

Universidade do Minho

José Miguel Mesquita Matos

Implementação de um Filtro Lock-In Digital

Tese de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores

Trabalho realizado sob orientação do

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

DECLARAÇÃO

José Miguel Mesquita Matos

Endereço eletrónico:

mesquitacomputer@gmail.com

Título da Dissertação:

Implementação de um Filtro Lock-In Digital

Orientador:

Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica e de Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS
PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO
INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

" Every man is the architect of his own fortune"

Appius Claudius Caecus

Agradecimentos

Na conclusão de uma temporada de um grau de elevada importância, como foi o desenvolvimento desta dissertação que é o culminar de um ciclo de estudos. Os primeiros agradecimentos são endereçados para os meus pais, por todo o suporte educacional, financeiro, psicológico, essencialmente pela família que foram não só nesta fase, mas em toda a minha vida. Sem todo este apoio a realização desta caminhada não seria possível.

Ao meu orientador Professor Doutor Luís Gonçalves por me ter proporcionado todas as condições para a elaboração deste trabalho e essencialmente por me ter acolhido mesmo numa fase adianta do ano apresentando um novo caminho a seguir, mesmo com todos os entraves que nos foram colocados.

Aos meus colegas de curso que me acompanharam ao longo destes anos, em especial ao Cláudio Silva e Carlos Pereira, que esteve envolvido no projeto onde se integra a dissertação, por todo o companheirismo e auxílio prestados. A estas duas fantásticas pessoas e aos restantes que me acompanharam nas várias atividades académicas o meu enorme obrigada, claramente que são os irmãos que adotei.

Finalmente e não menos importante, à minha restante família e aos restantes grupos de amigos por todos os momentos vividos e partilhados, e sobretudo por me terem alegrado, compreendido e apoiado em todos os momentos.

Resumo

Nos dias de hoje, a sociedade procura supervisionar o meio que habita, recolhendo, armazenando e analisando dados. A aquisição destes dados recorre ao auxílio da eletrónica, esta tem permitido a supervisão requerida, através do melhoramento das técnicas já existentes ou mesmo com novas abordagens. Os requerimentos passam por sistemas cada vez mais fiáveis, eficientes, análises no local, complexidade baixa e entre outras características.

No meio aquático, a monitorização das variáveis marítimas tem um papel importante para estudo biológico, geológico, químico e físico. Especialmente com o debate das alterações climáticas é necessário dar uma resposta usando os respetivos estudos e resultados. Este meio é o maior no nosso planeta, porém é o que se tem menor conhecimento.

A leitura das variáveis do meio aquático tem como obstáculo associado à sua baixa amplitude de sinal. O que requer o uso de técnicas de amplificação de sinal, porém este é facilmente afetado por ruído, comprometendo a viabilidade das leituras. É então de extrema importância, a implementação de um mecanismo de leitura de alta sensibilidade, imune a ruído e de selecionar a componente do sinal de interesse.

O amplificador *lock-in* utiliza uma das técnicas mais conhecidas e eficazes para a medição de sinais de baixa magnitude, propondo-se esta dissertação ao seu estudo e implementação de um amplificador deste tipo. Neste caso com uma abordagem digital que entre outras vantagens estão presentes a maior adaptabilidade a ajustes e alterações via software. Ao longo desta dissertação o sistema em estudo é dimensionado com principal finalidade a captação de uma luz proveniente fluorescência da clorofila, para quantificação do fitoplâncton presente no meio. A fluorescência é a resposta à excitação do microrganismo a um comprimento de onda restrito.

No presente documento são descritas metodologias estudadas, assim como as soluções escolhidas para desenvolver um sistema capaz de realizar a medição da clorofila presente na amostra. É apresentado as características do projeto e as simulações realizadas, assim como os componentes usados e seus parâmetros. É implementado a solução do sistema de leitura digital, o mesmo é testado e equiparado ao seu homólogo analógico. O sistema desenvolvido apresentou resultados satisfatórios com diferenciação de clorofila até 1:1000. No capítulo final são apresentadas as conclusões e alterações a serem efetuadas para melhorar o sistema desenvolvido.

Palavras-Chave: Amplificador *lock-in* digital, microprocessador, Ruído e Sensibilidade.

Abstract

Nowadays, society seeks to supervise its environment, collecting, storing and analysing data. The acquisition of these data is aided by electronics, which has been increasing its resources with novel approaches. Challenges are launched over time, because of discoveries of new areas of analysis, or the search for more reliable and efficient systems.

In the aquatic environment, monitoring of marine variables plays a key role in biological and physical study. Especially with the debate on climate change, it is necessary to respond using their studies and results.

The reading of the variables in aquatic environment has as obstacle associated with its low signal amplitude. Being therefore easily affected by noise, compromising the viability of the readings. It is therefore of utmost importance to implement a high-sensitivity, noise-free and read-only reading mechanism.

The lock-in amplifier uses one of the most known and effective techniques for the measurement of low-magnitude signals, proposing this dissertation to its study and implementation of an amplifier of this type but in a digital approach. Among the advantages of implementing such an amplifier in a DSP, compared to its analogue counterpart are the lower cost, greater adaptability to adjustments and changes via software, as well as reduced dimensions.

This type of amplifiers may have several possibilities for applications, but the main implementation is the amplifier in a mechanism called a synchronous detector. throughout this dissertation the system under study is designed with the main purpose of capturing a wavelength from the chlorophyll, to quantify the phytoplankton present in the medium.

In this document are the methodologies studied, as well as the solutions chosen for the development of a model capable of performing a chlorophyll test. The characteristics of the project and the following simulations, as well as their components and their parameters, are presented. The application is a digital system solution, it is tested and combined with its analog equivalent. The chlorophyll measurement system presents satisfactory results with chlorophyll differentiation up to 1 : 1000 . At the end, the improvements that need to be implemented in the developed system.

Keywords: Digital lock-in amplifier, microprocessor, noise and sensitivity.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Acrónimos e Siglas.....	xvii
Nomenclatura	xix
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Sistema de Aquisição de Sinais.....	3
1.3 Motivações	4
1.4 Objetivos	5
1.5 Organização da Tese.....	6
Capítulo 2 Estado da Arte	7
2.1 Conceito.....	7
2.1.1 Amplificador <i>Lock-In</i>	9
2.1.2 Técnica da Fluorescência	11
2.1.3 Solução Proposta.....	12
2.2 Equipamentos Comerciais e Projetos Desenvolvidos	13
2.2.1 USBLockIn250	14
2.2.2 SR830/SR850.....	14
2.2.3 Pekin Elmer/EG&G Model 7265	14
2.2.4 Sensitive Digital Lock-in Amplifier Using a Personal Computer	15
2.2.5 A Lock-In Amplifier for Fluorescent Light Detection	15
2.2.6 Digital Lock-In Amplifier: Study, Design and Development.....	15
2.2.7 A Low-Cost, Portable Alternative for a Digital Lock-In Amplifier	15
2.3 Aplicações.....	16
Capítulo 3 Fundamentos Teóricos.....	17
3.1 Sistema Lock-In.....	17
3.1.1 Tipos de Lock-In.....	18
3.2 Blocos do Sistema de Leitura.....	20
3.2.1 Instrumentação.....	21
3.2.2 Bloco de Conversão A/D	21
3.2.3 Bloco Multiplicador	22
3.2.4 Bloco de Filtragem.....	22
3.2.5 Bloco de Conversão D/A	22
3.2.6 Sinal de Referência	23
3.2.7 Unidade de Processamento Digital de Sinal.....	23
3.3 Diagrama de Blocos do Sistema Global.....	24
Capítulo 4 Projeto e simulação	25
4.1 Análise do Projeto	25

4.1.1	Requisitos do Projeto	25
4.1.2	Restrições do Projeto	26
4.2	Simulação Computacional	27
4.2.1	Simulink	27
4.2.2	Filter Design and Analysis Tool.....	31
4.3	Desenvolvimento Prático	34
4.3.1	Firmware	34
4.3.2	Hardware - Escolha de Componentes	37
Capítulo 5	Teste e Resultados do Sistema de Leitura.....	41
5.1	Arquitetura do Sistema Final	41
5.1.1	Abordagem Analógica	42
5.1.2	Abordagem Digital	43
5.1.3	Aplicação Específica	44
5.2	Sistema de Leitura Digital	45
5.2.1	Teste e Caracterização do Sistema de Leitura.....	46
5.2.2	Teste com Recurso ao DAC	50
5.2.3	Teste com o Sistema de Medição de Clorofila.....	50
Capítulo 6	Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro.....	53
6.1	Conclusões Gerais.....	53
6.2	Trabalho futuro.....	55
Lista de Referências.....		57

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Blocos da Técnica do Amplificador <i>Lock-in</i>	8
Figura 2-2 - Gráficos das Sidas do princípio do Amplificador <i>Lock-In</i>	9
Figura 2-3 - Interações da Luz ao Atravessar um Objeto	11
Figura 2-4 - Diagrama da Solução Proposta	12
Figura 3-1 - Diagrama de Blocos de um Amplificador <i>Lock-In</i> do tipo Analógico	19
Figura 3-2 - Diagrama de Blocos de um Amplificador <i>Lock-in</i> Tipo Digital	20
Figura 3-3 - Diagrama de Blocos Sistema de Leitura.....	21
Figura 3-4 - Diagrama de Blocos Sistema Global.....	24
Figura 4-1 - Diagrama de Blocos do Amplificador Tipo <i>Lock-In</i> Analógico, em <i>Simulink</i>	27
Figura 4-2 - Diagrama de Blocos do Amplificador Tipo <i>Lock-In</i> Digital, em <i>Simulink</i>	28
Figura 4-3 - Ondas dos Sinais do Amplificador <i>Lock-In</i> Analógico.....	28
Figura 4-4 - Sinal de Ruído Aplicado	29
Figura 4-5 - Sinal de interesse vs Sinal de Saida vs Sinal com Ruído Associado	29
Figura 4-6 - Ondas dos Sinais do Amplificador <i>Lock-In</i> Digital	30
Figura 4-7 - Janela Inicial da Ferramenta <i>FDATool</i>	31
Figura 4-8 - Diagrama do Filtro Passa-Baixo	32
Figura 4-9 - Gráfico da Magnitude e Fase, Filtro Passa-Baixo	33
Figura 4-10 - Recursos Utilizados STM32.....	35
Figura 4-11 - Apresentação do Esquema de <i>Header Files</i>	35
Figura 4-12 - Configuração do Circuito de Transimpedância	37
Figura 4-13 - Circuito de Amplificação.....	38
Figura 4-14 - Circuito de Comutação da Fonte de Excitação	39
Figura 4-15 - LED Rebe Royal Blue	39
Figura 4-16 - Curva Característica do LED	40
Figura 5-1 - Sistema Global	44
Figura 5-2 - Unidade de Processamento de Sinal.....	45
Figura 5-3 - Sinal de Interesse [1 Hz].....	46
Figura 5-4 - Sinal de Entrada, Modulação de 1 kHz do Sinal de Interesse	46
Figura 5-5 - Gráfico de Saída para Diferentes Sinais de Entrada	47
Figura 5-6 - Gráfico de Saída para Diferentes Resoluções de ADC [8-6bits].....	48
Figura 5-7 - Gráfico de Saída para Diferentes Resoluções de ADC [12-10bits]	48
Figura 5-8 - Gráfico da Saída para Diferentes Frequências de Amostragem	49
Figura 5-9 - Gráfico do Osciloscópio, Sinal de Entrada e Saida	50
Figura 5-10 - Gráfico de Saída para Diferentes Concentrações de Clorofila	50
Figura 5-11 - Amostras das Diluições em Teste.....	51
Figura 5-12 - Tensão de Saída (Analógico) em Comparação com Valor Digital (Digital)	52

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Tabela de Preços dos Equipamentos Comerciais.....	13
Tabela 2-2 - Ruído de Entrada USBLockIn250	14
Tabela 4-1 - Valor dos Coeficientes, para Diferentes Frequências de Amostragem	32
Tabela 4-2 - Especificações elétricas do amplificador operacional <i>ADA4522-2</i>	37
Tabela 4-3 - Especificações elétricas dos circuitos integrados TL084 versus OPO7CSZ.....	38
Tabela 4-4 - Caraterísticas do Fotodetector	40
Tabela 5-1 - Valor da intensidade de fluorescência da clorofila	51

Acrónimos e Siglas

Acrónimo / Sigla	Significado
ADC	Analog-to-Digital Converter
CA	Corrente Alternada
DAC	Digital-to-Analog Converter
DSP	Digital Signal Processor
LED	Light Emitting Diode
LIA	Lock-in Amplifier
LPF	Low Pass Filter
PLL	Phase Locked Loop

Nomenclatura

f	Frequência da tensão da rede elétrica	Hz
f_s	Frequência de amostragem	Hz
f_r	Frequência de referência	Hz
R	Resistência	Ω
C	Capacidade	F

Capítulo 1

Introdução

No capítulo inicial é evidenciado o enquadramento desta dissertação, descrevendo o contexto, a motivação e objetivos do projeto. É explicada toda a abordagem para o desenvolvimento do sistema que é proposto. Numa fase inicial é exposto o diagrama de blocos que se encontra dentro do sistema de leitura e que utiliza a técnica do tipo *lock-in*. O uso desta técnica permite realizar a recuperação do sinal de interesse, que tem como características uma baixa amplitude assim como a frequência. Para finalizar este capítulo é apresentada a estrutura e organização deste documento.

1.1 Enquadramento

Hoje em dia os equipamentos tecnológicos e o seu desenvolvimento influenciam diretamente a vida quotidiana das pessoas, gerando uma necessidade de conhecimento e estudo do meio envolvente. Este documento baseia-se no desenvolvimento de um sistema que permite a recolha de dados do meio aquático envolvente, para possível análise de evolução ou deteriorização do ecossistema.

Assim é necessário o desenvolvimento de um protótipo que seja solução, que seja modelável para análise do meio envolvente, procurando a eficácia no seu funcionamento tanto a nível de fiabilidade como um enquadramento no meio envolvente, sendo que causa pouco impacto visual, espacial ou perturbação no meio a inserir.

O sistema a desenvolver passa por equipamentos que têm como base a eletrónica para a conexão entre a sensorização, processamento e na armazenagem dos dados adquiridos. A eletrónica está em constante desenvolvimento apresentando soluções para progresso nestas pesquisas. Tanto na evolução de componentes já existentes ou novos, assim como a utilização de novas técnicas de processamento de sinais provenientes desses equipamentos e sistemas envolventes. É exemplo disso o sistema de aquisição de sinais, mais concretamente o amplificador *lock-in*, que irá ser abordado ao longo desta dissertação.

Como referido anteriormente o meio selecionado para inserção deste projeto é o ecossistema aquático, sendo o ecossistema com maior peso no nosso planeta. É este que detém a maior massa do nosso planeta e conseqüentemente contém uma variada fauna e flora. Assim sendo, é elevada a importância ecológica deste meio, dado que é necessário um controlo das características físico-químicas,

essenciais para os seres vivos que nela habitam. No meio aquático existe o objetivo de analisar, conhecer e quantificar o meio envolvente para a preservação deste espaço [1].

Ao nível da eletrónica é necessária uma atenção para o tipo de componentes e suas características para que estes possam ser enquadrados no meio aquático. Ao longo deste estudo é realizada uma comparação e uma análise de viabilidade com um sistema utilizando a mesma técnica, porém com métodos analógicos. Uma das características pretendidas no sistema digital é a simplicidade do modelo global.

Esta dissertação visa estudar e testar a viabilidade da aquisição do sinal através de um sistema de leitura num dispositivo incorporado, que permita a leitura de um sinal com elevada sensibilidade, imune ao ruído, com reduzidas dimensões e com baixo custo. Após a obtenção desse sinal pretende-se a análise e o armazenamento para posterior partilha dos dados numa base de dados.

A viabilidade deste sistema permite que seja possível o melhoramento dos sistemas de aquisição de dados sendo que quando comparado com um sistema *in-situ* oferece mais portabilidade, mais simplicidade de funcionamento, passando a não ser necessário o transporte de amostras. Obtendo um resultado que se enquadre dentro dos valores obtidos em sistemas de laboratório torna a sua funcionalidade superior. Um sistema com a abordagem digital procura que a mesma unidade de processamento de sinal seja autónoma na aquisição e análise de sinais de um ou vários sensores.

1.2 Sistema de Aquisição de Sinais

Nos últimos anos as técnicas e equipamentos eletrônicos têm auxiliado na aquisição de sinais com a com uma componente de amplitude baixa. Nesta área procura-se o desenvolvimento de dispositivos que permitam a minimização dos efeitos de ruído presentes neste tipo de sensorizações, tornando-os mais eficazes e a redução de espaço utilizados pelos equipamentos.

As técnicas baseadas em detecção podem ser separadas em térmicos, acústicos, óticos, capacitivos, quânticos, entre outros. Estas são ferramentas que permitem a caracterização de meio ou variáveis presentes neste. Porém exigem uma recuperação de sinal, que muitas vezes é acompanhado de ruído. A solução mais seleciona é o uso da técnica do amplificador *lock-in*, que significa fecho interno, ou seja procura medir componentes de sinais somente na frequência desejada, considerando as restantes como ruído [2] .

Este método também pode ser denominado como fase-sensível e é uma ferramenta fundamental física experimental capaz de extrair sinais extremamente pequenos, com ruídos associados. Técnica que separa a componente de sinal em uma frequência e fase de referência selecionadas. Atualmente, tem existido interesse em amplificadores que empreguem esta técnica, mas que tenham características como por exemplo, portabilidade e já sejam embebidos com instrumentação, detecção e com o armazenamento de dados.

A associação destes sistemas com os conhecimentos que a ciência reporta sobre resposta a estímulos específicos, permite que seja possível identificar, classificar e quantificar amostras. Então procura-se desenvolver o estudo de um sistema que se enquadra nesta solução para que seja integrado na análise de meios aquáticos.

1.3 Motivações

O tema desta dissertação enquadra-se na área de Microtecnologias, uma especialização do mestrado do curso de engenharia eletrónica industrial e computadores. A dissertação irá abordar especificamente a filtragem digital de um amplificador tipo *lock-in*, utilizando processamento digital.

A monitorização do meio aquático é cada vez mais comum no quotidiano, muito por consequência do tema das alterações climáticas, mas também pela necessidade de conhecimento do meio marítimo que representa grande parte do nosso planeta [3].

Esta dissertação propõe-se a desenvolver soluções capazes de inovar na monitorização das variáveis marítimas, com o desenvolvimento de equipamentos de monitorização subaquática, particularmente o desenvolvimento de um sistema para a quantificação de clorofila presente no meio. A monitorização de microalgas na água do mar é um dos métodos utilizados para a quantificação de fitoplâncton, uma vez que o interior das células de fitoplâncton contém clorofila, e esta é relativamente simples de quantificar devido às suas propriedades fluorescentes. Os fluorímetros de medição *in-situ* assumiram um papel importante na quantificação de clorofila na água em geral e mais especificamente na oceanografia. Um dos grandes entraves deste equipamento além do seu preço, é a incapacidade de monitorizar autonomamente debaixo de água. No entanto, com a constante evolução tecnológica, muitos dos componentes eletrónicos utilizados estão constantemente a ver reduzidos o seu tamanho e custo. Pelos motivos referidos, o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, de elevada sensibilidade, imune a ruído e capaz de quantificar a clorofila em meio marítimo tornar-se-á uma mais valia para a área da oceanografia [4].

Nesta dissertação irá ser estudado o mecanismo de amplificação digital tipo *lock-in*. Este mecanismo providencia ajustes e alterações via software tornando-se assim um sistema mais versátil e adaptável, a um baixo custo com um desempenho e eficiência aceitáveis. A implementação, dimensionamento e integração são a meta a alcançar [5].

O trabalho em equipa, num projeto multidisciplinar de desenvolvimento de um protótipo, neste caso particular subaquático, o aprofundar conhecimentos e aquisição de novas valências são o incentivo para esta dissertação.

1.4 Objetivos

O tema desta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema baseado num filtro sintonizado tipo *lock-in*, com técnicas de processamento digital de sinal aplicadas num processador. A finalidade abordagem é uma leitura viável de um sinal de entrada com baixa amplitude, assim como eficácia nessa mesma aquisição.

Para tal é necessário o estudo bibliográfico de equipamentos já comercializados que utilizam a mesma técnica assim como literatura de projetos desenvolvidos ou em desenvolvimento. É também necessário a validação do sistema, onde se efetue o desenvolvimento do mesmo e dos circuitos envolventes e a realização de testes em ambiente controlado onde se possa dar a prova de conceito de funcionamento do protótipo desenvolvido.

Ao longo do documento é realizada uma comparação com o sistema com a mesma abordagem, todavia com métodos analógicos. É então apontada as vantagens dos dois métodos e qual a possibilidade de uma convergência das duas abordagens para um sistema mais evoluído.

A escolha de um mecanismo de transferência digital é a procura de um sistema menos suscetível a interferências externas, e principalmente aos seus componentes ativos e passivos, como é o caso dos circuitos integrados, resistências, condensadores e bobines. A escolha por um sistema digital também permite um armazenamento de dados de uma forma mais simples, assim como permite a alteração de parâmetros e características de uma forma mais rápida, tornando o sistema mais moldável. Sendo um sistema digital permite também a sua saída no domínio analógico, acompanhando o seu homólogo, para tal basta utilizar um DAC que permite tal conversão.

1.5 Organização da Tese

O trabalho desenvolvido neste documento está organizado em seis capítulos. No **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é apresentada a contextualização da dissertação desenvolvida, assim como os objetivos propostos, a sua motivação e a descrição da estrutura do documento, incluindo toda a mecânica de como será apresentado o documento.

No Capítulo 2 está apresentado o estado da arte relativo aos principais temas abordados na tese, sobre o estudo efetuado sobre equipamentos comerciais e projetos que têm o mesmo princípio de funcionamento. É então introduzido conceitos do amplificador *lock-in*, princípios, organização, funcionamento e funcionalidades, também são decifrados os fenómenos físicos inerentes à interação da luz num corpo. No terceiro capítulo é feita a análise do sistema de leitura a implementar, identificando os seus blocos constituintes. É também apresentado os tipos de *lock-in*, assim como o seu funcionamento. Ainda neste capítulo é apresentada a solução do sistema global, explicitando os seus blocos e respetivas funções. No Capítulo 4 consiste na descrição dos métodos e técnicas implementadas, assim como a sua análise computacional, requisitos e restrições da abordagem escolhida. Neste capítulo é também introduzido os sistemas adjacentes responsáveis por realizarem a atuação e deteção, operações essenciais para o funcionamento do sistema de leitura, assim como é feito o esclarecimento dos métodos utilizados para serem a solução ao problema tanto a nível de *hardware* e *software*. No Capítulo 5 é apresentada a implementação final do sistema, são então comparadas as duas abordagens em domínios diferentes. É também demonstrado os passos de execução, os resultados obtidos em testes e a análise dos resultados fase aos objetivos propostos.

Por último, no Capítulo 6 é realizada a conclusão e reflexão do trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

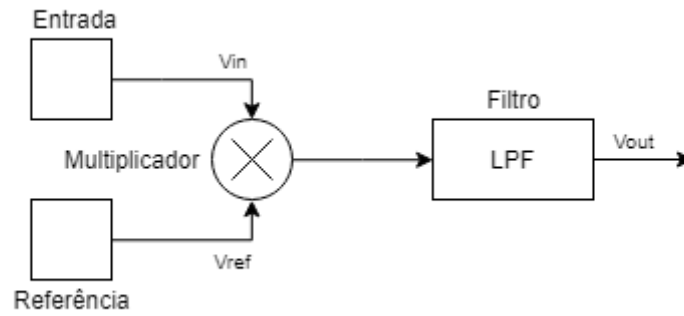
Neste segundo capítulo é feita uma revisão da visão geral dos trabalhos que foram desenvolvidos com o mesmo conceito de aplicação da técnica *lock-in*, assim como equipamentos comerciais que têm objetivo final similar. É dado a conhecer o conceito de recuperação de um sinal de baixa amplitude. É também enunciado os fenómenos físicos da luz na travessia de um corpo. O capítulo termina com a introdução da utilidade dos efeitos da luz, nomeadamente fluorescência, em aplicações que tem como finalidade a deteção de alguma componente. Esta deteção é baseada em fenómenos físicos que tem como resultado, neste caso particular, um sinal de baixa amplitude e gama baixas de frequência que leva que seja perturbado por ruído presente no meio, ou até no próprio sistema.

2.1 Conceito

Robert H. Dicke, doutorado em Física Nuclear, desenvolveu o amplificador *lock-in*. Este dispositivo modula um sinal usando um filtro que tem uma frequência selecionada consoante o sinal que se pretende medir e com uma largura de banda estreita, sendo que as restantes frequências são consideradas ruído. Este filtro pode ser chamado de detetor síncrono e a sua função é a desmodulação de um sinal sinusoidal e aplicação um filtro passa baixo, para tal utiliza uma segunda entrada que é um sinal que é usado como referência [6].

Esta técnica apresenta resultados para alcançar o objetivo definido para esta dissertação. O fundamento é a utilização de circuito do tipo *lock-in*, este tipo de amplificadores são usados para detetar e medir sinais de CA em ordem de baixa amplitude, com elevada precisão, mesmo quando copulado com ruído [7]. Este tipo de amplificadores usam a técnica denominada de deteção sensível, ou fase sensível, para separar o sinal em um fase e frequência específica.

Na Figura 2-1 pode-se ver os blocos constituintes do circuito referência, num modo geral tem duas entradas, o sinal de interesse ou entrada e o sinal de referência. Estes dois sofrem uma modulação aplicada por um bloco de multiplicação/demodulação que permite que o sinal de interesse seja isolado, ou seja, esteja próximo da componente contínua e que o ruído esteja presente nas altas frequências. Após a modulação é realizada a filtragem passa-baixo que permite ficar só com o sinal de interesse.

Figura 2-1 - Blocos da Técnica do Amplificador *Lock-in*

O modo de funcionamento deste sistema requer uma frequência de referência, normalmente o componente ativo é excitado com uma frequência fixa, que permite assim que o *lock-in* detete a resposta dentro dessa fase, ou seja, na mesma frequência. Estas características demonstram a versatilidade que gera importância do uso desta técnica para auxílio nas mais variadas aplicações de recuperação de sinal. Caso o sinal de referência não seja o mesmo sinal que está responsável pela modulação deve-se então proceder à sincronização dos sinais.

2.1.1 Amplificador *Lock-In*

A arquitetura do *lock-in* é baseada num sinal de entrada, que contém ruído, este sinal é amplificado e retificado por um sinal de referência (que está na mesma ordem de frequência do sinal de entrada). Sendo realizada a multiplicação dos dois sinais, o sinal resultante desta operação é filtrado por um filtro passa-baixo com uma frequência de corte baixa, que reduz o ruído dos harmónicos, e tem na saída um sinal constante [8], proporcional à amplitude do sinal de entrada.

Na Figura 2-2 pode-se visualizar os gráficos de saída dos blocos do amplificador *lock-in*. Através desta figura pode-se retirar a base do conceito inerente à arquitetura em estudo.

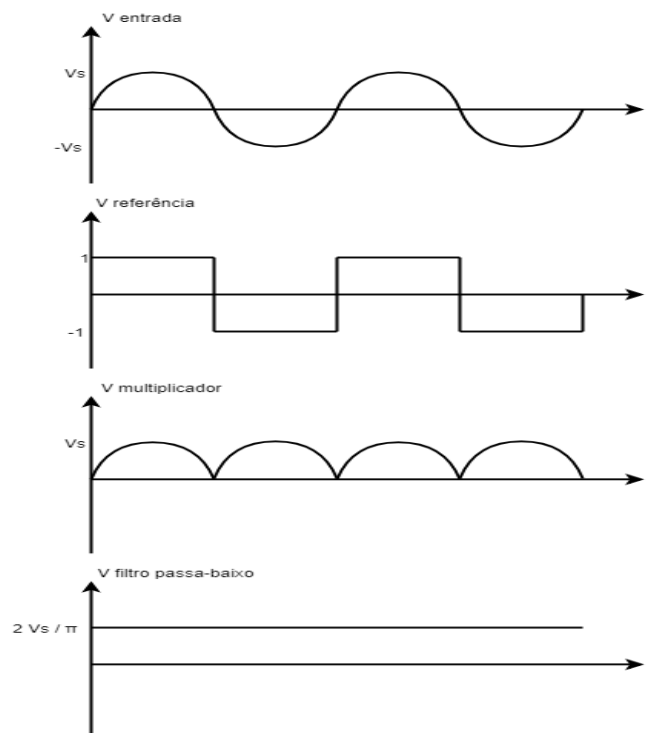


Figura 2-2 – Gráficos das Saídas do princípio do Amplificador *Lock-In*

No primeiro gráfico vê-se a entrada de uma tensão sinusoidal ao longo do tempo, um sinal com baixa amplitude. A amplitude deste sinal é o sinal de interesse a recuperar. No gráfico seguinte está representado o sinal de referência, uma onda de quadrada, que pode também ser uma onda sinusoidal. A característica que é evidenciada no sinal de referência é a sua componente de frequência, dado que esta deve ser mais elevada que o sinal de interesse a recuperar. No terceiro gráfico é a saída do multiplicador, onde as duas ondas, entrada e referência, são multiplicadas. Por último, visualiza-se a saída do sinal após filtragem passa-baixo as frequências mais elevadas são eliminadas ficando unicamente o sinal de interesse. Assim se verifica o funcionamento de um demodulador síncrono que realiza retificação da onda completa [8].

2.1.1.1 Recuperação de Sinal

Na técnica de recuperação de sinal, um sinal de referência é usado para demodular a resposta de um sistema à uma entrada de modulação conhecida. Este sinal modulado é transmitido aos circuitos de demodulação de um LIA com um sinal de referência que atua como portadora. Este mesmo sinal de referência é utilizado para controlar outros dispositivos que modulem a excitação do fenómeno físico a interagir. A disponibilidade de um sinal de referência permite utilizar o princípio da deteção síncrona, também denominada deteção sensível à fase ou deteção coerente.

2.1.1.2 Demodulação de Sinal com Referência Síncrona

Com detetores síncronos, é possível realizar demodulação de sinal. De salientar o interesse para o estudo de quando a referência e o sinal derivam de uma mesma fonte. Ou seja, utilizar uma excitação é também utilizada como referência para detetar o sinal de saída. O sinal de saída tem a mesma frequência da excitação e sofre um desfasamento. A referência é aplicada ao multiplicador do detetor síncrono com um deslocamento de fase alterável.

2.1.1.3 Demodulação da Amplitude

A demodulação da amplitude requer frequência e fase constantes do sinal de interesse. Para realizar a demodulação, é necessário ajustar a fase de referência para que seja igual à fase do sinal. O produto do sinal e da referência em fase fornece o valor ao multiplicador para a saída do detetor síncrono ser proporcional às variações do sinal de interesse. O filtro passa-baixo deve ter largura de banda suficiente para transmitir a modulação do sinal de interesse sem distorção.

2.1.1.4 Demodulação de Fase

O detetor síncrono opera como um detetor de fase linear para pequenas variações de fase. Isto é para pequenas variações de pode-se adotar obtendo-se a resposta linear. Uma vantagem do detetor síncrono em relação a um PLL, *Phase-Locked Loop*, é a sua maior imunidade ao ruído.

2.1.2 Técnica da Fluorescência



Figura 2-3 – Interações da Luz ao Atravessar um Objeto

Quando a luz atravessar um corpo ou objeto podem ocorrer diversos tipos de fenômenos físicos, estão representados na Figura 2-3. Se a luz não atravessar o objeto e for enviada de volta é chamado de reflexão. A transmissão é quando a luz atravessa o objeto sem que seja afetada a sua direção. A refração é definida pela luz atravessar dois meios com densidades diferentes o que provoca uma nova direção e intensidade em relação às características iniciais. Porém se os fótons forem absorvidos pelo corpo podem ser reemitidos com comprimentos de onda diferentes ao original. Se tal ocorrer durante o período de tempo que o corpo está a ser iluminado, o fenômeno chama-se fluorescência. O fóton é absorvido e um ou outros elétrons são excitados, na recuperação do nível de energia do elétron é dissipada a luz com um comprimento de onda diferente do comprimento de onda inicial [8].

A fluorescência é muito utilizada pela biotecnologia para proceder a deteção de características, substituindo técnicas com métodos de deteção baseados em radioatividade. A fluorescência oferece estabilidade, compatibilidade, fácil quantificação, sensibilidade e baixo custo [9].

Um fotodetector, converte a luz proveniente da fluorescência em corrente, que passa pelo amplificador de transimpedância, convertendo a corrente em tensão. Para reduzir a interferência da fonte de luz no fotodetector, este é posicionado perpendicularmente à fonte de luz, de forma a diminuir a quantidade da luz proveniente da fonte de excitação que atinge o detetor. É usada também um filtro de banda passante na lente do fotodetector para o comprimento de onda da fluorescência, que isola sinal de interesse dos restantes comprimentos de onda. O amplificador lock-in, será responsável pela aquisição do sinal de baixa amplitude proveniente do fotodetector, isolando-o do ruído [10].

2.1.3 Solução Proposta

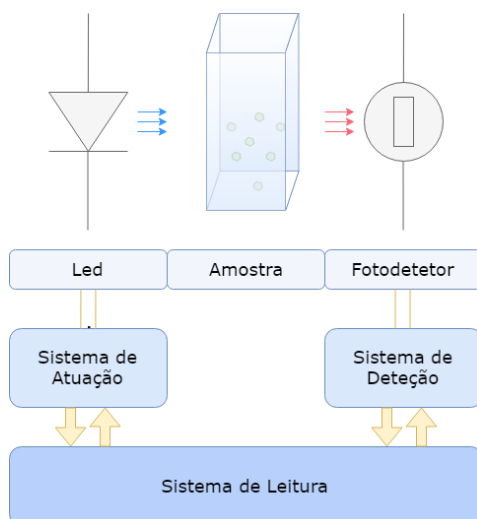


Figura 2-4 – Diagrama da Solução Proposta

O sistema a desenvolver nesta dissertação tem como objetivo a integração das técnicas e conceitos citados anteriormente. A base é o sistema de leitura, porém também será usado um sistema de atuação, responsável pelo controlo da emissão de luz, e também se utiliza um sistema de deteção, que permite a captação da resposta da amostra.

Após a intervenção destes dois sistemas referidos entra a tarefa do sistema de leitura. Este tem um circuito de instrumentação, porém o centro é uma unidade de processamento, que recolha os dados dos seus periféricos como *timers*, *ADC* e *DAC*. Com os seus periféricos esta unidade permite a captação do sinal de interesse, realizar todas as operações necessárias para que o sinal seja recuperado. Será então possível guardar digitalmente os dados ou até converter em analógico e permitir a sua visualização. Outra tarefa da unidade de processamento é a geração da frequência de referência, para que esta seja usada pelo sistema de emissão de luz.

O sistema de deteção é responsável pela receção da luz que é refletida pelo organismo. Neste caso específico a clorofila quando excitada a um comprimento de onda na ordem dos 440nm, comprimento de onda referente à cor azul, e reflete uma luz na gama espectral dos 680nm, comprimento de onda referente à cor vermelha[4].

O sistema de atuação é responsável por receber a onda de referência proveniente da unidade de processamento. Este sinal é aplicado num circuito que permite a comutação da fonte luminosa à frequência de referência.

Estes três sistemas em conjunto são a solução para alcançar os objetivos propostos para esta dissertação.

2.2 Equipamentos Comerciais e Projetos Desenvolvidos

Atualmente no mercado existem vários fabricantes que oferecem equipamentos que utilizam esta metodologia de *lock-in*, tanto com tecnologia analógica como digital para a recuperação de sinal. Os equipamentos mais evoluídos utilizam DSP's, sistemas digitais que permitem o processamento do sinal de uma forma rápida e com elevada precisão. Na Tabela 2-1 é possível verificar o custo de alguns equipamentos que utilizam método em estudo, estes são apresentados nos seguintes subcapítulos. Através da tabela pode-se concluir que o custo destes equipamentos é elevado, e que outra restrição é a possibilidade de utilização dos mesmos num local remoto.

Tabela 2-1 – Tabela de Preços dos Equipamentos Comerciais

Equipamento	Preço
USBLockIn250	2670,00€
SR830	3420,00€
SR850	4875,00€
EG&G Model 7265	2716,00€

Além do estudo realizado a equipamento comerciais realizou-se uma pesquisa de projetos desenvolvidos ou em desenvolvimento. Assim realizou-se a análise de vários projetos que têm como objetivo desenvolver um amplificador *lock-in*, utilizando processadores que sejam capazes de modelar um sinal digital. A principal vantagem destes projetos é o custo a que se propõem desenvolver a solução para os problemas apresentados. De toda a maneira são limitados na gama de funcionamento quando comparados com os equipamentos comerciais.

2.2.1 USBLockIn250

Um aparelho da *Anfatec Instruments AG*, o USBLockIn250, é um amplificador que utiliza a técnica de detecção de fase. O intervalo de frequência de entrada vai até a 250kHz, e com a sensibilidade de 10nV. O dispositivo tem uma memória de 32MBytes [11].

Na Tabela 2-2 verifica-se os valores de ruído de entrada medido [$V = 0 V$ e $R = 50 \Omega$].

Tabela 2-2 – Ruído de Entrada USBLockIn250

Frequência	1 Hz
Intervalo de tempo	1 s
Elevada reserva dinâmica	$< 1 \mu V_{rms}/Hz^{0.5}$
Normal	$< 160 nV_{rms}/Hz^{0.5}$
Baixo Ruído	$< 15 nV_{rms}/Hz^{0.5}$

2.2.2 SR830/SR850

Os dispositivos SR830 e SR850 são amplificadores *lock-in* digitais baseados em sistemas de processamento digital de sinal. Estes apresentam uma boa performance e vantagens quando comparados com outros amplificadores. Têm uma amplificação elevada, baixo desvio, baixa distorção e uma grande resolução de detecção de fase.

Têm uma precisão digital até 18 bits de conversão analógico para digital, um intervalo de frequência de 1 mHz até 102 kHz. Uma elevada impedância de entrada o que leva a um baixo ruído no sinal de entrada, e apresenta uma sensibilidade e 2 nV [7].

2.2.3 Pekin Elmer/EG&G Model 7265

O recuperador de sinal modelo 7265 utiliza um princípio processamento digital de sinal para operar as técnicas de um amplificador *lock-in*, o que permite a medição e controlo de um sinal experimental.

Com um intervalo de frequência de operação de 1mHz até 250 kHz, este dispositivo oferece uma escala completa de tensão com sensibilidade inferior a 2 nV e a corrente sensível até 2 fA. O dispositivo também é capaz de medir componentes em fase ou em quadratura, ângulos de fase e ruído no sinal de entrada.

2.2.4 Sensitive Digital Lock-in Amplifier Using a Personal Computer

Em 1990, Xiaoyi Wang, apresentou um artigo onde desenvolveu um amplificador *lock-in* com sensibilidade a baixas frequências e com a eliminação do ruído. O detetor *lock-in* desenvolvido apresenta uma boa solução para medir sinais com baixas amplitudes, tendo mais vantagem que alguns sistemas analógicos [12].

Na experiência foram usadas técnicas digitais de bloqueio de sinal. O sistema era constituído por um modulador e amplificação analógica, após isso o computador era responsável por inicialmente gerar a onda de referência, neste caso quadrada. Bem como realizava a amostragem do sinal assim com a aplicação das técnicas de *lock-in* e a filtragem digital. Finalmente é realizada uma análise do espectro.

Este método apresentado permite a redução do custo para a aquisição de sinais de baixa amplitude. Os resultados demonstram que o sistema é capaz de realizar a detecção de sinais com baixas gamas, sendo inferiores ao ruído que o amplificador gera, sendo deste modo mais vantajoso que certos sistemas analógicos.

2.2.5 A Lock-In Amplifier for Fluorescent Light Detection

Já em 2002, O. Oguz apresentou uma dissertação com base sobre técnica de amplificador tipo *lock-in* com a aplicação específica de detecção de luz para aplicações biológicas. O sistema era baseado numa microestrutura que usava um fotodiodo com um amplificador de transimpedância, seguido de pré-amplificador, amplificador de ganho e finalmente o LIA. Foi otimizado o técnica de *lock-in* comparando dois demoduladores de sinal diferentes [8].

2.2.6 Digital Lock-In Amplifier: Study, Design and Development

Em 2003, J. Gaspar, S. F. Chen, A. Gordillo, M. Hepp, P. Ferreyra e C. Marqués, publicaram um artigo sobre um trabalho que desenvolveu um amplificador *lock-in* digital com um processador digital de sinal (DSP32C). Nesta implementação eles demonstraram que era possível desenvolver um dispositivo com a técnica lock in digital com um custo reduzido e com uma boa performance [13].

2.2.7 A Low-Cost, Portable Alternative for a Digital Lock-In Amplifier

Em 2015, A. Kar, M. Chandra, P. Goel e V. K. Gupta, apresentaram um projeto onde implementaram um amplificador *lock-in* num processador TSM320C. Propuseram-se a realizar a eliminação do ruído num sinal de amplitude baixa, com o auxílio de uma onda de referência [14].

2.3 Aplicações

A técnica de detecção de luz pela fluorescência do microrganismo tem com prática a absorção de uma luz num específico comprimento de onda, que tem como reação do composto orgânico a emissão de luz num comprimento de onda diferente. Através desta resposta permite então definir a quantidade presente de organismos nessa amostra.

As técnicas de detecção de fase têm vindo a ser desenvolvidas para aplicações como o melhoramento das medições de luz. Derivado às suas características são capazes de produzir sinais consistes num ambiente com ruído associado. No domínio digital o *lock-in* tem a vantagem de a sua frequência de referência ser modelável [15].

Capítulo 3

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo será apresentada uma análise geral do sistema de leitura, sendo a parte integrante a técnica de *lock-in*. São então apresentados os métodos selecionados para a procura da solução para este projeto, onde o foco se centra no desenvolvimento do sistema de leitura, definindo os blocos e suas interações que devem ser incluídos sistema global. São estudadas abordagens de métodos tanto a nível analógico e digital, assim como a especificação dos blocos da abordagem a implementar no desenvolvimento desta dissertação. No final é feita uma apresentação da unidade de processamento, expondo microprocessadores que se enquadram em projetos que visam o desenvolvimento da técnica no domínio digital. Também é demonstrado o diagrama de blocos do sistema global.

3.1 Sistema Lock-In

Um sistema de amplificação *lock-in* é composto por duas entradas e a sua saída pode ser dupla, onde se contém a magnitude e fase do sinal, ou então a composta deste sinal. Uma das entradas é o sinal de referência que é utilizada para excitar o circuito de atuação e também é multiplicada pelo sinal de entrada. O sinal do sensor é modulada pelo sinal de referência, ou seja, pulsar o sinal na ordem dos kHz. Esta multiplicação tem como objetivo o desvio dos sinais cujas frequências estão afastadas da frequência do sinal de referência.

O amplificador *lock-in* tem uma resposta em relação à amplitude do sinal, porém também é sensível à diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal de referência. Este sistema é baseado na medida da variação de amplitude e fase de sinais periódicos copulados de ruído e interferências. O tratamento dado ao sistema *lock-in* é unicamente matemático e só usa alguns métodos básicos de transformadas. Para que o amplificador *lock-in* seja eficiente ele deve estar dimensionado para detetar o sinal de interesse.

Nas últimas décadas os amplificadores deste tipo foram substituídos das suas abordagens analógicas por sistemas digitais. Estes segundos permitem a análise de frequência de gama superior, são mais modeláveis e têm a possibilidade de simplificarem sinais com decimações e outras técnicas.

3.1.1 Tipos de Lock-In

O amplificador *lock-in* é usado para detetar e medir sinais de amplitude bastante reduzida, mesmo quando estes estão embebidos em ruído de valor superior ao sinal pretendido [16]. Como referido anteriormente nos últimos tempos este tipo de técnica tem sido substituída por abordagens digitais, derivado às características mais vantajosas e requisitos menos elaborados [17].

A crescente utilização da tecnologia da eletrónica digital possibilitou a implementação do *lock-in* digital [18]. De uma forma geral, o amplificador *lock-in* digital entrega a responsabilidade da filtragem ao seu processador, que fornece uma alta qualidade e elimina alguns obstáculos da filtragem analógica [13]. Neste caso a constante de tempo deve ser elevada para que permita uma saída de melhor performance. O processador também é responsável pela tarefa anterior que também é um processo matemático de multiplicação dos sinais, o de entrada e o de referência [19]. De um modo geral o sinal de referência é interno, ou seja, o acesso a este é a utilização da informação que está na memória ou nos registos do microprocessador. Em termos do sinal de entrada é necessário recuperar o sinal proveniente de um componente eletrónico. Para recuperação deste sinal é necessária instrumentação eletrónica que permita a aquisição do sinal para o microprocessador, através de um conversor analógico para digital. Para o funcionamento correto nesta aquisição o sinal deve ser em tensão, e deve ser aproveitado todo o intervalo de leitura do conversor, para que a resolução do sinal seja a maior, sempre com a atenção de adição de o mínimo ruído possível.

3.1.1.1 Analógico

Em analógico o *lock-in* utiliza um filtro passa baixo para que recupere o sinal contínuo, reduzindo o ruído. O processo de filtragem é a integração/média equivalente do sinal. Normalmente a frequência de corte do filtro passa baixo é pelo menos 50 vezes inferior ao período do sinal de referência para que se permita uma saída limpa. Os amplificadores *lock-in* analógicos são caros, complexos e podem ser não lineares. Além disso requerem um desfasamento do sinal para alinhar o sinal de referência com o sinal de saída, para compensar o atraso experimental [15].

A abordagem analógica deste sistema consiste numa amplificação inicial que coloca o sinal de entrada numa gama de valores superior. Acontece que há a necessidade de realizar uma filtragem passa-banda para que seja removida qualquer frequência fora do intervalo de frequências desejadas, tanto valores do sinal contínuo como seus harmónicos [20].

Após o processo de multiplicação o sinal é filtrado por um passa-baixo que remove toda a gama de frequências que se afastam da componente contínua. Assim como o sinal de interesse, o sinal de referência necessita de um filtro passa-banda para os sinais fiquem com a mesma fase. Na Figura 3-1 é possível ver o diagrama de blocos do sistema descrito.

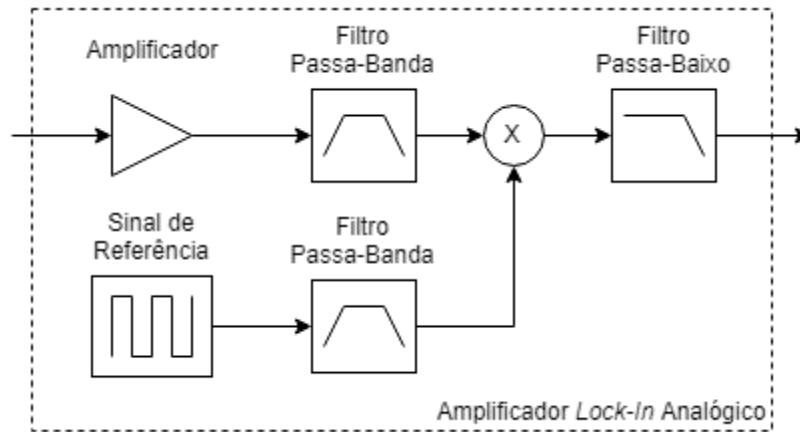


Figura 3-1 – Diagrama de Blocos de um Amplificador *Lock-In* do tipo Analógico

No amplificador *lock-in* o sinal de entrada é modulado por uma frequência de referência fixa. Esta frequência é gerada por um componente auxiliar e pode ter duas formas: onda sinusoidal demodulada ou onda quadrada. O sinal de entrada está embebido em ruído, pela sua baixa amplitude, é amplificado e se necessário retificado para que esteja sincronizado com o sinal de referência. Os dois sinais são multiplicados/demodulados para que posteriormente o sinal seja filtrado por um passa-baixo que vai permitir a passagem das frequências perto do sinal contínuo, sinal de interesse. As restantes frequências são eliminadas, por serem consideradas ruído, restando o sinal de interesse.

3.1.1.2 Digital

No caso do amplificador *lock-in* de implementação digital o processamento é de domínio digital usando *software* e *hardware* para processamento digital de sinal. Por este a abordagem situa-se nas mesmas operações, porém os componentes elétricos são substituídos por equações realizadas por uma unidade de processamento. No domínio digital os amplificadores podem-se dividir em dois tipos: *Digital Switch Lock-In Amplifier* e *Digital Lock-In Amplifier* [17]. O primeiro é um amplificador *lock-in* digital usa um subsistema de inversão de polaridade operado na frequência de referência, estes tipos de amplificadores apresentam harmónicos ímpares indesejados. Por sua vez a abordagem mais sim utiliza o amplificador *lock-in* digital de modo a que use o *software* para executar a multiplicação de sinal, filtro passa-baixo e gerador do sinal de referência.

Existem duas componentes essenciais no dimensionamento do *lock-in* digital. A primeira preocupação é o *hardware*, onde está incluído o circuito atuador até à ligação do sistema digital, e depois o *software*, onde são efetuadas todas as interações matemáticas para que seja obtido o sinal de saída.

O esquema do amplificador *lock-in* digital é mostrado na Figura 3-2. O sinal analógico é amplificado e aplicado um filtro anti-*aliasing* para remover qualquer sinal com componente superior a metade da frequência de amostragem. Posteriormente é digitalizado por um conversor analógico-digital. O sinal no domínio digital é então sujeito à multiplicação com o sinal de referência. Após a multiplicação o sinal é truncado e filtrado por um passa-baixo para remover a componente de frequências mais elevadas que estão fora da banda do sinal de interesse. O sinal de referência é gerado internamente, assim não sofre erros típicos presentes no *lock-in* analógico, derivado ao elevado grau de precisão dos seus pontos. Deste modo se obtém o sinal de interesse que pode ser amostrado a uma elevada taxa, para uma economia de recursos pode-se então usar a técnica de decimação, reduzindo a quantidade de pontos amostrados, porém sem alterar o sinal de interesse [20].

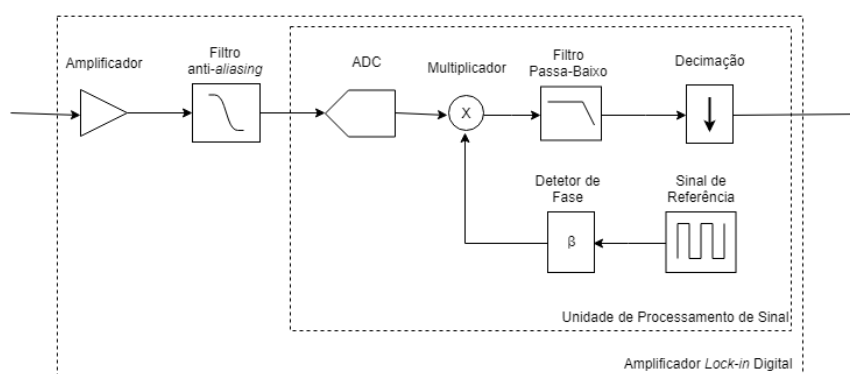


Figura 3-2 – Diagrama de Blocos de um Amplificador *Lock-in* Tipo Digital

3.2 Blocos do Sistema de Leitura

Na Figura 3-3 pode-se encontrar o diagrama de blocos do sistema a desenvolver, é possível visualizar as suas interações e respetiva ordem. Como entrada do sistema tem-se a conexão do sistema de deteção que fornece o sinal de interesse. Este sinal contém ruído que irá ser eliminado pela técnica de *lock-in* em estudo. Inicialmente passa por um estágio de instrumentação que contém o componente que realiza a transimpedância do sinal. Isto é o sinal de entrada que é representado por uma intensidade passa para uma representação em tensão. Este sinal é também amplificado para que assim seja aproveitada toda a gama de valores. Existe então a necessidade de realizar a conversão para valores digitais para que a unidade de processamento a possa interpretar. De seguida o processador fica responsável por realizar a multiplicação do sinal de entrada com a referência e também aplicar a equação

do filtro passa-baixo. O sinal de referência é uma das saídas do sistema de leitura para que este efetue a conexão com o sistema de atuação. O resultado proveniente do resultado da equação de filtragem é armazenado na memória do microprocessador e também é convertido para analógico para que este seja o sinal de saída do sistema.

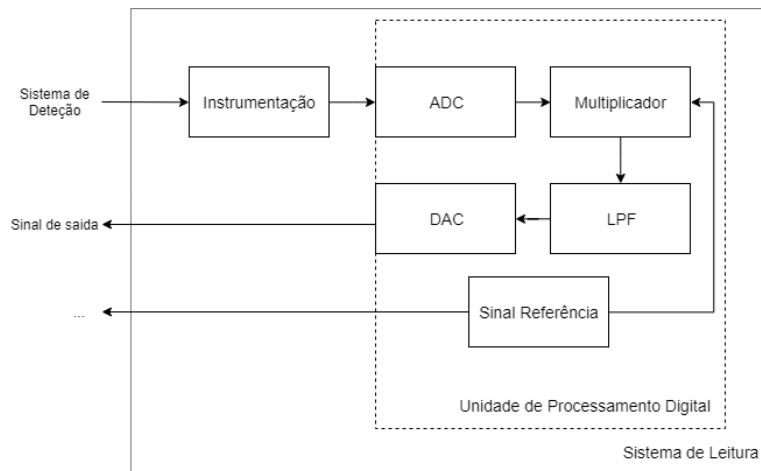


Figura 3-3 – Diagrama de Blocos Sistema de Leitura

3.2.1 Instrumentação

Os sensores utilizados na aquisição de sinal (fototérmicas, fotoacústica, entre outras) têm por vezes como saída uma variação de corrente. É então necessário realizar a conversão da corrente para tensão. Esta conversão é realizada por um amplificador de transimpedância. O sinal proveniente do sensor de origem é convertido e amplificado para um nível de tensão ajustado para o bloco de conversão analógica para digital. [8].

O amplificador de transimpedância tem um ganho associado, porém este ganho não sendo suficiente para que o intervalo de valores de tensão seja aproveitado pela resolução ADC, assim sendo pode-se realizar um estágio de amplificação do sinal de entrada.

3.2.2 Bloco de Conversão A/D

A conversão analógica-digital consiste na prática em três passos essenciais: Filtragem passa-baixo; *Sample and Hold*; e Conversão analógico para digital.

O filtro passa baixo limita o espectro do sinal para pelo menos metade da frequência de amostragem (Teoria de *Nyquist*). A aplicação do filtro passa baixo deve ser dimensionado para uma frequência superior à faixa de frequência de banda base [21].

A escolha ideal de um conversor depende das aplicações, tem que se ter em conta fatores como a precisão, resolução, o tipo de sinal analógico e condições do meio em que se insere devem ser tomados

em atenção no processo de seleção. Neste caso o conversor selecionado é periférico presente na placa de desenvolvimento aproveitando assim os recursos à disposição.

3.2.3 Bloco Multiplicador

O bloco multiplicador tem a função de deslocar o sinal modulado novamente para frequências mais baixas, e deslocar ruído para frequências mais elevadas. Isto acontece, devido à multiplicação no domínio dos tempos corresponder a uma convolução em frequências. Para sinais contínuos, o multiplicador pode ser visto como um retificador de onda completa, retificando o sinal modulado de entrada. A saída deste bloco possui uma componente contínua proporcional ao sinal contínuo de entrada.

O centro do amplificador *lock-in* é o multiplicador que realiza a operação do sinal de entrada com o sinal de referência. Outro tipo de implementação é o funcionamento com interruptor, o sinal alterna entre V e $-V$, o que equivale a multiplicar o sinal V pela onda de referência. No caso digital a multiplicação pode ser realizada pelo processador. Sendo o sinal de referência gerado pela própria placa de desenvolvimento é mais fácil a utilização da componente do sinal de referência, em fase ou desfasada 90° , multiplicando com o sinal proveniente do ADC, realizando assim a função do multiplicador.

3.2.4 Bloco de Filtragem

Após esta fase de recuperação e deslocação do sinal para a gama de frequência original, é necessária a eliminação do ruído que se encontra nas elevadas frequências. Entra em função o bloco de filtragem, neste caso é um passa-baixo, que atenua as altas frequências. Assim são eliminadas as tensões alternadas deixando só a tensão contínua, sinal de interesse. Por fim no domínio digital o sinal é passado através de um filtro de faixa de passagem baixa para gerar o valor final do sinal de saída. Normalmente são usados filtros FIR. Para tal é feita uma simulação que permite ter uma equação de saída, permitindo a filtragem digital.

3.2.5 Bloco de Conversão D/A

Este bloco interpola o valor das amostras digitais em valores do sinal. O que significa a implementação física do sinal de saída. A conversão digital analógica inclui a transição das amostras para o sinal, o *deglitcher* e a filtragem passa-baixo.

O princípio mais utilizado para a conversão D/A é a somada de correntes de fontes comutadas. A resolução do DAC, número de *bits*, está diretamente ligada ao número de fontes comutadas utilizadas pelo mesmo. A corrente é então convertida em uma tensão proporcional. [5].

Como realizado no bloco A/D pode-se utilizar os recursos presentes na placa de desenvolvimento.

3.2.6 Sinal de Referência

O sinal de referência é uma das saídas do sistema de leitura. O amplificador *lock-in* requer este sinal para realizar a detecção. A referência é utilizada diretamente no sistema atuador, como acontece em aplicações óticas onde o feixe de luz é modulado. A unidade de processamento de sinal é responsável por gerar a onda quadrada. Esta onda é parte integral da solução para esta dissertação. A excitação do sistema de atuação com a frequência de referência leva que o sinal de interesse seja modulado a uma frequência superior à sua. O sinal de interesse é recuperado depois da passagem no multiplicador, ou seja, volta à sua ordem de frequência original.

3.2.7 Unidade de Processamento Digital de Sinal

Na abordagem digital do *lock-in* são diversos os microprocessadores que são escolhidos para realizarem o processamento do sinal. Placas como TMS320 [14], Atmel 89C7152 [22], DSP32C [13] são escolhidas para implementarem o multiplicador e a filtragem digital.

A utilização de uma unidade central digital é apelativa pois por exemplo a filtragem necessária no amplificador *lock-in* analógico é composta por diversos componentes que eles próprios inserem no circuito alterações que nem sempre são favoráveis. A filtragem no domínio digital é de maior simplicidade, diminuindo assim o espaço utilizado pelo protótipo, assim como a intervenção de fatores externos no circuito é de menor volume. Outra vantagem é o armazenamento, ao ser calculado no domínio digital os dados são mais facilmente armazenados.

Esta unidade multiplica o sinal de entrada com a referência. Com o resultado deste produto filtra-o usando um filtro passa baixo com uma frequência de corte reduzida. A ordem não necessita ser de ordem elevada para que não seja comprometida a velocidade de processamento.

Para além de ser responsável pela realização de todos os cálculos a efetuar no sinal de entrada é responsável pela geração da onda de frequência. Esta unidade colocar a limitação da resolução do sistema. Outra característica que esta unidade pode permitir a geração de um sinal analógico, com um recurso a um DAC pode-se obter em tempo real o resultado no mesmo domínio da entrada.

3.3 Diagrama de Blocos do Sistema Global

No geral o sistema de deteção pode ser dividido em três partes integrantes: o sistema de leitura, parte em foco neste documento pela parte digital que contém, o sistema de atuação, que contém a fonte emissora de luz e respetivo circuito e por fim o sistema de deteção onde está incluído o fotodetetor e o seu filtro de banda passante. Na Figura 3-4 é possível ver a interação entre os vários sistemas.

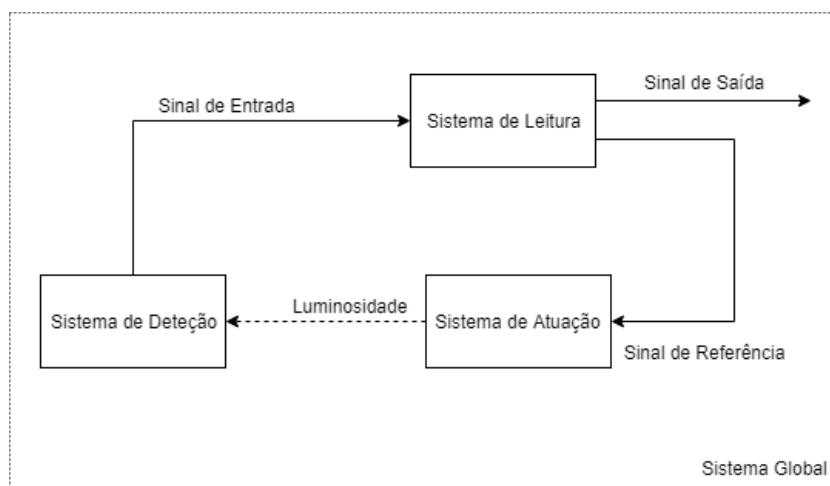


Figura 3-4 - Diagrama de Blocos Sistema Global

O sistema de leitura foi anteriormente descrito, dentro deste está incluída a unidade de processamento digital de sinal, esta também é responsável pela geração do sinal de referência. A saída do sistema global tem origem no sinal de saída do sistema de leitura. Que após processamento do sinal de entrada realiza as operações que permitem chegar ao resultado final.

Por outro lado o sistema de atuação é constituído por um circuito de atuação que inclui a fonte luminosa. A modulação do sinal de alimentação tem origem no sinal de referência proveniente do sistema de leitura. Para finalizar tem-se o sistema de deteção que na sua entrada tem um filtro que inibe a entrada da luz o comprimento de onda fora do intervalo da fluorescência do organismo em quantificação. Após o filtro é realizada a operação que permite a recolha da quantidade de luminosidade através de um fotodetetor, o sinal é então a entrada do sistema de leitura para ser processado.

Esta é a solução proposta para realizar o estudo da quantificação do organismo presente numa amostra. Deste modo pretende-se que estes sistemas em conjunto permitam a análise de várias amostras com diferentes concentrações e permitam a diferenciação entre elas.

Capítulo 4

Projeto e simulação

Neste capítulo é apresentada toda a análise realizada ao sistema desenvolvido nesta dissertação. Desta forma são então apresentados os requisitos e as restrições do projeto. Assim como as simulações e arquitetura de implementação do sistema de leitura e equações da aplicação à unidade de processamento. É também demonstrado toda a seleção de componentes realizado ao longo do desenvolvimento do projeto.

4.1 Análise do Projeto

O desenvolvimento desta dissertação procura comprovar a possibilidade da ligação do processamento digital de um sinal, proveniente de um sensor e instrumentação adjacente, que permita a leitura do sinal original com uma análise direta. A utilização de uma plataforma digital permite um sistema de leitura modelável e com uma capacidade de armazenamento de dados mais facilitada.

4.1.1 Requisitos do Projeto

O principal requisito funcional do sistema a desenvolver é a deteção de um sinal de baixa amplitude embebido em ruído. Para tal foi implementada a técnica de *lock-in* para o sinal principal seja recuperado e o ruído seja eliminado. É então necessário gerar uma onda de referência e permitir a utilização desta no sistema de atuação, e assim esperar um sinal de entrada pulsado à frequência de referência. Para além deste requisito é necessária instrumentação que permita o funcionamento dos sistemas adjacentes, sistema de atuação e sistema de deteção e a interação entre os três sistemas.

Para tal é necessário um circuito de comutação da fonte emissora para que esta seja excitada à frequência de referência. Para o circuito do fotodetector é necessária a instrumentação de conexão ao sistema de leitura que tem como componente inicial o amplificador de transimpedância para que a corrente proveniente do sistema de deteção seja convertida em tensão. O passo seguinte é a utilização de um mecanismo para amplificação do sinal para que este possa ser convertido no sinal digital com maior ganho. Para esta aquisição é necessário a utilização de um conversor analógico para digital que permita a conexão à unidade que vai processar o sinal. Com esta etapa a aquisição do sinal está concluída, passa a ser necessário a eliminação do ruído que está acoplado ao sinal. Para tal implementa-

se o método de *lock-in* digital desenvolvido neste estudo, este método pode-se dividir em duas operações, multiplicação e filtragem passa baixas frequências. O sinal de saída obtido será armazenado em memória. A unidade de processamento de sinal, inclui a possibilidade da utilização de um periférico que permita a conversão de um sinal digital para analógico, esta opção torna-se interessante para a visualização do sinal de saída em laboratório.

Sendo assim pretende-se o desenvolvimento do sistema eletrônico que permita a compilação destes requisitos explicitados anteriormente. Torna-se necessário a prova de conceito do estudo desenvolvido e respetivo protótipo, é então necessário o estudo e validação da aquisição do sinal, tanto o nível de recuperação de um sinal pré-definido e controlado como na utilização dos sistemas adjacentes e realizar a comparação com os resultados da abordagem analógica. O desafio final à compilação dos sistemas para pela imersão do mesmo.

4.1.2 Restrições do Projeto

O projeto em desenvolvimento requer determinados conhecimentos e ferramentas para a realização dos objetivos definidos. A nível matemático para obtenção das equações necessárias para implementar o sistema ficam a cargo da ferramenta *Filter Design and Analysis Tool*, presente na plataforma *Matlab*. Outra ferramenta derivada do *Matlab* usada ao longo do projeto é o *Simulink*, esta ferramenta permite a simulação dos conceitos teóricos dos métodos a implementar.

No domínio da eletrónica será necessário a utilização de conhecimentos de codificação em linguagem C, para programação da unidade de processamento digital. É também necessário a utilização de um *IDE*, *Integrated Development Environment*, uma ferramenta que permita a compilação, envio, execução e *debug* de todo o código fonte desenvolvido, neste caso particular *Keill*. Requer-se também o uso de um processador que contenha periféricos, neste caso foi selecionado a *STM32F4*. Para simplificar o uso das bibliotecas do processador selecionado utilizou-se o programa *STM32CubeMX*, que permite o uso do portefólio da placa selecionada de uma forma simplificada. A configuração é automática assim como a geração de código C [23]. Para a conexão de todos os sistemas é usado um programa que desenha os circuitos do mesmo, neste é usado o *Altium*. Esta última ferramenta permite o desenho do domínio analógico, seus componentes e suas ligações, permitindo que seja a impressa a placa de circuitos e conectados os respetivos componentes

4.2 Simulação Computacional

De modo a proceder à simulação das características do sistema são usadas ferramentas que permitem explorar formas de abordar o problema geral. Para a solução do sistema de leitura foi feita a simulação do mesmo, numa fase inicial umas simulações de prova de conceito da solução teórica e numa fase seguinte a simulação do bloco de filtragem. A simulação foi realizada no *Matlab*, onde o diagrama de blocos foi apresentado na ferramenta *Simulink*. Para apresentação das características do filtro passa baixo foi usado o mesmo programa com a ferramenta *FDAtool*.

4.2.1 Simulink

No *Simulink* foram realizados os diagramas de blocos da abordagem analógica e digital, Figura 4-1 e Figura 4-2, respetivamente. Nestes dois diagramas pode-se verificar os blocos necessários para usado na técnica em estudo. O programa usado permite a realização de simulações que permitem a alteração dos parâmetros integrantes das abordagens. Esta simulação e alteração de parâmetros é relevante para que se comprove na teoria a técnica seguida para solucionar o problema, porém também se torna crucial para que durante o desenvolvimento do projeto a alteração de parâmetros seja compreendida por meio da simulação. [24]

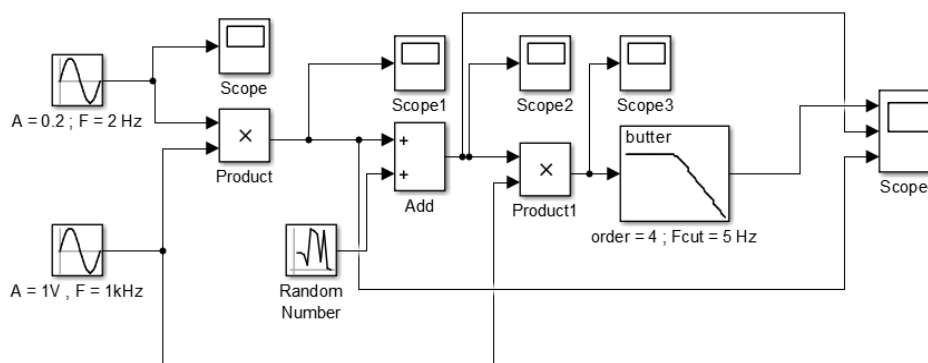


Figura 4-1 – Diagrama de Blocos do Amplificador Tipo *Lock-In* Analógico, em *Simulink*

Na abordagem analógica procede-se à entrada de dois sinais: um de referência [1 Vpp; 1 kHz] e outro com o sinal de referência modulado com um sinal de baixa amplitude e frequência [0,2 Vpp; 2 Hz]. É também adicionado um ruído aleatório com uma amplitude 10 vezes superior ao sinal de referência, 2 Vpp, para que o *lock-in* possa demonstrar que realiza a eliminação de sinais próximos da frequência do sinal de interesse. O *lock-in* é constituído por um bloco de multiplicação, “*Product1*” e por outro bloco que é um filtro passa-baixo do tipo *Butterworth*, de 4ª ordem e com uma frequência de corte situada nos 5 Hz.

Por outro lado, tem-se a abordagem digital que aproveita os mesmos sinais de entrada realizando a conversão destes de analógico para digital, a uma frequência de amostragem de 10 kHz. Os blocos que constituem o *lock-in* são idênticos ao do tipo analógico, porém utiliza equações para realizar as suas operações. Outra alteração relevante é a utilização de um filtro passa-baixo de ordem inferior, neste caso ordem 2. A redução da ordem permite uma maior simplicidade nas equações do filtro digital e não comprometem o resultado final.

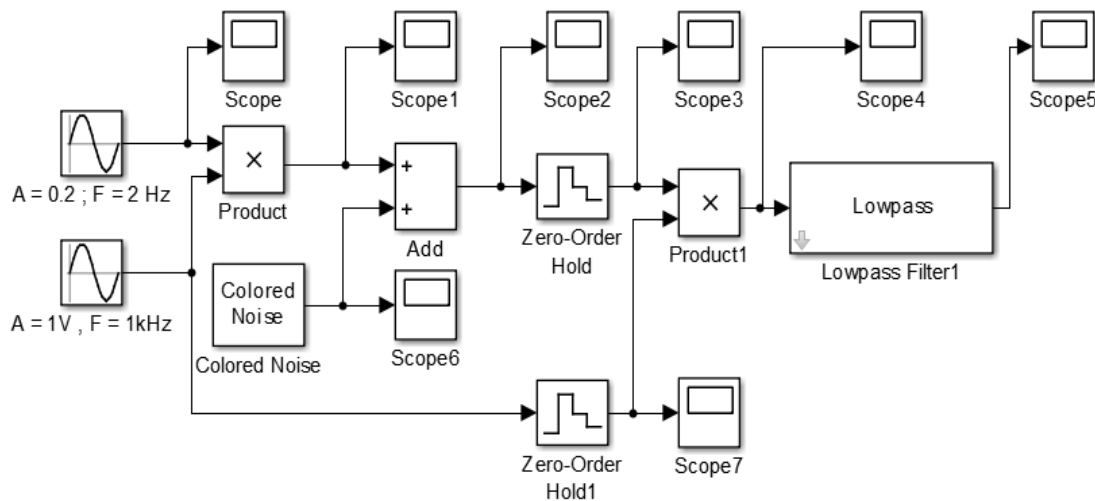


Figura 4-2 - Diagrama de Blocos do Amplificador Tipo *Lock-In* Digital, em *Simulink*

Na Figura 4-3, relativa à solução analógica, pode-se visualizar a vermelho o valor de entrada da onda de interesse ao longo do tempo, a cinza tem-se o produto desta onda com a onda de referência. Por fim a verde é representada a saída o amplificador tipo *lock-in*, onde se pode ver que o sinal de interesse foi mantido com uma ligeira atenuação do sinal devido ao filtragem passa-baixo existente no sistema, assim como o atraso do sinal é derivado aos processos que os sinais estão sujeitos, em particular o atraso no filtro passa baixo.

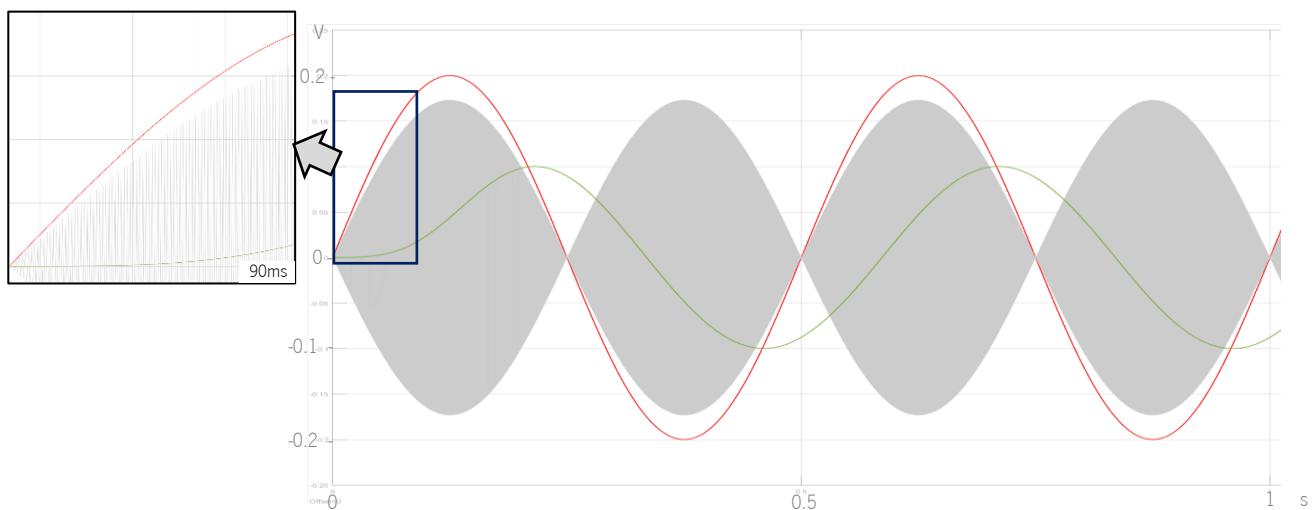


Figura 4-3 - Ondas dos Sinais do Amplificador *Lock-In* Analógico

Para simular as alterações que o amplificador pode encontrar no meio envolvente fez-se a adição do ruído aleatório. Este ruído pretende então a simulação de perturbações que o sistema está sujeito, o *lock-in* deve então descartar este sinal na sua componente de sinal de saída.

Na Figura 4-4 pode-se visualizar a azul os valores do sinal de ruído aleatório que irá ser adicionado ao sinal de interesse. Na Figura 4-5 é possível visualizar a azul escuro o sinal de ruído adicionado ao sinal de interesse já multiplicado com a referência, a vermelho tem-se o sinal de interesse e por a verde o sinal de saída do amplificador *lock-in*. Denotou-se então que o sinal fica influenciado pelo ruído de toda a maneira como se verifica no sinal de saída, o *lock-in* manteve-se unicamente com o sinal de interesse, eliminando qualquer sinal de ruído ou de referência presentes no sistema.

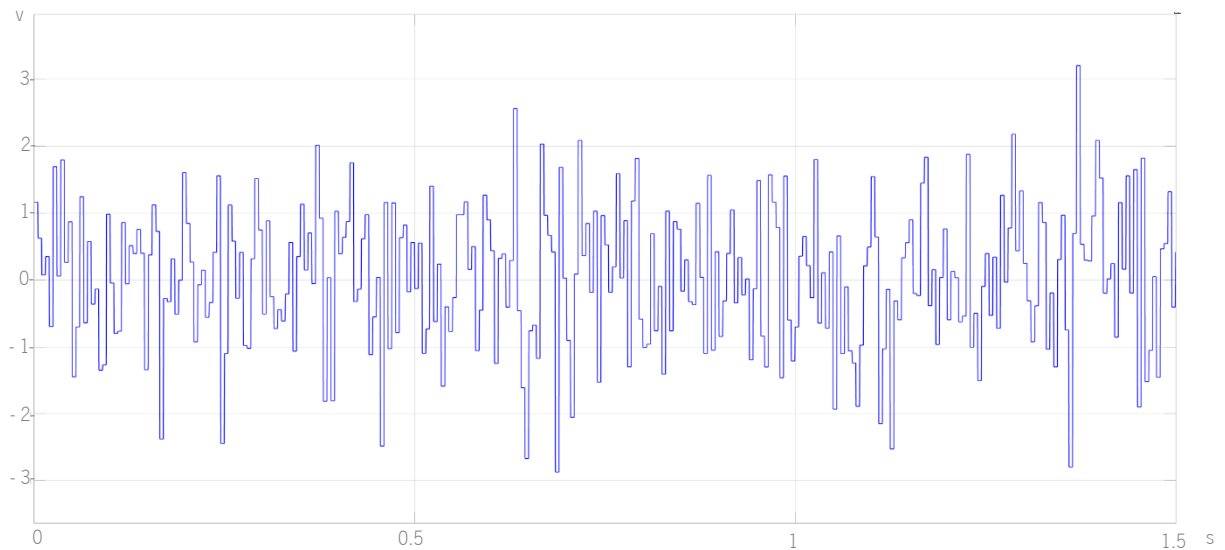


Figura 4-4 - Sinal de Ruído Aplicado

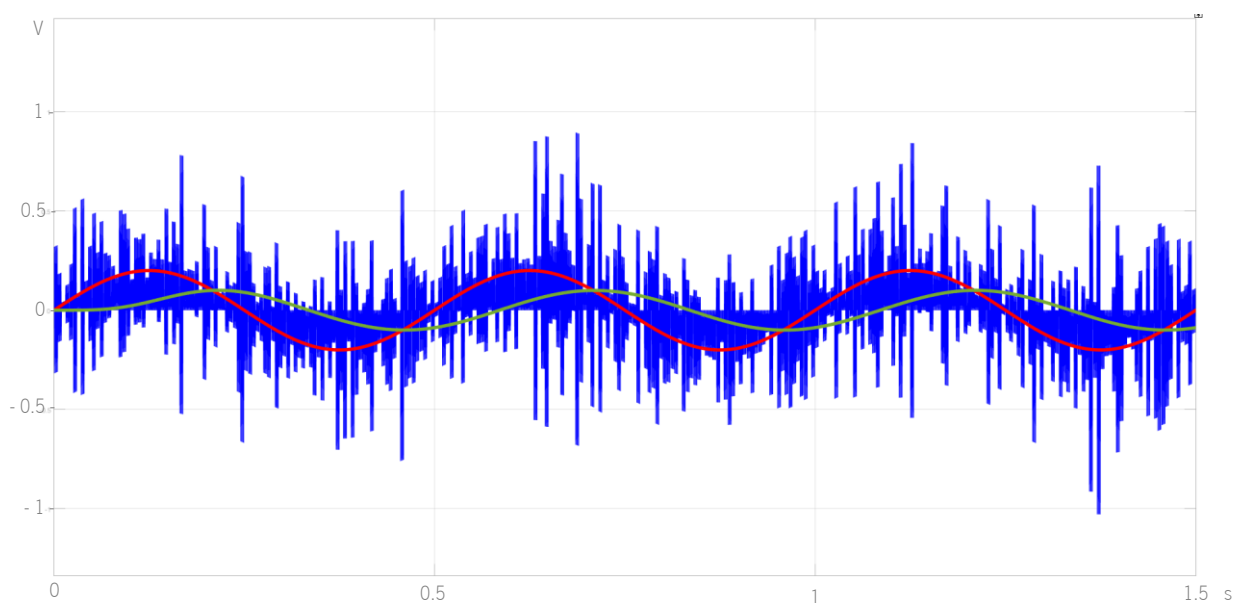


Figura 4-5 - Sinal de interesse vs Sinal de Saída vs Sinal com Ruído Associado

Relativamente ao lock-in digital, na Figura 4-6 pode-se ver a onda de entrada do sinal de interesse a vermelho, a cinza tem-se essa onda acoplada com o sinal de referência. Por fim tem-se a verde a onda à saída do filtro passa-baixo, o último bloco do *lock-in*. Verifica-se então que à saída tem-se um sinal com uma ligeira atenuação assim com na abordagem analógica. Porém o atrasado da saída em relação à entrada é inferior, assim como o tempo de estabilização inicial é mais curto. Assim como realizado no estudo analógico é adicionado um ruído à simulação para provar que o *lock-in* consegue realizar a eliminação de sinais que não estão nos valores de frequência desejados.

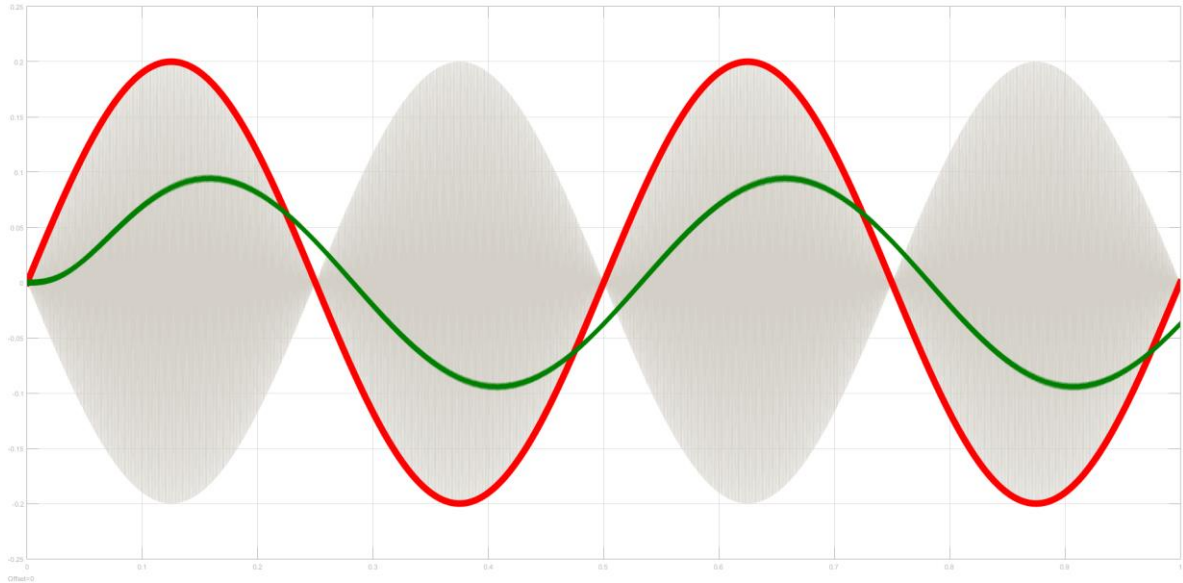


Figura 4-6 – Ondas dos Sinais do Amplificador *Lock-In* Digital

4.2.2 Filter Design and Analysis Tool

Para o desenvolvimento do *lock-in* digital torna-se crucial a simulação do bloco de filtragem. O outro bloco constituinte desta técnica requer a multiplicação dos dois sinais de entrada e uma sincronização dos mesmos.

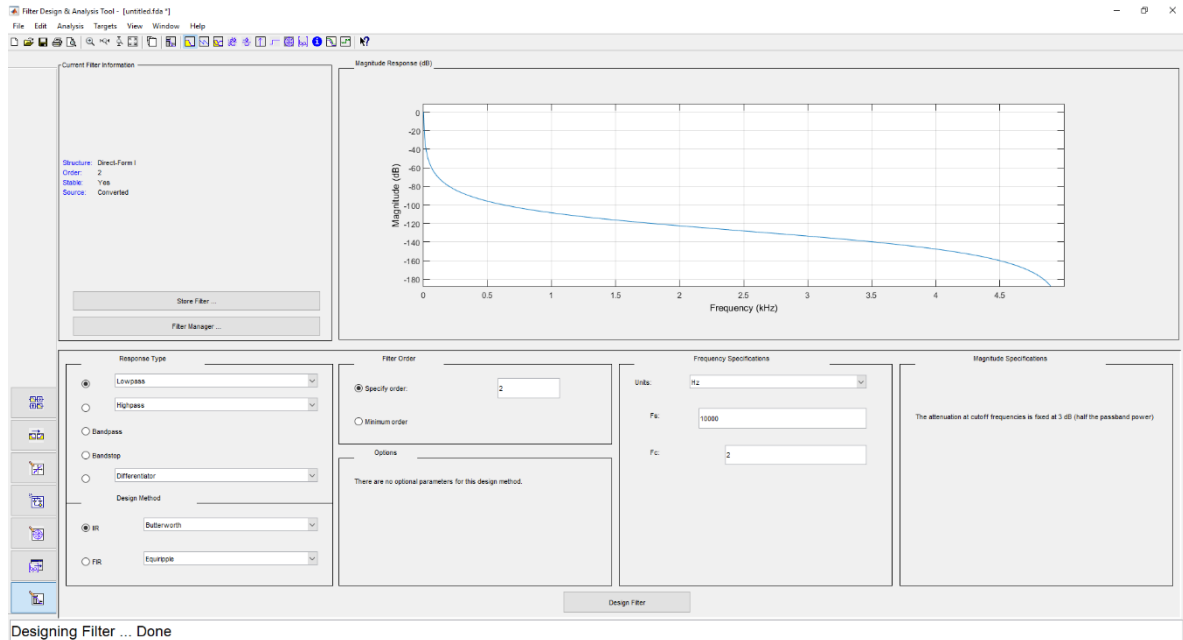


Figura 4-7 – Janela Inicial da Ferramenta *FDATool*

Pela filtragem é necessário o cálculo dos coeficientes para complementar as equações que permitem a aplicação digital do filtro passa-baixo, para tal foi utilizada a ferramenta *Filter Design and Analysis Tool*. Esta ferramenta está disponível no *Matlab*, sendo ativada ao inserir “>> *fdatool*” na janela de comandos do programa. Após o envio do comando abre uma janela que está representada na Figura 4-7. Neste ambiente de simulação é possível realizar a simulação dos vários tipos de filtros digitais e suas características, obtendo como resultado a equação final para implementação dos mesmos, assim como os seus coeficientes. No caso concreto foi selecionado um filtro passa-baixo com o método infinito do tipo *Butterworth*.

De modo a obter coeficientes que não comprometem o funcionamento da unidade de processamento de dados a ordem do filtro foi pré-definida com o valor 2. A frequência de corte foi igualmente dimensionada para o valor de 2 Hz, um valor próximo do sinal contínuo e que não compromete o funcionamento da técnica de *lock-in*. Sendo assim através desta ferramenta e com a definição destes parâmetros foi possível a construção da Tabela 4-1, que define os coeficientes para o numerador e denominador. O número de coeficientes é uma unidade superior à ordem do filtro ($N + 1$), neste caso, $2 + 1$ o que dá três coeficientes para cada parâmetro.

Tabela 4-1 - Valor dos Coeficientes, para Diferentes Frequências de Amostragem

		Frequência de Amostragem		
		10 kHz	8 kHz	6 kHz
Coeficientes	Numerador	0, 00000039443363968670564	0,00000061616576042876322	0, 0000010950006583099541
		0, 00000078886727937341127	0,0000012323315208575264	0, 0000021900013166199082
		0, 00000039443363968670564	0,0000012323315208575264	0, 0000010950006583099541
	Denominador	1	1	1
		-1, 9982228472918417	-1, 9977785594429318	-1, 9970380802018315
		0, 99822442502640052	0, 99778102410597347	0, 99704246020446474

Para a obtenção da estrutura mais simples para aplicação após realizar a função *Design Filter* deve-se proceder à conversão da estrutura do filtro para a *Direct Form I e Single Section*. Deste modo obtém-se a estrutura mais simples de implementação e os coeficientes adequados. A estrutura do filtro pode ser analisada na Figura 4-8.

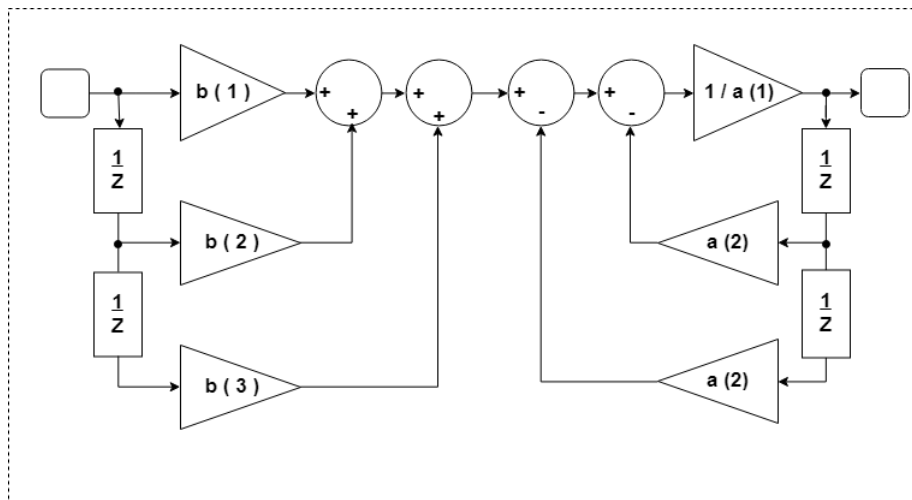


Figura 4-8 – Diagrama do Filtro Passa-Baixo

Desta estrutura do filtro retira-se o seguinte conjunto de equações. Na próxima tem-se o resultado da soma das entradas multiplicado pelo valor do coeficiente do numerador, a este valor é realizada a divisão pelo denominador:

$$b_{sum} = \frac{b_{num}(1) \times x(1) + b_{num}(2) \times x(2) + b_{num}(3) \times x(3)}{a_{den}(1)} \quad (4.1)$$

Na seguinte equação é dada a soma dos valores de saída anteriores multiplicados pelos coeficientes do denominador

$$asum = a_den(2) \times y(2) + a_den(3) \times y(1) \quad (4.2)$$

Finalmente, é realizada a subtração da soma do resultado da saída ao valor da soma da entrada:

$$y(3) = bsum - asum \quad (4.3)$$

Na Figura 4-9 pode-se observar o gráfico de saída em valores de magnitude, a vermelho, e de fase, a azul, em valores de frequência. Este gráfico é gerado pela simulação do filtro resultada da ferramenta que se utilizou para realizar a análise da filtragem.

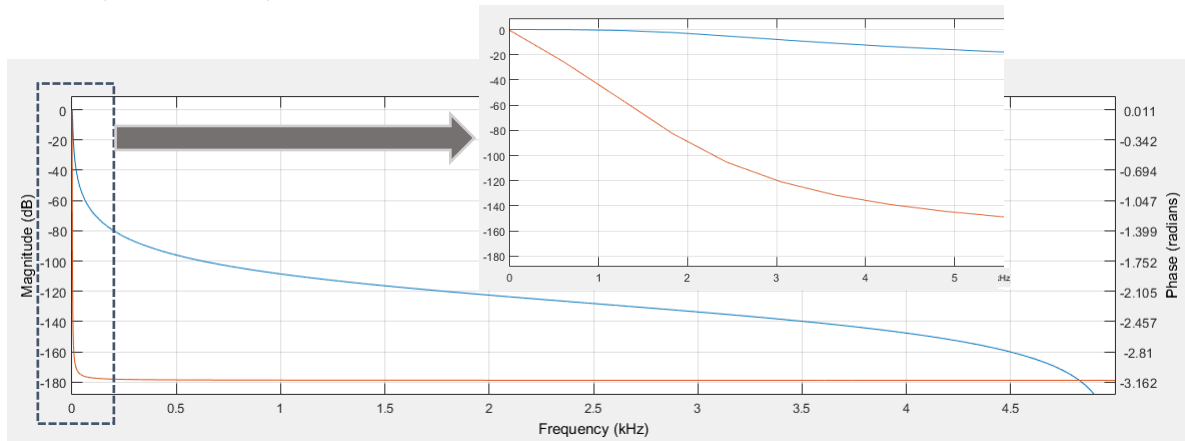


Figura 4-9 – Gráfico da Magnitude e Fase, Filtro Passa-Baixo

4.3 Desenvolvimento Prático

O desenvolvimento do projeto guia-se por duas vertentes, *software* e *hardware*. A primeira contém toda a definição da escolha da placa de desenvolvimento, assim como todo o processo de implementação do código. Por outro lado, o *hardware*, contém todas as conexões necessárias entre o mundo físico e eletrónico, componentes utilizados e respetivas características.

4.3.1 Firmware

A escolha da placa de desenvolvimento recai para um dispositivo com uma boa capacidade de processamento de sinal, memória e se possível com acesso a periféricos (ADC e DAC). A placa escolhida foi a STM32F4. O seu custo e o acesso a recursos são as vantagens desta placa.

Como referido anteriormente foram utilizadas ferramentas auxiliares (STM32CubeMx e Keil) que permitiram a implementação de todo código e respetivos recursos.

4.3.1.1 Microcontrolador - STM32F407VG

O microcontrolador da *STMicroelectronics* está agrupado em processadores de 32 bits, baseado em *ARM Cortex*. No caso da serie utilizada possui um ARM Cortex M4. Internamente cada microcontrolador consiste num core processador, RAM estática, memória *flash*, interface para *debug*, e vários periféricos. Dentro destes periféricos estão incluídos 17 temporizadores 32/16 bits com frequência de relógio 168 MHz, 1 MByte de memória Flash, 192 KByte de SRAM, 3 x 12 bit conversores de analógico para digital e a característica de ponto flutuante. Derivado aos seus periféricos, e ao simples modo de configuração foi o componente escolhido para integra o sistema de leitura desenvolvido, assumindo a responsabilidade de realizar a conversão do sinal analógico, processar dos dados, salvaguardá-los. Outra função disponível é a apresentação do resultado analógico em tempo real, sendo necessário a colocação do sinal no domínio digital.

Na Figura 4-10 está presente o diagrama da ferramenta STM32CubeMx, que a verde tem a identificação dos recursos em uso. Estes recursos são as entradas, saídas e estados da unidade de processamento. A entrada com maior significado deriva do sistema de deteção é realizada pelo ADC1. Outra entrada presente é da porta serial, que também contém a sua saída. Como saída de GPIO tem-se o PD5, que é responsável pela partilha do sinal de referência gerado internamente pela placa e PD12-15 que são responsáveis pela identificação do estado de processamento num modo de *debug*. Uma saída também em uso é o DAC, que permite a visualização do sinal de saída no domínio analógico.

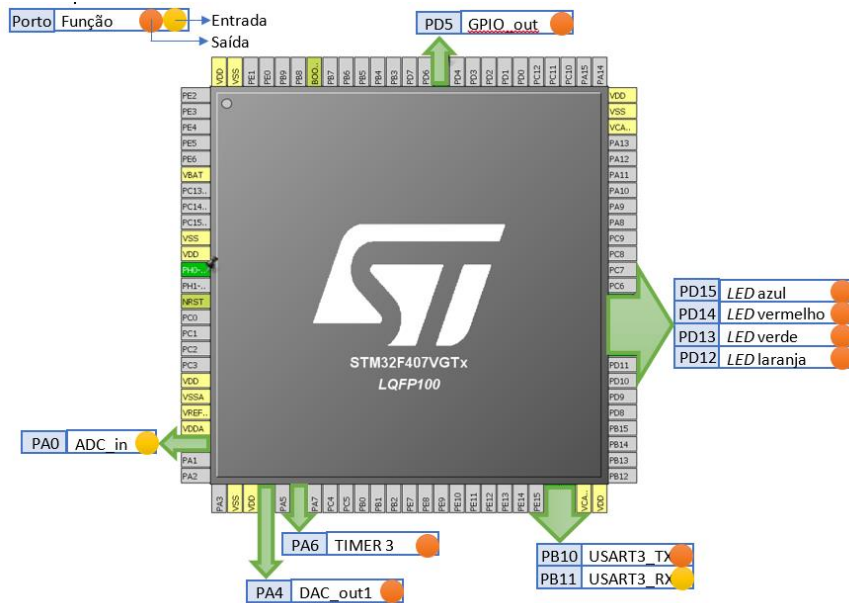


Figura 4-10 – Recursos Utilizados STM32

4.3.1.2 Implementação

No controlo da unidade de processamento é realizado a programação da mesma. Nesse programa está contida toda a configuração dos periféricos, com as bibliotecas auxiliares geradas pela ferramenta auxiliar. As configurações destes periféricos permitem a conexão aos circuitos adjacentes, assim como está contido todos os dados para a realização das operações matemáticas e as equações.

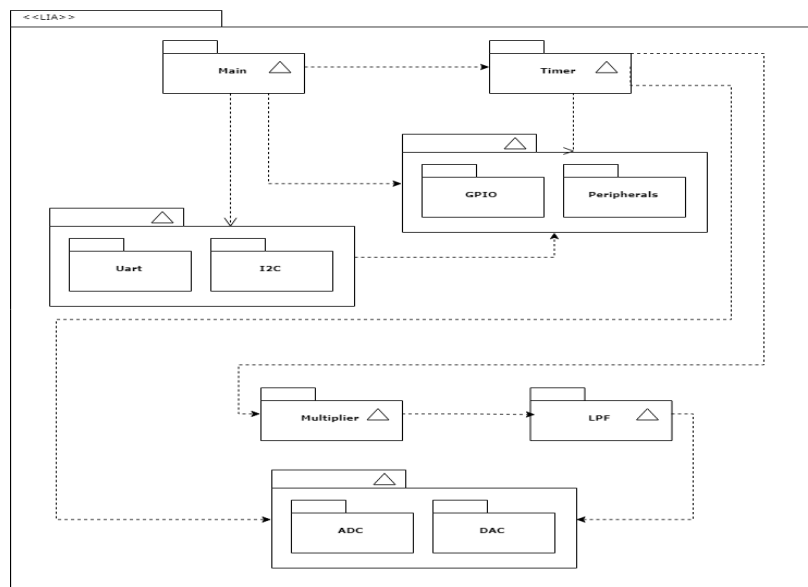


Figura 4-11 – Apresentação do Esquema de Header Files

Na Figura 4-11 estão representadas todas as classes presentes na estrutura do código. Nelas estão contidas as funções e bibliotecas dos periféricos em uso, como o caso do *timer*, ADC, DAC, GPIO

e UART. Outras classes contidas são a que contém as funções do filtro *lock-in*, *Multiplier* e as funções do filtro passa-baixo, LPF. Nestas estão presentes as equações que permitem realizar a aplicação de *lock-in* digital.

Na *main* do código está contida toda as configurações necessárias para utilização dos recursos. Estas configurações são fornecidas pela ferramenta *STM32CUBEMX* e pelos dados que podem ser alterados pelo programador. É então iniciado os recursos de GPIO, comunicação série e *timers*. Após todas as configurações terem sido realizadas é esperado pelo início do *timer*, que quando iniciar irá recolher à velocidade da frequência de amostragem os dados que estão presentes no ADC, estes dados são salvaguardados num *array*.

Em simultâneo é modulada uma onda que tem como característica de tempo a frequência de referência, que é colocada numa saída para que possa ser partilhada com o sistema de atuação. Deste modo é possível recolher os dados que provém do sistema de deteção. Quando o tempo total de amostra for atingido é iniciada a função de multiplicador e de filtragem, permitindo assim a ação do *lock-in*. A frequência de amostragem pode variar entre os 4 kHz e os 10 kHz, previamente selecionados. O número de amostras total é 30000. A frequência de referência para ser similar à abordagem analógica é 1 kHz. As características do filtro como explicado anteriormente estão definidas para uma frequência de corte de 2 Hz com uma ordem igual a 2. A unidade de processamento permite a análise em tempo real, com a limitação da seleção da frequência de amostragem no mínimo para que não haja análises nos blocos de multiplicação e de filtragem. Neste modo a entrada é de imediata enviada para o multiplicador que realizada também a chamada da função filtragem que é colocada no DAC logo após o seu cálculo.

4.3.2 Hardware - Escolha de Componentes

Nos próximos pontos são apresentados os elementos analógicos presentes no sistema solução para alcançar os objetivos propostos. Foram realizadas algumas comparações e provas de conceito dos mesmos.

4.3.2.1 Amplificador de Transimpedância

A origem do sinal, proveniente do sistema de deteção, é uma corrente cuja amplitude varia com a variável física a ser medida, portanto é necessário realizar a conversão para tensão. Para tal é usado o amplificador de transimpedância. Este bloco de transimpedância, é fundamental que os circuitos usados não interfiram na qualidade do sinal. Para isso, é necessário selecionar um amplificador operacional com baixo ruído, baixa tensão de offset e uma corrente de polarização (*bias*) bem menor que a intensidade do sinal expectável. O ADA4522-2 apresenta as características pretendidas [25]

Tabela 4-2 – Especificações elétricas do amplificador operacional ADA4522-2

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de <i>offset</i>	5	μV
Nível de ruído	5,8	nV/√Hz
Corrente <i>I_{bias}</i>	50	pA
Corrente <i>Offset</i> de entrada	80	pA

Este componente ainda apresenta a possibilidade de ganho que é dado sob a forma da divisão da tensão de saída pela corrente de entrada:

$$A = \frac{V_o}{I_i} = R_f \quad (4.4)$$

Na Figura 4-12 é possível ver o circuito do bloco de transimpedância. O valor de R_f é que controla o ganho deste bloco. O uso do C previne as oscilações da tensão à saída do circuito.

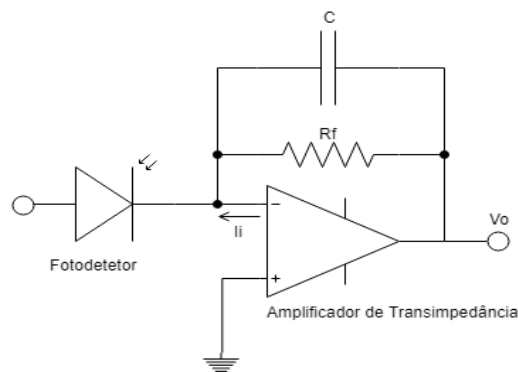


Figura 4-12 – Configuração do Circuito de Transimpedância

4.3.2.2 Amplificador

Para retirar o maior proveito da resolução do AC, é implementado o circuito de amplificação. Para tal é necessário um amplificador operacional, o componente seleccionado foi o OP07CSZ. Quando comparado com um dos amplificadores operacionais tradicionais, por exemplo, TL084 tem-se uma tensão de *offset* inferior no componente seleccionado [26][27].

Tabela 4-3 - Especificações elétricas dos circuitos integrados TL084 versus OP07CSZ

Parâmetro	Valor [TL084]	Valor [OP07CSZ]	Unidade
Tensão de <i>offset</i>	3000	30	μV
Nível de ruído	15	10,3	nV/√Hz
Corrente <i>I_{bias}</i>	20	1200	pA
Corrente <i>Offset</i> de entrada	5	500	pA

A principal diferença encontra-se na tensão de *offset*, pelo que o OP07CSZ se destaca. Outra vantagem é o facto de este permitir a introdução de uma resistência variável, possibilitando assim o ajuste da tensão de *offset*.

Na Figura 4-13 pode-se ver a configuração do circuito de amplificação, onde o ganho é dado pela equação seguinte.

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \times V_i \quad (4.5)$$

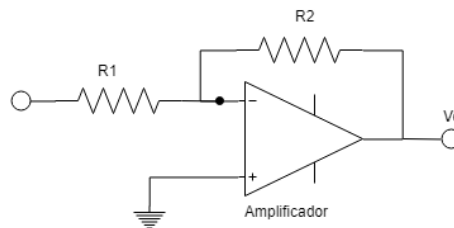


Figura 4-13 - Circuito de Amplificação

4.3.2.3 Controlo Fonte Emissora

O transistor 2N2222 é usado no circuito de comutação da fonte emissora. Neste caso específico o uso deste transistor é para a comutação do circuito, para que a frequência de referência controle a alimentação do LED, através do sinal obtido num pino de saída do microcontrolador.

Na Figura 4-14 pode-se ver o circuito de comutação que é a base do sistema de atuação.

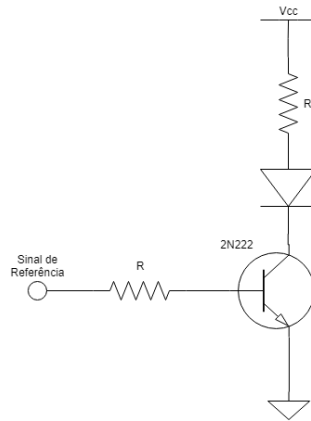


Figura 4-14 - Circuito de Comutação da Fonte de Excitação

4.3.2.4 Fonte Emissora

O LED será utilizado como fonte emissora de luz para excitar os pigmentos fotossintéticos presentes nas diferentes amostras de microalgas. Na sua escolha foram tidas em conta algumas características, tais como, o pico de comprimento de onda, o fluxo luminoso, o tamanho e o preço. Uma das características do LED é apresentar grande intensidade luminosa. Posto isto, escolheu-se o LED LUXEON Rebel Royal Blue da LUMILEDS, apresentado na Figura 4-15.

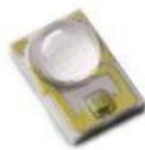


Figura 4-15 - LED Rebe Royal Blue

Este componente escolhido apresenta o seu pico nos 450 nm, suporta correntes até 700 mA e tem uma área de 1 mm². A Figura 4-16 é o gráfico representativo do da curva da intensidade do componente sobre o comprimento de onda emitido.

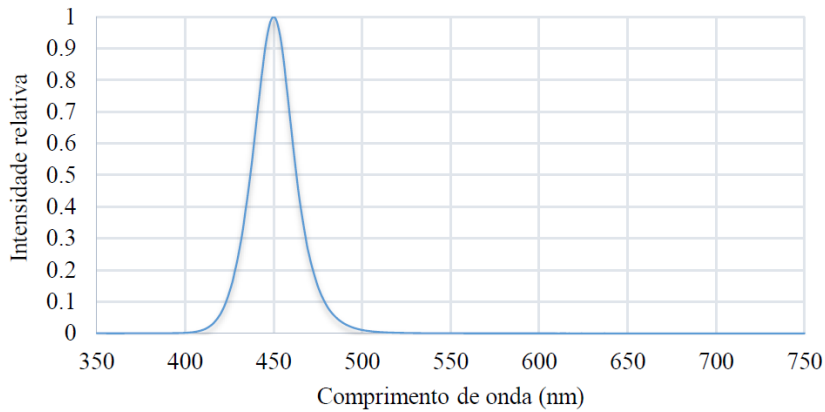


Figura 4-16 - Curva Característica do LED

4.3.2.5 Fotodetetor

O tipo de fotodetetor escolhido foi um fotodíodo de silício. São dispositivos semicondutores capazes de gerar um fluxo de corrente, proporcional à luz que nele incide, devido à sua capacidade de absorção de fótons. São muito utilizados nas aplicações de espectrofotometria, fotografia, e também como sensores de posição ótica, entre outras.

Na Tabela 4-4 estão apresentadas as características do fotodetetor utilizado, Hamamatsu S5971.

Tabela 4-4 - Características do Fotodetetor

Parâmetro	Hamamatsu S5971	Unidade
Tensão reversa	10	V
Capacidade	3	pF
Resistência de <i>shunt</i>	50	Ω
Corrente de pico	10	nA
Fotossensibilidade	0.44	A/W
Área	1.1	mm ²

4.3.2.6 Filtro Ótico

O filtro ótico tem como função deixar passar para o fotodetetor apenas a luz correspondente à gama espectral de interesse, sendo o seu pico de fluorescência é centrado nos 682 nm. Isto é, o filtro tem como objetivo rejeitar todos os comprimentos de onda diferentes da gama espectral de interesse, como por exemplo, a luz proveniente do LED tem comprimento de onda situado nos 450nm e toda a luz que possa interferir com a medição. Posto isto, e com base em algumas características, tais como, largura de banda, diâmetro, transmissão e preço, o filtro escolhido foi o 685AF40 da marca OMEGA OPTICAL. Este filtro apresenta uma largura de banda passante compreendida entre 650 nm e 705 nm, uma transmissão superior a 85 % e um diâmetro de 4.5 mm.

Capítulo 5

Teste e Resultados do Sistema de Leitura

Neste capítulo será apresentada toda a implementação e respectivos testes. São analisadas as várias características do sistema de leitura. Os resultados são também equiparados com o sistema similar de tratamento de sinal com uma abordagem analógica, e com os resultados de um fluorímetro de laboratório. É também apresentado o sistema de atuação, que gera a luz pulsada à frequência do lock-in, através de LEDs.

5.1 Arquitetura do Sistema Final

A arquitetura do sistema é a junção do sistema de leitura desenvolvido, análise abordagem analógica ou digital, com o sistema de atuação e sensorização, conjunto de circuito de comutação do LED com o circuito do fotodetector.

A nível do sistema de leitura, as duas abordagens em análise utilização a mesma técnica de *lock-in* alterando unicamente os seus blocos de análise em coerência com os métodos aplicados. No circuito de comutação da fonte de excitação, usou-se a fonte variável de tensão como fonte de alimentação do circuito e um transistor bipolar 2N2222. Já no circuito que permite a deteção de luminosidade, é usada um passa-banda ótico que permite a seleção de um comprimento de onda específico e depois têm a respetiva eletrónica adjacente.

A escolha dos componentes tem por base a disponibilidade de artigos disponíveis de uma forma fácil e de custo reduzido. Numa fase inicial foram usadas diferentes referências, porém no final são apresentados os componentes com melhor desempenho.

5.1.1 Abordagem Analógica

O amplificador Lock-in é constituído por cinco principais blocos: amplificador de transimpedância filtro passa banda amplificador multiplicador e filtro passa baixo.

Uma vez que é necessário deslocar o sinal desejado para frequências elevadas, para o desviar das frequências características de ruído dos circuitos integrados, a fonte emissora de luz terá que ser pulsada à mesma frequência garantindo assim a sincronização dos blocos do amplificador *lock-in*. O sinal usado como referência será o mesmo que pulsa a fonte emissora de luz, para que ambos se encontrem em fase no bloco multiplicador.

O amplificador de transimpedância, ligado ao fotodetector, permite que o sinal gerado pelo fotodetector seja convertido em tensão. O sinal embebido em ruído, além de convertido, será também amplificado para um nível adequado à entrada do multiplicador. Na maioria dos componentes eletrónicos, quanto menor é a frequência maior será o ruído associado. Afastando o sinal de interesse das baixas frequências, possibilita a deteção de sinais de amplitude bastante reduzida, como é o caso em estudo. Isto é conseguido através da modulação da fonte emissora de luz (pulsada a 1 kHz), deslocando o sinal desejado para as frequências de menor ruído. O circuito de leitura possui duas entradas, em que uma delas corresponde à corrente gerada pelo fotodetector e a outra ao sinal de comutação da fonte emissora de luz. Esse sinal de excitação é usado para a comutação da fonte emissora de luz e como sinal de referência, garantindo a sincronização das fases dos sinais no módulo de multiplicação no circuito de leitura. O filtro passa-banda isola o sinal pulsado, removendo as frequências indesejadas. O bloco de amplificação tem como principal objetivo a diminuição do ganho aplicado ao amplificador de transimpedância para que o nível de ruído introduzido seja menor. O bloco multiplicador permite recuperar o sinal de interesse de baixa frequência. Este, deslocará o sinal que até esta fase se encontrava pulsado a 1 kHz, para o domínio contínuo (DC), rejeitando todos os sinais que não estejam sincronizados com a referência de excitação. Por último, o filtro passa-baixo é responsável por eliminar o ruído que se encontra a frequências superiores à frequência de corte, obtendo assim o sinal desejado limpo e sem ruído.

5.1.2 Abordagem Digital

No domínio digital é simplificada a utilização destes blocos. A utilização de componentes leva à introdução de ruídos no sistema pelo que o filtro passa banda a nível digital torna-se desnecessário. Os blocos de multiplicação e passa baixo, as duas componentes da técnica do *lock-in*, a nível digital são implementados como referido no capítulo anterior, sendo que estes acabam por ser mais simplistas no domínio matemático.

A utilização de uma unidade de processamento digital obriga à utilização de um conversor analógico para digital, para que o sinal proveniente do sensor seja convertido para ser analisado por esta unidade. A placa de desenvolvimento selecionada tem disponível periféricos que realizam esta conversão até uma resolução de 12 bits. Deriva ao sinal do sensor ser no domínio da variação da corrente torna-se necessário a permanência de utilização de um amplificador de transimpedância assim como o usado no domínio digital. E para uma melhor aquisição deste sinal, agora em tensão, também se optou por utilizar um amplificador para ter uma pré-amplificação antes da conversão do sinal.

5.1.3 Aplicação Específica

O sistema solução é apresentado na Figura 5-1, nele estão incluídos os sistemas adjacentes do sistema global. A laranja tem-se o sistema de atuação onde está presente a serie de dois LED's que permite a excitação da clorofila presente na amostra de água. A amarelo tem-se o sistema de deteção, este responsável pela deteção da luz resultante da fluorescência. A azul está presente a placa desenvolvida para a solução analógica, desta foram usados o andar de amplificação, o componente de transimpedância e respetivos conectores aos restantes sistemas. A preto pode-se observar a alimentação necessária para o sistema.

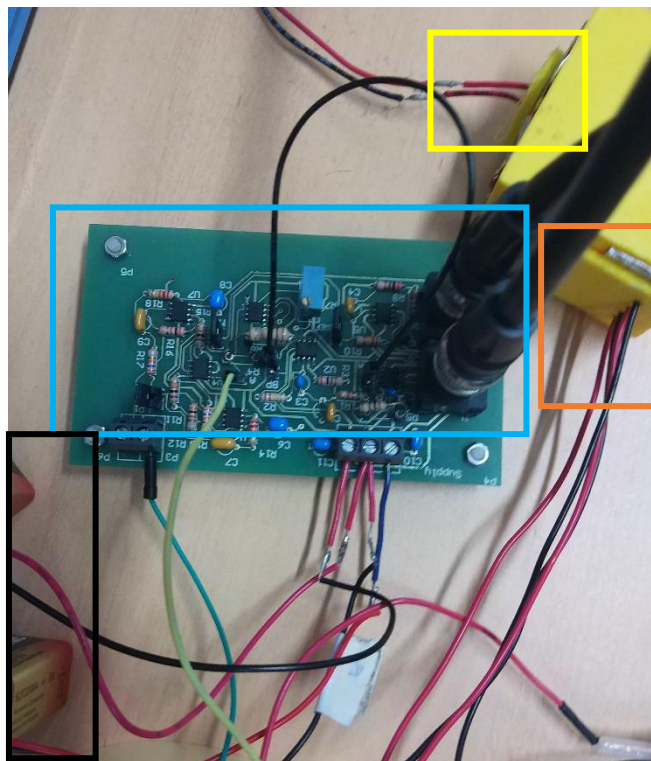


Figura 5-1 – Sistema Global

Para esta dissertação o foco de utilização é a uso do sistema para quantificação de clorofila numa amostra de água. Uma amostra de água com fitoplâncton é excitada com luz, através de um LED de comprimento de onda de 450 nm, à frequência do amplificador lock-in. Um fotodetector sob um filtro ótico passa-banda, converte a fluorescência da amostra em corrente, a ser medida pelo amplificador. Para reduzir a interferência da fonte de luz no fotodetector, este é posicionado perpendicularmente à fonte de luz, de forma a diminuir a quantidade da luz proveniente da fonte de excitação que atinge o detetor. O uso de um filtro ótico na lente do fotodetector, sintonizado para o comprimento de onda correspondente à fluorescência (685 nm), permitirá atenuar os sinais de comprimentos de onda diferentes do expectável na fluorescência, isolando o sinal de interesse.

5.2 Sistema de Leitura Digital

Na abordagem digital do sistema de leitura em estudo são usados blocos provenientes da técnica analógica que serve de margem de comparação. Para a integração do sistema de detecção e atuação é usada a mesma eletrônica, quanto aos blocos do sistema de leitura são mantidos para a instrumentação do sinal o bloco de transimpedância e o amplificador operacional. Coloca-se só uma ligeira alteração no andar que permite o ganho do sistema para que toda a resolução seja aproveitada pelo conversor A/D.

Como referido anteriormente a placa de desenvolvimento é a STM32F4, nela foram utilizados como recursos de entrada o seu ADC; a entrada e saída da porta série; e como saídas um pino de GPIO para o sinal de referência e outro para o DAC que permite a saída num sinal analógico.

A implementação do código foi explicitada anteriormente, como referido este é modelável para determinadas frequências de amostragem assim como o filtro passa-baixo pode ser mudado na sua ordem.

Na Figura 5-2 pode-se observar a unidade de processamento que se conecta aos restantes blocos presentes na Figura 5-1. São então ligados os sinais de referência a partir do microcontrolador e o sinal de entrada proveniente da eletrônica analógica em uso.

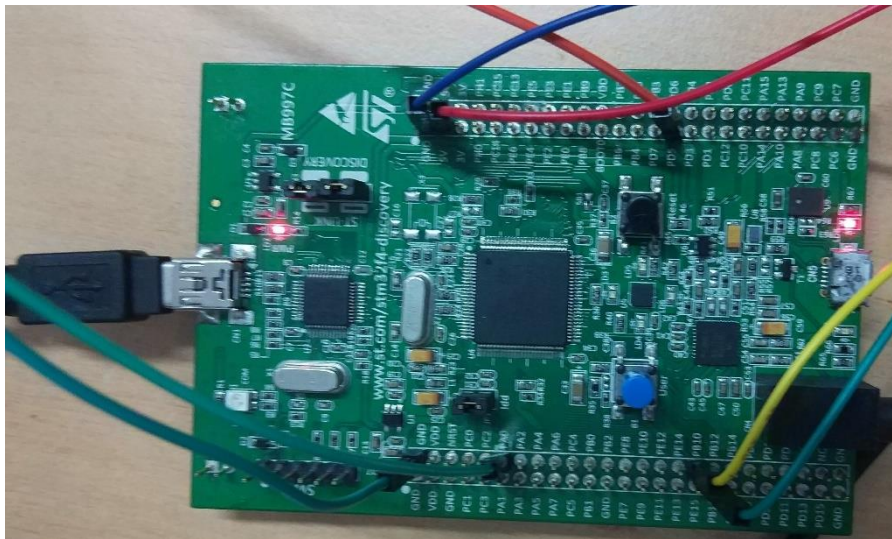


Figura 5-2 – Unidade de Processamento de Sinal

O ambiente de desenvolvimento integrado utilizado foi o Keil uVision 5. O envio do código é através do programador e debugger fornecido pela STMicroelectronics chamado de ST-LINK/V2, que esta integrado na placa de desenvolvimento é programada através da ferramenta *Keil* através da entrada USB da placa. Também usada a porta série para que os dados que estão armazenados na memória na placa sejam partilhados.

5.2.1 Teste e Caracterização do Sistema de Leitura

Nos seguintes pontos são apresentadas as características do sistema de leitura digital. Para tal foram definidos parâmetros base, onde a frequência de corte do filtro passa-baixo é de 2 Hz. O sinal de entrada tem uma tensão de 2 Vpp, sendo que este é sempre pulsado pela onda de referência de 1 kHz e a sua componente tem como valor de frequência 1 Hz.

Na Figura 5-3 pode-se visualizar o sinal de interesse com a frequência de 1 Hz como referido anteriormente. Este sinal tem como origem um gerador de sinais externo.

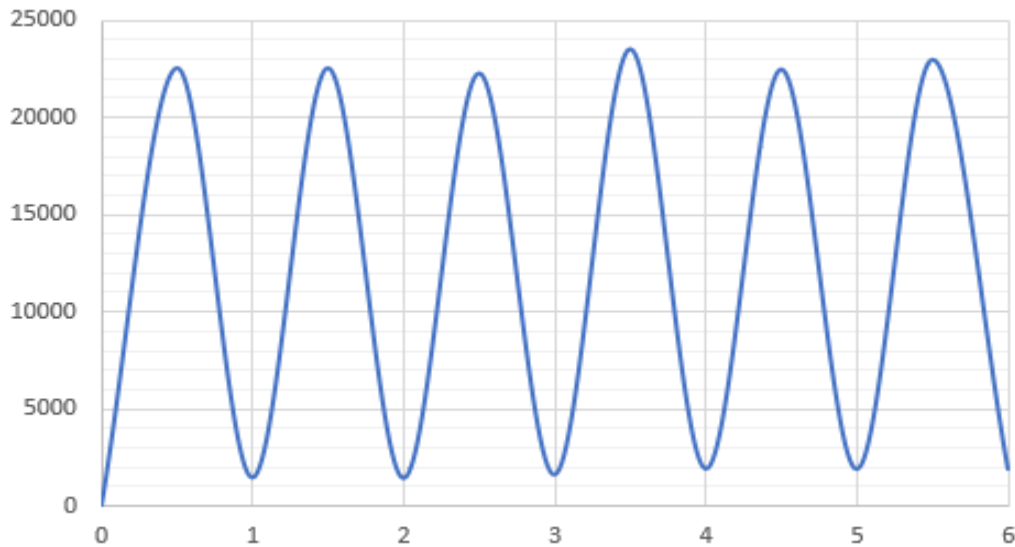


Figura 5-3 – Sinal de Interesse [1 Hz]

A Figura 5-4 é um excerto do sinal de entrada, onde a sua origem descende do sinal de interesse que é modelado pelo sinal de referência, onda portadora com frequência de 1 kHz. A ampliação da figura

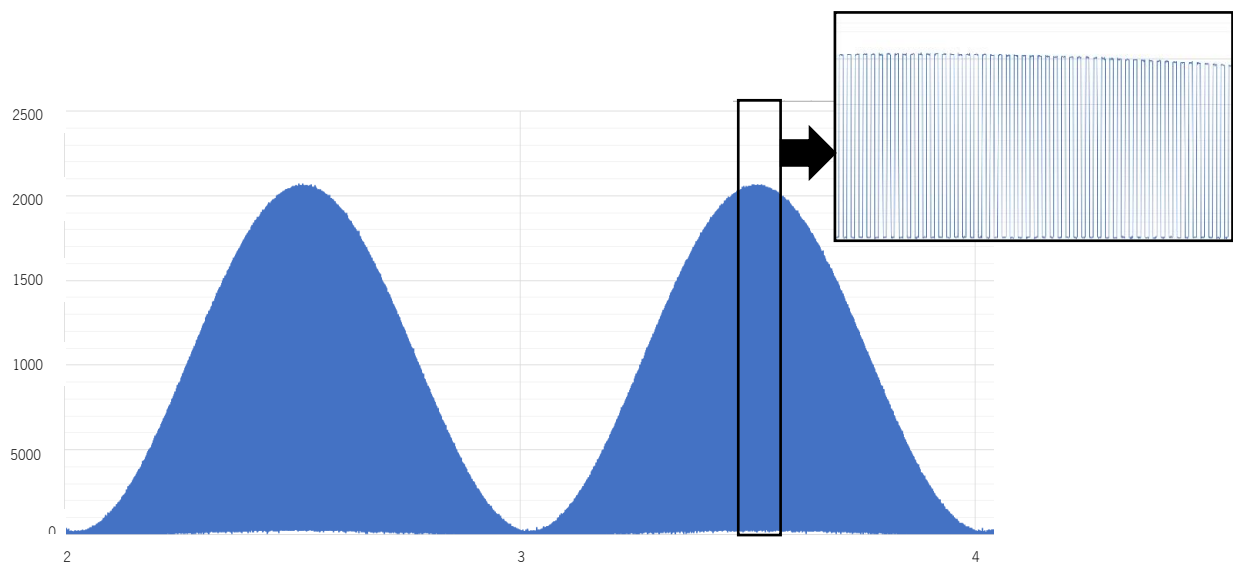


Figura 5-4 – Sinal de Entrada, Modulação de 1 kHz do Sinal de Interesse

permite observar a transição do sinal da portadora. A modulação foi realizada externamente recorrendo a um multiplicador que permite o resultado da figura.

5.2.1.1 Caracterização Frequência Sinal

Inicialmente realizou-se o teste da variação da frequência do sinal de entrada, modulado a 1 kHz. Este permite comprovar o método de funcionamento do *lock-in* derivado à multiplicação que recupera o sinal de baixa frequência e amplitude e ao filtro passa-baixo que elimina todas as altas frequências considerando estas ruído. Na Figura 5-5 é possível verificar que à medida que a frequência do sinal de entrada vai aumentando o filtro passa-baixo vai baixando a componente do sinal permanecendo o valor médio da componente próxima do contínuo.

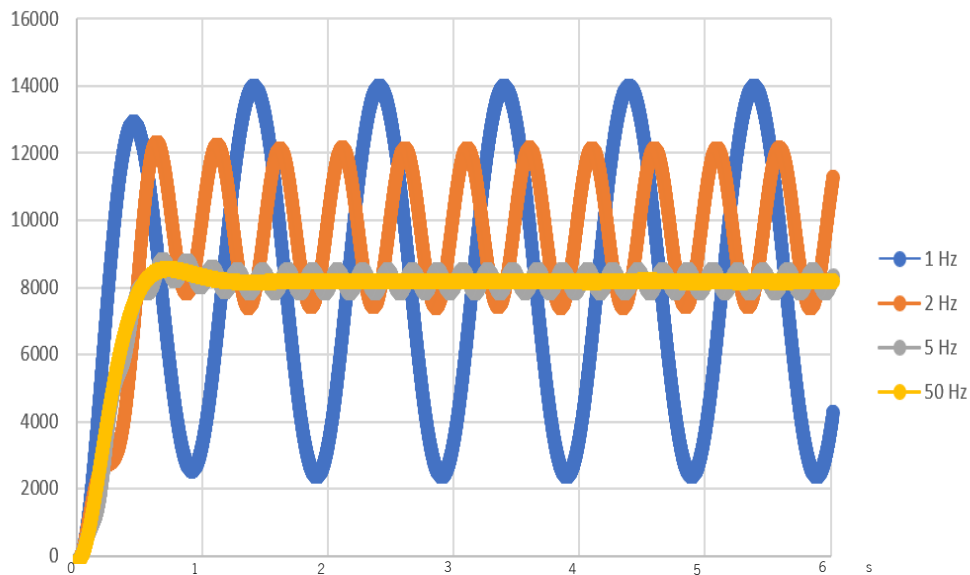


Figura 5-5 – Gráfico de Saída para Diferentes Sinais de Entrada

5.2.1.2 Caracterização Resolução

A resolução do periférico de conversão analógica para digital também é de elevada importância, pois como o sinal de entrada pode ser de baixa amplitude torna-se essencial analisar a capacidade de resolução do sistema na captação proveniente do sistema de deteção. A placa utilizada permite a utilização de 12, 10, 8 e 6 bits de resolução de ADC interno. Deste modo testou-se os vários valores do ADC, usando como entrada um sinal de 1 Hz, com uma amplitude de 2 Vpp, pulsado a 1 kHz.

Na Figura 5-7 e na Figura 5-6 pode-se ver a saída do sistema variando a resolução do ADC. Atentando que com 6 bits de resolução obtém-se uma saída idêntica à de 12 bits, não atingindo a saturação do sistema, porém pode-se verificar que se demora um pouco mais a realizar a estabilização do sinal de saída, cerca de 500 ms na resolução de 6bits valor superior aos 250 ms quando o ADC tem o maior número de bits. Na análise dos gráficos o valor do eixo vertical vai diminuindo ao mesmo tempo que o número de *bits* diminui derivado ao fim de escala ser menor quando a resolução do ADC reduz.

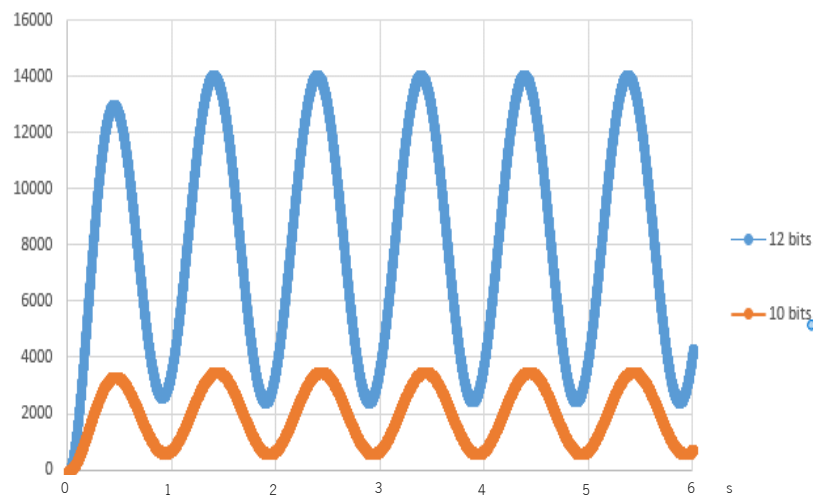


Figura 5-7 – Gráfico de Saída para Diferentes Resoluções de ADC [12-10bits]

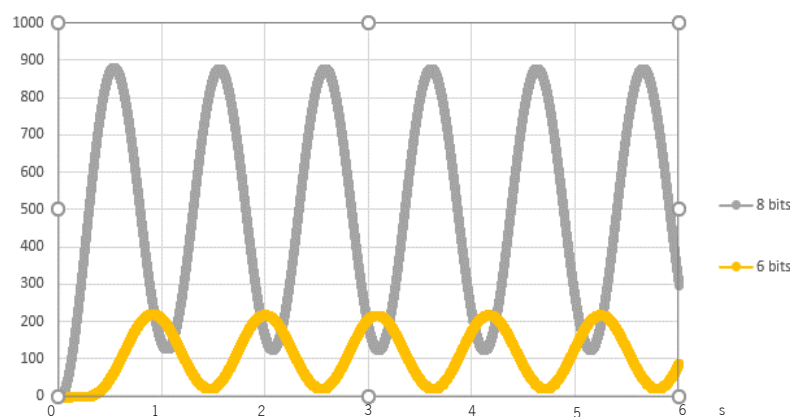


Figura 5-6 – Gráfico de Saída para Diferentes Resoluções de ADC [8-6bits]

5.2.1.3 Caracterização Frequência de Amostragem

Outra das características testadas na unidade de processamento é a variação da frequência de amostragem. Esta é importante para que o sinal recuperado seja captado pelo ADC e consequentemente seja tratado pelo processador. Para tal gerou-se uma onda de 2 Vpp com uma frequência de 1 Hz, esta onda foi modulada a 1 kHz, frequência de referência. Realizou-se então a alteração da frequência de amostragem na unidade de processamento. Recolheu-se os dados que são apresentados na Figura 5-8

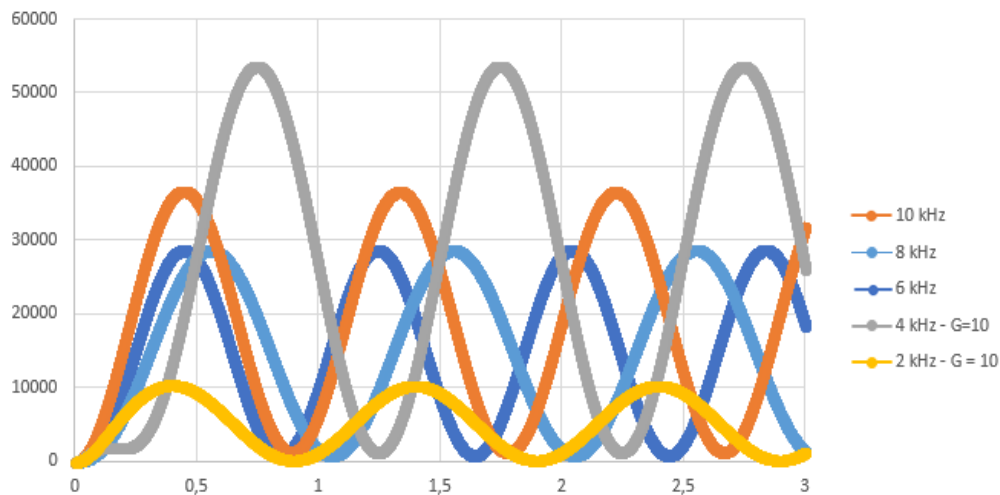


Figura 5-8 – Gráfico da Saída para Diferentes Frequências de Amostragem

Verifica-se então que para frequências de amostragem menores o sinal de entrada começa a perder parte da componente contínua. Nas frequências de amostragem de 2 kHz e de 4 kHz inseriu-se um ganho digital de valor para que fosse visível na escala vertical a sua acção. Para que esta componente não seja perdida o a frequência de amostragem deve ser superior aos 6 kHz. Nas frequências maiores a 6 kHz a amplitude tem maior valor derivado à frequência de amostragem conseguir detetar o pico com maior precisão,

5.2.2 Teste com Recurso ao DAC

Após a análise da resposta do sistema testou-se a saída analógica com recurso ao DAC da placa de desenvolvimento. Na Figura 5-9 tem-se a imagem do osciloscópio onde a azul está a entrada do sinal de entrada modulado pelo sinal de referência. A amarelo tem-se o sinal de saída após a filtragem do *lock-in*. Verifica-se que foi removido qualquer sinal de referência ou da ordem do mesmo, restando unicamente o sinal de interesse. É então demonstrado que o sinal de saída pode ser apresentado no domínio digital.

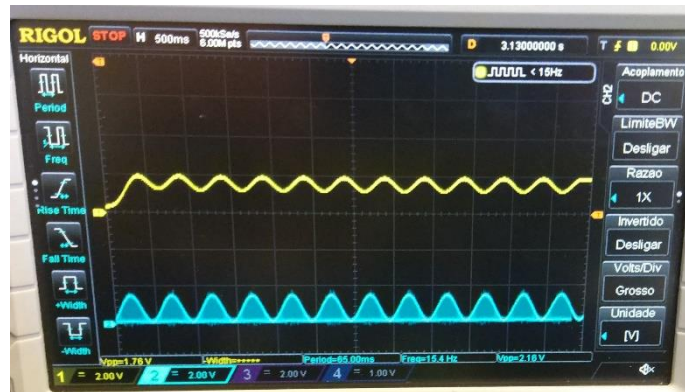


Figura 5-9 - Gráfico do Osciloscópio, Sinal de Entrada e Saída

5.2.3 Teste com o Sistema de Medição de Clorofila

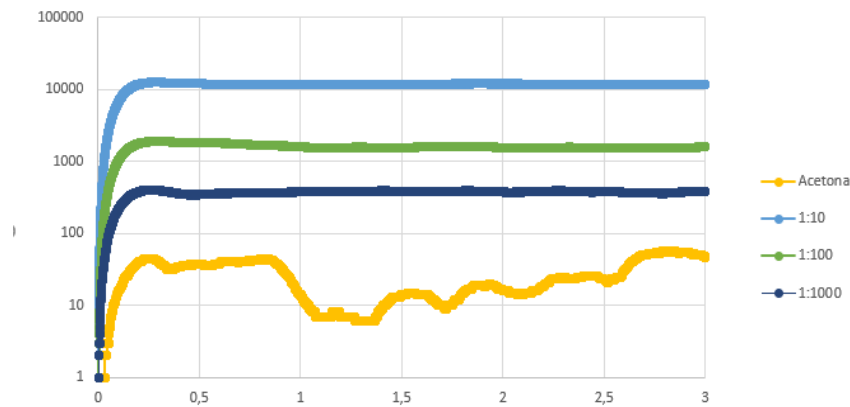


Figura 5-10 – Gráfico de Saída para Diferentes Concentrações de Clorofila

O teste seguinte consiste na integração do sistema de leitura com os sistemas de atuação e deteção, obtendo-se o sistema de medição de clorofila em fitoplâncton, conforme descrito na secção 5.1.3. A Figura 5-10 apresenta os resultados para as medições de diferentes concentrações assim com a amostra base, acetona. Esta representa o valor mínimo detetável, ou seja, uma solução equivalente à amostra, mas sem a presença de fitoplâncton, correspondendo ao “zero” na medição de clorofila. As

linhas 1:10, 1:100 e 1:1000 representam amostras em que a clorofila foi diluída respetivamente 10, 100 e 1000 vezes.

Nos testes realizados foram recolhidas amostras da cultura de fitoplâncton e diluídas em várias quantidades de acetona. Assim, 1 mL de fitoplâncton foi diluído em 9, 99, 999 mL, perfazendo as proporções de 1/10, 1/100 e 1/1000. Essas amostras das diluições estão representadas na Figura 5-11.

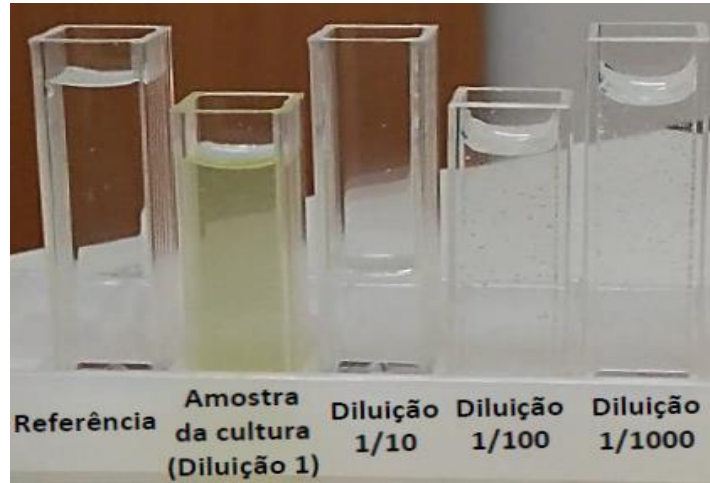


Figura 5-11 - Amostras das Diluições em Teste

Os resultados derivados do sistema com a abordagem analógica enquadram-se nos resultados à saída do sistema de leitura digital, respetivamente aos dados armazenados.

De modo a comparar o funcionamento do sistema de medição desenvolvido, foram realizados os testes de detetabilidade, com o equipamento laboratorial Fluorolog Horiba Jobin Yvon. O princípio de funcionamento é semelhante ao desenvolvido, no entanto tem a capacidade de realizar o varrimento de um intervalo de comprimentos de onda de excitação e medir o espectro de emissão da amostra.

Assim, foram realizadas as diluições até à proporção de 1/10000 (esta diluição atinge a detetabilidade do dispositivo desenvolvido) e medida a intensidade do pico de fluorescência. Os valores obtidos estão apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5-1 - Valor da intensidade de fluorescência da clorofila

Diluições	Pico de fluorescência (u.a.)
Amostra original (Diluição 1)	5,28E+06
Diluição 1/10	1,29E+06
Diluição 1/100	1,65E+05
Diluição 1/1000	3,14E+04
Diluição 1/10000	1,92E+04

A fiabilidade destes testes é comprovada com a utilização de um fluorímetro laboratorial que apresenta resultados na mesma média.

Até à diluição de 1/1000 temos um valor de saída superior ao da acetona pura. Esta resolução é idêntica aos valores que o sistema analógico conseguia atingir.

Na Figura 2-1/Figura 5-12 tem-se na eixo vertical da esquerda a tensão de saída expressa em volts que é representado pela linha azul que apresenta os resultados do sistema analógico. E no eixo vertical contrário encontra-se o intervalo de valores digitais que se obteve no sistema digital que é representado pela linha laranja.

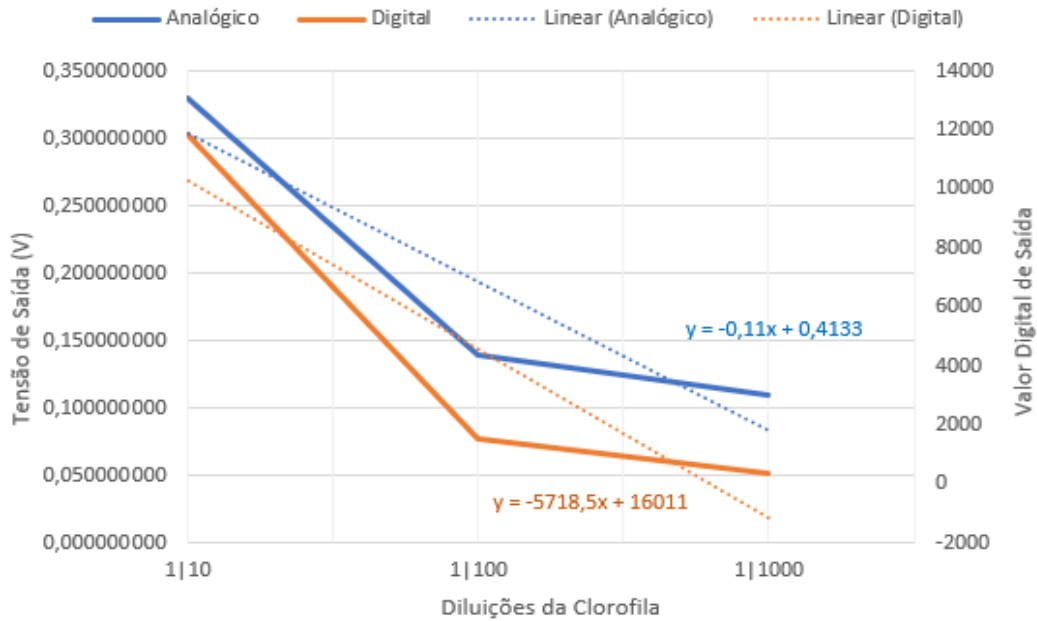


Figura 5-12 - Tensão de Saída (Analógico) em Comparação com Valor Digital (Digital)

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

Neste último capítulo é apresentada a preceptiva do autor referente ao desenvolvimento desta dissertação. São debatidos os resultados finais, é feita uma reflexão quanto a melhoramentos ao sistema de leitura, assim como alterações a realizar na interligação a outros sistemas e ao meio envolvente. É então feita a análise geral do sistema global e sobre a sua prestação.

6.1 Conclusões Gerais

A preocupação crescente destas mesmas alterações, tem levado a comunidade científica, a querer entender e perceber todos os fenómenos que acontecem no meio marinho, mas fundamentalmente, a desenvolver uma gestão das zonas costeiras que permita a antecipação de todos estes fenómenos com base numa monitorização contínua e eficiente do meio subaquático.

Os objetivos enunciados no início desta dissertação foram cumpridos. O sistema global que foi enunciado ao longo do documento revelou resultados dentro o intervalo esperado. Numa fase inicial verificou-se todas as características que estavam adjacentes à unidade de processamento. Os testes realizados ao sistema de leitura permitiram realizar a análise às características como frequência de sinal, resolução do ADC e frequência de amostragem. Os coeficientes presentes nas equações do filtro passa-baixa digital foram alvo de análise e verificação de resposta.

A implementação do estudo do sistema de leitura capaz de detetar e medir sinais de baixa amplitude foi concluído com sucesso. Dado que o sistema implementando foi capaz de detetar e diferenciar as várias diluições de amostras de uma forma viável. Este sistema de leitura revelou-se versátil e modelável, a unidade de processamento conseguiu realizar as tarefas que lhe eram destinadas. A saída deste sistema era salvaguarda na memória e partilhada via porta série, valores digitais. Porém, a saída em domínio analógico também foi concebida e testada. O DAC presente na placa de desenvolvimento era o recurso usado para colocar a saída no domínio digital.

A abordagem com a adição de uma unidade de processamento permite um sistema com métodos de funcionamento mais eficazes e com maior simplicidade. A interação do sistema global também se torna simples e modelável. Outra vantagem é a possibilidade de armazenamento de sinal de uma forma autónoma e durante o intervalo de tempo desejado.

Ao longo do estudo foram encontrados alguns problemas, tanto a nível eletrónico como biológico. Porém quando realizada a comparação com um fluorímetro laboratorial e com o amplificador de técnicas analógicas a gama de valores é idêntica. Deste modo pode-se concluir que o sistema global apresentado como solução deste projeto apresenta resultados positivos e com resolução suficiente para realizar a diferenciação entre diluições.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema global cumpre os requisitos impostos, podendo ser utilizado em variadas aplicações. A integração deste sistema com os adjacentes, deteção e atuação, permite que sejam alterados consoante a aplicação que se pretende. O sistema de leitura pela componente digital permite a versatilidade de ser moldável.

6.2 Trabalho futuro

Apesar da satisfação dos resultados obtidos e de toda a prova de conceito do sistema desenvolvido, existe ainda melhorias que podem ser implementadas para aperfeiçoar o projeto.

Iniciando pelo sistema global deve-se optar por uma solução mais compacta com os seus subsistemas, ou seja, é necessário colocar todos os componentes na mesma estrutura de forma a que esta tenha a menor dimensão possível e seja rentabilizada no volume ocupado e na disposição dos seus constituintes.

Na unidade de processamento pode ser adicionado uma melhoria no *firmware* que permite a decimação do sinal para que este seja de mais baixo consumo de armazenamento. Esta ação requer a adição de um bloco dentro do sistema de leitura que seria responsável pela tarefa de decimação.

Já o sistema de leitura pode-se implementar um modo automático para que a amostra seja analisada numa cadencia de tempo sem a necessidade da interação do utilizador.

No sistema de atuação é necessária uma retificação da luminosidade proveniente do LED, neste momento a abertura da série de LED's é elevado, o que faz com que a luminosidade seja desperdiçada para as paredes da estrutura.

Pelo lado do sistema de deteção o filtro ótico deve ser acoplado ao fotodetector de modo a que não esteja colocado depois da armação do mesmo, ficando de outra forma mais próximo do fotodetector e consequentemente mais próximo da amostra.

Numa etapa final, para a implementação do sistema num local remoto, será necessário redesenhar o sistema de modo a contruir uma estrutura que permita a integração dos três sistemas em interação. A estrutura deve permitir a análise de uma amostra real, sendo que toda a eletrónica deve estar selada de modo a que não seja danificada pelo meio aquático. O dispositivo deverá ser alimentado por baterias carregadas por fenómenos físicos presentes no meio envolvente, sendo o objetivo futuro, o desenvolvimento de um equipamento autossustentável.

Lista de Referências

- [1] R. W. Fairbridge, “Ozone,” in *Environmental Geology*, Dordrecht: Springer, Dordrecht, 1999, pp. 463–464.
- [2] -, “The Benefits of DSP Lock-in Amplifiers.” Gooch and Housego, 1996.
- [3] M. Babin, “Phytoplankton fluorescence: theory, current literature and in situ measurement,” *Real-time Coast. Obs. Syst. Mar. ...*, 2008.
- [4] T. Leeuw, E. S. Boss, and D. L. Wright, “In situ measurements of phytoplankton fluorescence using low cost electronics,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, Jun. 2013.
- [5] M.L.Meade, *Lock-in Amplifiers: Principles and Applications*. 1983.
- [6] S. Hageman, “Design a DSP lock-in amplifier, Part 1: Background | EDN,” 2017. [Online]. Available: <https://www.edn.com/design/test-and-measurement/4459202/Design-a-DSP-lock-in-amplifier--Part-1--Background>.
- [7] -, “Model SR530,” *Stanford Res. Syst.*, vol. 4, no. 408, 2013.
- [8] O. Oguz, “A Lock-In Amplifier for Fluorescent Light Detection,” 2002.
- [9] E. Rabinovich, M. J. O’Brien, S. R. J. Brueck, and G. P. Lopez, “Phase-sensitive multichannel detection system for chemical and biosensor arrays and fluorescence lifetime-based imaging,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 2 I, Feb. 2000.
- [10] Y. Sukekawa, T. Mujiono, and T. Nakamoto, “Two-dimensional digital lock-in circuit for fluorescent imaging of odor biosensor system,” *Proc. - 2017 1st New Gener. CAS, NGCAS 2017*, pp. 241–244, 2017.
- [11] -, “USB LOCKIN 250 LOCKIN AMPLIFIER AMPLIFIER 10 mHz to 250 kHz,” vol. 49, no. 0.
- [12] R. Wolfson, “The lock-in amplifier: A student experiment,” *Am. J. Phys.*, vol. 59, no. 6, pp. 569–572, 1991.
- [13] J. Gaspar, S. F. Chen, A. Gordillo, M. Hepp, P. Ferreyra, and C. Marques, “Digital lock in amplifier: Study, design and development with a digital signal processor,” *Microprocess. Microsyst.*, vol. 28, no. 4, 2004.

- [14] A. Das and T. Yaswanth, "A low-cost, portable alternative for a digital Lock-In Amplifier using TMS320C5535 DSP," *12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control*, 2016.
- [15] R. Davies and G. Meuli, "Development of a digital lock-in amplifier for open-path light scattering measurement," in *ISIEA 2010 - 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, 2010.
- [16] -, "About Lock-In Amplifiers," 2011.
- [17] R. G. Skillington, "DSP Based Lock-in Amplifier A dissertation submitted by," University of Southern Queensland Faculty, 2013.
- [18] M. O. Sonnaillon and F. J. Bonetto, "A low-cost, high-performance, digital signal processor-based lock-in amplifier capable of measuring multiple frequency sweeps simultaneously," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 76, no. 2, Feb. 2005.
- [19] Q. Wang and H. Zheng, "Implementation of Digital Lock-in Amplifier Based on System Generator," 2016.
- [20] D. Wenn, "Implementing Digital Lock-In Amplifiers Using the dsPIC ® DSC," 2007.
- [21] P. Dimitris, "Digital Signal Processing," 1990.
- [22] A. A. Dorrington and R. Kunnemeyer, "A simple microcontroller based digital lock-in amplifier for the detection of low level optical signals," University of Waikato, 2002.
- [23] I. D. Environments and A. Stm, "User manual and initialization C," 2015.
- [24] W. J. Palm, *System Dynamics*, Third Edit. University of Rhode Island, 2005.
- [25] -, "Rail-To-Rail Output Operational Amplifiers," 2013.
- [26] -, "TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers," 2015.
- [27] -, "Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier."