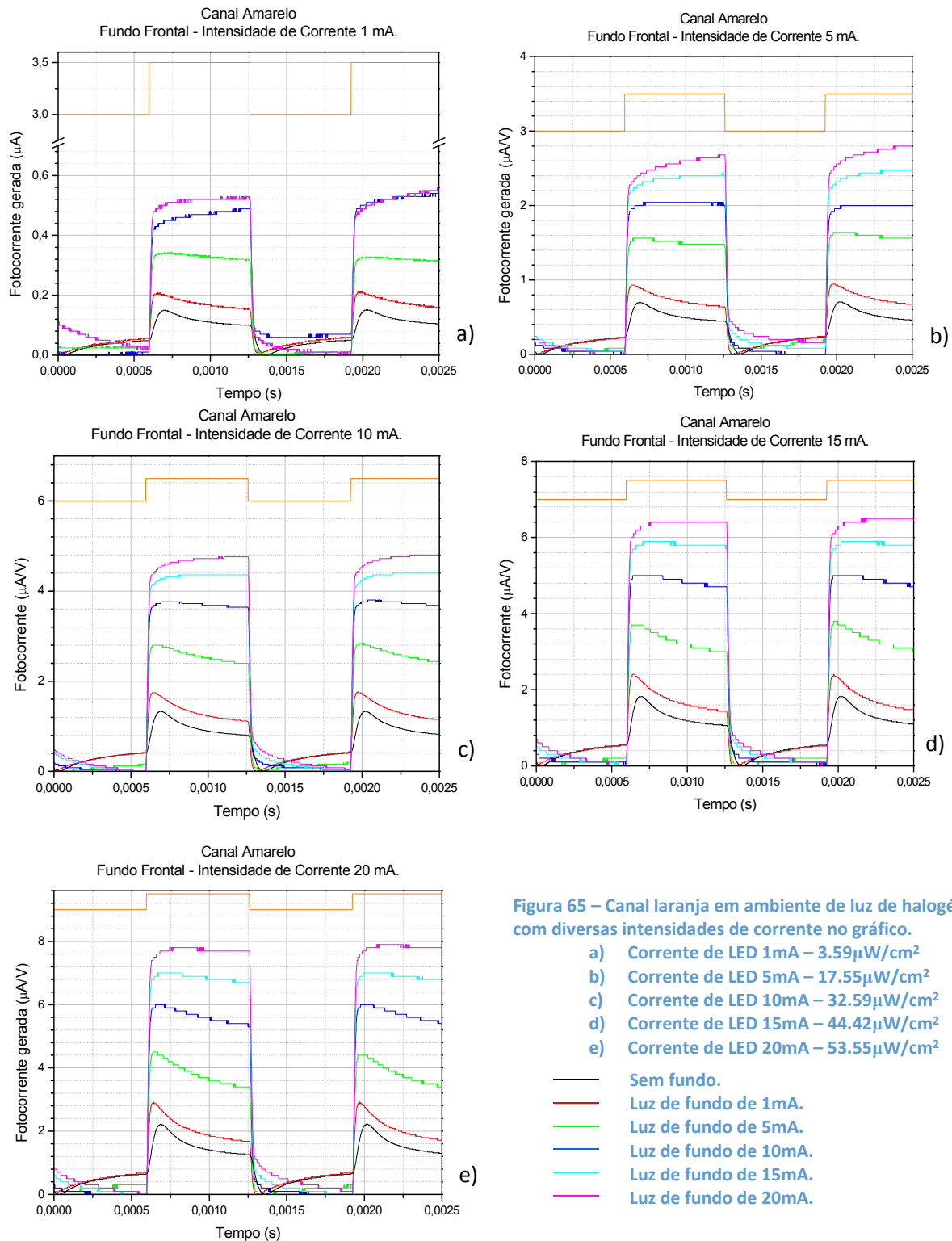


Figura 64 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com polarização frontal.

À medida que a corrente do fundo de polarização aumenta, seja qual for a corrente do canal todos os casos têm o mesmo comportamento e um ganho semelhante visto que as curvas estão todas muito próximas. Mesmo com as variações sofridas pela luz de ambiente o comportamento perante os fundos ópticos está de acordo com as situações anteriores do ambiente de canal controlado e com luz ambiente fluorescente.

A Figura 65 representa o canal laranja com um ambiente de luz de halogéneo e com fundo de polarização óptica frontal incidente.



Na Figura 65 observa-se o comportamento do sensor perante o canal laranja e pode ver-se que o sensor comporta-se da mesma forma que nos casos anteriores, perante a presença do fundo frontal existe um ganho em relação ao sinal sem fundo.

A Figura 66 mostra a evolução do canal laranja e pode ver-se que todas as correntes de canal com o aumento do fundo de polarização tendem para o mesmo valor.

O ganho máximo obtido em todas as curvas é aproximadamente 5 vezes o valor da corrente no escuro com a luz de halogéneo como fundo.

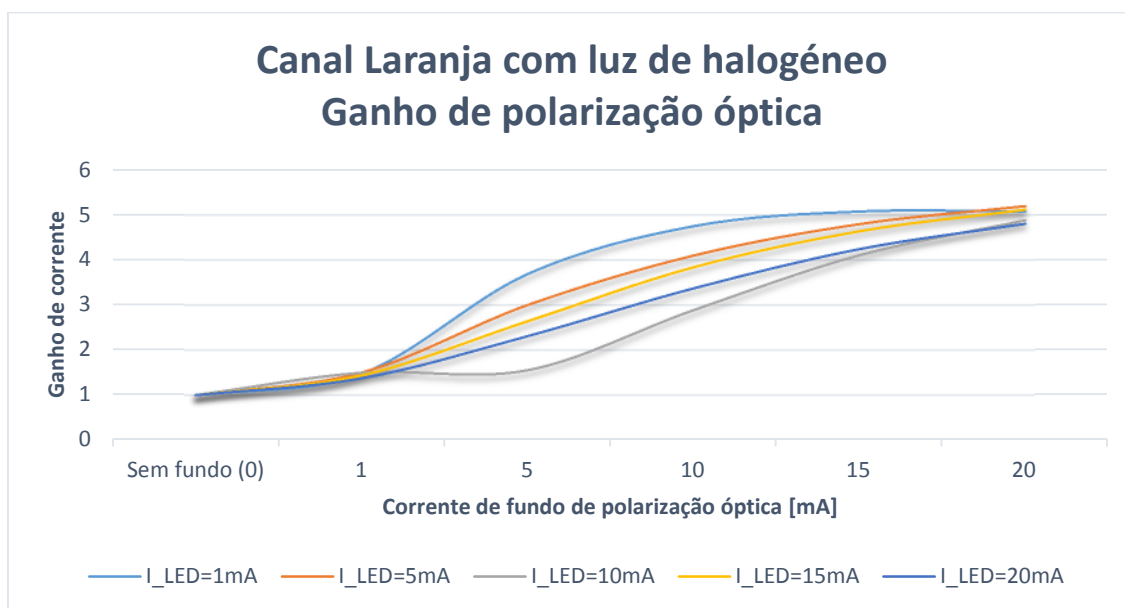
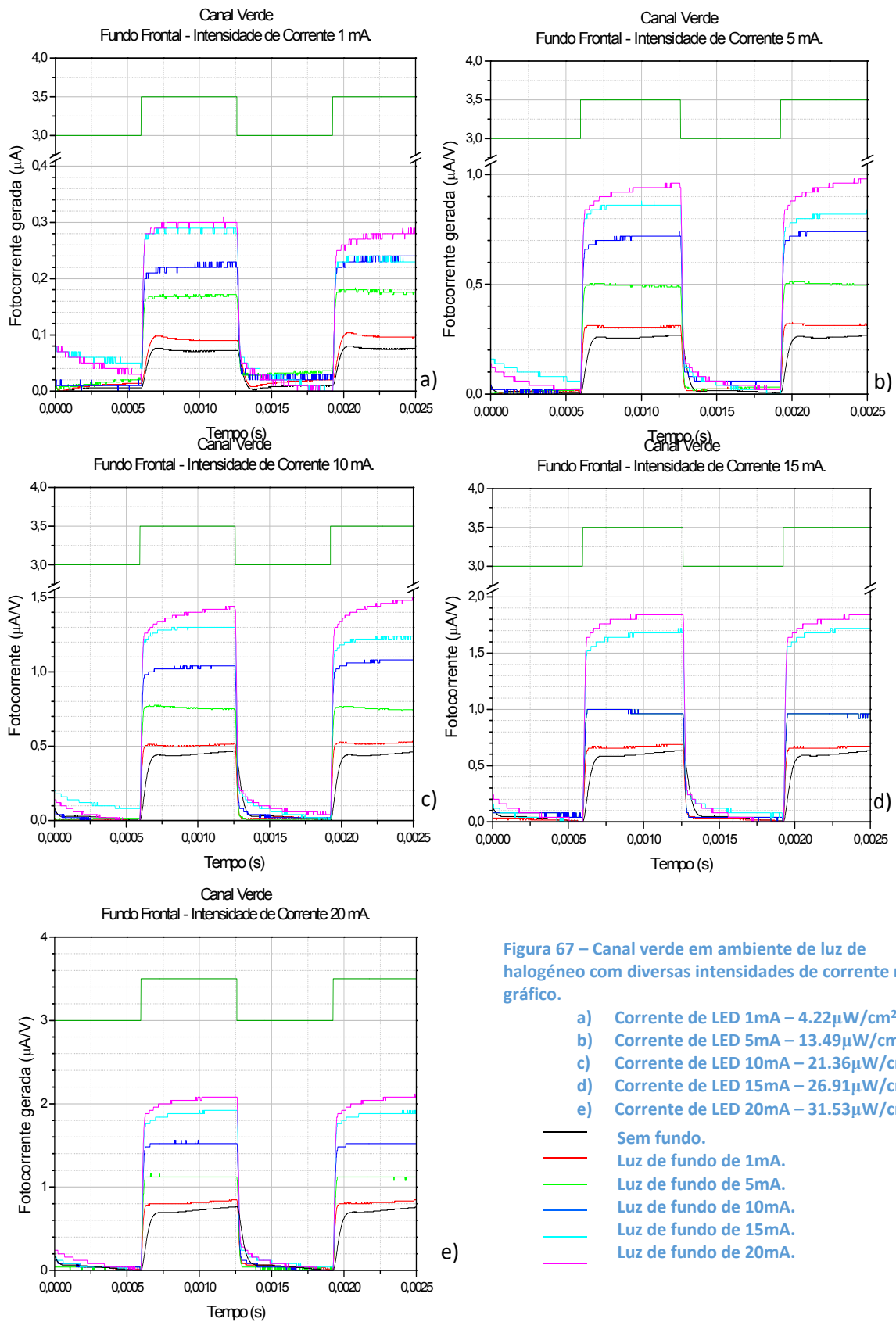


Figura 66 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz de halogéneo com polarização frontal.

Analise-se agora a Figura 67.



A Figura 67 mostra o canal verde com luz ambiente de halogéneo com fundo frontal incidente.

O canal verde apresenta o mesmo comportamento que as outras cores presentes nos ensaios quando tem um fundo óptico a incidir pela parte frontal do sensor a corrente gerada no escuro é amplificada. No gráfico a) e b) continua a verificar-se a instabilidade que a luz de halogéneo acrescenta ao canal.

A Figura 68 vê-se que à medida que a corrente do fundo de polarização aumenta o ganho do fotorreceptor também aumenta no caso do canal verde não se pode afirmar que a curva esteja a tender para um valor de ganho porque todas elas estão a crescer aos 20mA.

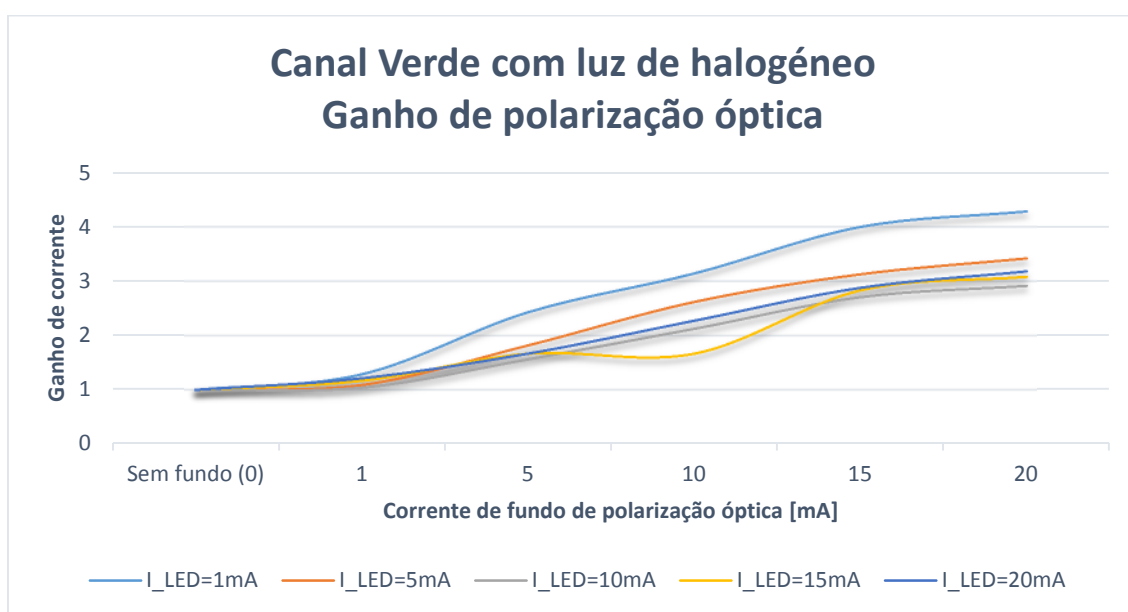


Figura 68 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz de halogéneo com polarização frontal.

A Figura 69 representa a média do ganho do fundo óptico num ambiente de halogéneo. A média de ganhos mais baixa é do canal verde como nas situações anteriores analisadas, e à medida que a corrente do canal aumenta a sua resposta piora. Para o canal vermelho e laranja continuam a com as respostas semelhantes. Embora para esta situação a luz do canal vermelho apresente uma resposta quase constante e o canal laranja tende a ficar com o ganho mais baixo à medida que a corrente do canal aumenta.

Em relação aos outros ambientes estudados este é o que apresenta pior resposta pois todos os canais geram ganhos mais baixos quando o fundo incidente é

frontal. Neste ambiente a corrente do fundo óptico não é suficiente para contrariar o efeito do ambiente envolvente.

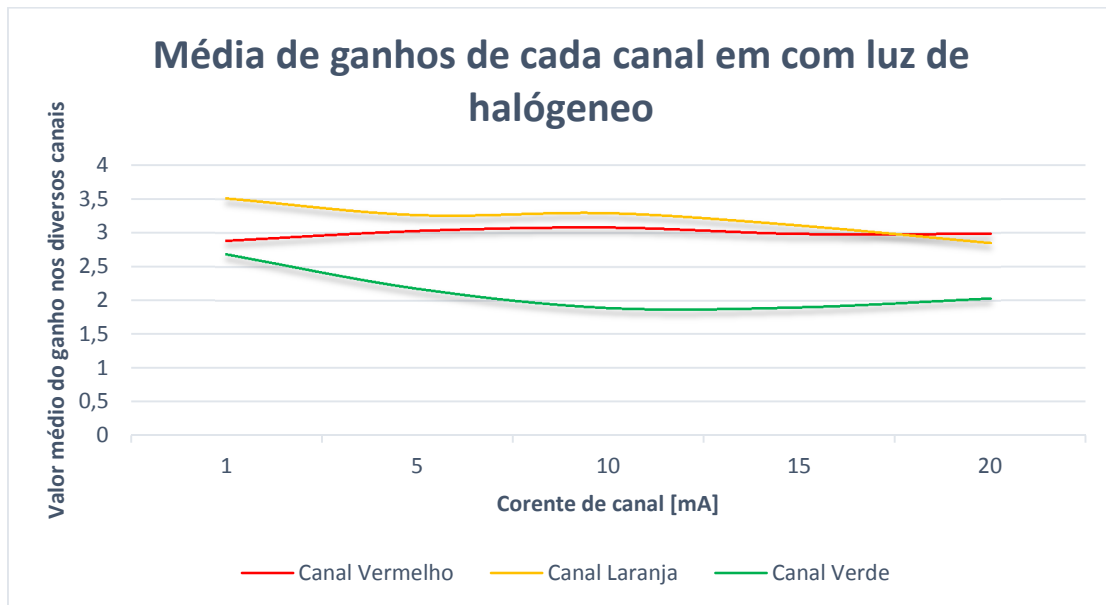


Figura 69 – Média de ganhos da polarização frontal com fundo violeta para os 3 canais em ambiente de luz de halógeno.

Observe-se a Figura 70.

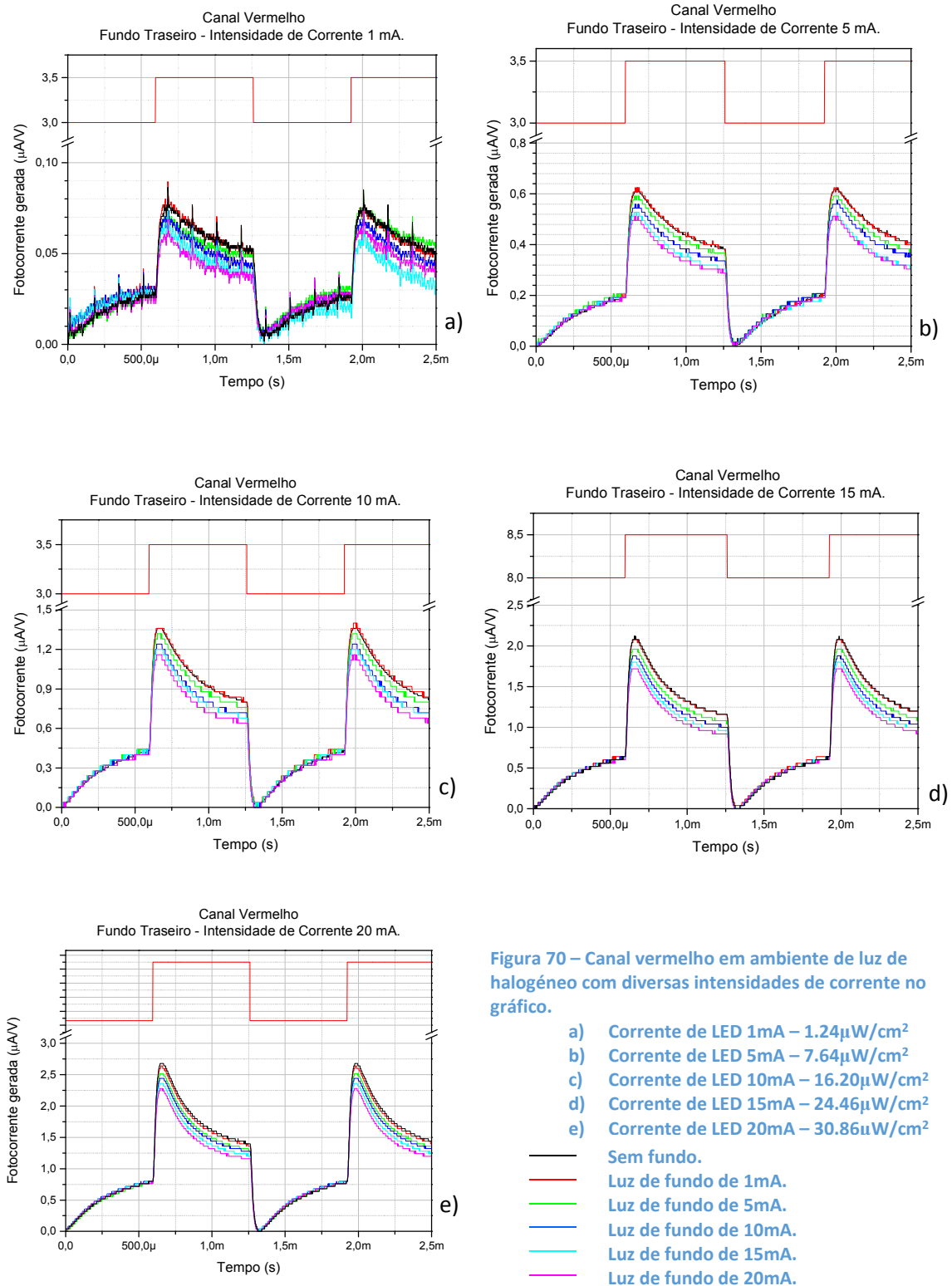


Figura 70 – Canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com diversas intensidades de corrente no gráfico.

- a) Corrente de LED 1mA – $1.24\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- b) Corrente de LED 5mA – $7.64\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- c) Corrente de LED 10mA – $16.20\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- d) Corrente de LED 15mA – $24.46\mu\text{W}/\text{cm}^2$
- e) Corrente de LED 20mA – $30.86\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Na Figura 71 pode observar-se o comportamento do sensor para o canal vermelho e com fundo posterior. Repare-se que as respostas de todas as curvas do canal vermelho são moldadas pelo fundo óptico, e tal como no caso do fundo fluorescente o sensor também reage da mesma forma, apenas com uma ligeira atenuação. Em relação ao ambiente controlado apresentam-se atenuações muito menores e todas na ordem dos 0.8. Em relação à situação com o ambiente fluorescente o ambiente de halogéneo tem menos influência visto que no ambiente fluorescente a atenuação é maior.

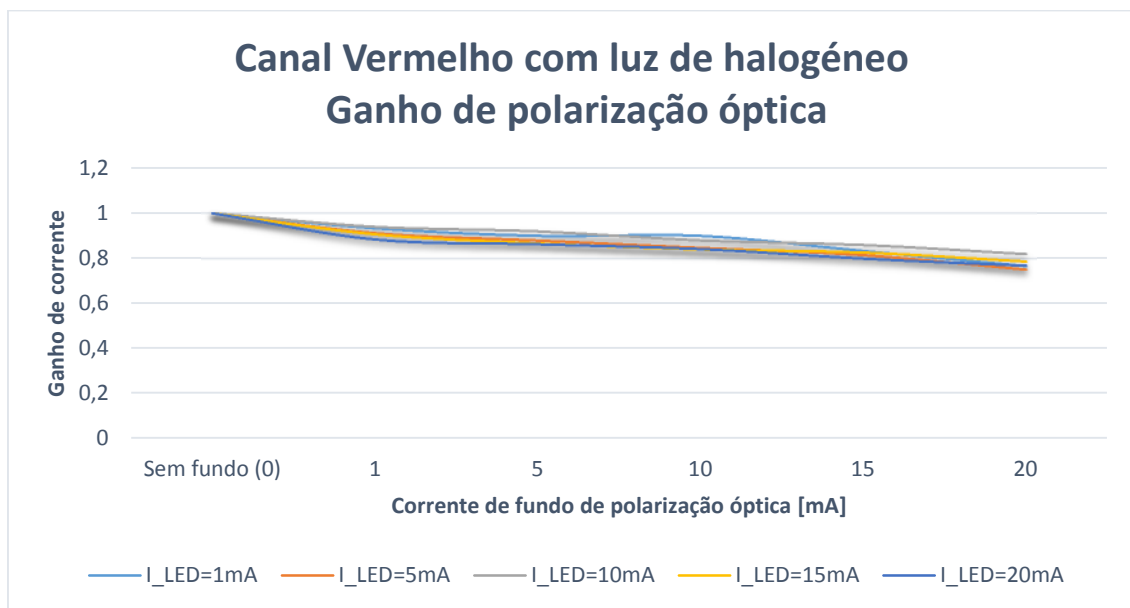
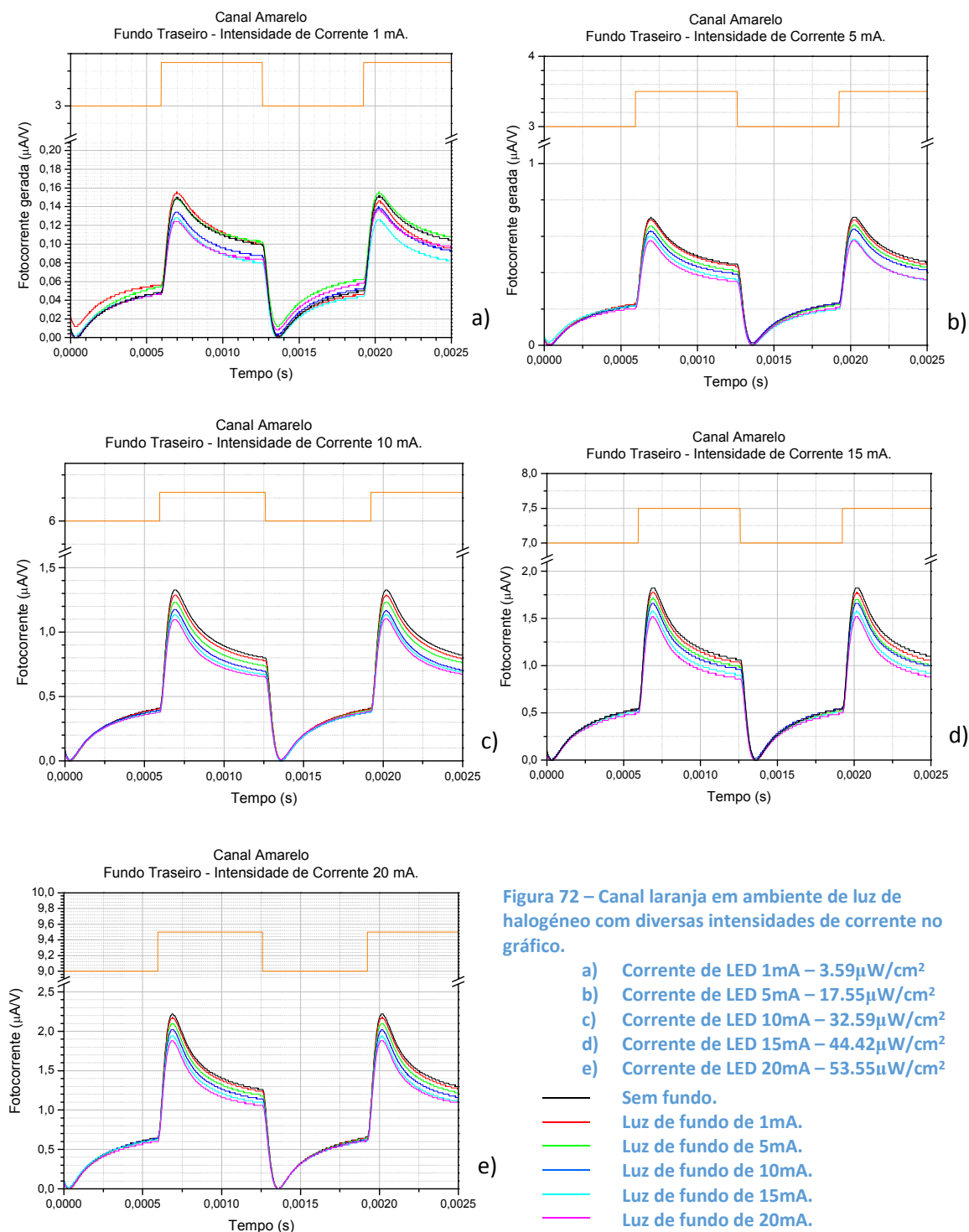


Figura 71 – Ganho de polarização óptica para o canal vermelho em ambiente de luz de halogéneo com polarização posterior.

A Figura 72 representa o canal laranja com fundo posterior e em ambiente de luz de halogéneo.



A Figura 72 mostra um comportamento semelhante a todas as outras situações de ambiente analisadas anteriormente, o sinal do canal laranja decresce à medida que os fundos ópticos são aplicados.

Observando a Figura 73 verifica-se que o comportamento do sensor perante o fundo óptico posterior é semelhante ao canal vermelho. O canal laranja é atenuado com a presença dos fundo ópticos, e verifica-se também que o sensor em ambiente de halógeno faz moldar a curva que atenua o sinal que chega ao sensor.

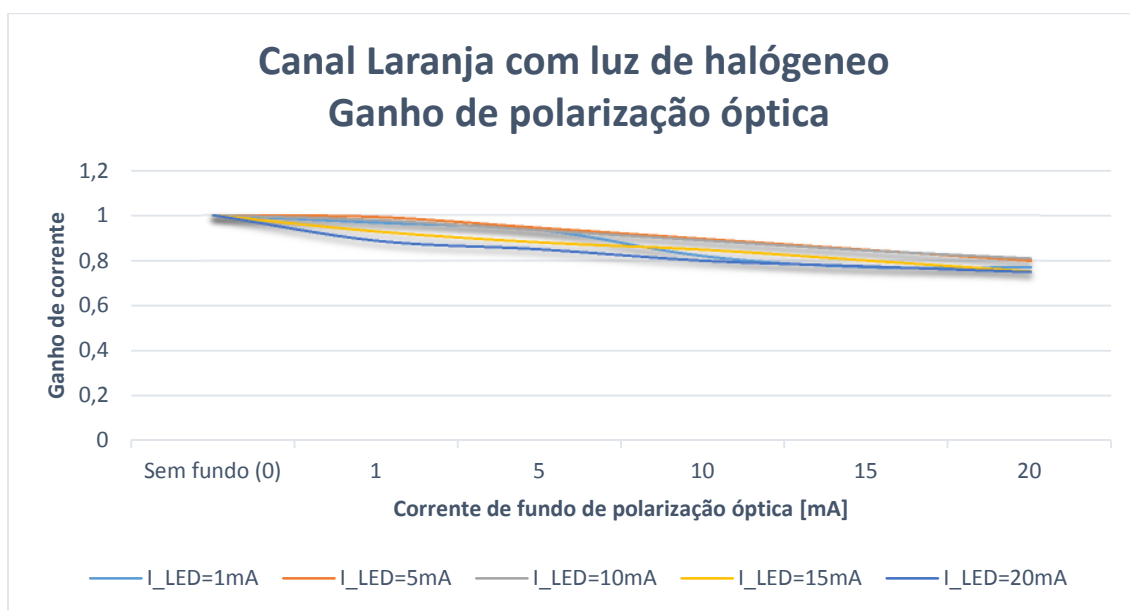
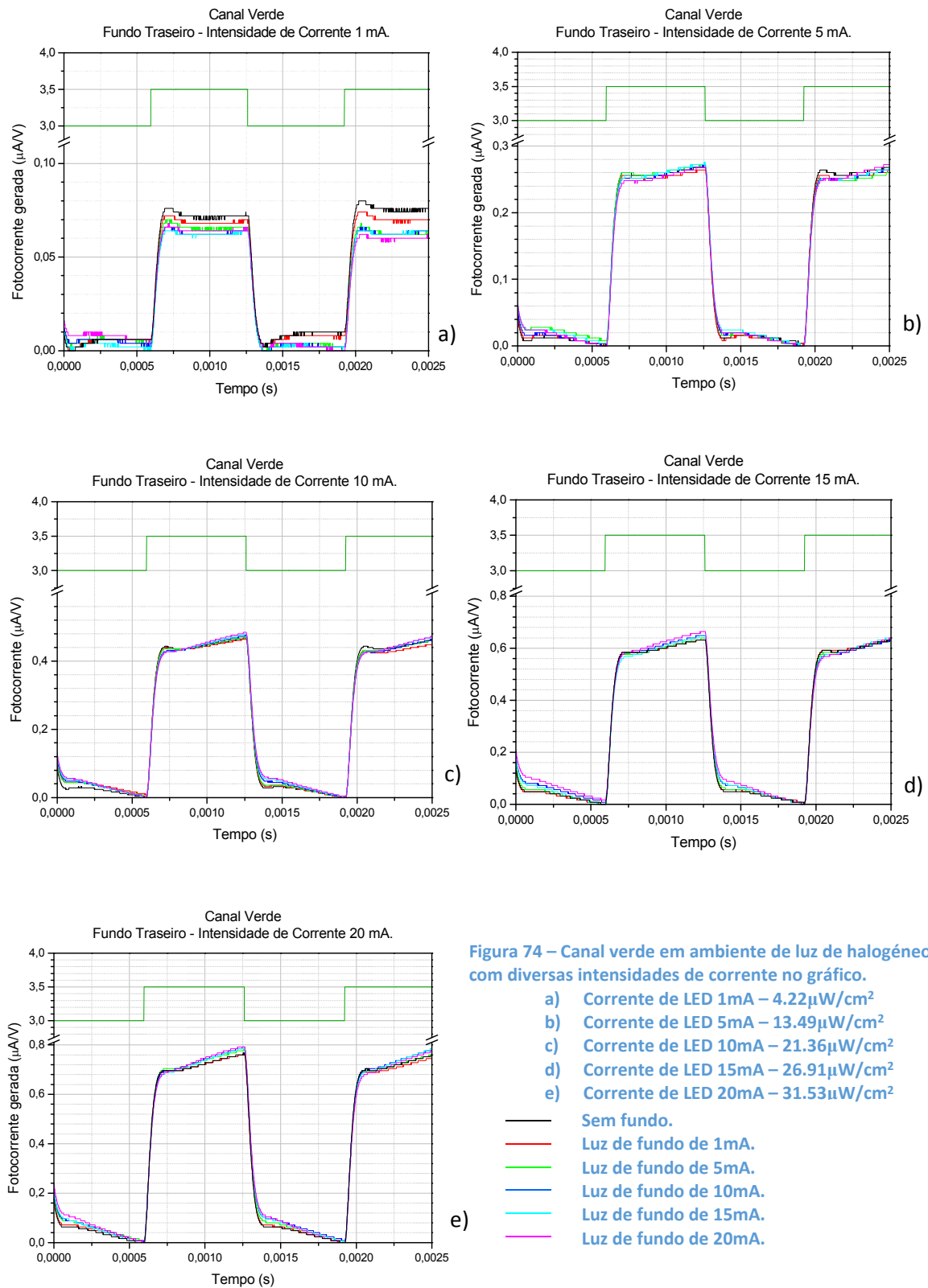


Figura 73 – Ganho de polarização óptica para o canal laranja em ambiente de luz de halógeno com polarização posterior

Analise-se a Figura 74.



Observando a Figura 74 pode ver-se o comportamento do sensor perante o fundo posterior incidente e com ambiente de luz de halogéneo. Repare-se que o canal verde é o menos atenuado com estas condições. De realçar ainda que nas curvas de 15mA e 20mA o canal não é atenuado.

Repare-se agora na Figura 75, para a situação dos 15mA o sensor não tem atenuação associado ou ganho algum, ou seja, seja qual for a intensidade do fundo óptico não produz efeito no sensor para o canal verde visto que a relação da saída perante a entrada é de aproximadamente 1.

Para os 20mA de canal o fundo de polarização posterior faz com que haja ganho na corrente gerada em relação à corrente gerada sem fundos ópticos. É o único caso em que com um fundo posterior o comportamento apresenta ganho com um valor máximo de 1.12 para os 20mA de canal e de fundo óptico.

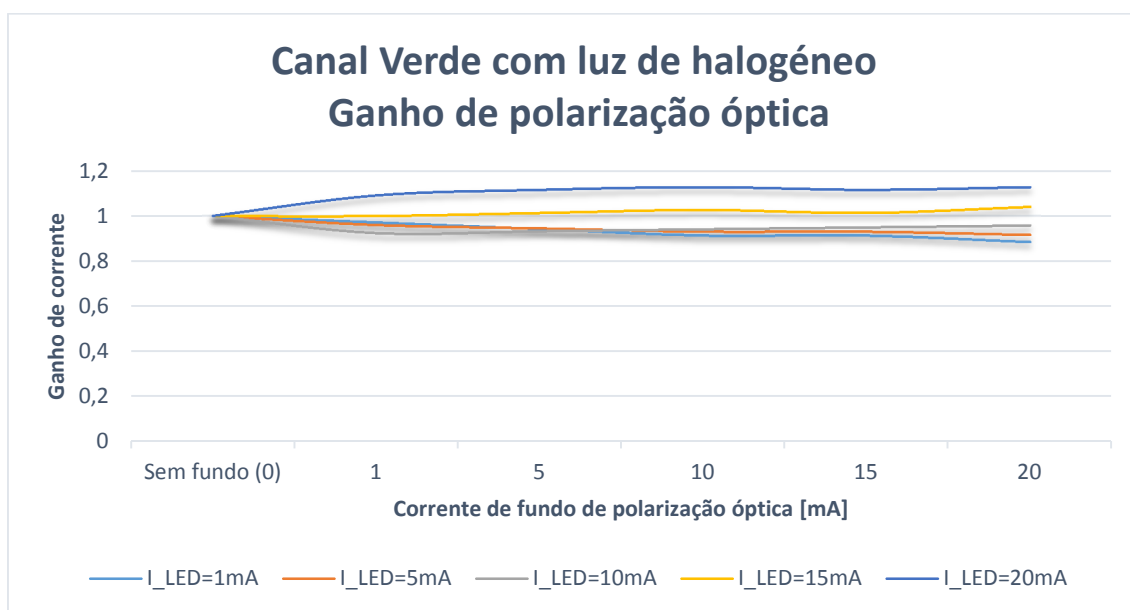


Figura 75 – Ganho de polarização óptica para o canal verde em ambiente de luz de halogéneo com polarização posterior

Olhando à Figura 76 pode ver-se que o canal vermelho e o laranja são atenuados à medida que a corrente do fundo de polarização óptico aumenta. Observe-se também que apenas o canal verde apresenta ganho. Em todas as situações de fundo posterior apenas no canal verde e com este ambiente de luz para o sensor apresenta ganho, embora não seja um ganho significativo é uma mudança de comportamento relevante.

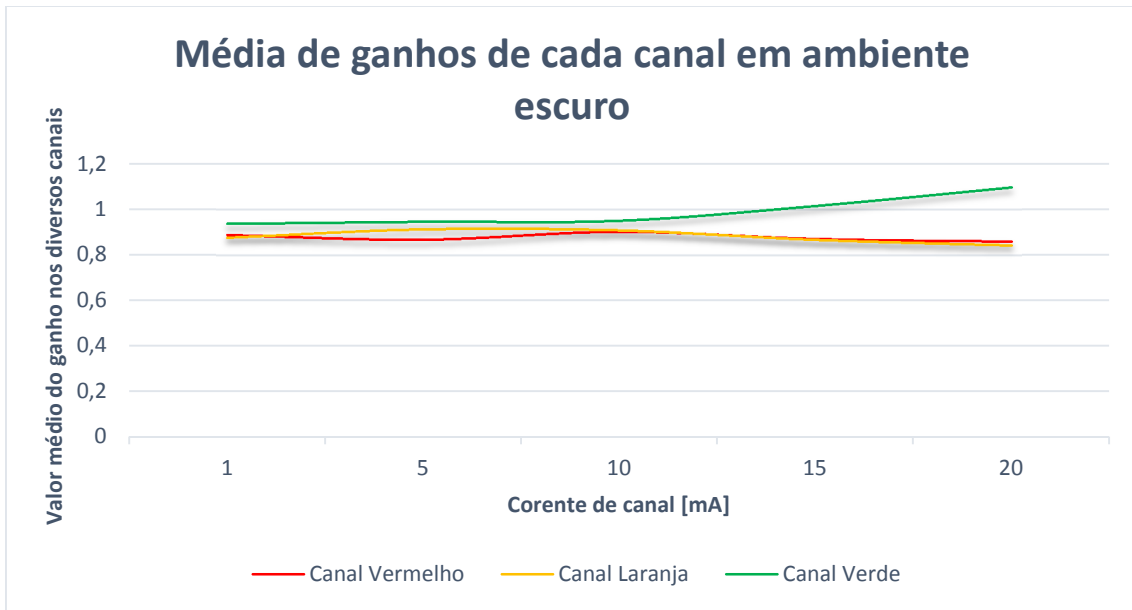


Figura 76 – Média de ganhos da polarização posterior com fundo violeta para os 3 canais em ambiente de luz de halógeno.

Observe-se a Figura 77 onde é apresentado o comportamento do sensor perante os vários canais de luz sem a influência dos fundos ópticos, utilizando apenas a luz de halógeno como meio ambiente do sensor. Pode ver-se um comportamento semelhante aos gráficos anteriores, em que o vermelho tem a melhor resposta e o verde a pior. Como o comprimento do LED laranja é próximo do vermelho a diferença não é muito mas ainda assim a variação que provoca aos terminais do sensor é mais baixa.

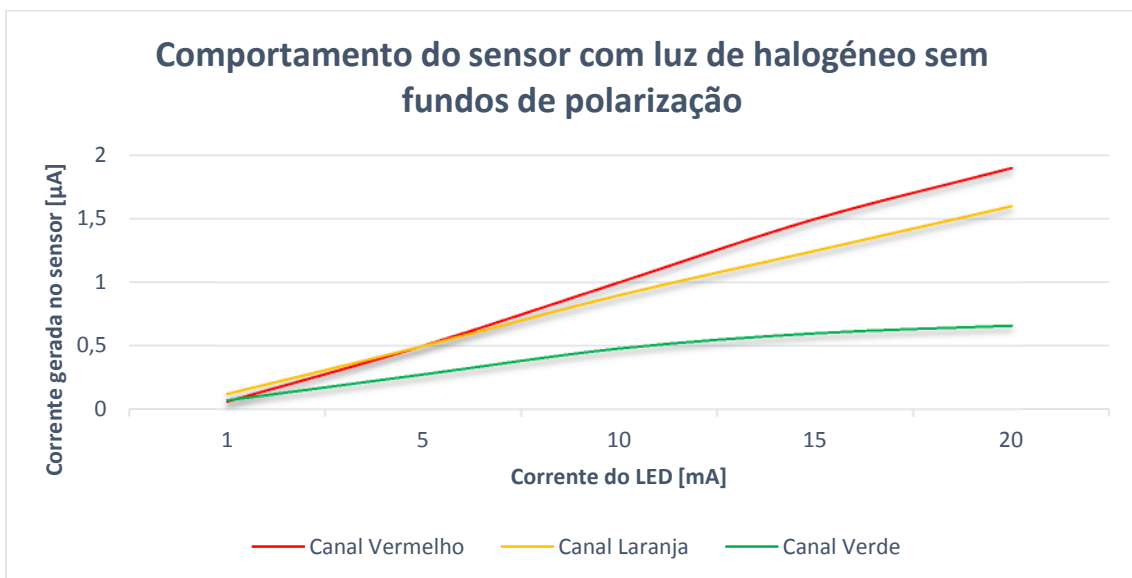


Figura 77 – Comportamento do sensor em ambiente de luz de halógeno.

4.6 Comparação de canais

Olhando a Figura 78 pode ver-se a influência da luz no canal vermelho. As curvas presentes no gráfico são para os valores de intensidade de corrente no canal e sem nenhum fundo de polarização aplicado. As linhas a tracejado representam uma aproximação linear ao seu comportamento.

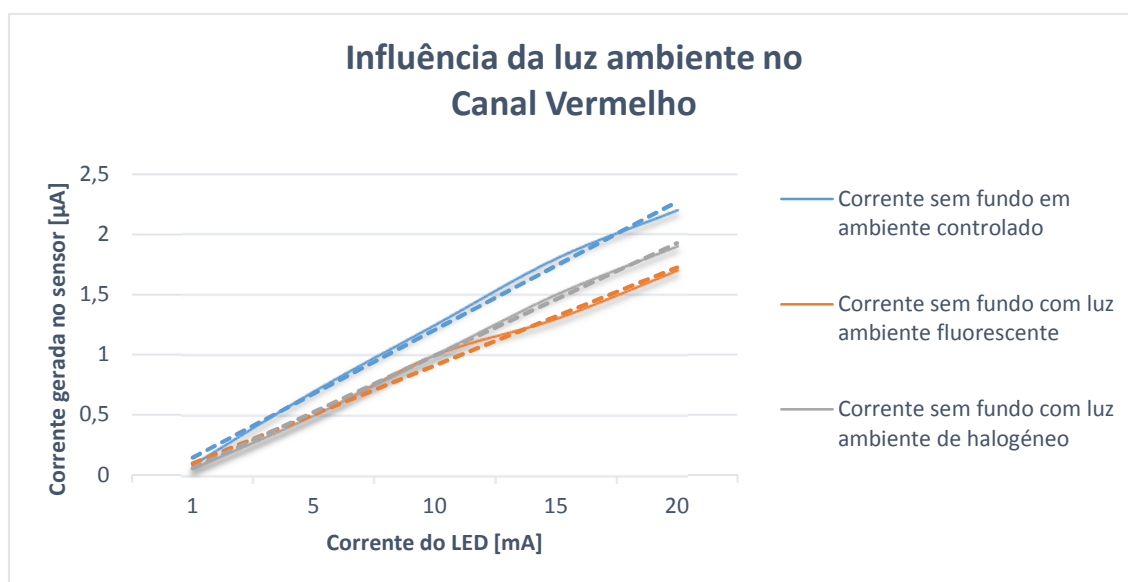


Figura 78 – Comportamento do canal vermelho para os vários ambientes sem fundos de polarização.

Repare-se que o sensor reage melhor ao comprimento de onda vermelho quando está num ambiente escuro. Quando tem luz de fundo neste caso luz fluorescente e de halogéneo pode ver-se que a fotocorrente gerada no sensor diminui.

Para o ambiente controlado a curva tem quase um comportamento linear e à medida que a corrente do canal aumenta, o sensor produz mais corrente. Pode ver-se que a curva que tem maior declive é a do ambiente controlado, ou seja, por cada salto na corrente de LED este tem um crescimento maior. Para o canal vermelho o que apresenta pior comportamento é o ambiente fluorescente. Pode ver-se que esse efeito principalmente a partir dos 10mA. Até esse ponto a curva é semelhante à do ambiente de halogéneo.

Observe-se agora a influência da luz ambiente no canal laranja presente na Figura 79. As linhas a tracejado são a aproximação a rectas para ver uma evolução linear das correntes geradas.

O canal laranja tem uma resposta à luz ambiente semelhante ao canal vermelho. O ambiente controlado é o que tem melhor resposta com um declive da recta mais alto. A luz fluorescente é o ambiente que provoca pior resposta ao canal laranja fazendo com que a corrente gerada pelo canal seja mais baixa no ambiente fluorescente. Repare-se que para o canal de halogéneo e fluorescente só se começa a notar diferentes, neste caso, a partir dos 15mA.

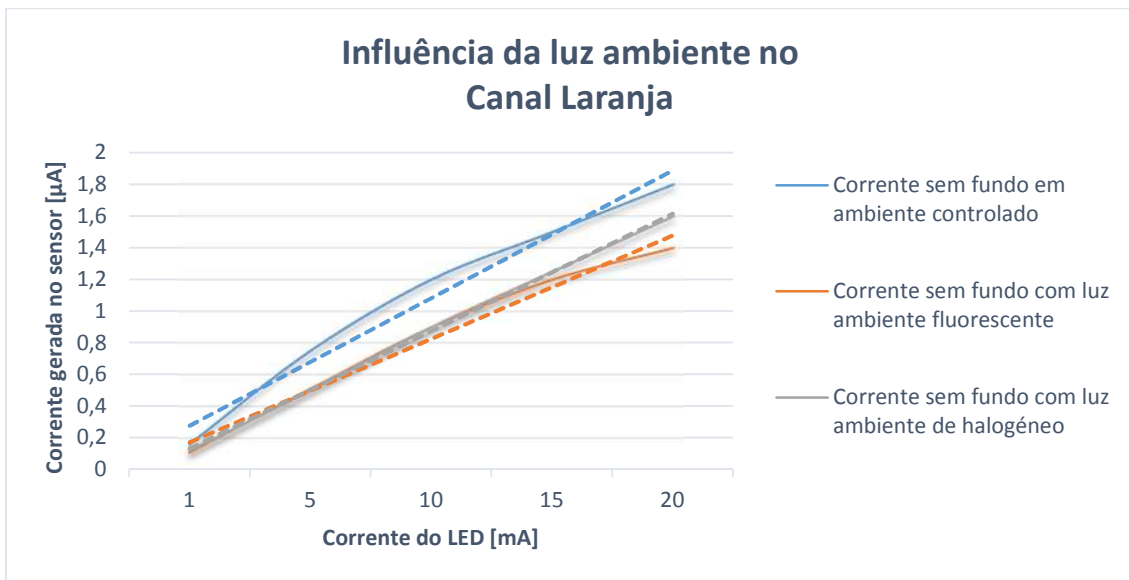


Figura 79 – Comportamento do canal laranja para os vários ambientes sem fundos de polarização.

A Figura 80 mostra a influência da luz ambiente sobre o canal verde. Observe-se que para este canal o ambiente controlado continua a apresentar a melhor resposta pois continua a ter o declive mais alto das três rectas de tendência.

No caso dos outros ambientes utilizados pode ver-se que para o caso do canal verde a luz de halogéneo é a que tem a resposta mais baixa. Repare-se que tanto no ambiente fluorescente como no ambiente de halogéneo as curvas na situação de corrente de LED de 20mA tendem a estabilizar.

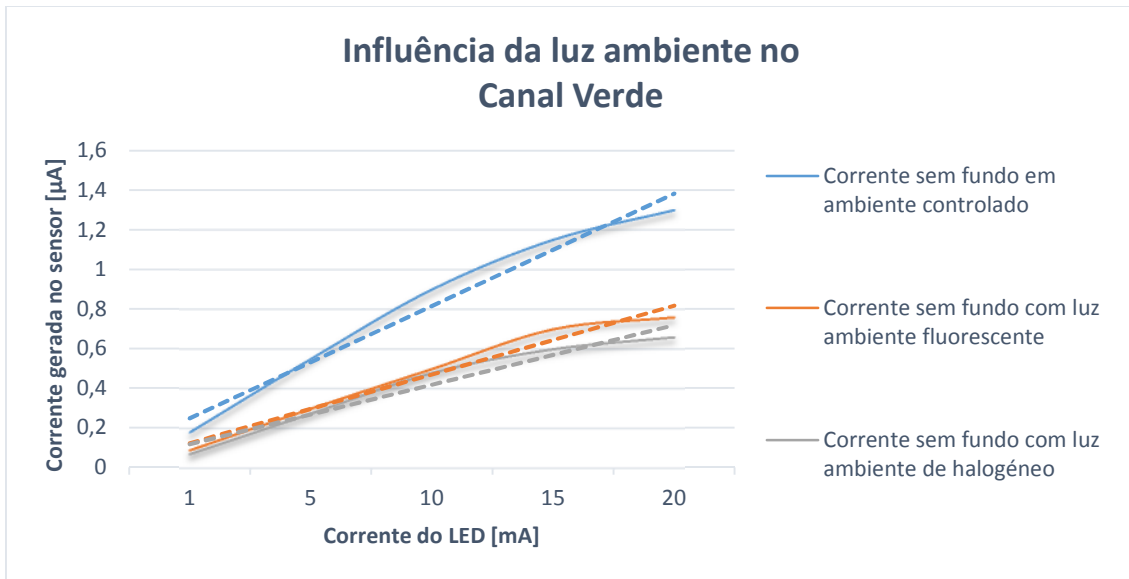
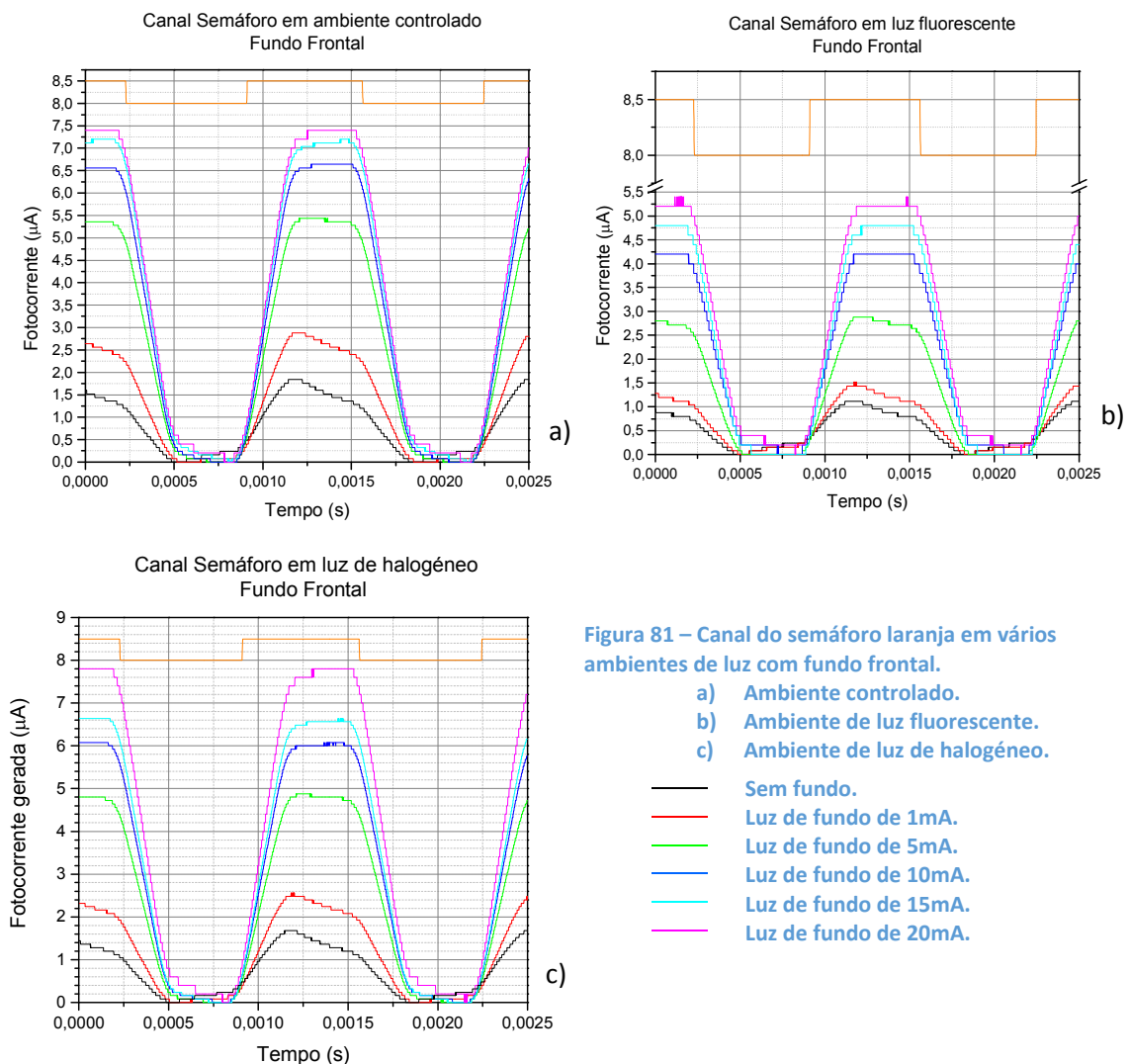


Figura 80 – Comportamento do canal verde para os vários ambientes sem fundos de polarização.

4.7 Semáforo Laranja

Observe-se agora a Figura 81. Esta representa os testes feitos com o semáforo e com o sensor. A luz do semáforo foi usada para fazer os mesmos testes que foram feitos com o ensaio experimental com os LEDs.

Observe-se que a luz do semáforo continua a apresentar o mesmo comportamento dos LEDs, ou seja, na presença do fundo óptico frontal o sensor apresenta ganho em qualquer uma das situações. Repare-se que na situação b) sob a influência da luz fluorescente, nota-se que a amplitude é mais baixa que nas outras situações.



Observe-se a Figura 82 onde se verifica a influência da luz ambiente no ganho de corrente do sensor.

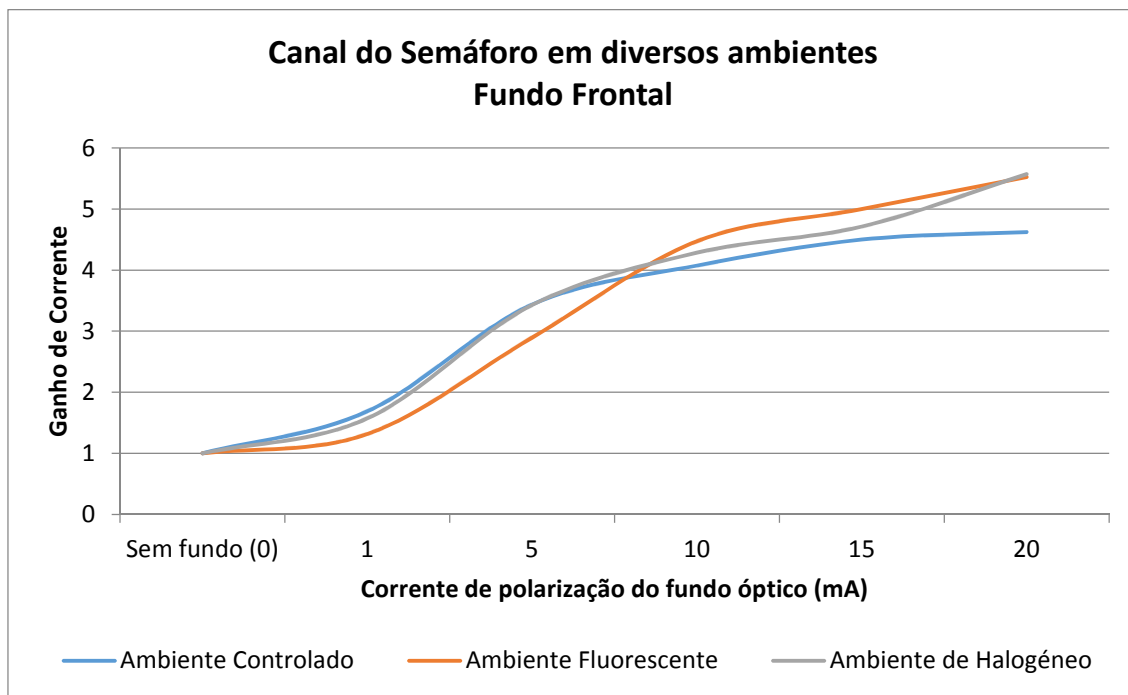
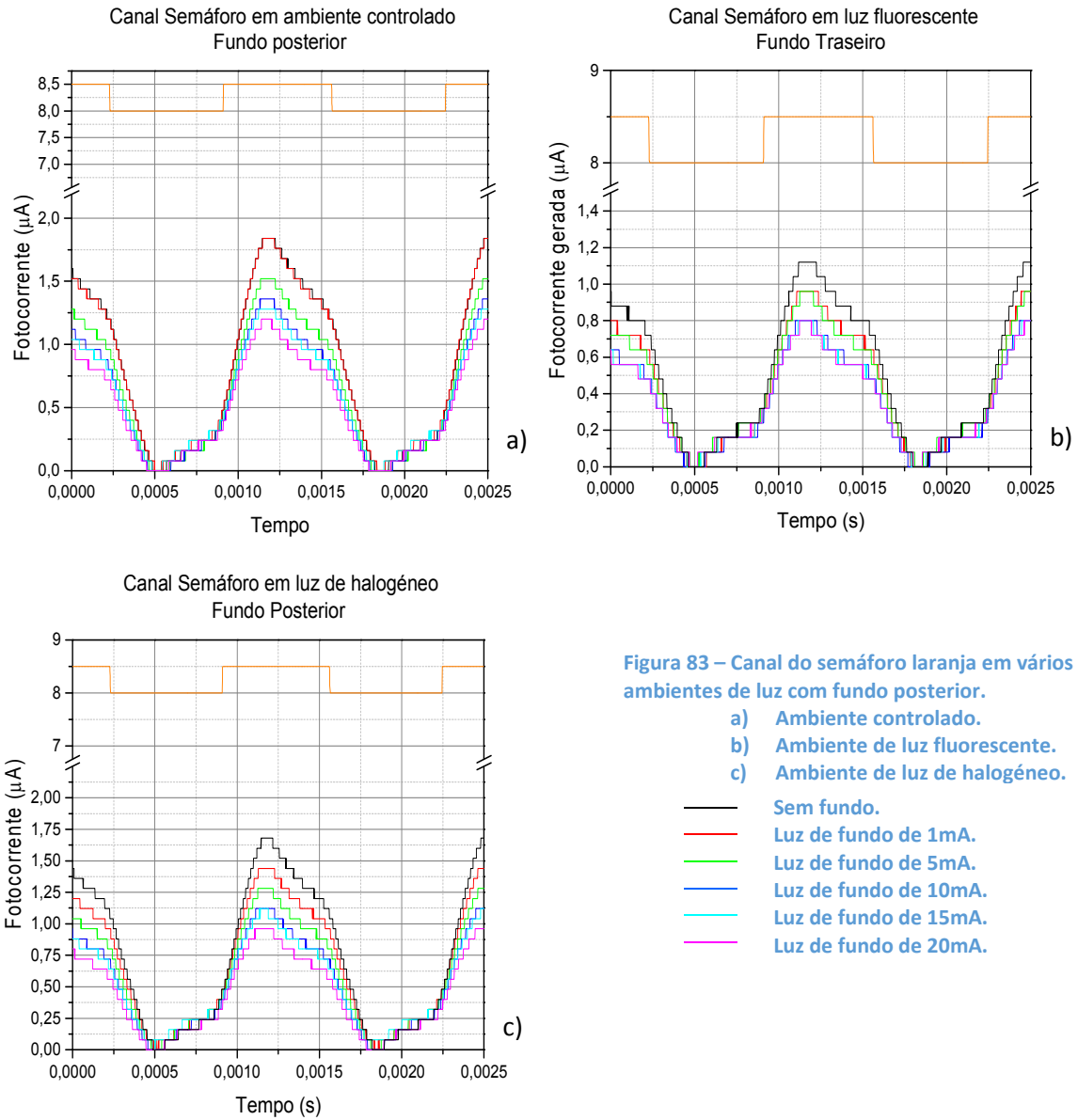


Figura 82 – Evolução do ganho de polarização óptica frontal perante os diversos ambientes envolventes.

Observe-se que embora o canal fluorescente seja o que tem menor corrente gerada quando o fundo óptico é de 20mA na Figura 81 b) repare-se que no gráfico do ganho de corrente a partir dos 10mA tem um ganho superior às outras duas condições testadas

Fazendo a média dos vários ambientes verifica-se um ganho médio para todos os fundos. Para o ambiente controlado de consegue-se um ganho de 3.220, para o ambiente fluorescente o ganho médio é de 3.368 e para o ambiente de luz de halogéneo o ganho médio é de 3.428. Pode observar-se também que à medida que a corrente do fundo de polarização aumenta o ganho também aumentou, atingindo o máximo de 4.62 para o ambiente controlado com o fundo de 20mA. Já para o ambiente de halogéneo e fluorescente o ganho máximo é de 5.57 para 20mA de corrente de fundo óptico também.

A Figura 83 representa o comportamento do semáforo laranja com a incidência do fundo posterior. Pode ver-se que o comportamento do sensor ao ter o fundo posterior incidente atenua o canal do semáforo em todos os ambientes testados.



Pode ver-se na Figura 84 a evolução do ganho de corrente com o aumento da corrente de polarização de fundo óptico. O ganho vai decrescendo à medida que o fundo de polarização aumenta.

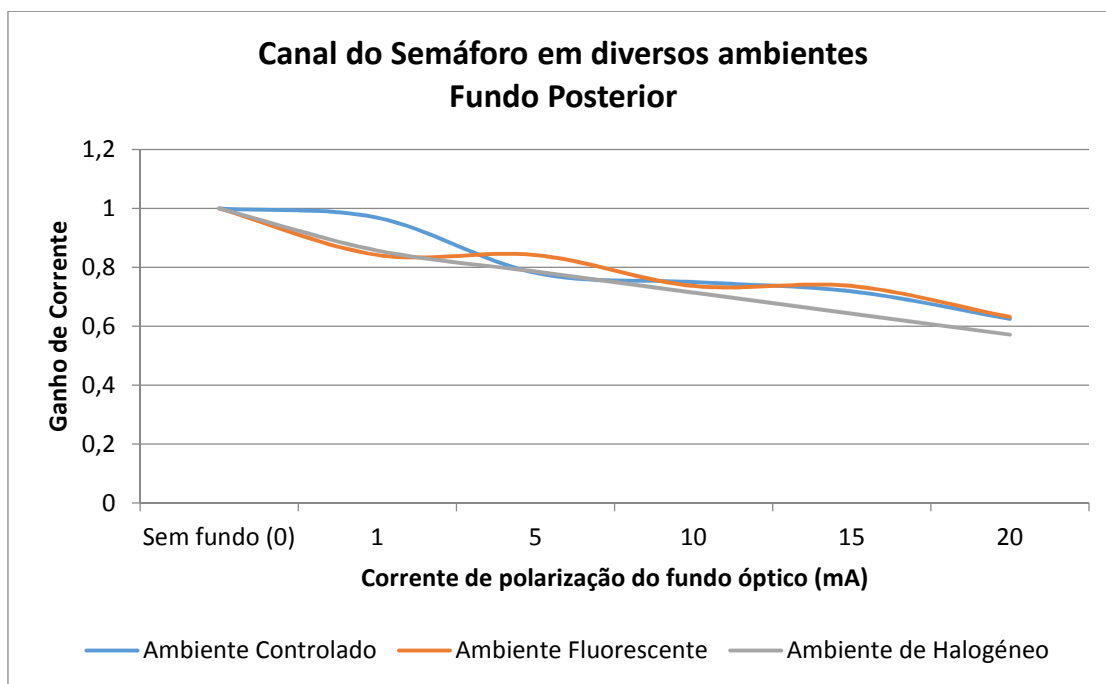


Figura 84 – Evolução do ganho de polarização óptica frontal perante os diversos ambientes envolventes.

Observe-se que a atenuação dá-se nos três tipos de ambiente e são muito aproximados. A média do ganho em ambiente controlado é de 0.807, para o ambiente fluorescente é de 0.798 e para o ambiente de halogéneo é de 0.761. Todos os valores estão muito próximos e pode ver-se que nas curvas apenas onde há discrepância é apenas na situação de 1mA de corrente de fundo.

4.8 Comparação de Ambientes

Em suma comparando os ambientes testados de condições controladas no escuro, ambiente de luz fluorescente e de luz de halogéneo, observe-se a Figura 85 Figura 86.

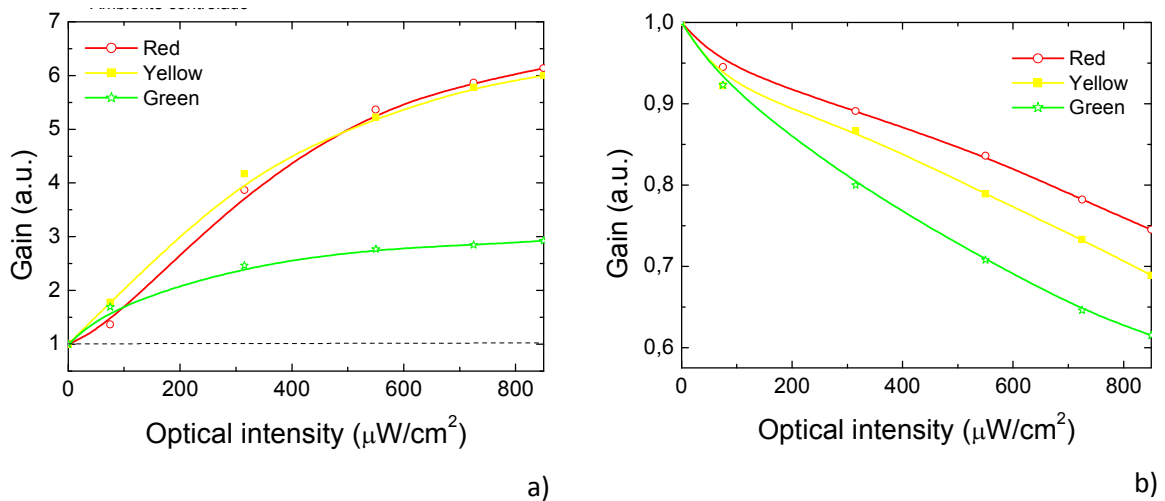


Figura 85 – Variação do ganho óptico para cada comprimento de onda com a evolução da potência em ambiente controlado a) fundo frontal b) fundo posterior.

Pode ver-se que na figura 85 que o canal vermelho e amarelo têm um comportamento semelhante atingindo as 6 unidades de ganho quando o fundo incide frontalmente, já o canal verde é o que tem o ganho mais baixo, 3. Já para o fundo posterior pode ver-se que os três canais também têm o mesmo comportamento, o canal vermelho é o menos atenuado, já o verde é o que tem uma atenuação maior com cerca de 0.6.

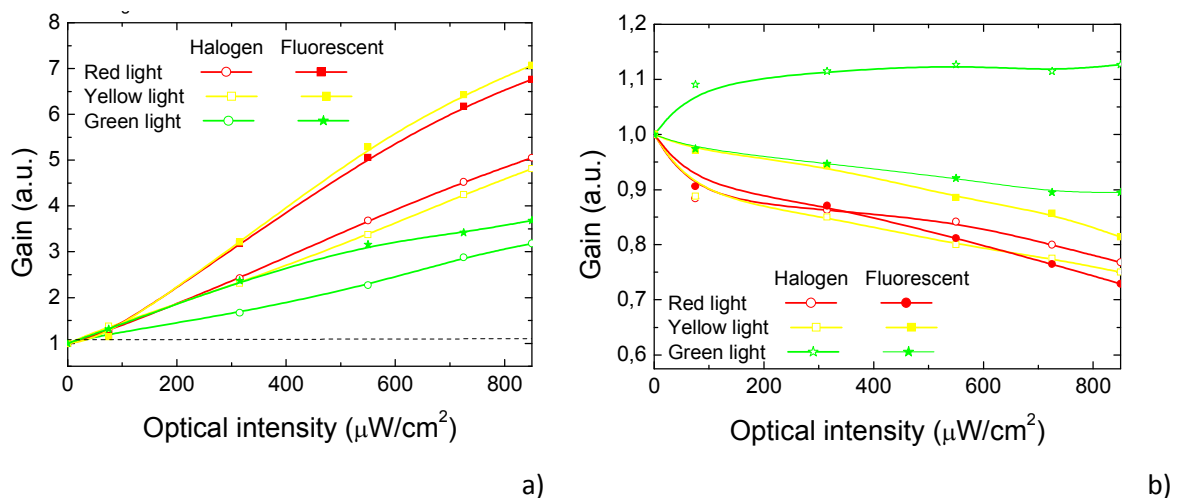


Figura 86 – Variação do ganho óptico para cada comprimento de onda com a evolução da potência em ambientes de luz fluorescente e de luz de halogéneo a) fundo frontal b) fundo posterior.

Para os ambientes envolventes de luz fluorescente (representado por quadrado cheio) e luz de halogéneo (representado por círculo oco) pode ver-se que há diferença no comportamento do sensor perante as condições de luz envolventes.

Pode ver-se que o ganho para o ambiente fluorescente é amplificado em qualquer uma das cores, continua a verificar-se que o vermelho e o laranja têm comportamentos próximos e que o verde continua com o ganho mais baixo. Este comportamento verifica-se que quando o fundo óptico incide pela parte frontal do sensor. Quando o fundo óptico incide pela parte posterior do sensor verifica que o comportamento para o ambiente fluorescente é semelhante ao ambiente controlado e que todos os canais sofrem atenuação na mesma ordem de grandeza.

Para o ambiente de halogéneo pode ver-se que embora o canal encarnado e laranja continuem com um comportamento semelhante o ganho que se consegue é mais baixo que nas condições do laboratório. Já para o canal verde, este é amplificado face ao ambiente de laboratório. Estes resultados verificam-se quando o fundo óptico incide frontalmente. Para o fundo posterior pode ver-se que o canal laranja e vermelho são atenuados nas mesmas ordens de grandeza aproximadamente 0.7. Já para o canal verde consegue-se um ganho, sendo a única situação em que o fundo óptico incidente posteriormente provoca ganho num canal. Embora o ganho seja baixo, 1.16, o que há a realçar é que o ambiente de halogéneo envolvente faz com que o comportamento que nas condições de laboratório era de atenuação neste ensaio experimental passa-se a um ganho.

Capítulo 5. Conclusão

Este trabalho foi sobre o tema da sinalização semafórica com transmissão de informação integrada (S2TI2). A informação pretende-se que seja transmitida pela luz enviada pelo semáforo LED tirando partido das características dos LEDs de *fast switching* ON-OFF.

Com este conhecimento foi preciso estudar a luz e como o olho humano reage a ela. Como a informação será transmitida pelo semáforo, não pode fazer com que ele perca a sua principal função de regulador do trânsito. Embora na prática as suas lâmpadas precisem de acender e apagar, a frequência com que isso é feito é tal que para o olho humano o sinal de trânsito para todos os efeitos está aceso.

O tema sobre a semaforização e como podem ser desenvolvidos os seus componentes, nomeadamente os semáforos, não tem tido grande desenvolvimento face às tecnologias e capacidades que hoje em dia se dispõe. Como tal, este projecto pretende dar o seu contributo para que os elementos que regulam a circulação rodoviária tenham um papel mais pró-activo e interventivo na segurança das pessoas.

A nível tecnológico a implementação de um sistema destes pode ter interesse em grandes cidades. Será uma forma de poder avisar aos condutores do que se passa por exemplo numa grande artéria de tráfego da cidade e quais as alternativas que eles dispõem, pode servir por exemplo para avisar num cruzamento que determinado troço está cortado e que pode ter outras alternativas.

É um sistema pensado sobretudo para avisar e informar os condutores dos veículos, com informações relevantes para o seu percurso na cidade resultando num maior conforto para os condutores, e traduzindo-se em maior segurança para as pessoas e para a cidade.

Outra vertente que poderá existir para este sistema semafórico, para além do seu papel fundamental enquanto auxiliar de trânsito, é divulgar actividades e locais nas cidades onde esteja implementado. Por exemplo quando houver um evento cultural, musical, desportivo entre outros, pode ser uma forma de o promover para a cidade e para o condutor de planear uma viagem com menos problemas.

Ao ser usada a luz dos semáforos será transmitida luz no espectro luminoso visível. Para o espectro visível de luz foi estudado o protocolo VLC (*Visible Light Communication*) que é utilizado para fazer transmissão de informação através de luz do espectro visível.

Entre as diversas abordagens encontradas à forma como fazer a recepção da informação, praticamente todas elas têm em comum usarem uma câmara de alta velocidade. Para que se possa fazer a detecção de um sinal com uma câmara deste tipo ela tem de conseguir ter uma taxa de actualização de imagens muito superior à velocidade de transmissão dos LEDs.

A abordagem seguida foi através de um fotorreceptor desenvolvido no ISEL no grupo de investigação GIAMOS. Este sensor tem como característica ser sensível a todo o espectro visível e realçar os comprimentos de onda incidentes consoante o fundo óptico aplicado.

De modo a se poder fazer uma aproximação a esta situação foi preciso analisar o sensor e ver como ele respondia em diversos ambientes de luz foi testado o sensor num ambiente controlado (no escuro), no ambiente de luz fluorescente e num ambiente de luz de halogéneo. Foram testados os canais Vermelho, Laranja e Verde. De modo a realçar o sinal enviado foram utilizados fundos de polarização ópticos.

Para isto foi usado um sistema com um microcontrolador com uma aplicação no PC que faz interface entre a montagem do ensaio experimental dos semáforos a LEDs e o controlo no PC feito pelo utilizador.

As medidas efectuadas no ambiente controlado foram tomadas como base. Consideraram-se essas medições como sendo a base de comparação com os outros casos.

Poderá ver-se nos sinais obtidos que a luz que envolve o sensor tem influência tanto no ganho da polarização como na própria atenuação da luz que chega ao sensor. A luz ambiente adiciona ruído ao canal pode ver-se que os patamares de cada sinal são mais irregulares em torno de um valor médio.

Pôde verificar-se também que a luz fluorescente causa pior resposta ao sensor em todos os comprimentos de onda. Repare-se que a presença da luz ambiente fez-se sentir sobretudo quando a intensidade de corrente dos canais era mais baixa, para as correntes mais altas prevaleciam as correntes de canal e a influência dos fundos ópticos.

De realçar que o fundo de polarização óptico violeta faz realçar os comprimentos de onda incidentes no sensor desde pela parte frontal do sensor. Em todos os ambientes de luz este comportamento se verificou.

Quando o fundo de polarização óptico foi aplicado pela parte posterior do sensor a fotocorrente gerada era em todos os casos mais baixa do que sem a presença do fundo de polarização. Apenas num caso este comportamento não se verificou, foi para o canal verde com ambiente de luz de halogéneo com fundo posterior e correntes de canal de 15 e 20 mA.

Testou-se um semáforo utilizado pelas ruas de Lisboa, de cor Laranja. Quando foi testado o semáforo o comportamento foi exactamente o mesmo embora a sua potência óptica fosse superior à potência óptica dos LEDs. Ainda assim a potência óptica do fundo de polarização óptico era superior tal como nos testes efectuados com os LEDs.

Quando se utilizou o semáforo com diferentes ambientes de luz envolvente também a luz fluorescente foi a que causou pior impacto, tal como na simulação dos LEDs. Nesta situação foi quando foi gerada a corrente mais baixa dos testes com o semáforo.

Este sensor adaptar-se-á ao sistema rodoviário? Pelo menos tem características que leva a crer que sim, senão veja-se que é sensível a todas as cores do espectro, todas elas provocam alterações no seu comportamento em repouso. E se por um lado esta característica pode parecer desapropriada quando se querem detectar três cores bem definidas como o verde, o amarelo e o vermelho, por outro a ausência de filtros de cor para cada um dos semáforos ou de câmaras de alta velocidade na captura da imagem são vantagens para este processo.

Bibliografia

- [1] P. M. F. SOARES, *Avaliação do Desempenho de Fibras Óticas de Plástico*, Lisboa, 2012.
- [2] PureVLC, *Differences Between Radio & Visible Light Communications*, PureVLC, 2012.
- [3] F. R. G. A. U. BAPST, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation," em *PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 67, NO. 11*, 1979.
- [4] Y. T. a. M. N. M. I. Masako Akanegawa, *Basic Study on Traffic Information System Using LED Traffic Lights*, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 2, NO. 4, 2001.
- [5] T. K. H. L. & C.-H. C. GRANTHAM PANG, *LED Wireless A novel use of LEDs to transmit audio and digital signals*, IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE, JAN|FEB 2002.
- [6] C. Poynton, *Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces*, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2007.
- [7] [Online]. Available: <http://kids.britannica.com/comptons/art-57434/When-white-light-is-spread-apart-by-a-prism-or>.
- [8] H. H. H. E. a. D. K. Mostafa Z. Afgani, "Visible Light Communication Using OFDM," Bremen, 2006.
- [9] P. Louro, *OE_Light Emitting Diodes*, Lisboa, 2012.
- [10] A. S. R. Mouta, "Distribuição de Sinais Rádio e Vídeo sobre Fibra," Lisboa, 2012.
- [11] G. Held, *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*, CRC Press, 2009.
- [12] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2003.
- [13] CEN - Comité Européen de Normalisation, "BS EN 12368:2006 Traffic Control Equipment - Signal heads," CEN - Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2006.
- [14] [Online]. Available: <http://www.inir.pt/portal/Inova%C3%A7%C3%A3oNormaliza%C3%A7%C3%A3o/ExpertGroups/MareNostrum/tabid/249/language/pt-PT/Default.aspx>.
- [15] Project EasyWay, "http://www.easyway-its.eu/," [Online]. Available: <http://www.easyway-its.eu/organisation/project-overview/>.

- [16] Instituto Nacional de Infraestruturas Rodoviárias, “www.inir.pt,” [Online]. Available: <http://www.inir.pt/portal/Inova%C3%A7%C3%A3oNormaliza%C3%A7%C3%A3o/ExpertGroups/MareNostrum/tabid/249/language/pt-PT/Default.aspx>.
- [17] T. Y. T. F. a. M. T. Mitsuhiro Wada, *Road-to-Vehicle Communication Using LED Traffic Light*, Nagoya: IEEE, 2005.
- [18] H. Ferraz, “Fotodetector e dispositivo WDM integrados,” Lisboa, 2012.
- [19] M. V. M. A. V. M. F. J. C. P. Louro, *Use of α -SiC:H Photodiodes in Optical Communications Applications*.
- [20] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *BS EN 12368:2006*, Bruxelas, 2006.
- [21] P. Louro, *Apontamentos de OE*, 2012.
- [22] <http://www.soltrafego.pt/content/passadeira-segura>. [Online].
- [23] [Online]. Available: <http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/08/1319887-novas-faixas-de-pedestre-iluminadas-em-sao-paulo-serao-entregues-ate-o-final-do-ano.shtml>.
- [24] M. V. M. A. V. V. S. A. F. P. Louro, *Novel device for implementation of WDM in the visible spectrum*.