



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

“Instrumentação e Controlo para Regulação de pH em Sistemas de Cultivo de Organismos Aquáticos”

André Filipe Dias Fernandes

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Prof. Dr. Pedro Miguel Frazão Fernandes Ferreira

Prof. Dr. António Eduardo de Barros Ruano

2012

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

“Instrumentação e Controlo para Regulação de pH em Sistemas de Cultivo de Organismos Aquáticos”

André Filipe Dias Fernandes

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Prof. Dr. Pedro Miguel Frazão Fernandes Ferreira

Prof. Dr. António Eduardo de Barros Ruano

2012

"Instrumentação e controlo para regulação de pH em sistemas de cultivo de organismos aquáticos"

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

O autor _____

Copyright © André Filipe Dias Fernandes

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“O primeiro passo em direção ao sucesso é o conhecimento.”

Nikola Tesla

Resumo

A Ria Formosa é um tesouro ambiental sem paralelo, preservando uma fauna e flora únicas no mundo. A riqueza deste habitat é de enorme importância para a região, e extremamente apetecível para cientistas oriundos de todas as partes do globo, que aqui frequentemente se deslocam para conduzirem estudos científicos e experiências. O Centro de Ciências do Mar (CCMAR) da Universidade do Algarve (que inclui o Centro Experimental do Ramalhete) conduz estudos e experiências neste palco, estudos que são de inquestionável valor para o conhecimento e desenvolvimento científico. Um assunto que está a merecer a atenção da comunidade científica mundial nos últimos anos é a questão da acidificação dos oceanos.

A diminuição gradual do pH das águas pode vir a ter graves repercussões nos ecossistemas marinhos, e o Centro Experimental do Ramalhete tem vindo a conduzir experiências com fauna e flora provenientes da Ria Formosa em águas com níveis de pH mais reduzido, condições que se prevê que os oceanos venham a ter no futuro. Os equipamentos de instrumentação e controlo a que o Centro tem acesso condicionam as experiências que ali são levadas a cabo pelos investigadores, pelo que o desenvolvimento de equipamentos adequados incorporando tecnologias apropriadas permitiria a realização de novas e melhores experiências no campo da biologia marinha.

Ao nível do controlo existe uma lacuna no mercado, entre controladores para aquarofilia demasiado simples e controladores industriais demasiado dispendiosos e complexos. Esta dissertação pretende colmatar essa lacuna através do desenvolvimento de um protótipo de um sistema distribuído microcontrolado para aquisição de dados e controlo de pH que vá ao encontro das necessidades dos investigadores do Centro e que se pretende simples, modular, flexível, económico e expansível no futuro. O foco centra-se no desenvolvimento da instrumentação necessária para as medições de temperatura e pH, e depois no estudo de uma malha de controlo PID utilizando como base um modelo do sistema obtido através de resultados experimentais, para o controlo automático do pH.

Termos chave: Instrumentação eletrónica, PID, Microcontrolador, Controlo de pH, Aquacultura, Ria Formosa

Abstract

Ria Formosa is an unmatched environmental treasure, holding unique fauna and flora in the world. The variety of this habitat is extremely important to the region, and very appealing to scientists from all over the globe that frequently come to conduct scientific studies and experiments.

The Center of Ocean Sciences (CCMAR) of the University of Algarve (that includes the Experimental Center of Ramalhete) leads studies and experiments in this site, which are of unquestionable value to the scientific knowledge and development.

A theme that is gathering the attention of the global scientific community in the last few years is the oceanic acidification. The steady decrease of water pH can have dire consequences in marine ecosystems, and the Experimental Center of Ramalhete has been leading experiments in waters with lower pH, which are foreseeable conditions for the future. The lack of instruments in the Center bottlenecks the experiments that are possible to conduct, so more and better instrumentation would allow for new and better experiments in the marine biology field.

On the pH control point of view, there is a gap between too simple controllers for aquariums and too complex industrial controllers. This dissertation aims to fulfill that gap through developing a prototype for a microcontrolled distributed control system device, for control and data acquisition that meets the needs of the researchers. It is meant to be simple, modular, flexible, cheap and expandable in the future. Its focus is on development of the instrumentation needed to measure temperature and pH, and later on studying a PID control loop based on a model of the system obtained from experimental results, to perform automatic pH control.

Keywords: Electronic instrumentation, PID, Microcontroller, pH control, Aquaculture, Ria Formosa

Índice

1 – Introdução, temática e tecnologias

1.1 - A problemática da acidificação dos oceanos.....	16
1.2 - Parâmetros físico-químicos da água.....	20
1.2.1 – Temperatura.....	20
1.2.2 – Salinidade.....	21
1.2.3 – pH.....	21
1.3 - Tecnologias de medição e controlo de pH.....	23
1.3.1 - Medição de pH: indicadores químicos e medidores eletrónicos.....	23
1.3.2 - Controlo de pH: controlo manual e controladores eletrónicos.....	25
1.3.3 - Considerações finais.....	27
1.4 – Controladores PID.....	28
1.5 - Estado da arte em monitorização e controlo de águas.....	30

2 - Arquitetura do sistema distribuído de medição e controlo de pH

2.1 - Levantamento dos sistemas existentes.....	32
2.2 - Componentes	
2.2.1 - Sensor de pH, calibração e interface.....	35
2.2.2 - Sensor de temperatura.....	39
2.2.3 - Fonte de alimentação.....	39
2.2.4 - Amplificador de instrumentação.....	45

2.2.5 - Acionamentos e interface.....	47
2.2.6 - Placa de circuito impresso (PCB).....	48
2.2.7 - Filtro passa baixo.....	52
2.2.8 – Microcontrolador.....	53
2.2.9 – Invólucro.....	54
2.2.10 – Cablagem.....	55
2.2.11 – Software	56
2.2.12 – Sistema de controlo.....	57

3 – Resultados experimentais e proposta de modelo de controlo

3.1 - Testes do protótipo no laboratório como medidor de pH.....	58
3.2 – Testes do protótipo no terreno como medidor e regulador de pH.....	60
3.3 - Determinação do modelo do sistema através da resposta ao degrau.....	65
3.4 - Proposta de sistema de controlo PID.....	89
3.5 - Implementação e resultados com o sistema de controlo.....	95

4 - Considerações finais

4.1 – Conclusões.....	97
4.2 – Viabilidade.....	98
4.3 - Trabalhos futuros.....	99

5 – Referências bibliográficas.....

Lista de abreviaturas e variáveis

AC – Corrente alternada (Alternate current)

ADC – Conversor analógico-digital (Analog-digital converter)

ANN – Rede neuronal artificial (Artificial neural network)

ARX – Autoregressivo com entrada exógena (Auto-regressive exogenous)

CMRR – Rácio de Rejeição de Modo Comum (Common-Mode Rejection Ratio)

CO₂ – Dióxido de Carbono

DC – Corrente direta (Direct current)

DO – Oxigênio dissolvido (Dissolved Oxygen)

E – Potencial eletrolítico

E⁰ – Potencial eletrolítico inicial do eletrodo

F – Constante de Faraday

F_C – Frequência de Corte

G – Ganho

LPF – Filtro passa-baixo (Low-Pass Filter)

O₂ – Oxigênio

P - Potência

PCB – Placa de Circuito Impresso (Printed Circuit Board)

pH – Potencial Hidrogeniônico

PID – Proporcional, Integral, Derivativo

PRBS – Sequência binária pseudo-aleatória (Pseudo-Random Binary Sequence)

PV – Variável de processo (Process Variable)

PWM – Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)

R – Constante dos gases

SP – Referência (Set Point)

T – Temperatura

τ – Constante de Tempo

V_O – Tensão de saída

V_P – Tensão de pico

V_{Ref} – Tensão de referência

V_{RMS} – Tensão RMS (Root Means Squared Voltage)

Índice de figuras

Figura 1.1 – Concentração oceânica de dióxido de carbono VS pH da água oceânica (IPCC, 2007).....	17
Figura 1.2 - Ciclo do processo químico de acidificação oceânica (Universidade de Maryland, 2009).....	18
Figura 1.3 – Evolução do pH oceânico ao longo da história (Turley et all, 2006).....	18
Figura 1.4 – Evolução do potencial de crescimento de recifes de corais (NOAA, 2008).....	19
Figura 1.5 – Fita medidora de pH.....	23
Figura 1.6 – Indicador químico de pH.....	23
Figura 1.7 – Medidor eletrônico de pH com elétrico combinado.....	24
Figura 1.8 – Controlador comercial de pH AquaMedic.....	26
Figura 1.9 – Controlador industrial de pH Yokogawa.....	26
Figura 1.10 – Diagrama do controlador PID.....	28
Figura 2.1 – Configuração inicial do sistema.....	32
Figura 2.2 – Configuração projetada do sistema.....	34
Figura 2.3 – Resposta elétrica do elétrico de pH segundo equação de Nernst.....	36
Figura 2.4 – Variação da resposta elétrica do elétrico com a temperatura.....	38
Figura 2.5 – Transformador 240V – 24V.....	40
Figura 2.6 – Ponte de díodos de retificação completa de onda.....	41
Figura 2.7 – Esquema EAGLE do retificador de onda completa.....	41
Figura 2.8 – Forma de onda após retificação de onda completa com condensadores.....	42
Figura 2.9 – Esquema EAGLE da fonte de alimentação completa do equipamento.....	44
Figura 2.10 – Esquema EAGLE do circuito completo da PCB 1.....	49
Figura 2.11 – Esquema completo da PCB 1 para impressão.....	50
Figura 2.12 – Esquema EAGLE do circuito completo da PCB 2.....	51
Figura 2.13 – Esquema EAGLE da PCB 2 para impressão.....	51
Figura 2.14 – Esquema EAGLE do filtro-passa baixo.....	52

Figura 2.15 – Microcontrolador Arduino UNO.....	53
Figura 2.16 – Caixa fechada.....	54
Figura 2.17 – Conteúdo interior da caixa.....	55
Figura 2.18 – Curva de titulação ácido fraco – base fraca.....	57
Figura 3.1 – Medidor comercial comparativo.....	59
Figura 3.2- Instalação no local.....	60
Figura 3.3 - Tanque interior (visível a amostra de algas, sensor de pH, de temperatura, torneira de entrada de água, tubo injetor de ar, tubo de nível).....	61
Figura 3.4 - Eletroválvula (visível a válvula manual (vermelha), e bifurcação de entrada de CO2 / entrada de ar comprimido / saída de mistura).....	61
Figura 3.5 - Quadro de alimentação (visível a caixa do transformador, interruptor de corte da eletroválvula, tomada de alimentação e <i>hub</i> de rede).....	62
Figura 3.6 – Curva da resposta do sistema a injeções aleatórias de CO2 durante 1s, válvula manual a 100%.....	63
Figura 3.7 - Respostas do sistema para abertura de 50%, ao nascer do sol.....	66
Figura 3.8 - Respostas do sistema para abertura de 75%, ao nascer do sol.....	67
Figura 3.9 - Respostas do sistema para abertura de 100%, ao nascer do sol.....	68
Figura 3.10 - Respostas do sistema para abertura de 50%, ao meio dia solar.....	69
Figura 3.11 - Respostas do sistema para abertura de 75%, ao meio dia solar.....	70
Figura 3.12 - Respostas do sistema para abertura de 100%, ao meio dia solar.....	71
Figura 3.13 - Respostas do sistema para abertura de 50%, ao por do sol.....	72
Figura 3.14 - Respostas do sistema para abertura de 75%, ao por do sol.....	73
Figura 3.15 - Respostas do sistema para abertura de 100%, ao por do sol.....	74
Figura 3.16 - Medições de pH efetuadas durante a manhã, tarde e noite.....	77
Figura 3.17 - Janela principal da Ferramenta de Identificação de Sistemas.....	78
Figura 3.18 - Janela de importação de dados do <i>workspace</i>	79
Figura 3.19 - Janela de estimação de modelos não-lineares.....	79
Figura 3.20 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de <i>Wavelet Network</i>	83
Figura 3.21 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de <i>Tree Partition</i>	83

Figura 3.22 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de <i>Sigmoid Network</i> com bloco linear.....	84
Figura 3.23 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de <i>Sigmoid Network</i> sem bloco linear.....	84
Figura 3.24 - Modelo de não linearidade <i>Sigmoid Network</i> com 8 <i>units</i> e 2 termos Input/Output.....	85
Figura 3.25 - Diagrama de blocos, comparação dos dados experimentais (Output) com os obtidos do modelo determinado.....	86
Figura 3.26 - Sequência de entrada, valores de duração (s) do pulso PWM solicitado, em função do tempo.....	86
Figura 3.27 - Medições manhã (Output a violeta) VS Saída do modelo (amarelo).....	87
Figura 3.28 - Medições tarde (Output a violeta) VS Saída do modelo (amarelo).....	87
Figura 3.29 - Medições noite (Output a violeta) VS Saída do modelo (amarelo).....	88
Figura 3.30 - Diagrama de blocos, degrau unitário com implementação de controlador PID e ruído.....	89
Figura 3.31 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador P.....	90
Figura 3.32 - PID <i>tuner</i> e parâmetros de desempenho para o controlador P.....	90
Figura 3.33 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador PI.....	91
Figura 3.34 - PID <i>tuner</i> e parâmetros de desempenho para o controlador PI.....	91
Figura 3.35 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador PID.....	92
Figura 3.36 - PID <i>tuner</i> e parâmetros de desempenho para o controlador PID.....	92
Figura 3.37 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador PID ideal.....	93
Figura 3.38 - PID <i>tuner</i> e parâmetros de desempenho para o controlador PID, com critério de rejeição a perturbações.....	94
Figura 3.39 – Resultados obtidos com a implementação do sistema de controle.....	95

Índice de tabelas

Tabela 1.1 - Gamas de temperatura de organismos aquáticos (por WUP Center, Universidade Tecnológica do Michigan).....	20
Tabela 1.2 - Gamas de pH de organismos aquáticos (por WUP Center, Universidade Tecnológica do Michigan).....	22
Tabela 3.1 - Valores não-amplificados do sensor de pH.....	58
Tabela 3.2 - Medições comparativas entre o protótipo e o aparelho comercial.....	59
Tabela 3.3 - Comportamento do sistema com a válvula manual a 50% de abertura.....	75
Tabela 3.4 - Comportamento do sistema com a válvula manual a 75% de abertura.....	75
Tabela 3.5 - Comportamento do sistema com a válvula manual a 100% de abertura.....	75
Tabela 3.6 - Características dos modelos não-lineares <i>Wavelet network</i>	80
Tabela 3.7 - Características dos modelos não-lineares <i>Tree Partition</i>	81
Tabela 3.8 - Características dos modelos não-lineares <i>Sigmoid network</i> c/bloco linear.....	81
Tabela 3.9 - Características dos modelos não-lineares <i>Sigmoid network</i> s/bloco linear.....	82

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, e em todos os eventos ao longo da minha vida que me trouxeram até este momento.

Em primeiro lugar, ao Prof. Doutor António Ruano e ao Prof. Doutor Pedro Frazão pela disponibilidade que demonstraram em orientar me nesta dissertação. Também ao João Reis e ao CCMAR por disponibilizarem todos os meios e recursos necessários à elaboração deste projeto, ao Mário Freitas e ao Eng^o Artur Neves pelo apoio, esclarecimento de dúvidas e ajuda à construção.

A todos os colegas de curso, em especial aos amigos Paulo Oliveira, Lígia Luís, Ricardo Luz, Tashi Ravach e Hugo Amorim, pelos momentos de amizade, de aprendizagem, e pelo apoio que me deram ao longo de todo o curso. Ainda aos colegas do Centro de Sistemas Inteligentes (CSILab), em particular ao João Gomes, por toda a ajuda e conselhos durante estes longos meses de trabalho.

Aos amigos de sempre, à minha família, pais e avós.

A todos um muito obrigado.

1 – Introdução, temática e tecnologias

1.1 - A problemática da acidificação dos oceanos

Ao longo das últimas décadas muito se tem especulado sobre o efeito da emissão de gases de estufa no nosso planeta, sendo o dióxido de carbono (CO₂) um dos que têm tido mais destaque e reunido mais atenção por parte da comunidade científica e política entre o mundo civilizado.

Apesar de haver uma significativa discórdia sobre a verdadeira origem do excesso de dióxido de carbono na atmosfera, havendo teóricos que defendem que a pegada ambiental humana é significativamente reduzida comparativamente com aquilo que é naturalmente emitido na natureza, é inevitável ligar o atual problema ambiental à atuação humana.

Atualmente, o consumo de combustíveis fósseis é considerado um alvo a abater, sendo de há uns anos para cá fomentada a utilização de fontes de energia alternativas para suprir a maior parte das necessidades energéticas da civilização nos anos vindouros. Esse é certamente o caminho a seguir, por provir de fontes limpas e inesgotáveis (ao contrário dos combustíveis fósseis que estão condenados à depleção), e o desenvolvimento tecnológico nos últimos anos tem vindo a tornar isso possível, embora ainda haja um longo caminho a percorrer.

De qualquer forma, o desequilíbrio na concentração de gases na atmosfera terrestre tem vindo a ter efeitos significativos a nível global, e isso é algo que é irrefutável. Um dos maiores problemas que se apresentam (para além do aquecimento global) é a acidificação dos oceanos, ou seja, o decréscimo dos níveis de pH dos oceanos.

Desde os tempos da revolução industrial, e a consequente utilização de combustíveis fósseis na indústria e transportes, que tem havido emissão de dióxido de carbono em quantidades massivas para a atmosfera. Cerca de um terço do volume de emissões de CO₂ de origem humana é absorvido pelos oceanos (*National Academy of Sciences*, 2011 [28]). Isto totaliza cerca de seis milhões de toneladas diárias.

Essa absorção perturba o delicado equilíbrio oceânico e desencadeia uma cadeia de reações químicas que produzem ácido carbónico, acidificando o meio e diminuindo o índice de pH (R.A. Feely et al, 2006). Para agravar ainda mais a situação, a emissão de ácido nítrico e

ácido sulfúrico para a atmosfera, provenientes da combustão de combustíveis fósseis e de resíduos agrícolas resulta na deposição de compostos como enxofre e nitrogênio nos oceanos, e esse efeito também contribui para a sua acidificação.

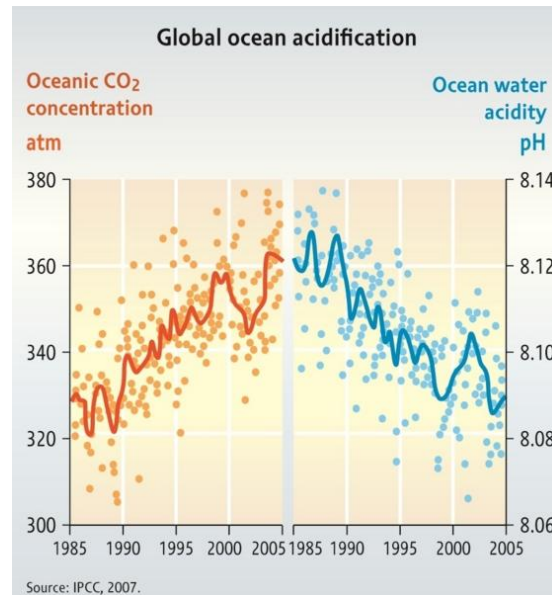


Figura 1.1 - Concentração oceânica de dióxido de carbono VS pH da água oceânica (IPCC. 2007)

Esse decréscimo do pH tem um impacto significativo no desenvolvimento das espécies marinhas. O ácido carbônico na água do mar aumenta a concentração de íons de hidrogênio na água, que se combina com os carbonatos, formando bicarbonato. Isto tem como consequência reduzir a concentração de carbonatos, um composto necessário aos corais e organismos marinhos para construir a sua base estrutural (D. Hopley, 2011). No pior cenário, numa antevisão feita por Gattuso, J.P. (2009), a água oceânica será ácida o suficiente para dissolver as conchas de moluscos, crustáceos, e outras espécies. Declara ainda que 10% do Oceano Ártico será ácido em 2018, 50% em 2050, e 100% em 2100. Isto interfere com o ecossistema marinho e com a cadeia alimentar, afetando direta ou indiretamente todas as espécies marinhas, e outras que subsistam delas.

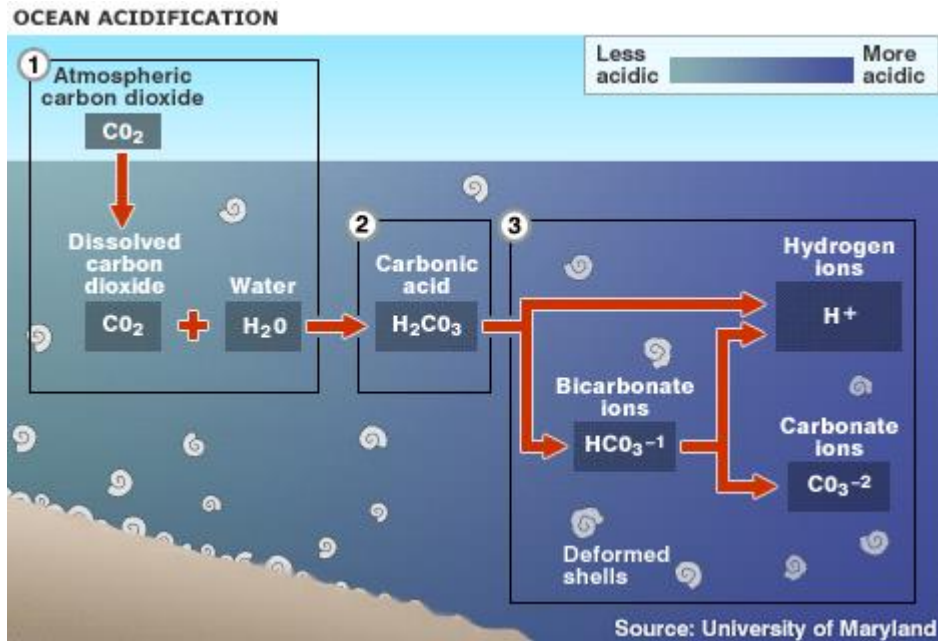


Figura 1.2 - Ciclo do processo químico de acidificação oceânica (Universidade de Maryland, 2009)

Estudos revelam que o pH oceânico já baixou em 0.1 e até ao final do século pode baixar até 0.4, o que o colocaria fora da gama de valores que qualquer organismo já experienciou nas últimas centenas de milhares de anos (De'ath et al, 2009).

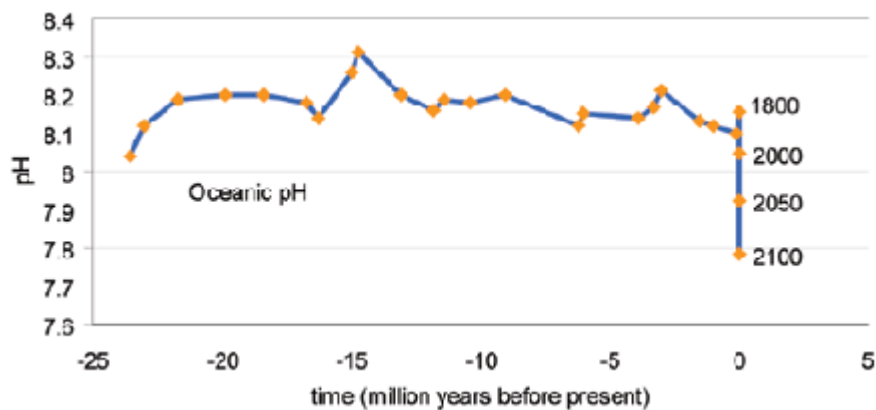


Figura 1.3 - Evolução do pH oceânico ao longo da história (Turley et al, 2006)

Estima-se que desde 1990, a calcificação coral tem reduzido em cerca de 14% (De'ath et al, 2009). Estudos comprovam que muitas espécies marinhas suportam mal a mudança de condições de pH no seu meio, e não é por acaso que a rápida acidificação dos oceanos tem

sido uma das presumíveis causas de eventos de extinção massiva na história do planeta (S.C. Doney et al, 2007).

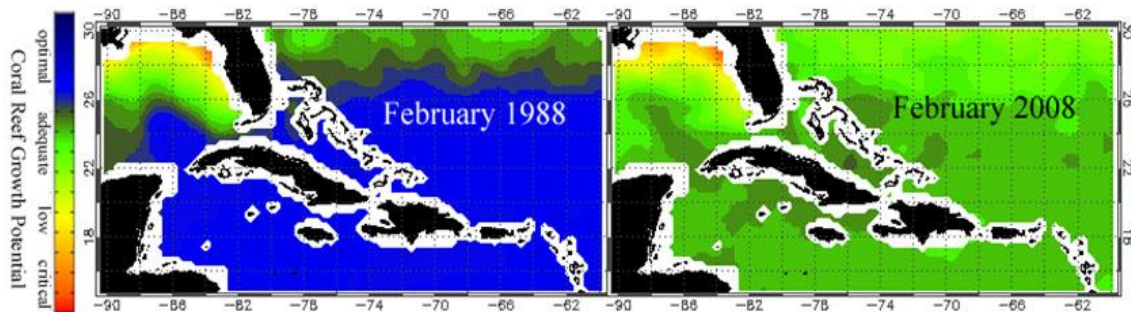


Figura 1.4 - Evolução do potencial de crescimento de recifes de corais (NOAA, 2008)

Em cima de tudo isto há outros efeitos secundários; uma antevisão feita pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* em 2007, prevê que os níveis do mar subirão entre 20 a 60 cm, ou mais, até ao ano de 2100 graças ao aquecimento global causado pelas emissões de CO₂ fruto da pegada humana. A temperatura média do planeta também deverá subir entre 3° e 5° Celsius. Isto tem potencial para mudar a face do planeta, inundando áreas costeiras, expandindo desertos e derretendo calotes polares.

Se a emissão de gases para a atmosfera continuar ao ritmo frenético que se tem verificado nas últimas décadas, é inevitável que os oceanos continuem a acidificar, até chegarem a uma magnitude que não se verifica desde há dezenas de milhões de anos. E se isso ocorrer, haverá um potencial impacto catastrófico nos ecossistemas marinhos, podendo culminar em condições hostis à vida de inúmeras espécies de fauna e flora com graves repercussões a nível global. Urge assim encontrar uma resposta apta para este problema.

1.2 - Parâmetros físico-químicos da água

A água pode ser caracterizada por toda uma série de parâmetros, cuja análise ilustra a qualidade e composição dessa água. Naturalmente diferentes águas apresentam diferentes valores, e uma aplicação específica para a água necessita de valores específicos (por exemplo, água para consumo humano, água para regas, água para aquicultura, cada aplicação tem valores ótimos para esses parâmetros).

Há muitos parâmetros que podem ser medidos, entre eles alguns dos mais vulgarmente considerados no âmbito da aquicultura são a temperatura, salinidade e pH.

1.2.1 - Temperatura

A temperatura de uma água influencia a velocidade das reações biológicas e do crescimento das espécies, certos parâmetros sensoriais (como odores e sabores), e a quantidade de oxigénio dissolvido. Quanto mais baixa for a temperatura, maior a capacidade de solubilidade de oxigénio.

Cada espécie tem uma gama ideal de temperaturas para viver e se desenvolver, daí cada habitat acolher diferentes espécies de fauna e flora. Condições ideais para determinadas espécies, podem ser incompatíveis com a vida de outras.

Temperatura	Formas de vida aquáticas (exemplos)
$T < 14^{\circ}\text{C}$	Poucas plantas, truta, poucas doenças infecciosas em peixes.
$15^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$	Algumas plantas, truta, picão-verde, lúcio, algumas doenças infecciosas em peixes.
$21^{\circ}\text{C} < T < 27^{\circ}\text{C}$	Muitas plantas, robalo, carpa, perca-prateada, raia, bagre, muitas doenças infecciosas em peixes.
$T > 27^{\circ}\text{C}$	Altas temperaturas começam a reduzir o potencial para vida aquática.

Tabela 1.1 - Gamas de temperatura de organismos aquáticos (WUP Center, Universidade Tecnológica do Michigan)

A temperatura também governa uma importante característica física da água, que é a densidade. A água atinge a máxima densidade aos 4°C e é menos densa para temperaturas inferiores e superiores a esse valor.

1.2.2 - Salinidade

Representa a concentração total de sais na água. Uma água com maior concentração de sais reflete-se num aumento da densidade da água. De um modo geral, maior salinidade corresponde a uma maior condutividade da água. A concentração de sais influi, naturalmente, nas espécies de organismos que se podem desenvolver nesse meio.

A salinidade é normalmente maior no Verão e menor no Inverno, pois a evaporação faz com que este parâmetro aumente. Por outro lado, a precipitação costuma diminuí-la, devido às alterações na concentração de água e sais.

1.2.3 – pH

O pH (ou potencial hidrogeniónico) de uma amostra de água é a medida da concentração de iões de hidrogénio nessa água. O pH da água determina a solubilidade (quantidade que pode ser dissolvida na água) e a disponibilidade biológica (quantidade que pode ser usada pela biota aquática) dos constituintes químicos, tais como os nutrientes (fósforo, azoto e carbono) e metais pesados como o chumbo, cobre, cádmio e outros (Universidade Federal do Rio de Janeiro, n.d. [38]).

Matematicamente, o pH pode ser expresso pela função:

$$pH = -\log_{10}[a_{H^+}] \quad (1)$$

Sendo que a_{H^+} é a actividade dos iões de hidrogénio, em mol/dm⁻³. Em soluções diluídas (abaixo de 0.1 mol/dm⁻³) o valor dessa actividade é próxima do valor da concentração iónica.

O potencial eletrolítico do sensor, E, pode ser definido pela equação de Nernst:

$$E = E^0 - \frac{2.303RT}{F}pH \quad (2)$$

Onde E é o potencial eletrolítico da célula, E^0 é o potencial eletrolítico inicial, R é a constante dos gases, T é a temperatura em Kelvin, F a constante de Faraday, e pH é o valor em unidades de pH.

Pode-se ainda dizer que o fator de Nernst, ou declive da reta, é dado por:

$$k.T = \frac{2.303RT}{F} \quad (3)$$

A água pode ser ácida, alcalina ou neutra conforme a proporção de compostos alcalinos e ácidos presentes, variando também com a concentração de oxigénio (que aumenta o pH) e de dióxido de carbono (que o diminui). O grau de acidez da água é expresso pelo pH cuja escala varia desde 0 a 14. A água neutra tem um pH igual a 7; a água com um pH inferior é ácida e quanto menor, mais ácida é a água; a água com pH superior a 7 é alcalina e quanto mais alto o valor, mais alcalina é a água.

O pH da água deve ajustar-se às necessidades das espécies residentes no meio, embora tipicamente, valores abaixo dos 5.5 e acima dos 9 sejam prejudiciais ao bem-estar da fauna marítima (apenas algumas bactérias e plantas vivem em tais condições).

O grau de acidez da água deve ser monitorizado constantemente, pois valores inadequados podem ditar a morte das espécies residentes no meio. É importante estar atento quando há trocas parciais de água, pois a adição de água limpa geralmente provoca uma alteração no grau de acidez do meio aquático.

Formas de vida aquática (exemplos)	Gama de pH suportada
Bactérias	1.5 < pH < 13.5
Plantas	6.5 < pH < 12.0
Carpa, raia, bagre, peixe-gato	6.0 < pH < 9.0
Robalo, perca-prateada	6.5 < pH < 8.5
Ostra, mexilhão, outros moluscos	7.5 < pH < 9.0
Truta, invertebrados	6.5 < pH < 7.5

Tabela 1.2 - Gamas de pH de organismos aquáticos (WUP Center, Universidade Tecnológica do Michigan)

1.3- Tecnologias de medição e controlo de pH

1.3.1 - Medição de pH: indicadores químicos e medidores eletrónicos

Fazendo uma medição manual, um operador colhe uma amostra da água a testar, com os devidos cuidados para evitar a contaminação, e realiza testes para determinar o valor com indicadores de pH, que podem ser fitas medidoras ou compostos químicos.

As fitas medidoras são mergulhadas na água a analisar, o papel em contacto com a solução mudará de cor, e a comparação com uma escala de cores indicará o valor aproximado do pH.



Figura 1.5 - Fita medidora de pH



Figura 1.6 - Indicador químico de pH

Os indicadores químicos são compostos químicos com propriedades halocrómicas (a capacidade de mudar de coloração em função do pH do meio). A adição de uma pequena quantidade do indicador a uma amostra da solução alterará a cor do composto, e à semelhança das fitas medidoras, a comparação com uma escala de cores permitirá determinar aproximadamente o valor de pH da água. Alguns dos compostos utilizados são a fenoftaleína, azul de bromofenol, alaranjado de metilo ou o violeta de metilo.

A leitura dos parâmetros pode também ser feita recorrendo a instrumentos analíticos de medição, em que é mergulhado um sensor na substância, e o sensor gera uma resposta elétrica proporcional ao valor do parâmetro que se está a medir. Essa resposta elétrica pode

então ser lida e interpretada por um aparelho medidor para expressar o valor do parâmetro presente na substância.

A medição de pH é normalmente efetuada com elétrodos que utilizam um vidro sensível ao pH. A atividade de iões de hidrogénio à superfície do vidro gera um pequeno sinal elétrico proporcional à concentração de iões, que pode ser lido e traduzido para unidades de pH.

A medição desse sinal requer dois elétrodos, um eléctrodo de vidro e um de referência. É gerada uma força eletromotriz entre o eléctrodo sensível à atividade de iões de hidrogénio e um eléctrodo de referência, quando estão ambos mergulhados na mesma solução, e é usada uma célula galvânica para detetar essa força. Hoje em dia, a maior parte dos sensores traz os dois elétrodos incorporados no mesmo tubo que compõe o corpo do sensor, contudo determinadas aplicações exigem a sua utilização separada.



Figura 1.7 - Medidor eletrônico de pH com eléctrodo combinado

1.3.2 - Controlo de pH: controlo manual e controladores eletrónicos

Uma vez conhecido o valor do parâmetro da água que se pretende controlar, é possível atuar sobre a solução para manter o valor próximo do pretendido. Isto é feito geralmente injetando substâncias no meio, variando a temperatura ou intervindo de outra forma sobre ele, conforme o parâmetro a controlar.

A retificação do pH pode ser feita manualmente pelo operador, em que este injeta substâncias na solução para aproximar o valor daquele que é o desejado (como por exemplo dióxido de carbono e carbonato de cálcio, que fazem diminuir ou aumentar, respetivamente, os índices de pH).

Contudo, com o advento da era digital, começaram a surgir aparelhos suportados por microcontroladores que não só medem os parâmetros físico-químicos da água como os controlam automaticamente, lendo os dados provenientes de sensores em contacto com o meio, processando esses dados e atuando sobre esse meio. Acionando outros dispositivos no sistema como relés, válvulas ou bombas que introduzirão perturbações no meio, seja injetando substâncias, ligando um aquecedor, uma bomba aeradora, ou de outra forma, o sistema será regulado até serem atingidos os valores pretendidos. Isto permite que o sistema seja controlado autonomamente, com mínima intervenção humana, maior segurança e otimização de recursos. Alguns sistemas permitem ainda o registo e exportação dos dados, possibilitando a monitorização e controlo remotos.

Há no mercado um vasto leque de aparelhos específicos para controlo de pH, desde simples aparelhos para utilização em aquarofilia até outros mais complexos e orientados para processos industriais.

Embora sejam uma solução económica e decente, tipicamente os controladores comercializados para aplicações de pequena escala como a aquarofilia são um pouco limitados, oferecendo rudimentares estratégias de controlo, pouca flexibilidade e pouca ou nenhuma possibilidade de expansão, podendo torná-los insuficientes para certas utilizações que não aquela para a qual foram especificamente desenhados.



Figura 1.8 -Controlador comercial de pH AquaMedic

No outro lado do espectro existem controladores mais avançados. São controladores normalmente utilizados em processos de grande escala, como processos industriais, piscicultura de produção e estações de tratamento de águas residuais (ETARs). Estes controladores são robustos, flexíveis, permitem implementar complexas técnicas de controlo de processo (por exemplo PID, adaptativo, ANN, entre outros), mas são altamente dispendiosos e muitas vezes acabam por ter mais funcionalidades do que aquelas que são necessárias para aplicações em uma escala mais pequena, não sendo as suas capacidades aproveitadas em pleno.



Figura 1.9 - Controlador industrial de pH Yokogawa

1.3.3 - Considerações finais

As técnicas de medição manual são simples, baratas e satisfatórias quando o rigor exigido pela aplicação é baixo. Isto porque qualquer destes métodos é pouco rigoroso, pois a análise é feita a olho pelo operador, o que introduz um fator de erro humano. Para além disso, muitas vezes a discretização das escalas de medição é grosseira e torna-se difícil fazer medições que sejam muito apuradas, permitindo apenas determinar um valor aproximado e não o real.

Como acontece com a medição, qualquer tipo de controlo manual feito por um operador humano é propício a erros e tem uma baixa eficiência inerente, incorrendo em maiores gastos de recursos e trazendo outros potenciais problemas associados. A título de exemplo, no caso específico da aquacultura, uma pequena variação dos parâmetros físico-químicos do meio aquático para valores fora do normal pode resultar na perda de toda a fauna e flora marinha existente no aquário.

O controlo automático permite a otimização dos processos, resultando numa grande economia de tempo e recursos, agindo autonomamente conforme a leitura que faz dos dados a serem monitorizados.

Este tipo de controlo está cada vez mais presente não só na indústria como nas mais diversas aplicações, inclusive domésticas.

1.4 – Controladores PID

Os controladores PID têm proliferado na indústria desde o seu surgimento. Hoje em dia, estima-se que 95% de todos os processos industriais em malha fechada são controlados por controladores deste tipo (Neves M.G.S, 2009).

Eles são compostos por três tipos de ação distintas mas complementares: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativa (D). O controlador PID discreto, genericamente, pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^n e(i) + \frac{K_d}{T_s} \Delta e(k) \quad (4)$$

Em que $u(k)$ é o sinal de controle, $e(k)$ o erro entre a referência (*Set Point*) e a variável de processo PV, T_s o tempo de amostragem, K_p o ganho proporcional, K_i o ganho integral e K_d o ganho derivativo.

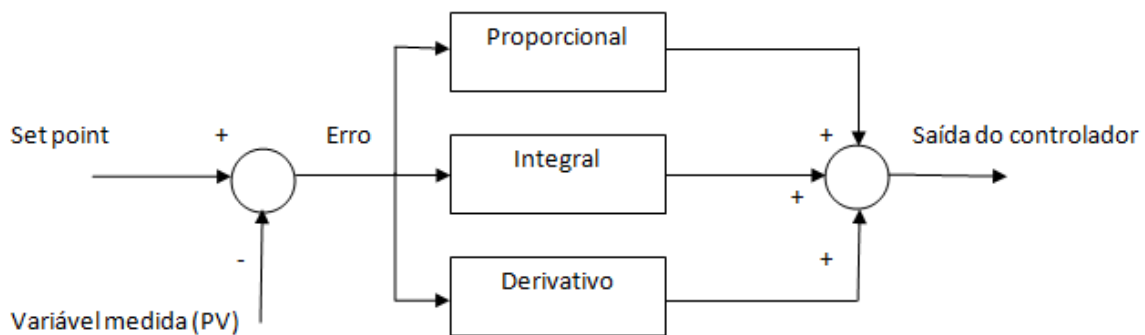


Figura 1.10 - Diagrama do controlador PID

O efeito Proporcional compara a referência com a variável de processo para determinar o erro entre os dois valores. Esse erro vai ser multiplicado pelo ganho proporcional K_p e esse fator vai ser aplicado ao sistema. Quanto maior for o K_p , mais rápida será a velocidade da correção. Se esse ganho for demasiado alto, o sistema tenderá a oscilar quando a correção for feita, provocando um *overshoot* de cada vez que a variável de processo passar pela

referência e o controlador tentar fazer a correção no sentido inverso muito agressivamente. Por outro lado, não é desejável um ganho muito pequeno pois a resposta do controlador será muito lenta, e para valores de erro muito pequenos a sua resposta muito diminuta e insuficiente. Outro problema inerente é quando surgem perturbações externas que interferem ou anulam o efeito proporcional do controlador, criando um *offset* entre a variável medida e a referência que não pode ser corrigido apenas pelo efeito proporcional.

O efeito Integral vai acumulando o valor desse *offset* (ou o integral da curva de erro), sempre que este exista, para acrescentar ou subtrair ao sinal de atuação. A sua tarefa é, portanto, eliminar o erro em regime estacionário. Um valor muito elevado de ação integrativa pode dar origem a uma sobre-elevação da variável de processo em relação à referência.

O efeito Derivativo regista a velocidade de variação do erro, comparando o valor do erro com o erro da última verificação, para balancear a resposta do controlador PI e contrariar qualquer possível *overshoot* caso detete que a correção está demasiado agressiva. Ele permite assim utilizar ganhos P e I mais elevados, para agilizar o tempo de resposta, minimizando a sobre-elevação e mantendo estável o sistema em malha fechada.

O principal desafio neste tipo de controladores vem portanto da sintonia dos parâmetros necessária para retirar a maior eficácia possível do processo e otimizar a resposta do sistema. A máxima eficiência do sistema, ou o seu total falhanço, dependem da adequada afinação dos três parâmetros.

1.5 - Estado da arte em monitorização e controlo de águas

O assunto da monitorização e controlo de parâmetros físico-químicos da água aplicados à aquacultura tem sido abordado na comunidade científica.

Beck, Silva, Guerra e Messias (2006) propuseram um modelo para aquacultura que possibilitava a monitorização de pH, temperatura, turbidez e nível da água, assim como o controlo automático desses parâmetros e ainda da dosagem de alimento.

Os sensores utilizados foram um LM35 para a temperatura, um eléctrodo EPC-70 da Instrutherm para o pH, um fotodíodo para a turbidez e um sensor de pressão para medir o nível de água.

A regulação automática é feita recorrendo a um motor para fornecimento do alimento, uma electroválvula para acionar a bomba de água, 3 resistências acionadas por um conversor DC/DC *step-up* para o aquecimento da água, e o pH é regulado com a injeção de uma substância alcalinizante e outra acidificante através de eletroválvulas.

A leitura dos parâmetros da água e a ativação dos atuadores é feita recorrendo a um microprocessador ATmega8 programado para o efeito. O controlo é feito por histerese para a regulação dos parâmetros, e a alimentação é governada por um temporizador a cada 8 horas.

Em termos de instrumentação, neste projeto está ausente uma componente de eletrónica para condicionamento do sinal do sensor de pH, sendo tudo realizado em *software* pelo microcontrolador. A electroválvula para o controlo de nível é acionada diretamente da saída digital através de um transístor, ao invés de utilizar relés, e a injeção dos elementos alcalinizantes e acidificantes para o controlo do pH é feita através de sinais de corrente de 4-20 mA, fornecido por um DAC de 4 bits que faz a conversão do sinal de saída do microcontrolador de digital para analógico.

Zhu X., Li D., He D., Wang J., Ma D., Li F. (2008) propõem um sistema mais elaborado, com uma rede de módulos distribuídos que comunicam com a estação central através de rede CDMA e duma VPN. Executa medição de pH, Oxigénio dissolvido (DO), temperatura da água, temperatura da sala e salinidade. Um modelo de previsão para a evolução do DO é feito com uma rede neuronal artificial (ANN). Os sinais são condicionados através de

circuitos eletrônicos elaborados para o efeito para a gama de 0-5V do ADC e transmitidos para a estação central, que armazena os dados, produz relatórios de erro, lança alertas ao utilizador para valores fora do esperado, e analisa os dados de DO tentando prever a sua evolução, fazendo a comparação desses com valores pré-definidos calculados pelo conhecimento empírico adquirido pela ANN. Em termos de controlo, à altura do artigo ele apenas controlava um aerador para aumentar os níveis de oxigénio dissolvido.

Neelamegam P., Kumaravel S., e Raghunatnah R. (2008) apresentam outro sistema de controlo distribuído baseado em microcontroladores ATmega8535, sendo capaz de regular o pH, temperatura, DO e a iluminação.

Nesta aplicação, existe um computador central onde são definidos os parâmetros de operação pelo utilizador e feita a monitorização do sistema. Está ligado a um microcontrolador de coordenação por RS-232, que faz o interface com outros quatro microcontroladores distribuídos e serve como sistema de controlo central. Cada um dos quatro microcontroladores é responsável por um dos parâmetros a serem medidos, e executa a medição, transmissão dos dados para o sistema central, e atua sobre o sistema com um controlo por histerese. A temperatura é medida com um termopar e controlada por uma ventoinha de arrefecimento e um aquecedor. A iluminação é detetada com um LDR e se necessário é acionada uma tira de LED's. O pH é medido por um eletrodo de pH e tem como atuadores um alarme para alertar para valores anómalos e uma electroválvula para a injeção de água doce no tanque, renovando assim a água para retificar o pH. O oxigénio dissolvido é medido pelo último microcontrolador, através de um sensor de DO e controla uma bomba injetora de oxigénio para aumentar o seu valor quando este é inferior ao valor de referência. Todos os sensores têm circuitos de condicionamento e amplificação para colocar os sinais dentro da gama de medição dos ADC's (aproximadamente 0-5V).

Neves C. (2010) [24] foi uma das primeiras pessoas na comunidade científica a publicar a construção de um medidor de pH com base no microcontrolador Arduino. Este aparelho funciona apenas como medidor de pH e temperatura, não sendo no entanto capaz de atuar sobre o sistema e não tendo conectividade remota de qualquer tipo. É contudo um projeto em constante desenvolvimento e vai continuar a receber novas funcionalidades. Em termos de instrumentação, o circuito de condicionamento de sinal é maioritariamente feito recorrendo a elementos discretos, e a calibração do sensor é feita exclusivamente por meio eletrónico através de potenciómetros.

2 - Arquitetura do sistema distribuído de medição de pH

2.1 - Levantamento do sistema existente

O primeiro passo do trabalho foi a deslocação ao Centro do Ramalhete, falar com o João Reis, o técnico responsável pelo Centro e fazer o levantamento do sistema hídrico e elétrico existentes e relevantes para o trabalho em questão.

Existe um sistema com um par de circuitos hídricos, um onde a água é circulada com condições normais de pH (sistema de referência), e outro onde a água é tratada com concentrações de CO₂ superior ao normal (e conseqüentemente, um valor de pH mais baixo) para serem realizadas experiências sob diferentes condições do meio aquático.

Cada circuito hídrico é composto por um tanque primário de 2000L, onde se dá a entrada de água vinda de uma bacia na Ria Formosa e onde o pH da água a circular é tratado (através da injeção de CO₂ para redução, ou através de uma bomba aeradora para aumento). A partir deste tanque sai a água para os tanques secundários no circuito (tanques de 640L onde são realizadas as experiências), e no final do circuito, qualquer água em excesso é retornada ao tanque primário.

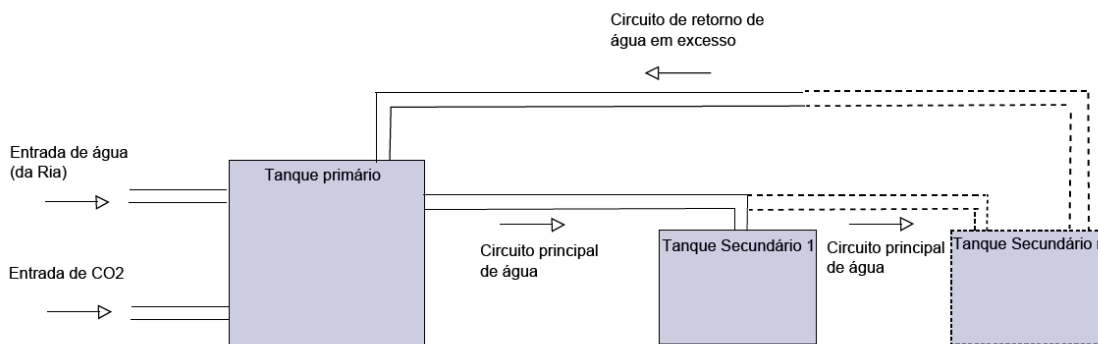


Figura 2.1 - Configuração inicial do sistema existente

O controlo do pH no tanque primário é realizado através de um Controlador Yokogawa EXA XT 450, configurado para exercer controlo proporcional nos níveis de pH através de uma sonda inserida na tubagem e de uma eletroválvula que dispara para libertar CO₂ no sistema sempre que necessário baixar o pH. Para elevar o pH, o tanque está dotado de uma bomba aeradora que aciona quando é necessário fazer uma correção por excesso da quantidade de

CO₂. Os dados do controlador são registados num *datalogger* para serem periodicamente transferidos para o computador, o que é feito manualmente.

Contudo, atualmente os tanques secundários não são controlados, e isto acarreta alguns problemas na acuidade dos resultados pretendidos. Isto porque a água é distribuída pelos tanques secundários, mas a atividade biológica decorrente em cada tanque altera significativamente o valor de pH em cada um dos tanques secundários, relativamente ao tanque primário. Por isso, o valor de pH nos tanques subsequentes ao primeiro nunca será igual ao realmente pretendido (a referência para o qual o controlador foi configurado, e o presente no tanque primário), o que contamina os resultados obtidos em cada tanque pois as experiências passam a ser feitas em condições diferentes das pressupostas. Nos últimos tanques o problema é exacerbado pois a mesma água já foi alterada diversas vezes nos anteriores.

A solução para esse problema, e o âmbito deste trabalho, é desenvolver um protótipo para um módulo controlador que possa ser aplicado nos tanques secundários (ou em qualquer outro tanque existente em que venha a haver necessidade de regulação), para que o controlo de pH possa ser feito localmente, em cada tanque individual. Estes controladores são governados por um microcontrolador que monitoriza e transmite os dados e controla a atuação. Isto garante que o valor de pH se mantém estável ao longo de todo o circuito e que é exatamente o pretendido, garantindo resultados mais apurados.

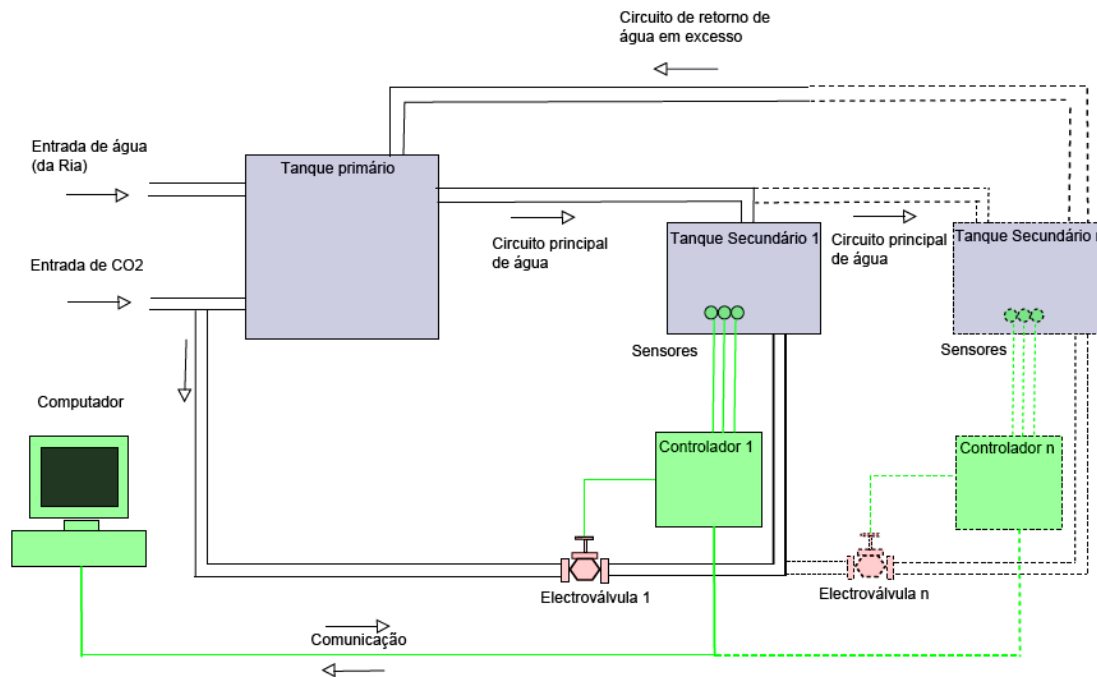


Figura 2.2 - Configuração projetada do sistema

O módulo controlador de pH tem os seguintes requisitos de funcionalidade:

- Medir os valores de pH e de temperatura da água, e apresentar esses valores num ecrã de LCD.
- Exportar esses dados para que possam ser acedidos remotamente, através da funcionalidade de *Web Server* do Arduino e de um *script* cliente em Python.
- Decidir através da leitura dos parâmetros e de um algoritmo de controlo quando se torna necessário atuar no sistema, acionando um relé para ativar a electroválvula dispensadora de CO₂, controlando assim o nível de pH da água.
- Permitir ajustar a referência (*set point*) de pH local e remotamente.
- Permitir a calibração com soluções padrão de pH.
- Ter uma construção simples, flexível e *open source* que permita de futuro alterar ou adicionar funcionalidades, e reinstalar noutros locais.
- Economia de custos, comparativamente a outros produtos comerciais.

2.2 – Componentes

Para o protótipo deste módulo foram escolhidos individualmente todos os componentes, de acordo com as especificações pretendidas. Para além dos principais componentes que se apresentam nas seguintes secções, foram também utilizados outros componentes discretos como condensadores e resistências.

2.2.1 - Sensor de pH, calibração e interface

O eléctrodo de pH comporta-se essencialmente como uma pequena bateria, já que a sua voltagem à saída é proporcional à concentração de iões de hidrogénio envolvendo o eléctrodo. É gerada uma força eletromotriz entre o eléctrodo sensível à atividade de iões de hidrogénio e um eléctrodo de referência, quando estão ambos mergulhados na mesma solução, e é usada uma célula galvânica para detetar essa força.

Idealmente o eléctrodo de pH deve apresentar as seguintes características (segundo EME Systems, 2003 [31]):

- Tensão nula (0 V) à saída para um pH = 7 (neutro)
- Tensão positiva em soluções de pH < 7 (ácido)
- Tensão negativa em soluções de pH > 7 (base)
- Gama total de pH de 0 a 14, de ácido forte até base forte
- Gerar -59.2 mV por unidade de pH a uma temperatura de 25 °C (Equação de Nernst).
- A gama de tensões total deve ser +/- 0.4144 V a 25 °C (ou, $7 * 59.2$ mV)

O coeficiente de temperatura do potencial de Nernst é $k = -0.001984$ mV / °C. Isto significa que a uma temperatura de 0 °C a resposta será de -54.2 mV por unidade de pH, e a 100 °C será de -74.04 mV por unidade de pH.

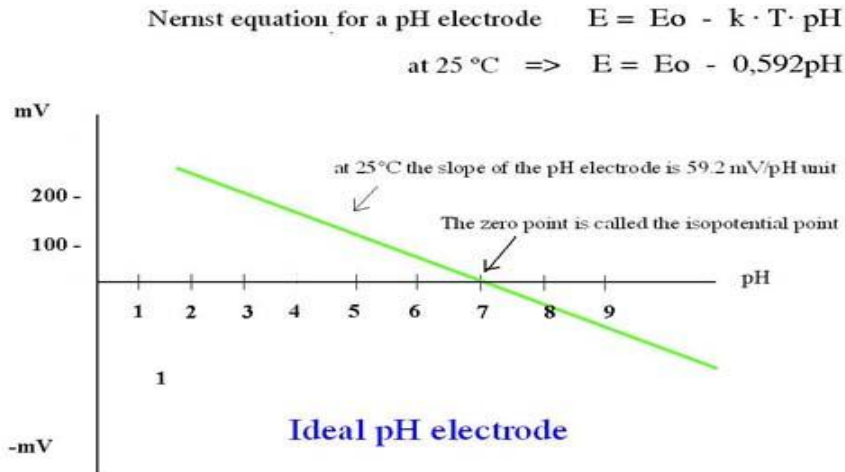


Figura 2.3 - Resposta elétrica do eletrodo de pH segundo equação de Nernst (www.all-about-ph.com/nernst-equation.html)

Em raras ocasiões o eletrodo é ideal. Ele é condicionado pela sua própria construção, pela sua idade e pela utilização prévia. Para além disso há diversos tipos de sensores, onde diferem os materiais, as membranas, junções, adequados para todo o tipo de aplicações.

Um aspeto de particular relevância quando se pretende medir pH é a impedância de saída do eletrodo, que é extremamente elevada devido à sua construção, nomeadamente ao bulbo de vidro. Esta impedância pode chegar a valores entre os 10 e os 100 MΩ. Como tal, são necessários alguns cuidados especiais para medir a tensão produzida pelo eletrodo, pois uma abordagem incorreta levará a que sejam medidos valores muito inferiores à realidade. Qualquer aparelho que seja utilizado para medir essa tensão terá que ter uma impedância de entrada muito elevada, na ordem do 1 TΩ ou superior. Para que possa ser feita uma comparação, a maior parte dos instrumentos de medição não têm mais de 10 ou 20 MΩ de impedância de entrada, o que os torna pouco apropriados para medirem estes sinais sem que o sinal seja condicionado antes da sua medição (EME Systems, 2003 [31]).

Para baixar a impedância de saída, pode ser colocado um amplificador operacional de alta impedância de entrada e baixa corrente de polarização, com realimentação negativa à saída do sensor com ganho igual ou superior a 1 (uma configuração seguidor de tensão com ganho=1 permite medir a resposta elétrica pura do sensor, sem amplificação). À saída do Amp-Op, o sinal terá mais baixa impedância, facilitando a sua medição pela maior parte dos

voltímetros e transporte através de distâncias maiores de cabo, com maior resiliência ao ruído e atenuação.

A ligação da ficha BNC para a entrada do Amp-Op deve ser feita com extrema cautela. O sinal de alta impedância é muito sensível ao ruído, incluindo o ruído de frequência de 50 Hz da rede elétrica. Por isso, o pino central da ficha BNC deve ser, se possível, diretamente soldado à entrada não inversora do Amp-Op (ou com o menor comprimento possível de fio condutor) e se possível essa ligação deve ser feita no ar, sem estar em contato com a PCB ou com outros contatos; isto é necessário para garantir que o sinal não é adulterado antes de entrar no Amp-Op, uma vez que quaisquer ruídos assimilados vão ser também amplificados, destruindo a integridade dos dados.

É necessário ainda ter em consideração as correntes de polarização (*Input Bias Current*) dos amplificadores operacionais utilizados, principalmente o primeiro Amp-Op que faz o interface com o sensor, por causa do sinal de alta impedância. Por exemplo, uma corrente de polarização tão baixa como 1 nA através de uma resistência de 100 M Ω é igual a uma tensão de *offset* à saída de 100 mV (o que equivale, atendendo ao potencial de Nernst, a uma diferença de aproximadamente 2 pH no resultado final). Assim o Amp-Op deve ter uma *Input Bias Current* na ordem dos pA (10^{-12} A), ou mesmo fA (10^{-15} A), para minimizar esse risco. Os Amp-Ops à base de transístores FET oferecem esses parâmetros e são recomendáveis para este tipo de aplicação (EME Systems, 2003 [31]).

Tendo em conta a construção de cada elétrodo, a sua idade e histórico de utilização e manutenção, a resposta elétrica dificilmente será idêntica de elétrodo para elétrodo, e mesmo um único elétrodo ao longo do tempo verá a sua resposta elétrica alterada. Para isso torna-se necessário calibrar o aparelho de tempos a tempos. Há dois tipos de calibração que podem ser feitos:

- **Standardizar** – ajustar a tensão de referência para alterar o *offset* da reta mV/pH, para que tenha o zero em pH=7.
- **Calibrar** - ajustar o ganho do amplificador para alterar o declive da reta mV/pH, para que uma tensão medida corresponda ao suposto valor de pH.

Normalmente isto é conseguido ajustando a tensão de referência (no caso da standardização) ou o ganho do amplificador (no caso da calibração) com um potenciômetro, através de *software*, ou uma combinação dos dois.

Ambas as calibrações são feitas com o auxílio de soluções *buffer* de pH padrão (pH 4, pH 7 e pH 10 são os mais comuns, embora haja outras), mergulhando o sensor na solução e efetuando ao mesmo tempo a calibração. A calibração com pH 4 deve ser utilizada quando o meio se espera predominantemente ácido, e analogamente, com pH 10 quando se espera que seja básico.

A temperatura também tem um efeito mensurável na variação do pH, logo uma mesma solução a temperaturas diferentes verá o seu valor de pH flutuar. Como tal é possível (e recomendável) fazer a compensação automática de temperatura.

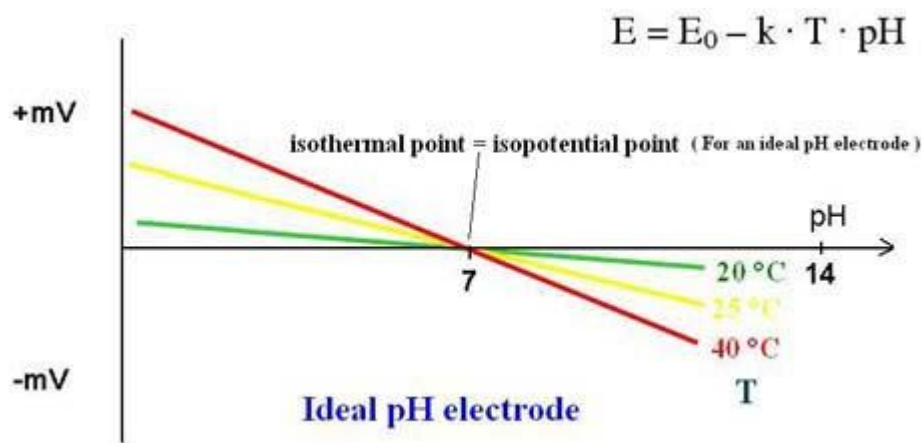


Figura 2.4 - Variação da resposta elétrica do eletrodo com a temperatura (www.all-about-ph.com/ph-versus-temperature.html)

2.2.2 - Sensor de temperatura

O sensor de temperatura utilizado é um LM35 da National Semiconductor. Este sensor é muito económico, simples de utilizar, não necessita de nenhuma manutenção nem calibração e oferece uma grande fiabilidade, precisão e gama de operação, aliado a um baixo consumo energético. Isto deve-se ao seu princípio de funcionamento assente na eletrónica de estado sólido: a tensão que percorre um díodo depende diretamente da temperatura a que está sujeito. Amplificando essa variação de tensão, temos assim um sensor muito resiliente e apurado.

O sensor tem 3 pinos, um das quais é a alimentação (5VDC), outro é a terra, e o último é a saída de tensão em função da temperatura. Para este modelo em particular, a variação é de 10mV por grau centígrado (por exemplo, a 25°C, a tensão de saída é 250 mV).

Para utilização em meio aquático, fechou-se o sensor dentro de um invólucro de plástico selado com um epóxido, neste caso Araldite. Esta solução tem a contrapartida de aumentar ligeiramente a inércia térmica (tornando a resposta um pouco mais lenta), mas é necessária para proteger o sensor na aplicação que se pretende.

2.2.3 - Fonte de alimentação

O dispositivo pode ser alimentado a partir de uma tomada de rede de 230 VAC, tendo um transformador de 240 VAC – 24 VAC (com referência no *center tap*, logo 12 V entre qualquer um dos terminais das pontas e o centro, e 24 V entre os dois terminais das pontas). O transformador debita uma corrente máxima de 1500 mA, o que é suficiente para a aplicação que se pretende. Desta maneira pode-se:

- Alimentar diretamente a electroválvula a 24 VAC.
- Retificar o sinal (fazendo uma retificação de onda completa) e usar reguladores lineares de tensão para fornecer níveis a 9 VDC, 5 VDC, 2.5 VDC, e -9 VDC.

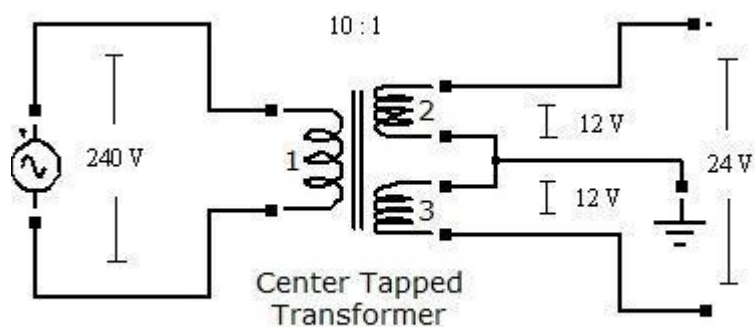


Figura 2.5 - Transformador 240V - 24V

Estas tensões terão as seguintes aplicações:

- Os 9 VDC são para o *rail* positivo do amplificador de instrumentação, e para alimentar o Arduino. Obtida com um regulador linear de tensão LM7809.
- Os 5 VDC, para alimentar os amplificadores operacionais, ecrã de LCD, botões pulsadores e sensor de temperatura. Obtida com um LM7805.
- Os 2.5 VDC, para a tensão de referência do amplificador de instrumentação (que induz um *offset* à saída do amplificador). A implementação deste andar com um regulador de tensão ajustável LM317 e uma malha contendo um potenciômetro permite ajustar a tensão de saída (que será a tensão de referência do amplificador), refinando a calibração do *offset*.
- Os -9 VDC são para o *rail* negativo do amplificador de instrumentação, obtido com um regulador de tensão negativa LM7909.

O sinal de 24 VAC após retificado com uma ponte de díodos e filtrado, é transformado num sinal de 34 VDC, como ditado pela seguinte expressão:

$$V_P = \sqrt{2} \cdot V_{RMS} = \sqrt{2} \cdot 24 = 34 \text{ V} \quad (5)$$

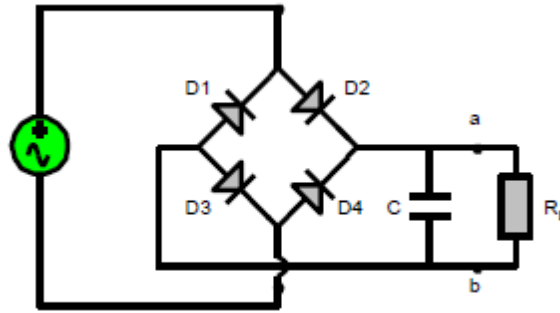


Figura 2.6 - Ponte de díodos de retificação completa de onda

Assim tem-se um *voltage swing* aos terminais da ponte de díodos de 0 a 34 V. Contudo pode-se adicionar dois condensadores eletrolíticos de 1000 uF e colocando a terra de referência ao seu ponto comum, obter-se um *voltage swing* de -17 V a 17 V.

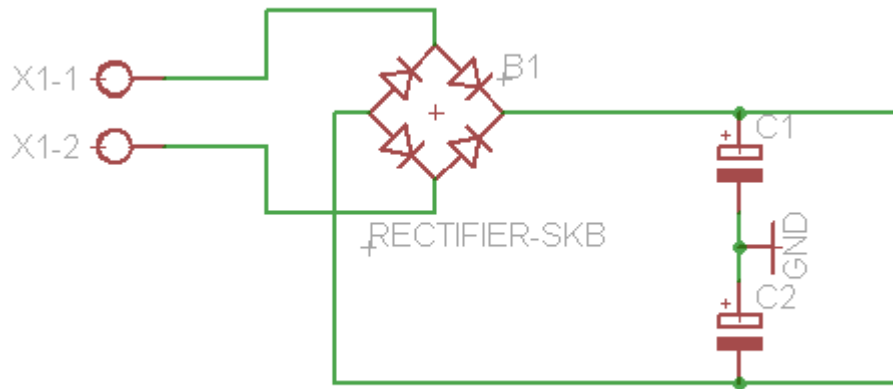


Figura 2.7 - Esquema EAGLE do retificador de onda completa

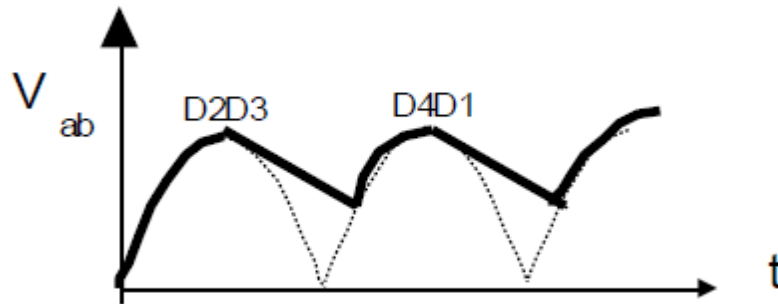


Figura 2.8 - Forma de onda após retificação de onda completa com condensadores

Os condensadores suavizam o sinal, armazenando energia que é libertada durante a fase descendente da curva, para assim haver um fornecimento constante de energia à carga.

Após o sinal retificado para 17 VDC, pode-se baixar a tensão para os 9 VDC colocando um regulador linear LM7809 em série.

Esta queda de tensão acarreta alguma perda energética, pois a potência dissipada dá-se sob a forma de calor pelo componente LM7809. Essa perda de potência é descrita pela expressão:

$$P_{max} = V \cdot I_{max} = 8 \times 1.5 = 12W \quad (6)$$

O que significa que à carga máxima de 1.5 A que o regulador debita, e tendo em conta que a queda de tensão desejada através do regulador é de 8 V, a potência máxima a ser dissipada é de 12 W. Isto seria extremamente ineficiente, mas considerando que a corrente consumida pelo circuito a jusante não supera a centena de mA (ao invés dos 1.5 A que o dispositivo suporta), as perdas são baixas e toleráveis. Assumindo uma corrente total de 100 mA, a potência dissipada será:

$$P_{max} = V \cdot I_{max} = 8 \times 0.1 = 0.8W \quad (7)$$

Em paralelo com o regulador de 9 V pode-se colocar um regulador linear LM7805, que baixa a tensão de 17 VDC para 5 VDC.

A perda de potência máxima é de:

$$P_{max} = V \cdot I_{max} = 12 \times 1.5 = 18W \quad (8)$$

Assumindo uma corrente total de 100 mA, a potência dissipada será:

$$P_{max} = V \cdot I_{max} = 12 \times 0.1 = 1.2W \quad (9)$$

Para obter os 2.5 V a partir dos 17 V para introduzir no amplificador de instrumentação, pode-se fazer uma malha com um regulador linear variável LM317T.

A tensão de saída do LM317T é definida por 2 resistências. Utilizando um potenciômetro como uma dessas resistências, pode-se facilmente variar a resistência aos terminais do regulador, e como tal a tensão de saída. Assim é possível variar a tensão de referência, para calibrar o aparelho.

Essa tensão é definida por:

$$V_O = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (10)$$

Em que V_{ref} é a diferença de potencial entre os pinos *Output* e *Adjustment* do LM317T.

A partir dos -17V utiliza-se um regulador linear negativo de tensão LM7909 para obter os -9V. A perda energética é a mesma que existe na conversão de 17V para 9V.

Em seguida apresenta-se o esquema dos andares *step-down* para 9V, -9V, 5V, e 2.5V.

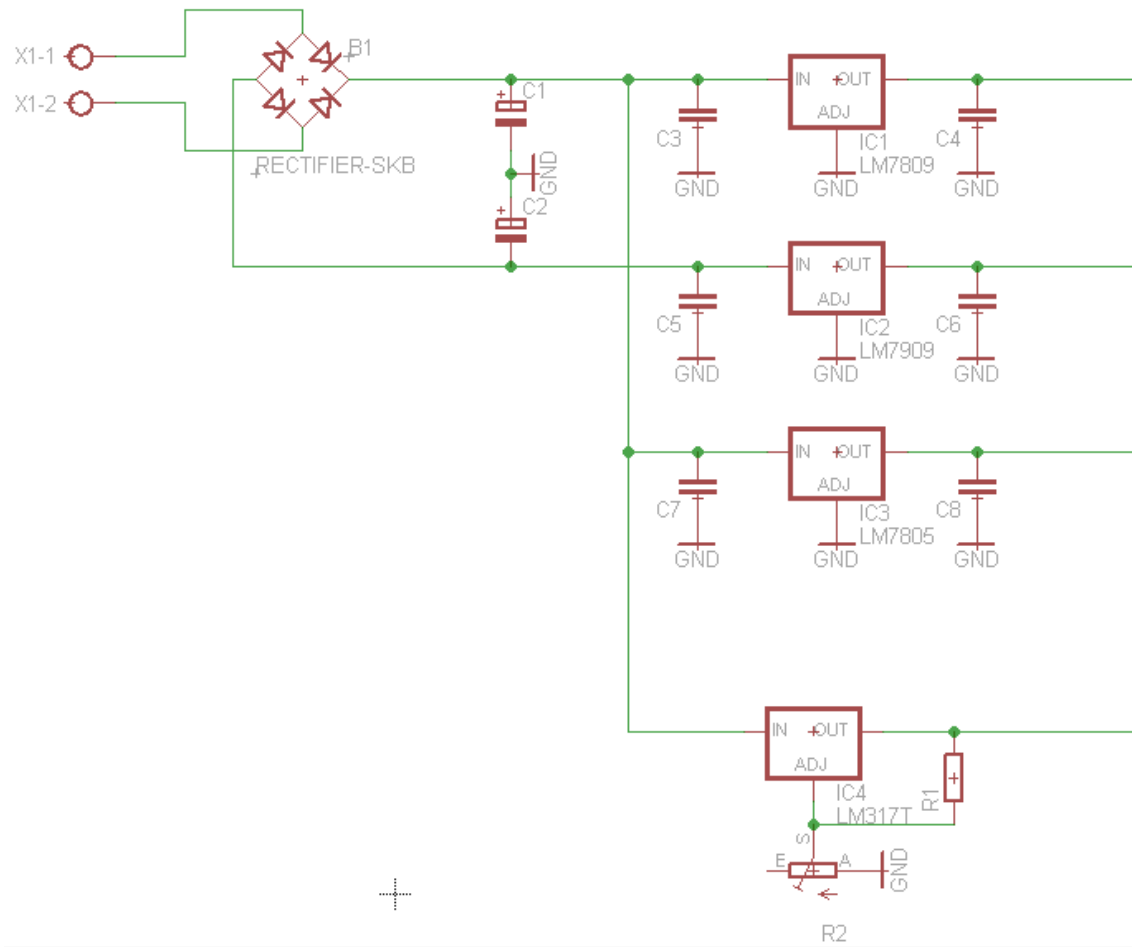


Figura 2.9 - Esquema EAGLE da fonte de alimentação completa do equipamento

Para melhor dissipar o calor proveniente das perdas energéticas dos reguladores, é aparafusado um dissipador de alumínio no corpo dos mesmos. Este dissipador em conjunto com uma massa térmica colocada entre os dois proporciona uma superfície maior, e suficiente, para a dissipação do calor gerado.

2.2.4 - Amplificador de instrumentação

Para o amplificador de instrumentação, foi escolhido um INA111AP da Texas Instruments.

Este amplificador oferece os parâmetros desejados, como uma baixa corrente de polarização de entrada (*input bias current*), o que é essencial para um sinal de muito alta impedância como é o proveniente do sensor de pH. A elevada impedância de entrada do amplificador também é necessária para manter a integridade do sinal, face a essa alta impedância do sinal. Uma baixa tensão de *offset* assegura que a variação no sinal de saída é minimizada. O ganho é definido através do uso de uma resistência externa. Dispõe ainda de um pino onde se pode introduzir uma tensão de referência para induzir um *offset* à saída.

As funções do amplificador de instrumentação são de *buffer*, amplificação e *offset* do sinal. Teoricamente, o sinal de saída do amplificador será um sinal com uma amplitude de 0 a 5 V, de baixa impedância, que entrará no ADC do microcontrolador para ser processado.

As características principais do amplificador são:

- Corrente de polarização: $I_b=20$ pA
- Tensão de *offset*: $V=500$ uV
- CMRR: 110 dB
- Supply Voltage Range: +-15 V
- Output Voltage: +-12.7 V

O pino Ref do amplificador de instrumentação precisa de um sinal com baixa impedância à sua entrada para garantir um bom CMRR. Como tal, à tensão de referência deve ser aplicado um Amp-Op em configuração seguidor de tensão para fazer *buffer* do sinal. Isto permite baixar a impedância do sinal antes de entrar no pino Ref. Neste caso utiliza-se um OPA177GPG4 da Texas Instruments.

Este pino é muito útil numa multiplicidade de aplicações, mas é essencial quando se está a medir pH, porque o sensor de pH tem uma resposta elétrica bipolar, ou seja, a gama de tensões à saída engloba valores positivos e negativos, dependendo do valor do pH medido. Como o microcontrolador Arduino apenas aceita valores positivos (0-5 V por defeito), é

necessário aplicar um *offset* ao sinal para que este se encontre dentro de uma gama que possa ser analisada (ou seja, um sinal estritamente positivo).

O sinal de alta impedância proveniente do sensor de pH necessita de cuidados especiais para garantir que não é adulterado antes de entrar no amplificador de instrumentação. Assim, a ficha à qual liga o sensor deve estar diretamente ligada (ou o mais perto possível) à entrada não inversora do amplificador, livre de outras possíveis fontes de interferência. O desenho da PCB deve ter em conta este aspeto, e deve ser feito isolamento nesse sentido.

O ganho do amplificador é definido por uma resistência externa, que deve ter uma variância muito reduzida, para garantir que o fator de ganho não flutua demasiado. A expressão do ganho é dada por:

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (11)$$

Neste caso, pretendendo um ganho $G = 10$, a resistência empregue deverá ser de $R_G = 5.6 \text{ k}\Omega$. Utilizando resistências com uma variância de 0.1%, assegura-se que o ganho é o mais constante e apurado possível.

O amplificador de instrumentação utilizado opera em regiões de tensão impostas pelos *rails* positivo e negativo que são injetados nos dois pinos de alimentação correspondentes (V+ e V-). Como o dispositivo não dispõe da característica de *rail-to-rail output*, há uma certa queda de tensão interna, pelo que a tensão à saída não será capaz de alcançar os limites (*rails*) da alimentação. Segundo a *datasheet*, para uma tensão de alimentação de $\pm 15 \text{ V}$, a saída terá um valor típico de $\pm 12.7 \text{ V}$ (ou seja, há uma queda de tensão de aproximadamente 2.3 V). Assim, o *supply* deverá ser sempre 2.3 V , pelo menos, acima do valor máximo que se espera ter à saída, e -2.3 V abaixo do valor mínimo.

Com uma alimentação de 9 V a -9 V como utilizado neste projeto, os sinais à entrada e à saída poderão estar dentro de uma gama de valores entre 6.7 V e -6.7 V , o que é adequado para a aplicação em questão.

2.2.5 - Acionamentos e Interface

Para acionar a eletroválvula a 24 VAC, utiliza-se um relé cujo sinal de controlo pode ser ativado por uma saída digital a 5 V do Arduino. Optou-se por utilizar um relé de estado sólido Opto-22 MP120D4 pelas vantagens que oferece relativamente aos tradicionais relés eletromecânicos, nomeadamente:

- Fiabilidade, resiliência e longevidade acrescidas devido à falta de componentes mecânicos, permitindo mais ciclos de abrir/fechar, sendo esses ciclos consideravelmente mais rápidos.
- Pode ser acionado com um sinal digital de controlo tão baixo como 3 V, por isso pode ser ligado diretamente à saída digital do Arduino a 5 V sem outro tipo de componente de interface entre os dois, apenas sendo utilizada uma resistência de 1.5 k Ω para limitar a corrente.
- Não produz ruído eletromagnético, vibrações, nem introduz não-linearidades no sistema, o que pode acontecer no ciclo de abrir/fechar de um relé eletromecânico, tendo em conta que o relé está montado na mesma PCB que o resto dos componentes.

Para poder visualizar os parâmetros que estão a ser medidos pelo sensor, e para interagir com o módulo, utiliza-se um ecrã de LCD de 16 colunas por 2 linhas Hitachi HD44780U, assim como 3 botões físicos.

Para poder interagir diretamente com o módulo, foram implementados três botões pulsadores: “Up”, “Down” e “Calibrar”.

Os botões “Up” e “Down” podem ser pressionados para fixar o valor de referência desejado para o pH. Estes botões têm assim uma resposta direta na atuação do sistema, permitindo escolher no momento o pH desejado para a amostra. De acordo com o valor introduzido para a referência, o algoritmo de controlo tentará fazer uma aproximação do meio a esse valor, acionando através do relé a electroválvula dispensadora de CO₂.

O protótipo apenas permite a atuação quando é necessário injetar CO₂, ou seja, quando se deve baixar o valor de pH da solução. Isto porque a elevada atividade biológica a decorrer dentro dos tanques faz com que o CO₂ dissolvido na água seja consumido com alguma rapidez, e como tal, o sistema converge para um ponto de equilíbrio em que pH é tendencialmente maior que 7 (básico). Como o propósito do aparelho é controlar o pH em tanques onde vão ser realizadas experiências em meios ácidos (pH ≤ 7), este protótipo apenas tem essa capacidade de atuação sobre o meio.

O botão “Calibrar” pode ser pressionado a qualquer altura para entrar no modo de calibração do aparelho. Neste modo é pedido ao utilizador para que mergulhe o sensor de pH numa solução padrão de pH 7, aguardar alguns minutos para que o eletrodo se possa ajustar à solução e o sinal estabilizar, e depois pressionar novamente o botão para confirmar. Quando isto é feito, o sistema é calibrado para o *offset* (para pH=7, a resposta elétrica deve ser 0 mV. Neste caso o propósito é medir qualquer voltagem presente que seja diferente de zero, e subtrair esse valor da equação do cálculo final).

Após a calibração para pH 7, é pedido para repetir o processo para uma solução de pH 4. O princípio é o mesmo, exceto que aqui o sistema é calibrado para o ganho (o ganho definido por *hardware* é G=10, se o valor medido pelo sistema for diferente do que o esperado, são realizados cálculos para ajustar a reta mV/pH em *software*.)

2.2.6 - Placas de circuito impresso (PCB)

Havendo uma máquina CNC de fabrico de circuitos impressos disponível no laboratório do Centro de Sistemas Inteligentes, fez-se o *layout* com o *software* de design de circuitos EAGLE e recortou-se a placa a partir de uma placa de cobre de dupla face para circuito impresso. Os componentes foram posteriormente colocados em posição e soldados na placa.

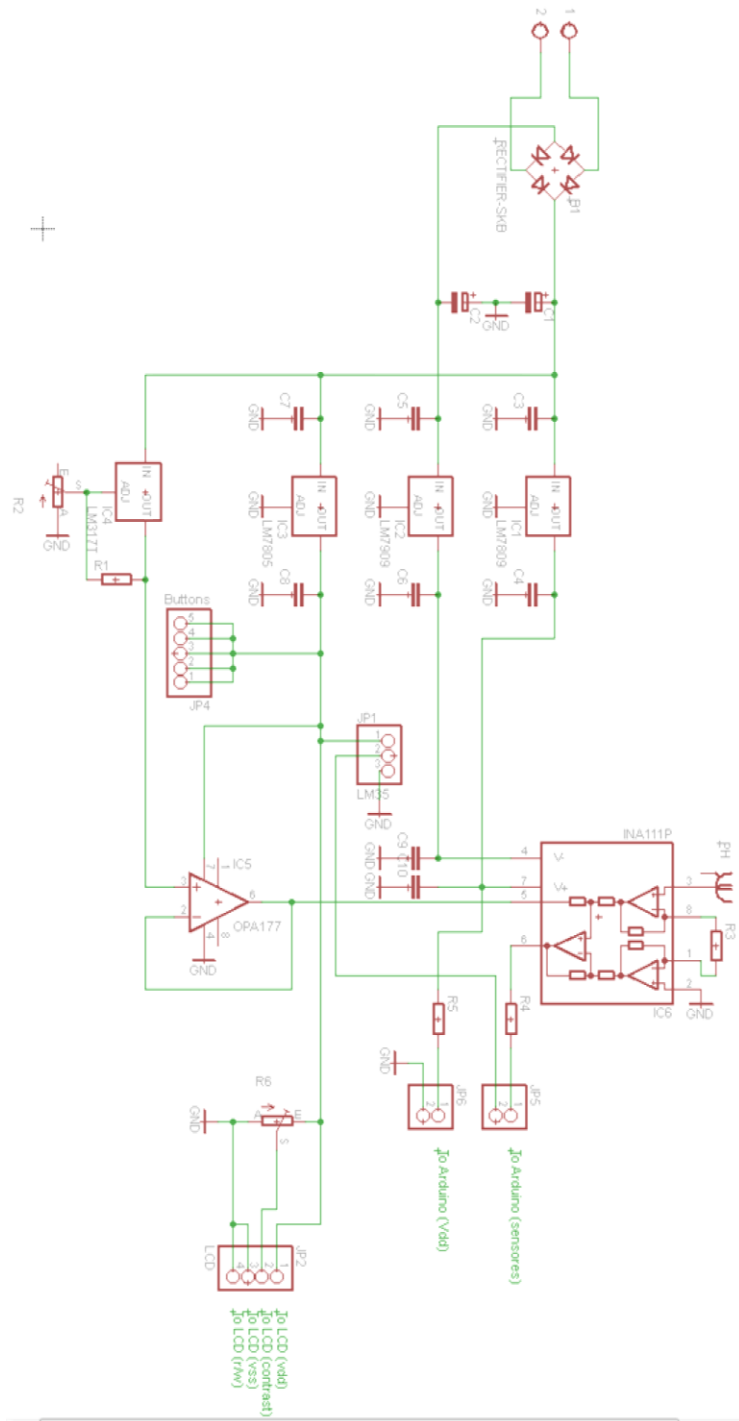


Figura 2.10 - Esquema EAGLE do circuito completo da PCB 1

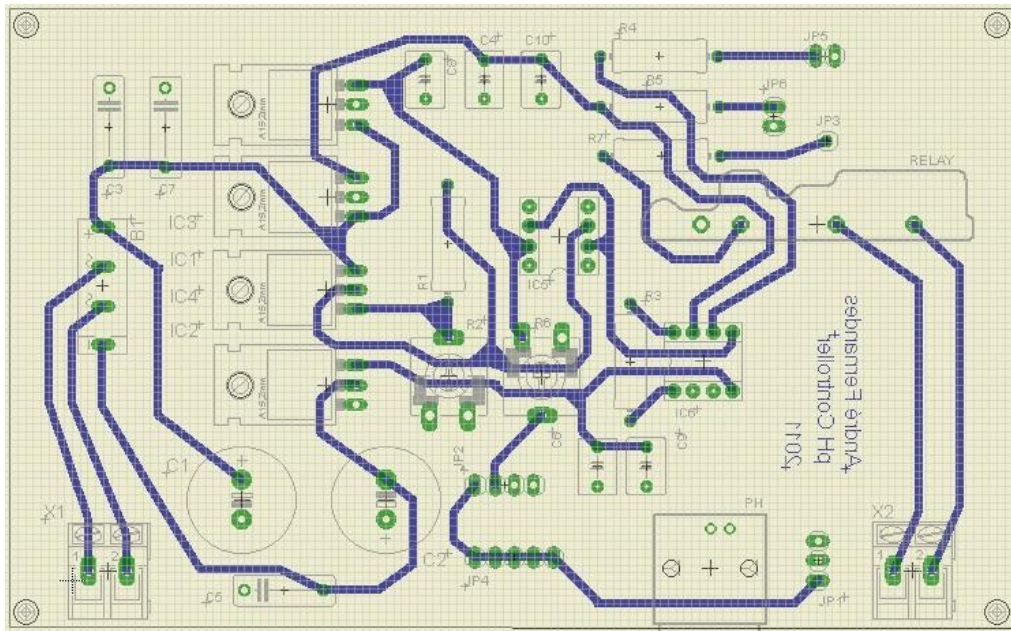


Figura 2.11 - Esquema completo da PCB 1 para impressão

Uma segunda placa, mais pequena, foi feita para albergar os botões pulsadores. Esta pequena placa recebe uma alimentação de 5V diretamente da PCB 1, para alimentar os botões, e tem como saídas 4 entradas digitais para o Arduino (uma para cada botão, embora apenas sejam utilizadas 3 neste momento).

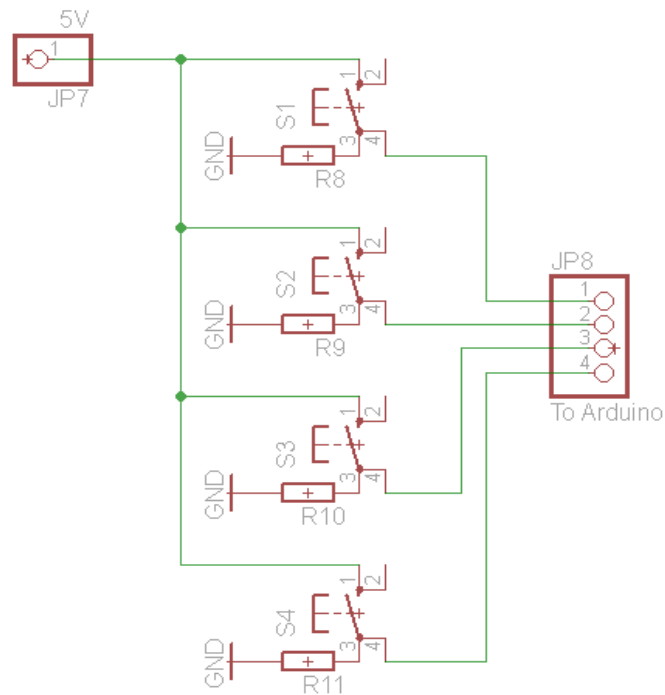


Figura 2.12 - Esquema EAGLE completo da PCB 2

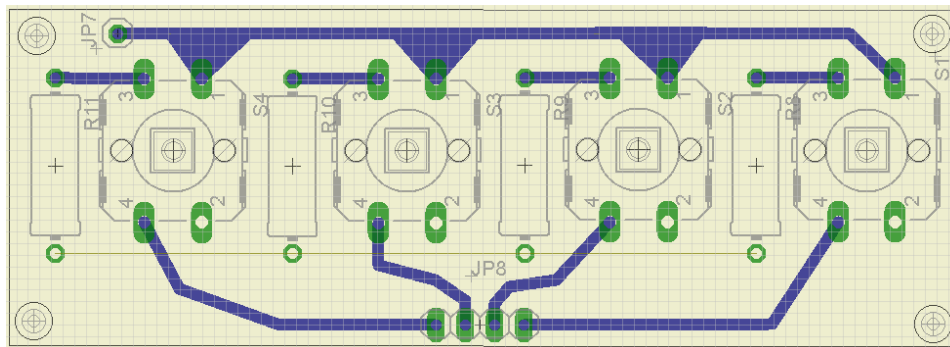


Figura 2.13 - Esquema EAGLE da PCB 2 para impressão

Os botões são montados com uma resistência *pull-down* em cada um (R8 a R11), para assegurar que o pino de saída (que será uma entrada digital do Arduino) está sempre no estado LOW quando o botão não está pressionado. Uma eventual tensão flutuante nesse pino poderia fazer com que o botão atuasse de maneira errática, estabelecendo um estado HIGH na entrada do Arduino, e provocando assim comportamentos indesejáveis no sistema.

2.2.7 - Filtro passa-baixo

Imediatamente antes do microcontrolador foram implementados dois filtros RC passa-baixo para filtrar os sinais oriundos dos sensores de pH e temperatura, para eliminar eventuais ruídos que possam ser inseridos a qualquer altura do condicionamento do sinal.

Sendo que as seguintes expressões definem a frequência de corte F_C e a constante de tempo τ de um filtro:

$$F_C = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \text{ k}\Omega \cdot 0.1 \text{ }\mu\text{F}} = 10 \text{ Hz} \quad (12)$$

$$\tau = RC = 100 \text{ k}\Omega \cdot 0.1 \text{ }\mu\text{F} = 10 \text{ ms} \quad (13)$$

Para uma $R = 100 \text{ k}\Omega$ e um $C = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$, consegue-se uma $F_C = 10 \text{ Hz}$ e uma constante de tempo $\tau = 10 \text{ ms}$, o que filtra a maior parte dos sinais indesejados que possam surgir, incluindo perturbações de 50 Hz da rede elétrica e dos motores das bombas de água.

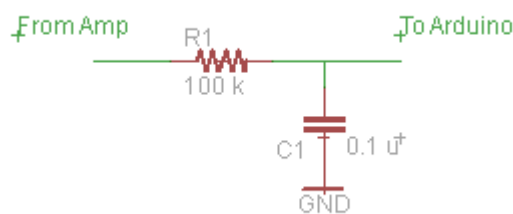


Figura 2.14 - Esquema EAGLE do filtro passa-baixo

2.2.8 - Microcontrolador

Para a unidade de processamento selecionou-se uma placa Arduino Uno. Esta oferece uma plataforma aberta, versátil, relativamente simples de usar e modificar, e permite a implementação de novas funcionalidades no futuro, ou a reutilização noutra aplicação, a um baixo custo.

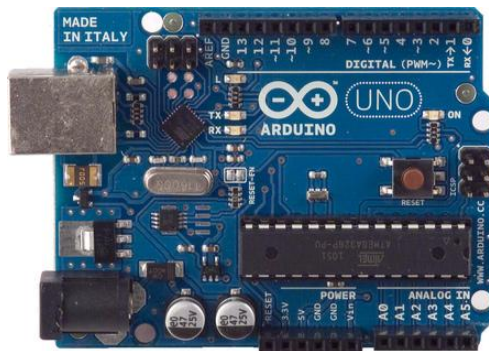


Figura 2.15 - Microcontrolador Arduino Uno

O Arduino oferece uma ADC de 10 bits, 6 entradas analógicas e 14 pinos digitais que podem ser utilizados como entradas ou saídas. Por defeito a sua gama é entre 0 e 5 V, embora o valor máximo possa ser definido como qualquer valor entre 0 e 5 V através do pino Aref (também dispõe de outros valores de referência internos que podem ser selecionados em vez dos 5 V, nomeadamente 3.3 V e 1 V).

Por a gama de tensões da ADC ser entre 0 e 5V, o sinal tem de ser condicionado em termos de tensão e corrente para estar compreendido nos valores esperados e passíveis de serem analisados.

O *software* do microcontrolador foi desenvolvido de raiz para responder às exigências e especificações, recorrendo por vezes a livrarias disponibilizadas pela comunidade.

Acoplado ao Arduino está um *shield* Ethernet, que permite ao dispositivo ligar-se à Internet. Isto permite ao Arduino funcionar como um *web server*, significando que a partir de um qualquer computador com acesso à Internet e que disponha do *script* em Python, se possa

monitorizar os parâmetros de pH, temperatura e referência. Também permite que seja ajustado o valor de referência remotamente. Futuramente poderá permitir ao controlador ser integrado num sistema distribuído com outros aparelhos similares.

2.2.9 - Invólucro

Para selar o aparelho foi escolhida uma caixa de quadro elétrico da Schneider, que foi modificada conforme as necessidades. A caixa tem um índice de proteção IP 65 (o que significa, conforme normas IEC 60529, que o interior fica selado contra pó e contra jatos de água), necessário já que a caixa vai estar instalada no exterior.



Figura 2.16 - Caixa fechada

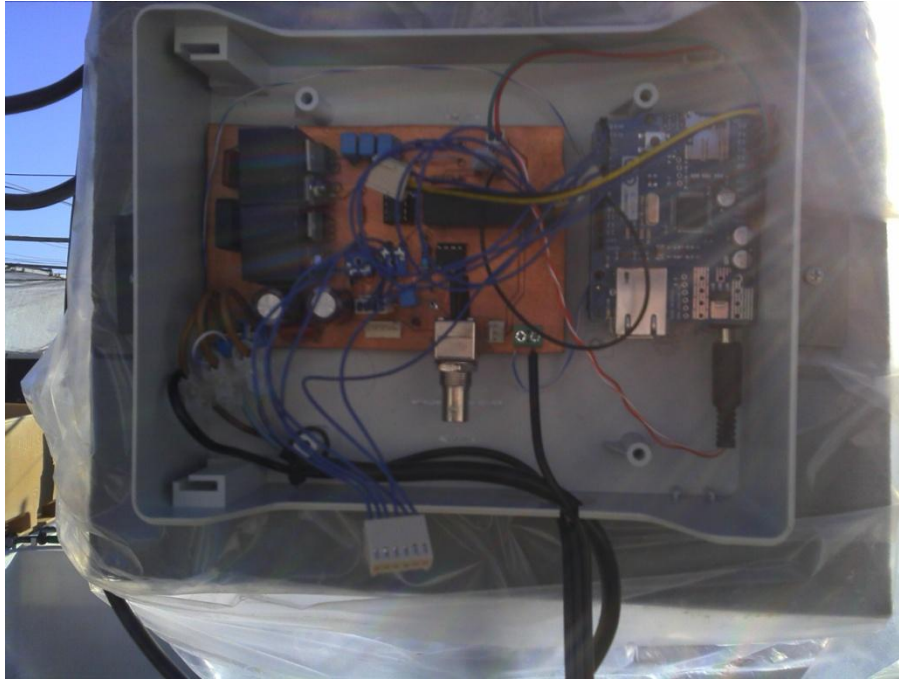


Figura 2.17 - Conteúdo interior da caixa

2.2.10 - Cablagem

A cablagem utilizada na construção foi cabo UTP Cat. 6 para a ligação de rede e para algumas interligações dentro do equipamento, cabo de cobre multifilar 22 AWG para as ligações entre Arduino, ecrã de LCD e conectores de PCB's, e cabo H07V-R de 3 condutores de 2.5 mm de diâmetro para a alimentação elétrica.

2.2.11 – Software

O *software* desenvolvido para o Arduino, que se comporta como um *web server*, vai ao encontro das especificações. O código deve:

- Fazer leituras dos valores do sistema (nomeadamente o pH e temperatura da água, através dos sensores) e atuar no meio (através da injeção de CO₂, por meio do conjunto relé e electroválvula), quando houver uma decisão do controlador, ou do utilizador, nesse sentido.
- Executar toda a computação e cálculos necessários, como converter os sinais elétricos em unidades físicas para leitura, calibração do aparelho, e os cálculos do sistema de controlo.
- Conferir ao aparelho a possibilidade de escutar por ligações remotas por *socket* de clientes, respondendo com informações sobre os parâmetros medidos, ou outras variáveis de desempenho, e responder a pedidos de mudança de referência ou de atuação sobre o sistema.
- Permitir a calibração do aparelho com soluções *buffer* de pH 7 e pH 4, para *offset* e para ganho, respetivamente. Isto é feito através do ajuste da reta pH/mV, quando o sensor está mergulhado nas soluções e for pedida a calibração, comparando os valores medidos com os valores teoricamente esperados.
- Por último, fazer o interface com o utilizador, apresentando os valores de pH, temperatura e referência no ecrã de LCD, e respondendo aos apertos de botões físicos e agindo de acordo.

Paralelamente, foi desenvolvida uma aplicação cliente escrita em Python que interage com o aparelho, para efeitos experimentais, de simulação, monitorização e controlo. Ela faz periodicamente uma ligação por *socket* com o aparelho, passa-lhe valores de parâmetros (como definir o valor para a referência de pH), solicita uma atuação no sistema ou um pedido de envio dos valores atuais medidos das variáveis de processo, mostrando esses valores e gravando-os em ficheiro. Isto permite a qualquer utilizador remoto interagir com o aparelho e monitorizar os parâmetros do processo.

2.2.12 – Sistema de controlo

Dado que o comportamento do sistema não é perfeitamente previsível (isto é, as variações dos parâmetros da água não são sempre as mesmas, dependendo de vários fatores como a atividade biológica na água, temperatura, precipitação, quantidade de água injetada, estado do eletrodo), e que as variações podem dar-se com uma frequência muito grande, a atuação não deve ser por histerese, porque assim o pH estaria sempre a oscilar à volta da referência, desgastaria mais os elementos mecânicos e gastaria mais reagentes. Isto tornaria o sistema menos eficiente originando resultados menos satisfatórios e um pior aproveitamento de recursos.

A curva de titulação de pH também não é linear, mas logarítmica. Contudo, analisando essa curva observa-se que na gama de valores expectáveis de pH para a aplicação (que serão maioritariamente dentro do intervalo 7.0 e 8.5) existe uma zona de linearidade, onde pode-se considerar que o sistema é linear para este intervalo de operação. Para valores a aproximar os 6 ou acima de 9 o sistema começa a mostrar a sua natureza não-linear.

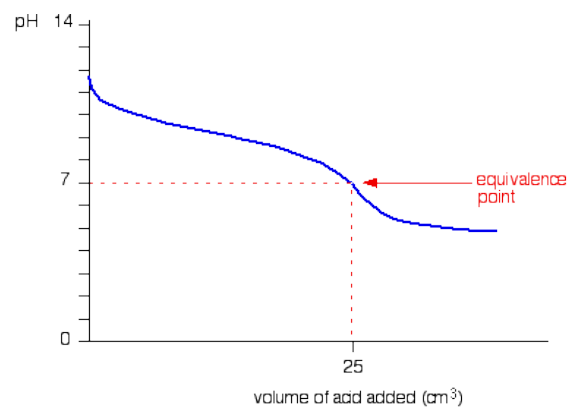


Figura 2.18 - Curva de titulação ácido fraco - base fraca
(<http://www.chemguide.co.uk/physical/acidbaseeqia/phcurves.html>)

Analisando o sistema, pela sua repetibilidade e sinal de referência maioritariamente constante, e linearidade no intervalo de operação, pode-se concluir que um controlador PID seria viável nesta aplicação, ultrapassando as limitações impostas por um método de controlo mais convencional e melhorando a eficiência do sistema automatizado. Assim, foi projetado um controlador PID e implementado no microcontrolador.

3 – Resultados experimentais e proposta de modelo de controlo

3.1 - Teste do protótipo como medidor de pH

Primeiro que tudo foi necessário comprovar os valores do sensor de pH segundo a teoria do potencial de Nernst. Para tal foi ligado o sensor de pH a uma placa de aquisição de dados da National Instruments DAQ 6251. Foi preciso utilizar um amplificador operacional em configuração seguidor de tensão para reduzir a impedância do sensor. Depois, na aplicação LabVIEW Signal Express foi efetuada uma aquisição de dados durante um intervalo de alguns segundos, com o sensor mergulhado nas soluções de calibração pH 4, 7 e 9, foi feita uma média dos últimos 200 valores e foi comparado com o valor expectável para cada um.

	pH 4	pH 7	pH 9
Média(200)	174 mV	0 mV	-100 mV
Valor esperado	$3 \times 59.2 \text{ mV} = 177.6 \text{ mV}$	0 mV	$2 \times (-59.2 \text{ mV}) = -118.4 \text{ mV}$

Tabela 3.1 - Valores não-amplificados do sensor de pH

Os valores obtidos comprovam a teoria de Nernst, apenas o pH 9 assumindo um valor ligeiramente mais reduzido do que o esperado. Isto pode ser atribuído à instabilidade da solução de pH 9, que em contacto com o ar perde eletrões e o seu pH fica reduzido, ou a uma alteração da própria solução ou à sua contaminação, ou a diferenças de temperatura das soluções (embora a sala estivesse climatizada para 25° C), ou mesmo pequenas variâncias relacionados com o sensor ou com a instrumentação.

Após a construção do protótipo foi possível comparar a sua performance como aparelho de medição contra um controlador de pH comercial, um Aquamedic pH computer.



Figura 3.1 - Medidor comercial comparativo

Para tal, foram medidas 4 soluções (soluções *buffer* de pH 4, 7, 9 e água da rede pública) com ambos os aparelhos. Foi utilizado o mesmo sensor para todas as medições (limpo entre medições), e foi feita uma calibração prévia com as soluções a pH 4 e 7. As medições foram repetidas 10 vezes e foi registado o valor que apresentava a maior variância entre todas as medições. Assim é possível inferir sobre a fiabilidade do protótipo desenvolvido, e se os valores são semelhantes aos do produto comercial. Os resultados obtidos foram os seguintes.

	Aparelho comercial	Protótipo	Diferença
<i>Buffer</i> pH 4	3.99	4.07	0.08
<i>Buffer</i> pH 7	6.98	7.08	0.10
<i>Buffer</i> pH 9	9.09	9.16	0.07
Água da rede	6.99	7.05	0.06

Tabela 3.2 - Medições comparativas entre o protótipo e o aparelho comercial

Analisando os resultados, é possível verificar que há uma pequena diferença em relação ao aparelho comercial, embora os valores sejam de uma magnitude bastante pequena (com uma variância máxima de 0.1 pH em relação ao ponto). Isto pode dever-se a vários fatores, entre eles a contaminação ou degradação das soluções *buffer*, variações de temperatura, à idade e condição do sensor, à presença de ruídos, à instrumentação ou radiação de outros condutores dentro da caixa (note-se que 0.1 pH traduz-se num sinal ruído de cerca de 6 mV de amplitude à saída do amplificador, tendo em conta que esse valor já é amplificado por 10, o sinal intruso original tem uma amplitude de aproximadamente 600 μ V o que é muito pequeno.) Apesar disso os valores não são muito díspares daquilo que era esperado e são facilmente toleráveis.

3.2 - Testes do protótipo no terreno como medidor e regulador de pH

Após finalizar a construção do protótipo, foi feita a instalação no Centro do Ramallete com todas as condições disponibilizadas para o efeito. Foram feitos testes para verificar a operacionalidade de todo o sistema, e foi testado o sistema de injeção de CO₂ e a resposta do sistema a esta estimulação para ver se os valores obtidos estão de acordo com o esperado, e se a curva obtida tem uma geometria semelhante à curva de titulação ácido fraco-base fraca. Isto comprova que o sistema se comporta de acordo com o suposto, e que o protótipo funciona.

O *setup* experimental foi composto por dois tanques, um de 130 litros no interior de um maior de 640 litros que recebe o transbordo do pequeno. Há uma torneira a introduzir água no tanque pequeno para fazer a renovação de água, um tubo injetor de ar comprimido dentro do tanque para favorecer a mistura homogênea da água (que também serve para injetar o CO₂), e uma rede com 200 ml de algas *Ulva Lactatus* provenientes da Ria Formosa. Uma electroválvula de 24 VAC é acionada pelo relé para injetar o dióxido de carbono no tubo de ar comprimido, diluindo a concentração gasosa e facilitando a sua mistura no meio aquático.



Figura 3.2- Instalação no local



Figura 3.3 - Tanque interior (visível a amostra de algas, sensor de pH, de temperatura, torneira de entrada de água, tubo injetor de ar, tubo de nível)



Figura 3.4 - Eletroválvula (visível a válvula manual (vermelha), e bifurcação de entrada de CO₂ / entrada de ar comprimido / saída de mistura)



Figura 3.5 - Quadro de alimentação (visível a caixa do transformador, interruptor de corte da eletroválvula, tomada de alimentação e *hub* de rede)

Foi criado um *script* em Python que envia para o aparelho uma sequência PRBS previamente gerada, com um valor binário por minuto (onde um 1 solicita a injeção de CO₂ durante um segundo, e um 0 mantém a válvula fechada) aos zero segundos de cada minuto, e pede ao aparelho para ser enviada uma leitura dos parâmetros a cada 15 segundos (4 vezes por minuto).

A válvula manual estava aberta a 100% para este teste, que teve a duração aproximada de 2 horas para 126 valores da sequência (126 minutos), e foram amostrados 509 pontos.

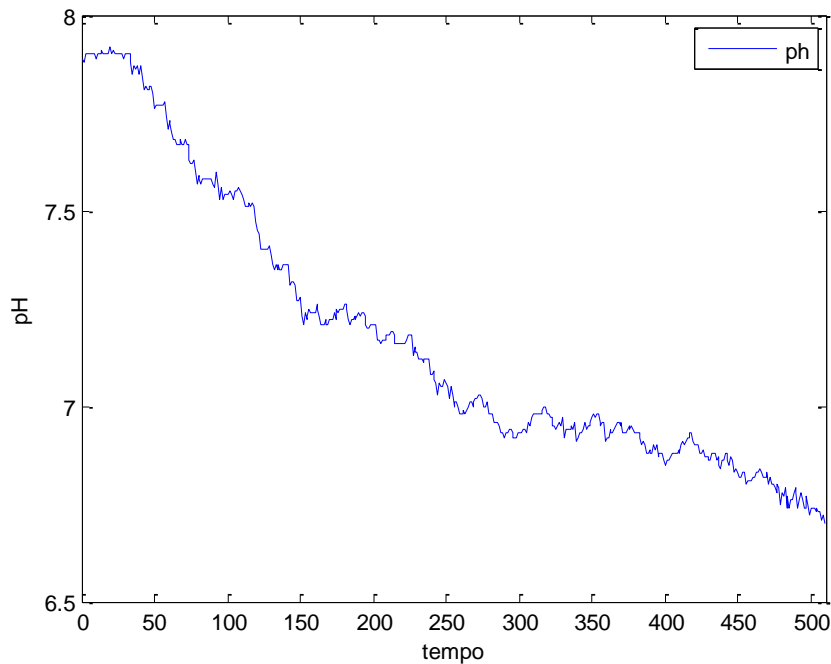


Figura 3.6 – Curva da resposta do sistema a injeções aleatórias de CO₂ durante 1s, válvula a 100%

Ao observar a curva obtida confere-se que a resposta é a expectável para uma curva de titulação de ácido fraco – base fraca, na gama de valores observados. Aqui o volume de ácido adicionado é análogo ao tempo decorrido (já que mais tempo implica mais atuações, logo mais ácido adicionado).

Pode-se ainda inferir alguns aspetos sobre o comportamento geral do sistema:

- Com a abertura da válvula manual a 100% e com um pulso de 1 segundo, o valor de pH desce 0.05 para cada injeção, até chegar a valores inferiores a 7 (ácidos), onde se sai da zona de linearidade, a curva estabiliza e a variação começa a ser muito inferior para a mesma quantidade de CO₂ injetada (entre 0 e 0.02). Isto é o esperado, conforme a curva de titulação e a natureza logarítmica da curva de pH.
- Ao fim de 15 segundos por vezes não se nota variação no valor do pH, embora aos 30 segundos já tenha estabilizado, ou perto disso. Isto deve-se ao volume de água do tanque ser grande, enquanto em comparação a quantidade de CO₂ injetada é pequena e demora algum tempo a misturar-se na sua totalidade, e ao tempo de resposta do

sensor. O baixo tempo de amostragem torna no entanto difícil observar o momento exato em que estabiliza.

- Há uma pequena variação nas medições, na ordem dos 0.01 de amplitude. Isto pode dever-se à instrumentação (ruído de medição, correntes de polarização do amplificador de instrumentação, outro ruído de baixa frequência); diferente quantidade de CO₂ injetado pela válvula (que depende da pressão na garrafa); imperfeita mistura de CO₂ na água dando origem a zonas com maior ou menor concentração de íons de hidrogénio; à qualidade e condição do eletrodo de pH; ou a uma mistura de todos estes fatores. Esta variação é muito pequena e aceitável em condições normais de funcionamento.
- Verifica-se em condições meteorológicas de maior vento que a variação é um pouco superior, chegando a um máximo de amplitude na ordem dos 0.05 de oscilação (pico a pico) em torno do ponto de equilíbrio em condições de vento forte. Verificou-se que esta oscilação apenas aparece quando a torneira de injeção de água da ria para o sistema está ligada, e desaparece quando se fecha a torneira. Uma hipótese é que isto tenha a ver com a ondulação gerada na ria em condições de maior vento. É possível que a ondulação faça variar a pressão de água na admissão da bomba, variando o trabalho que a bomba faz para coletar água e gerando harmónicos, ressonâncias, ruído de baixa frequência ou qualquer tipo de interferência; a um efeito de cavitação gerado por essa diferença de pressão; ou a vibrações mecânicas nas tubagens que de qualquer forma estão a interferir com o sistema; ou a qualquer outro ruído elétrico de muito baixa frequência (< 10 Hz) que não esteja a ser filtrado pelo LPF. Não foi possível determinar a causa específica deste fenómeno, por estar relacionado com o cerne do sistema hidráulico do centro.

3.3 - Determinação do modelo do sistema através da resposta ao degrau

Antes de projetar o controlador, é necessário determinar o modelo que descreve o sistema.

Primeiro, testou-se a relação entre a abertura da válvula e o tempo de atuação. Abriu-se a válvula manual a 50% de fluxo e mediu-se a variação do pH durante um intervalo de 5 minutos, com um intervalo de amostragem de 5 segundos, após uma injeção inicial de CO₂ com a duração de 1, 2, 3, 4 e 5 segundos. Depois repetiu-se essas medições para a válvula a 75% e 100% de fluxo. Isto tem como objetivo ter uma ideia do comportamento do sistema quando é feita uma atuação, e determinar qual a melhor abertura (em amplitude e em tempo) para a válvula, aquela que proporcione uma melhor relação entre *overshoot* inicial, tempo até estabilizar, tempo de estabilidade, oscilação e descida efetiva de pH.

De seguida são apresentados os gráficos que mostram a resposta do sistema para aberturas de 50%, 75% e 100%, para atuações de 1, 2, 3, 4 e 5 segundos, efetuadas durante o período após o nascer do sol, próximo do meio-dia solar, e no período perto do pôr-do-sol. Como a atividade fotossintética varia durante o dia, estas medições nestes 3 períodos permitem ter uma ideia dessa variação e da gama de valores encontrados durante o dia, assim como da taxa de consumo de CO₂ que deverá ser mais intenso durante as horas de maior luminosidade.

Esta experiência foi conduzida no dia 25 de Julho de 2012, durante o qual a alvorada ocorreu às 6h:31m, o meio-dia solar foi às 13h:38m, e o ocaso às 20h:44m. De manhã foram feitas as medições entre o período das 7h:30m e as 8h:56m, de tarde entre as 14h:25m e as 16h:03m, e ao final da tarde entre as 19h:15m e as 20h:53m.

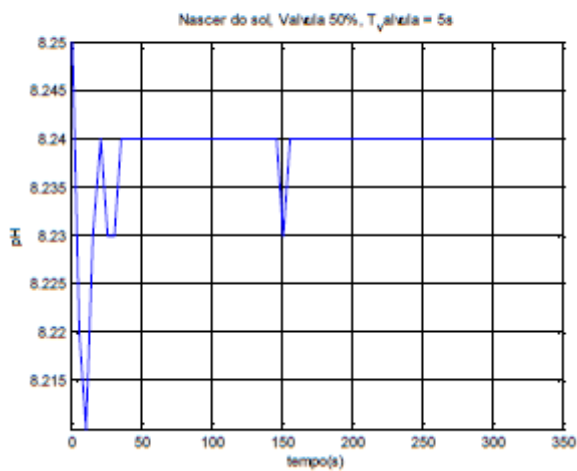
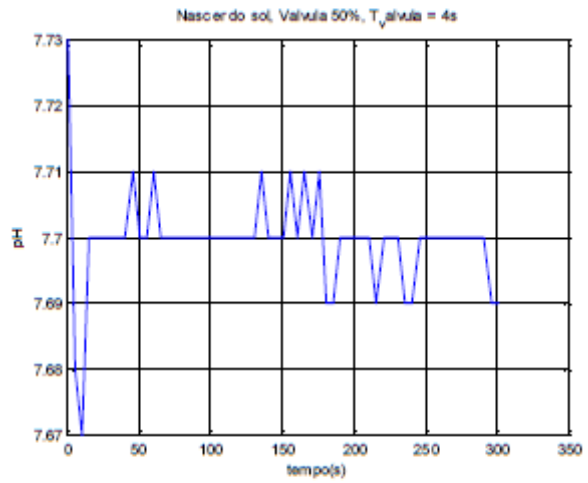
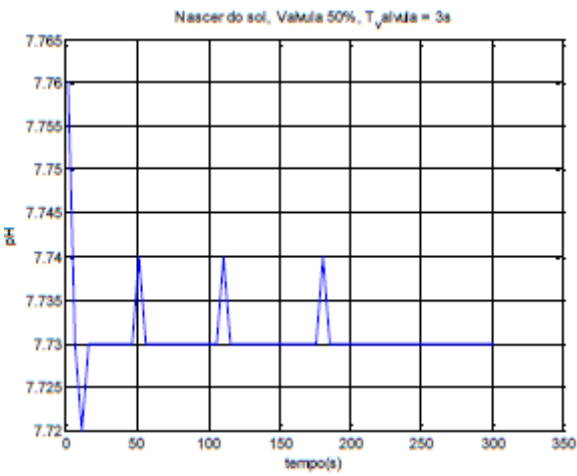
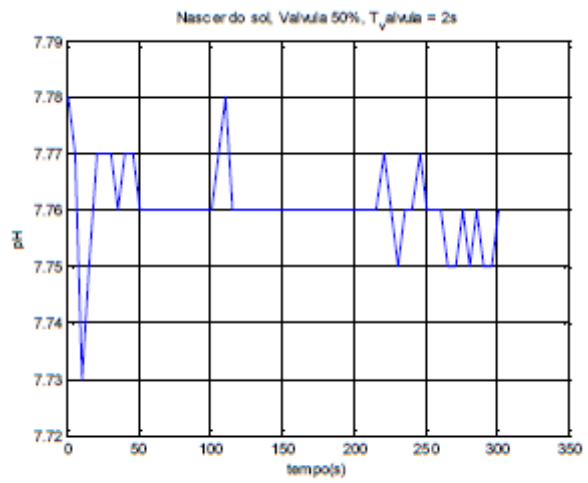
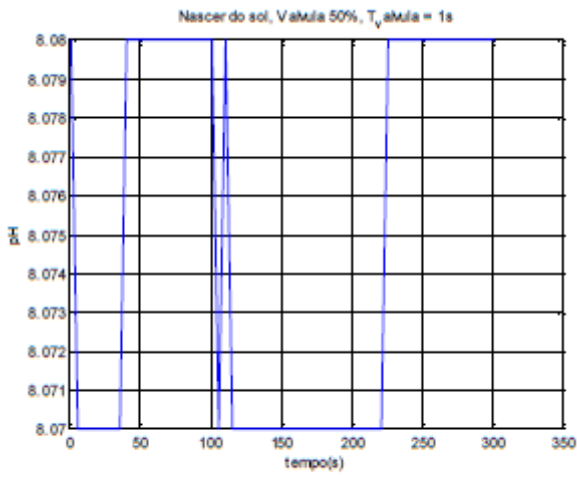


Figura 3.7 - Respostas do sistema para abertura de 50%, ao nascer do sol

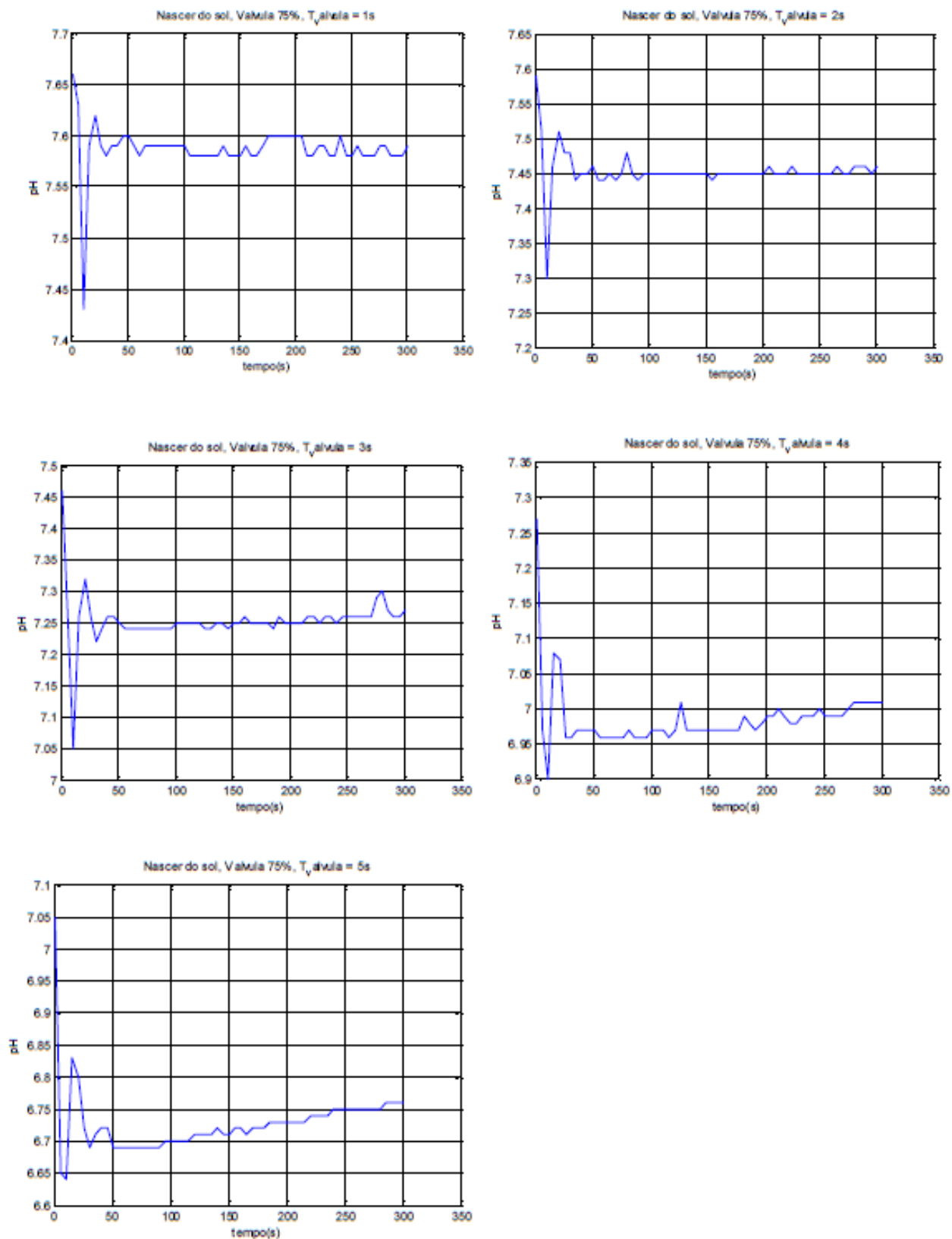


Figura 3.8 - Respostas do sistema para abertura de 75%, ao nascer do sol

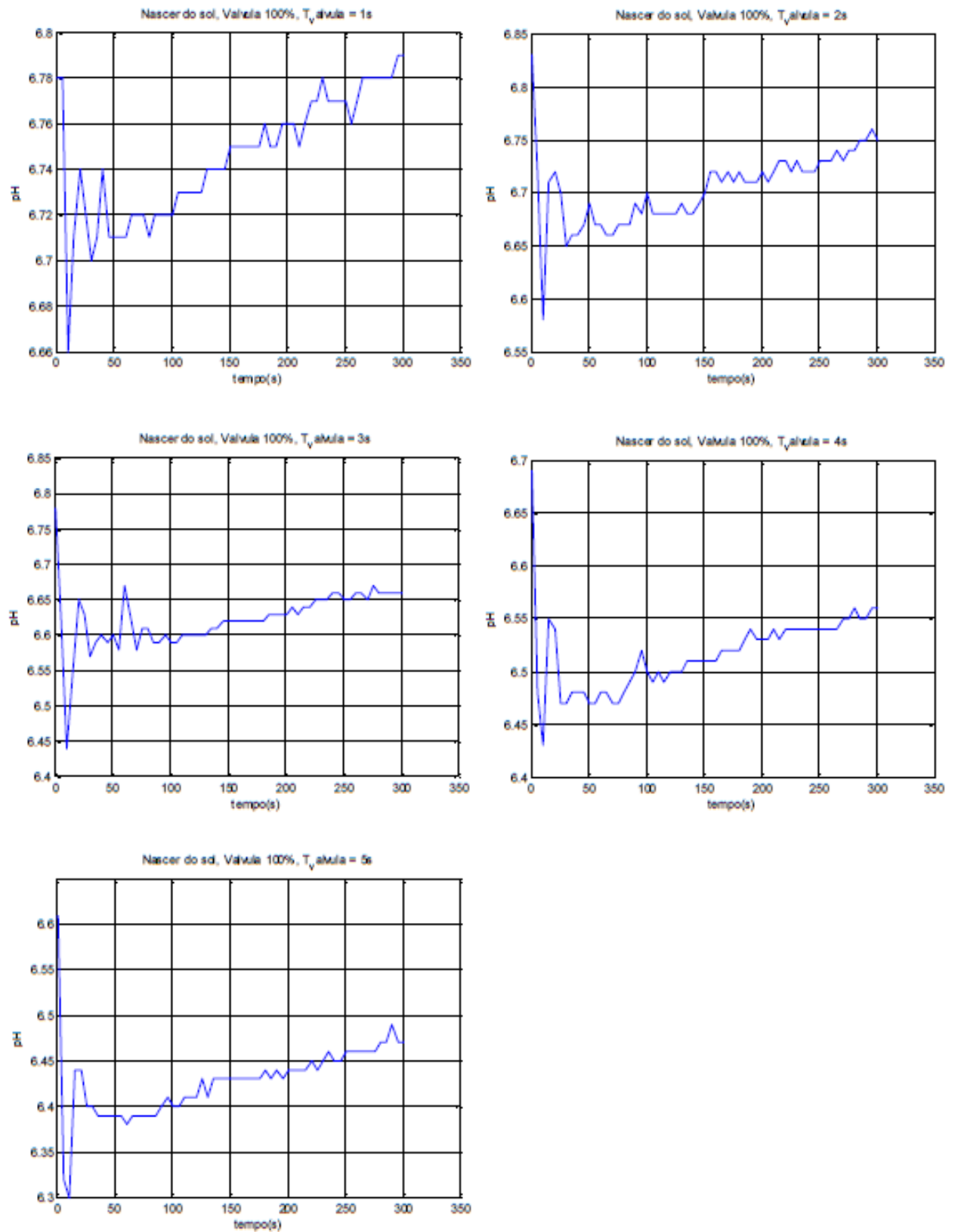


Figura 3.9 - Respostas do sistema para abertura de 100%, ao nascer do sol

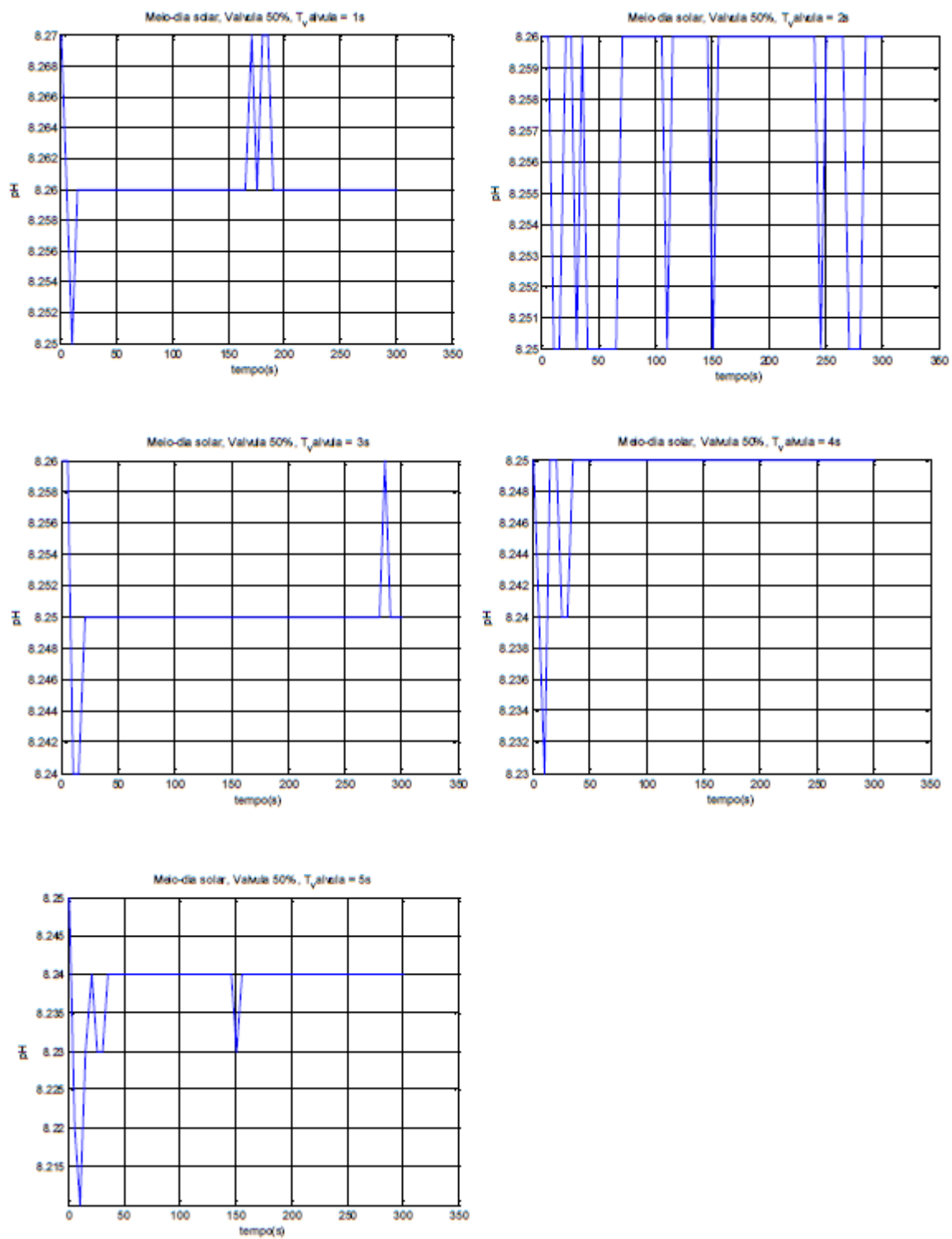


Figura 3.10 - Respostas do sistema para abertura de 50%, ao meio dia solar

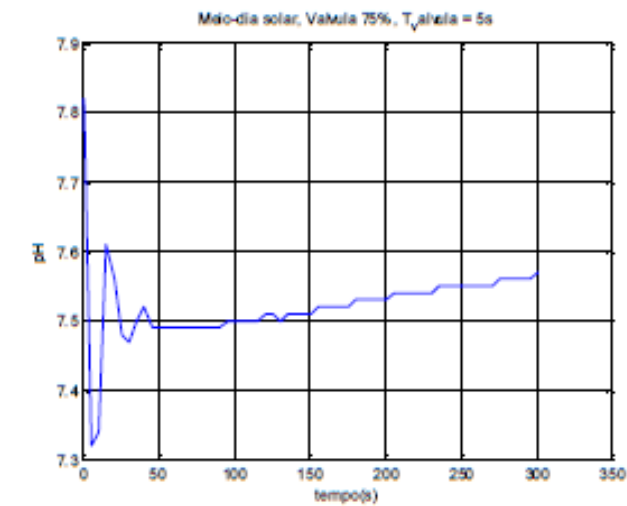
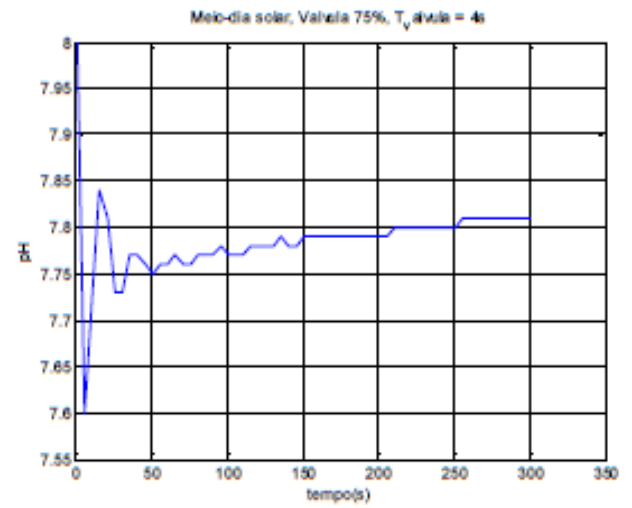
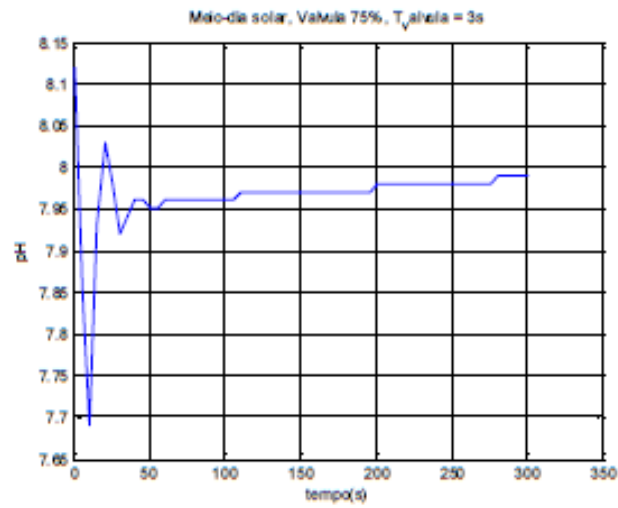
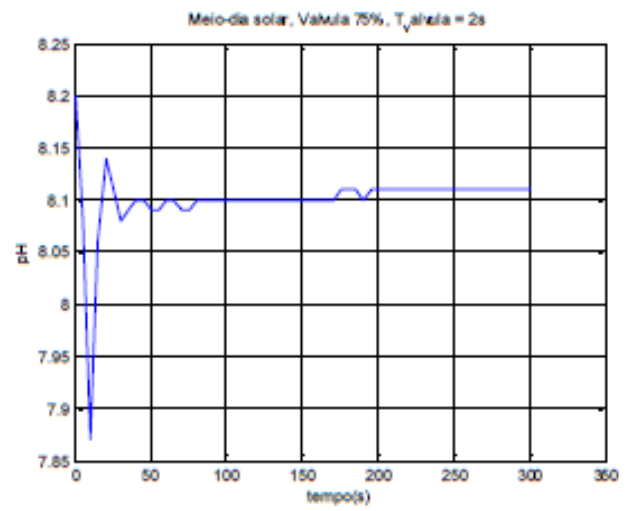
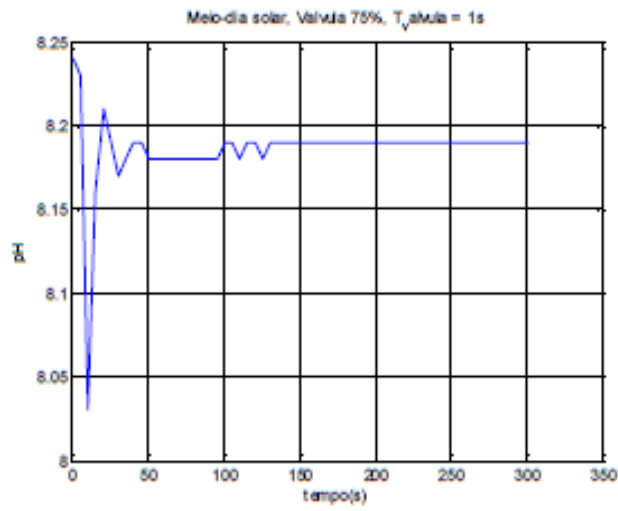


Figura 3.11 - Respostas do sistema para abertura de 75%, ao meio dia solar

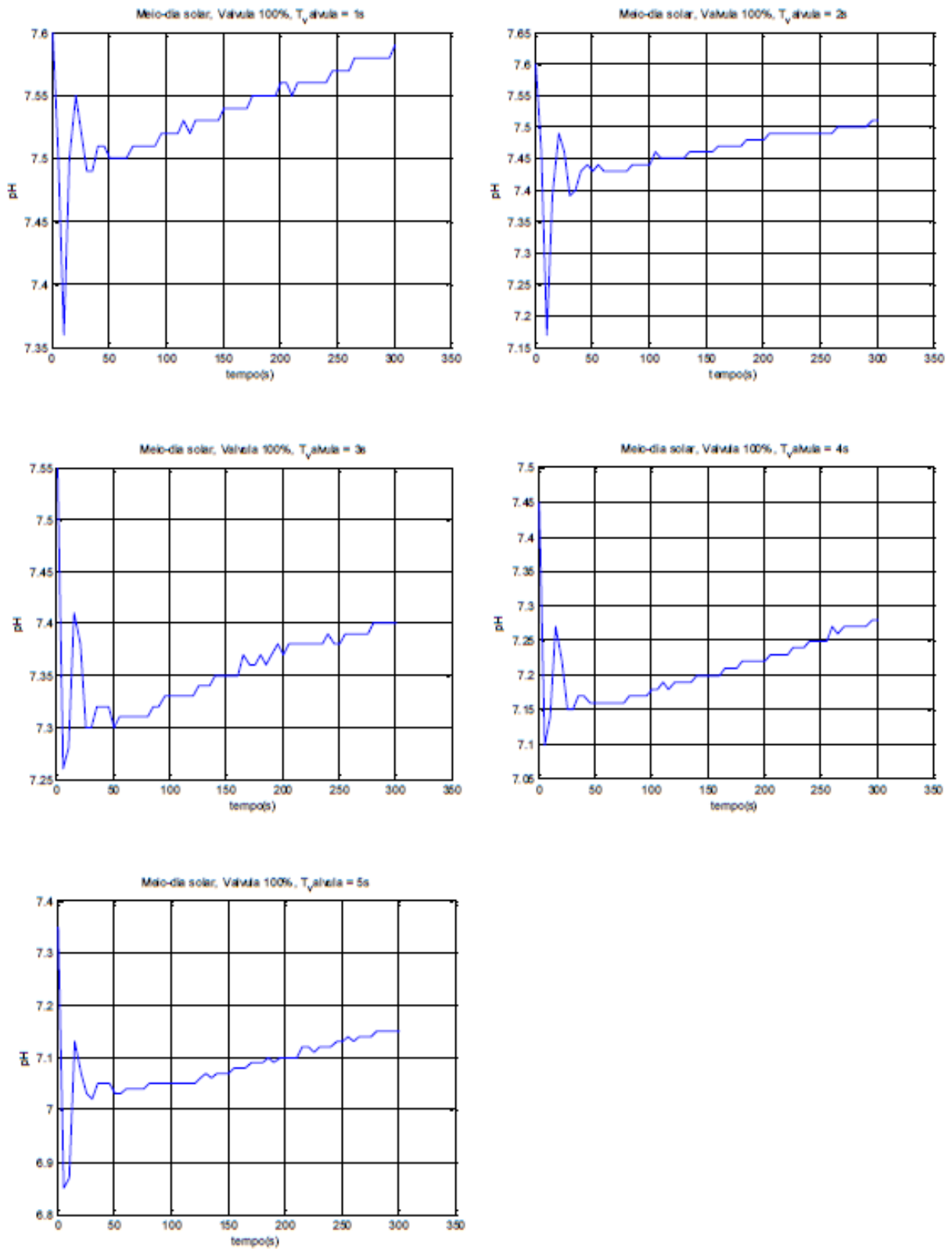


Figura 3.12 - Respostas do sistema para abertura de 100%, ao meio dia solar

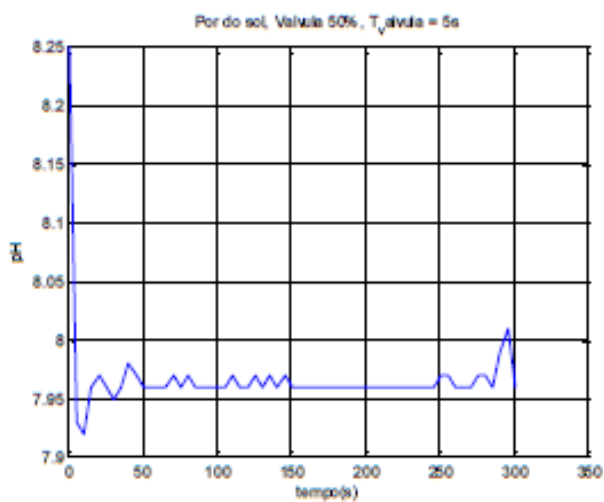
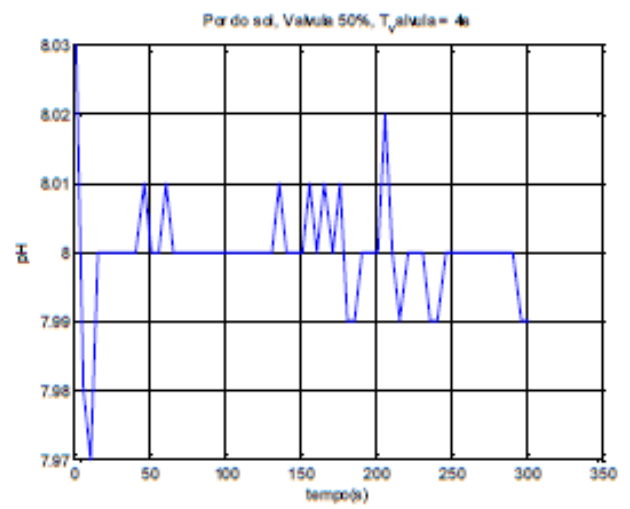
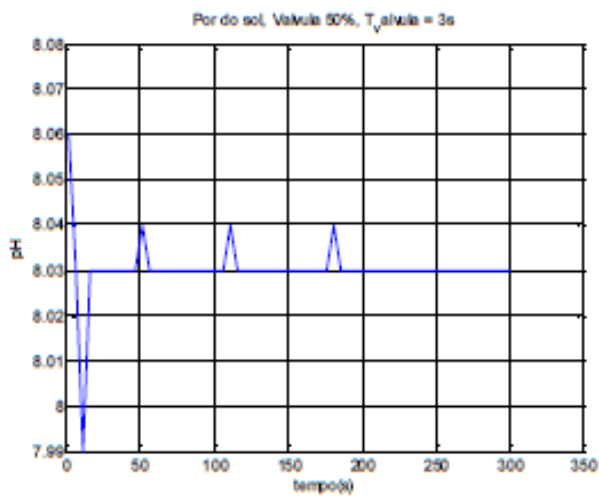
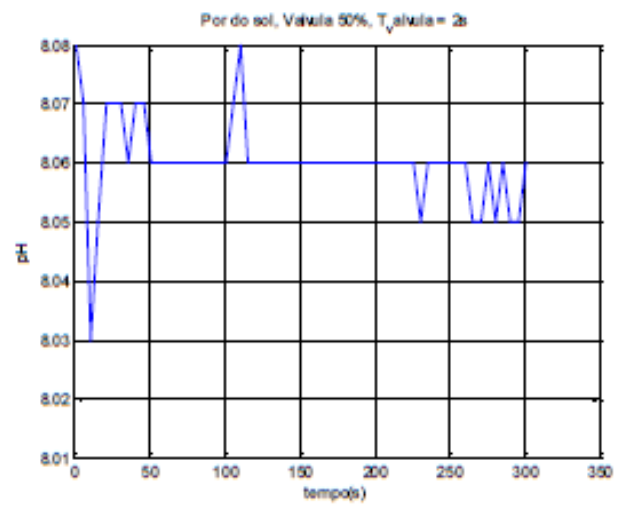
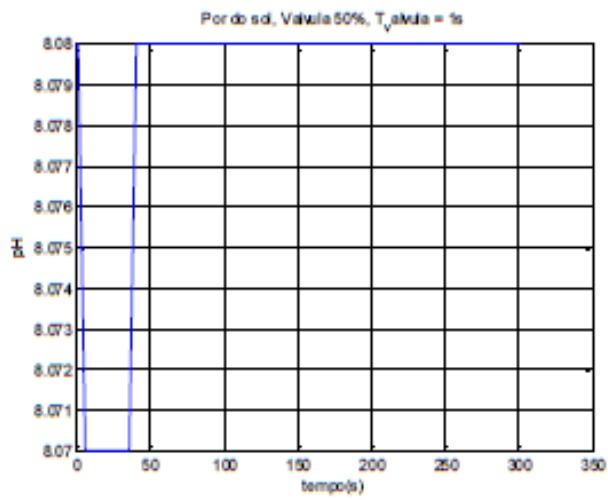


Figura 3.13 - Respostas do sistema para abertura de 50%, ao por do sol

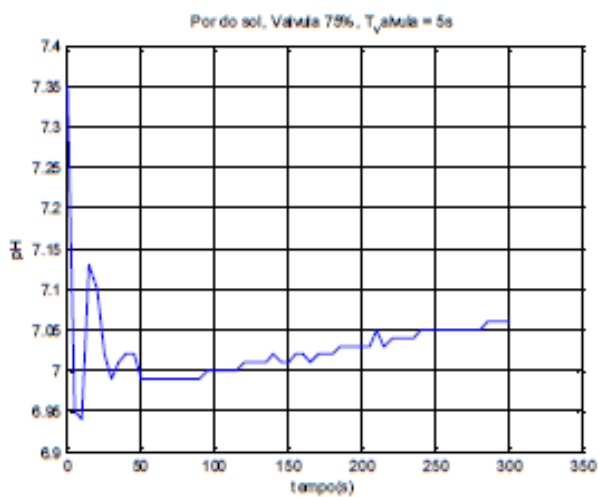
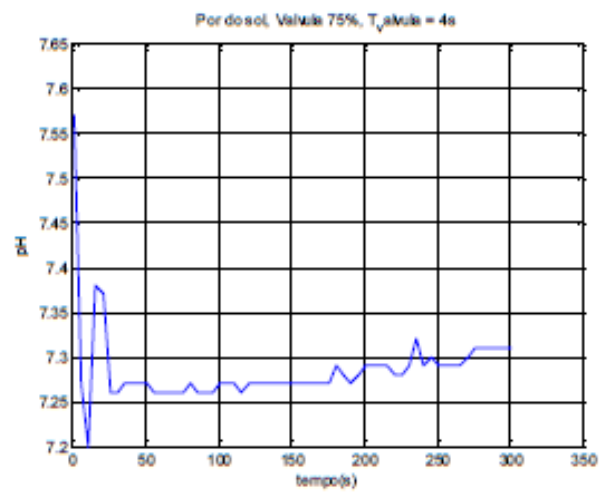
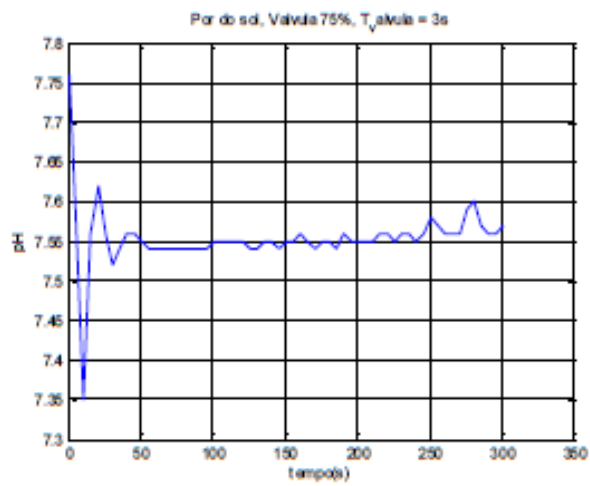
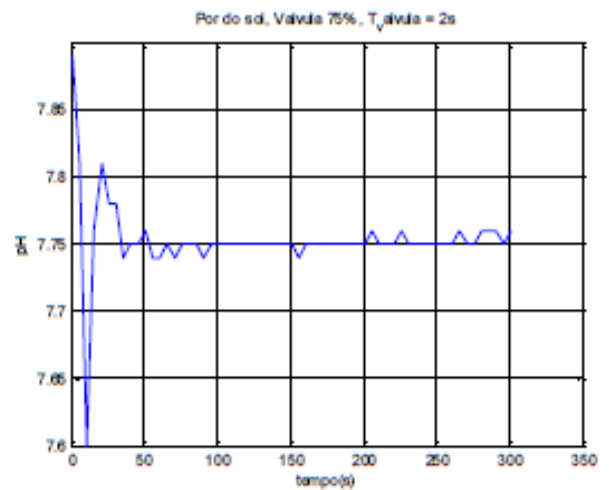
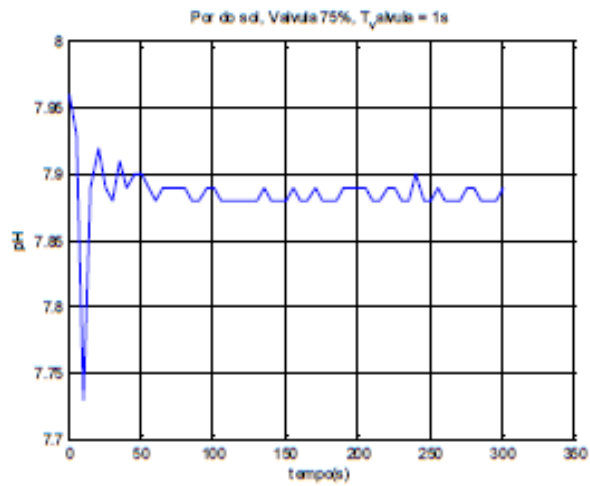


Figura 3.14 - Respostas do sistema para abertura de 75%, ao por do sol

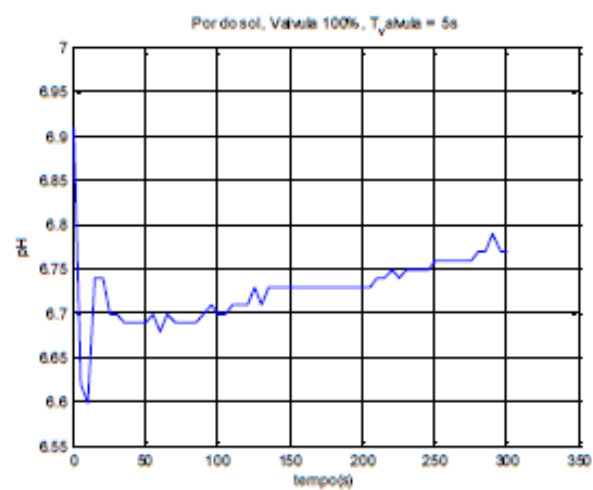
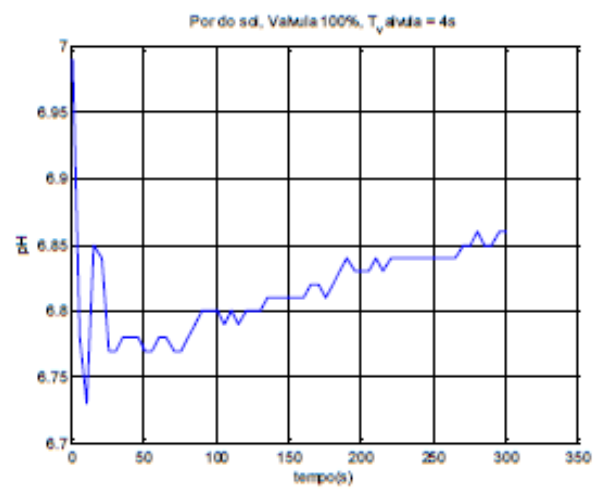
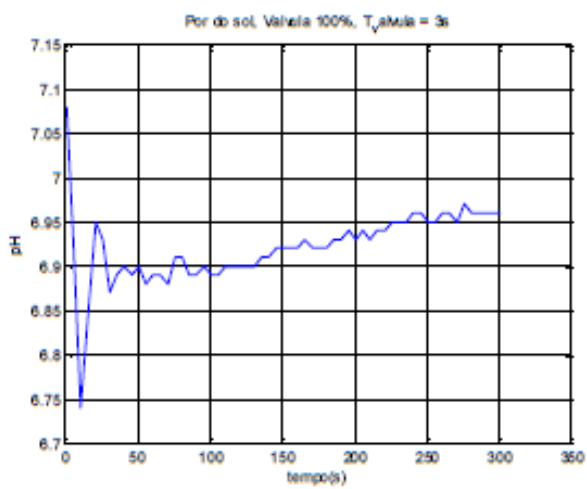
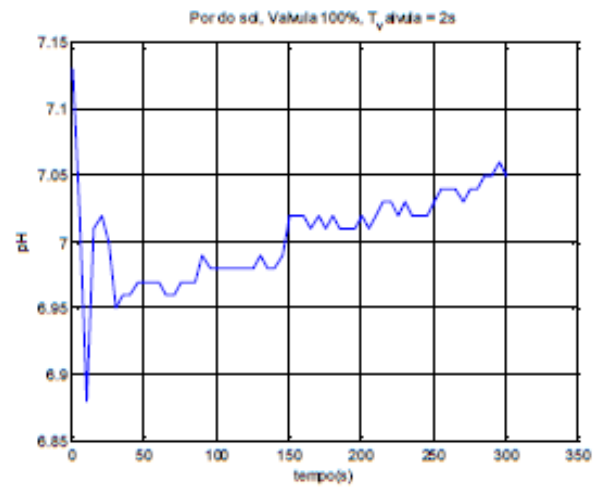
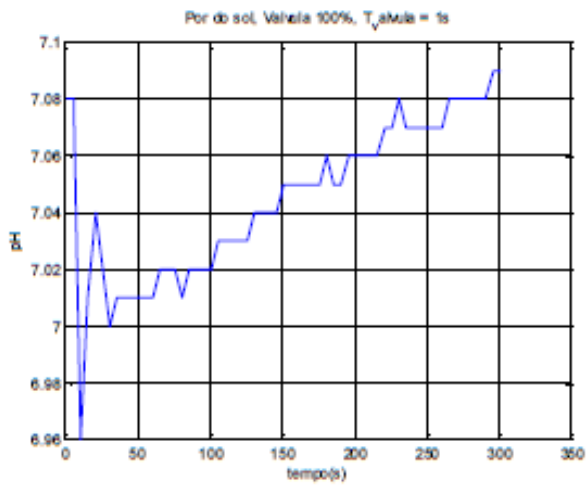


Figura 3.15 - Respostas do sistema para abertura de 100%, ao por do sol

%Abertura/Tempo	50/1	50/2	50/3	50/4	50/5
Valor inicial pH	8.27	8.26	8.26	8.25	8.25
Amp. Máxima	8.25	8.25	8.24	8.23	8.21
T. estabilização (s)	15s	10s	15s	25s	35s
Valor estável (ph)	8.26	8.25	8.25	8.24	8.24
Estável durante (s)	300s	300s	300s	300s	300s
Valor pH ao fim 5m	8.26	8.26	8.25	8.25	8.24

Tabela 3.3 - Comportamento do sistema com a válvula manual a 50% de abertura

%Abertura/Tempo	75/1	75/2	75/3	75/4	75/5
Valor inicial pH	8.24	8.20	8.12	8.00	7.82
Amp. Máxima	8.03	7.87	7.69	7.72	7.32
T. estabilização (s)	25s	35s	35s	30s	40s
Valor estável (ph)	8.18	8.10	7.96	7.77	7.49
Estável durante (s)	60s	140s	160s	90s	50s
Valor pH ao fim 5m	8.19	8.11	7.99	7.81	7.57

Tabela 3.4 - Comportamento do sistema com a válvula manual a 75% de abertura

%Abertura/Tempo	100/1	100/2	100/3	100/4	100/5
Valor pH inicial	7.60	7.60	7.55	7.45	7.35
Amp. Máxima	7.36	7.17	7.26	7.10	6.85
T. estabilização (s)	25s	35s	20s	40s	30s
Valor estável (ph)	7.50	7.43	7.30	7.16	7.05
Estável durante (s)	20s	45s	30s	35s	85s
Valor pH ao fim 5m	7.59	7.51	7.40	7.28	7.15

Tabela 3.5 - Comportamento do sistema com a válvula manual a 100% de abertura

Com os dados obtidos (analisando principalmente os valores obtidos durante a tarde, quando efetivamente há atividade fotossintética normal), pode-se observar que a válvula a 75% é aquela que apresenta um melhor desempenho, minimizando o *overshoot* inicial e a oscilação (tanto inicial como ao longo do tempo), e maximizando o tempo em que o valor fica estável, assim como tendo variações adequadas para cada atuação (entre 0.05 pH de descida para uma injeção de 1 segundo, e 0.30 pH para uma injeção de 5 segundos). O tempo de estabilização não é rigorosamente apurado devido ao tempo de amostragem de 5 segundos, e encontram-se ligeiramente inflacionados.

Todas as medições feitas no período em que o sol começava a descer apresentam descidas mais acentuadas no pH em comparação com as medições correspondentes efetuadas no

período da tarde (menos visível para tempos de injeção pequenos como 1 ou 2s, mas observável a partir de injeções de 3s). Isto é coerente com a redução da atividade biológica e da fotossíntese resultantes da menor exposição solar. As algas não consomem tanto CO₂, logo o pH apresenta uma variação maior e estabiliza num valor mais baixo a cada injeção.

Para as medições feitas com a válvula a 100%, com T a 3, 4 e 5 segundos, as variações são mais pequenas face às verificadas durante a tarde (em contrassenso com o que era observado até então). Isto é porque o pH chegou abaixo dos 7, e como tal saiu da zona linear e entrou na zona de curva logarítmica (em que é preciso uma maior quantidade de CO₂ para obter a mesma variação de pH). Os resultados são também coerentes com esse princípio.

Alguma da oscilação nos resultados da noite deve-se à presença de vento moderado àquela hora do dia.

Na segunda fase de testes, a válvula foi fixada nos 75% de abertura, após determinar que esta era a mais indicada. Depois foi gerada uma sequência de 255 valores de atuação (onde cada valor representa uma duração em segundos, que vai ser recebida e interpretada como pulsos PWM para a abertura da electroválvula). O tempo de amostragem é definido em 15s, o que quer dizer que estes valores serão transmitidos a cada 15 segundos (havendo uma atuação no sistema para cada valor não nulo), e será também registada uma medição dos valores com o mesmo tempo de amostragem, para medir a variação no meio.

Uma sequência PRBS pode ser gerada em Matlab com o seguinte algoritmo:

```
u = idinput (255, 'prbs', [0 1],[0 1])
```

```
ix = find (u==1)
```

```
u(ix) = (rand(size(ix,1),1)*2.5)+0.5
```

Não é mais do que uma sequência aleatória de bits onde não há auto-correlação, é determinística e repete-se ao longo do tempo.

Neste caso a PRBS não é binária, tendo valores decimais arbitrários entre 0 e 3, pois é modulada por um sinal aleatório para obter esses valores, que serão interpretados como pulsos PWM de respectiva duração.

Com estes parâmetros acertados, foram novamente repetidas as medições de manhã, à tarde e à noite. A válvula estava aberta a 75% para este teste, que teve a duração de 64 minutos para 255 valores da sequência, e foram amostrados 255 pontos.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

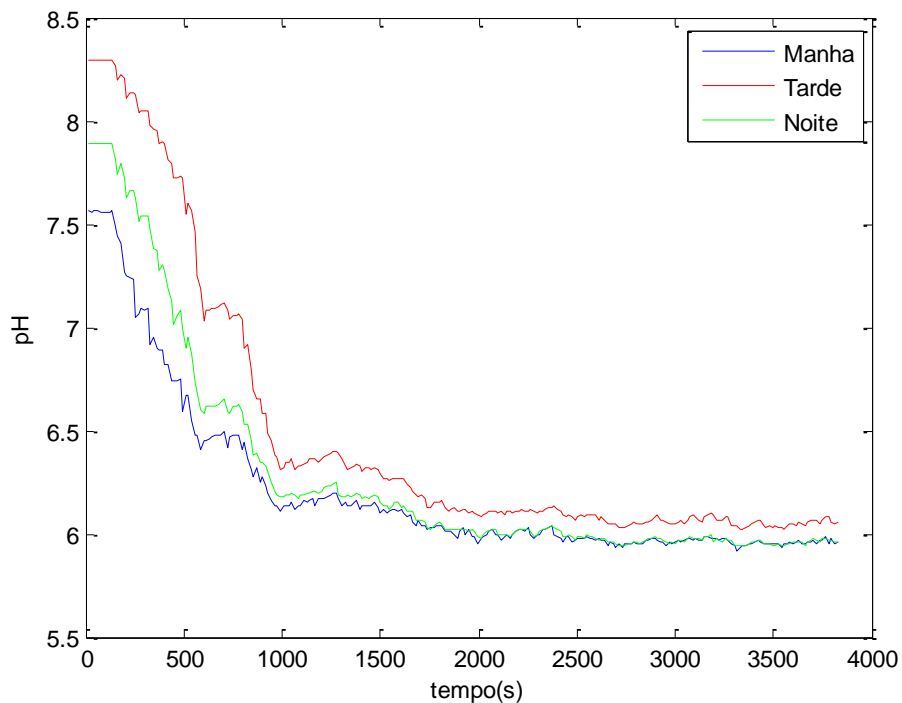


Figura 3.16 - Medições de pH efetuadas durante a manhã, tarde e noite

A partir destes dados experimentais, recorre-se à ferramenta de identificação de sistemas do Matlab, para poder determinar o modelo do sistema físico. Daí, pode projetar-se o controlador PID e simular o seu comportamento no Simulink.

Ferramenta de identificação de sistemas

Com o comando “*ident*” pode-se aceder à ferramenta de identificação de sistemas do Matlab. Esta ferramenta ajuda a determinar modelos de sistemas com base dos dados obtidos da resposta em frequência a uma perturbação conhecida.

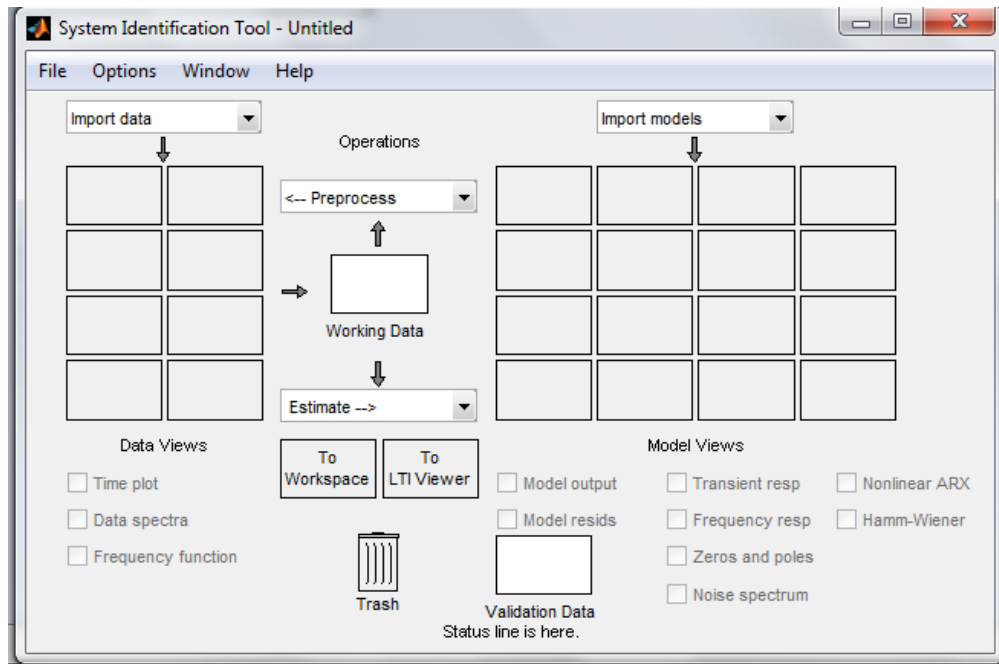


Figura 3.17 - Janela principal da Ferramenta de Identificação de Sistemas

Deve ser criada no *workspace* uma matriz unidimensional com os valores de PRBS, outra com os valores da medição de pH de manhã e outra com os valores de pH durante a tarde.

No campo “*Import data*” no canto superior esquerdo seleciona-se “*Time domain data*”. Indica-se como input a sequência PRBS, como output os valores de pH medidos de manhã, e como *Sampling interval* 15 segundos. Depois arrasta-se o ícone criado para o quadrado “*Working data*”. Isto estabelece a amostragem de manhã como “*Working data*”, ou os dados de identificação, que vão ser trabalhados.

Depois criou-se outro “*Time domain data*”, escolhendo desta vez o output como os valores de pH medidos de tarde. O input é a sequência PWM e o *Sampling interval* 15 segundos. O ícone criado ao ser arrastado para o quadrado “*Validation data*” estabelece a amostragem de tarde como dados de validação.

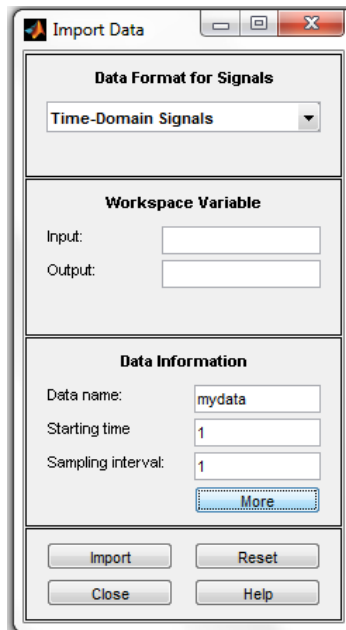


Figura 3.18 - Janela de importação de dados do *workspace*

Seguidamente, como o modelo de pH é não linear, seleciona-se no campo “*Estimate*” a opção “*Nonlinear models*”. Isto abre uma nova janela:

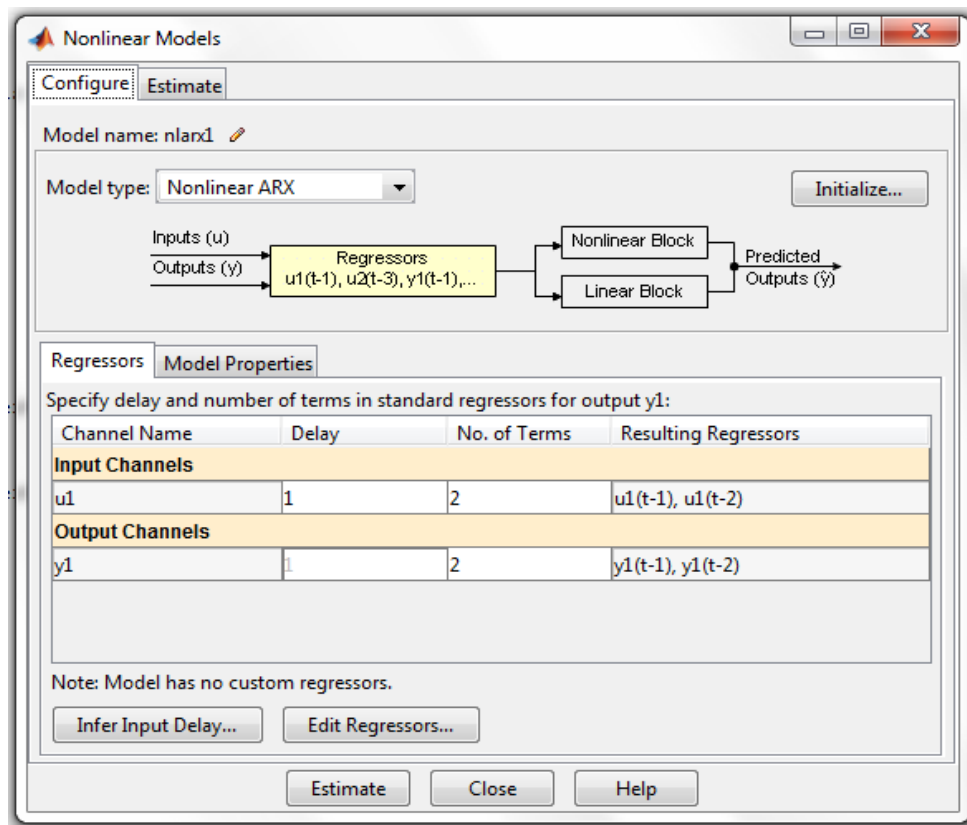


Figura 3.19 - Janela de estimação de modelos não-lineares

A partir daqui podem ser aplicados vários tipos de não-linearidades aos dados para observar o modelo gerado. Foram feitas estimativas para as seguintes combinações de termos (Nº. of terms) entre canais de input/output: 2/2, 3/3, 4/4, 4/5, 4/6, 4/7, 4/8, com um modelo ARX.

Para cada uma destas combinações de termos, no separador “*Model properties*” foram seleccionados quatro tipos de não linearidades, nomeadamente: *Wavelet network* com bloco linear, *Tree partition*, *Sigmoid network* com bloco linear, e *Sigmoid network* sem bloco linear. Para o *Sigmoid network*, foi variado o número de unidades entre 5 e 15 e escolheu-se o melhor caso (aquele cujo modelo se aproximava mais aos dados). Depois foram comparados os modelos obtidos de todas as 28 combinações possíveis e escolhido o melhor.

Foram registados os valores de *Fit %* (para os dados de identificação e de validação), *UOV* (*unexplained output variance*), *Loss Function* e *Final Prediction Error*, e analisando esses valores será possível escolher o modelo que mais se aproxima ao sistema. De seguida apresentam-se as tabelas com esses valores, assim como os gráficos do output simulado para todas as combinações de termos I/O para os quatro tipos de não linearidades:

Wavelet network c/ bloco linear

Terms (I/O)	Select interactively (wavelet)			Identificação (Estimate)			Validação (1 step predicted output)
	#units	UOV (%)	Fit (%)	Fit (%)	LF	FPE	Best fits
2 2	7	0.1219	96.51	92.13	0.0001918	0.0002631	93.10
3 3	12	0.1355	96.32	93.92	0.0002041	0.0003709	93.43
4 4	10	0.1524	96.10	90.81	0.0002189	0.0004091	93.67
4 5	14	0.1215	96.51	79.43	0.0001661	0.0003841	95.20
4 6	15	0.1466	96.17	89.29	0.0001901	0.0004818	95.00
4 7	15	0.1366	96.30	79.77	0.0001674	0.0004469	95.20
4 8	15	0.1333	96.35	90.73	0.0001537	0.0004312	94.45

Tabela 3.6 - Características dos modelos não-lineares *Wavelet network*

Tree partition

Terms (I/O)	Identificação(Estimate)			Validação (1 step predicted output)
	#units	Fit (%)	LF	Best fits
2 2	31	91.82	0.000215	94.29
3 3	31	93.85	0.0001912	93.67
4 4	15	94.13	0.0002276	94.71
4 5	15	92.57	0.0002161	95.09
4 6	15	91.62	0.0002339	94.54
4 7	15	91.39	0.0002248	94.60
4 8	15	93.35	0.0002286	94.57

Tabela 3.7 - Características dos modelos não-lineares *Tree Partition*

Sigmoid network c/ bloco linear

Terms (I/O)	#units	Identificação (Estimate)			Validação (1 step predicted output)
		Fit	LF	FPE	Best fits
2 2	8	85.93	0.0001423	0.002019	95.31
3 3	14	96.44	0.00009948	0.0001934	94.41
4 4	14	71.25	0.0001352	0.0002957	93.13
4 5	7	88.77	0.0001201	0.0002036	91.72
4 6	7	94.21	0.00009208	0.0001623	93.36
4 7	11	94.35	0.0001113	0.0002505	93.00
4 8	8	96.07	0.00005813	0.000117	93.22

Tabela 3.8 - Características dos modelos não-lineares *Sigmoid network c/bloco linear*

Sigmoid network s/ bloco linear

Terms (I/O)	Identificação (Estimate)				Validation (1 step predicted output)
	#units	Fit	LF	FPE	Best fits
2 2	5	80.86	0.000221	0.0002752	85.83
3 3	14	78.90	0.0006416	0.001217	93.10
4 4	13	33.37	0.0005556	0.001136	85.82
4 5	7	81.82	0.0001482	0.0002407	-237
4 6	5	86.77	0.0001132	0.0001686	88.35
4 7	10	53.37	0.001408	0.002895	87.85
4 8	8	30.65	0.0007283	0.001395	73.87

Tabela 3.9 - Características dos modelos não-lineares *Sigmoid network s/bloco linear*

Observando as gamas de valores de *Fit%* em todos os casos, revela que o *Tree Partition* é aquele que oferece para todas as combinações de termos I/O uma maior fidelidade, com valores acima de 91% para ambos os conjuntos de dados (identificação e validação).

Nos dados de validação do *Sigmoid network* sem bloco linear há um valor de *Fit%* negativo de -237%. Isto é irrealista e deve-se provavelmente a um erro na estimação do modelo para esta não-linearidade em particular.

Em seguida apresentam-se os gráficos comparando os dados de validação com todos os modelos de não-linearidades, e todas as combinações de termos de input/output em cada uma dessas não-linearidades (representados pelas diferentes cores):

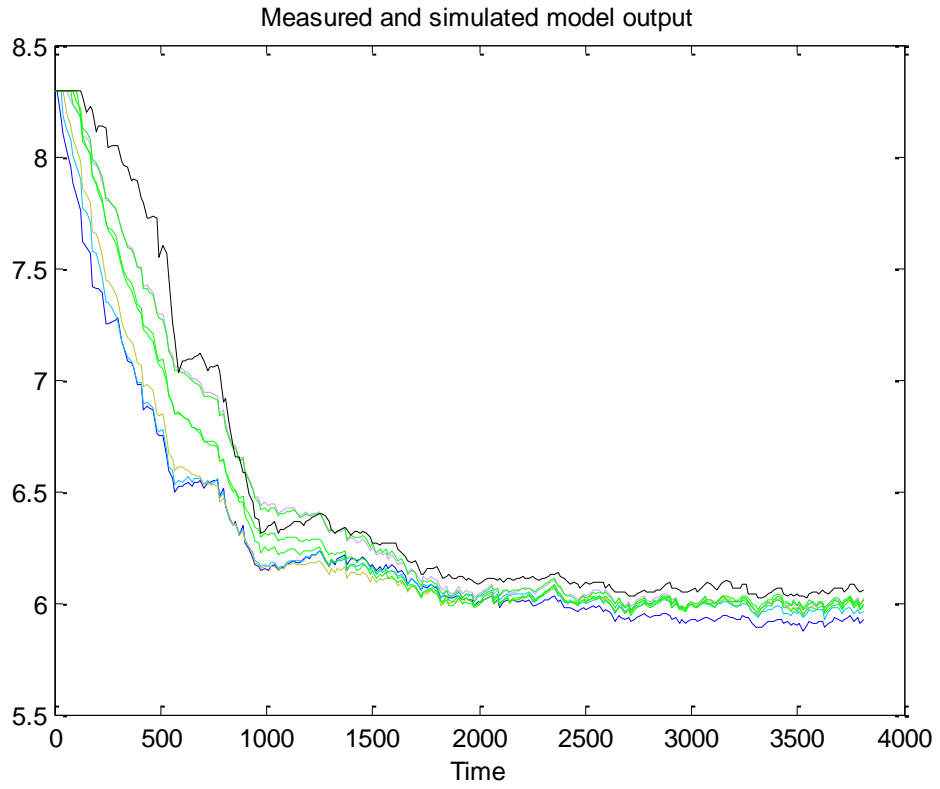


Figura 3.20 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de *Wavelet Network*

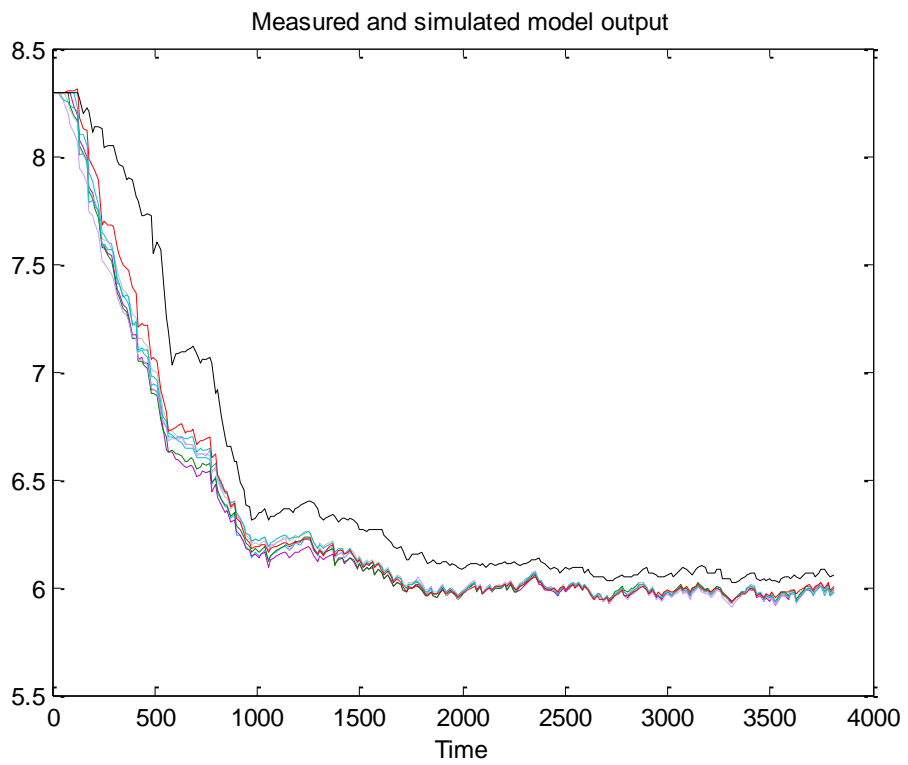


Figura 3.21 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de *Tree Partition*

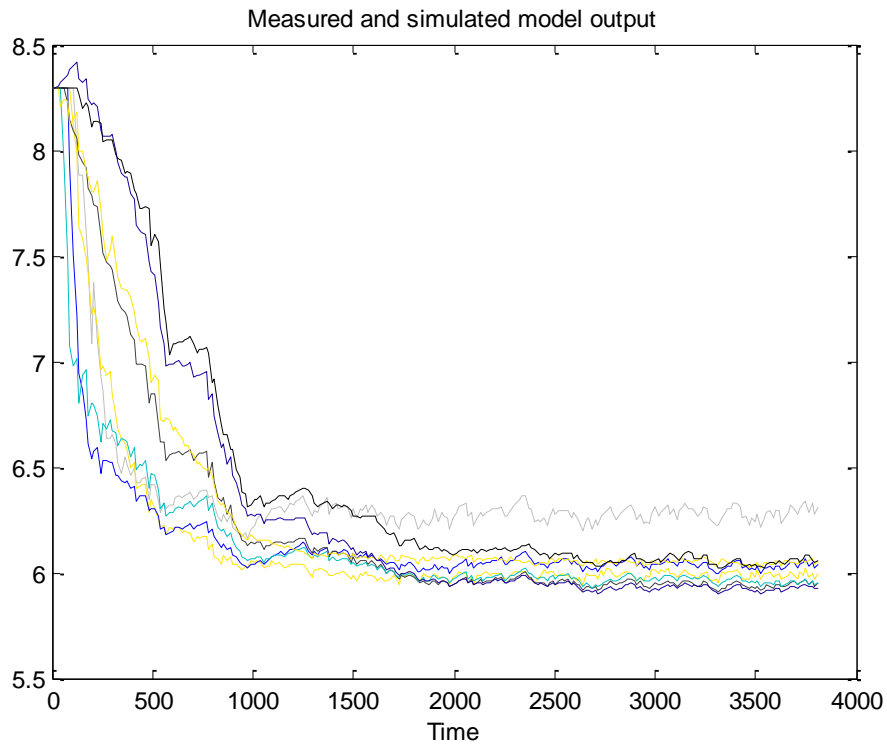


Figura 3.22 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de *Sigmoid Network* com bloco linear

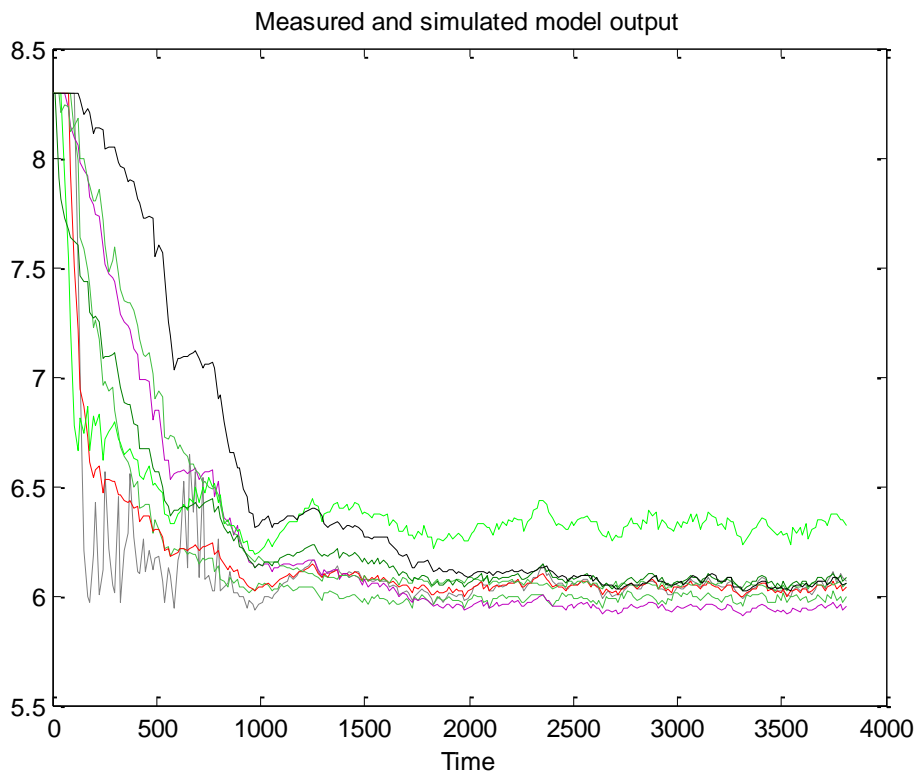


Figura 3.23 - Dados originais (a preto) e modelos aproximados de *Sigmoid Network* sem bloco linear

Daqui também se observa que o *Tree Partition* (figura 3.21) tem os modelos mais aproximados e consistentes para todas as combinações de termos de Input/Output. Não obstante, o *Sigmoid Network* com bloco linear de 8 *units* e 2/2 termos de Input/Output é aquele cuja resposta mais se aproxima aos dados experimentais (mais do que qualquer combinação do *Tree Partition*), principalmente na zona de operação (maioritariamente entre os 7.0 e 8.5 pH), por isso foi este o modelo escolhido para a fase seguinte.

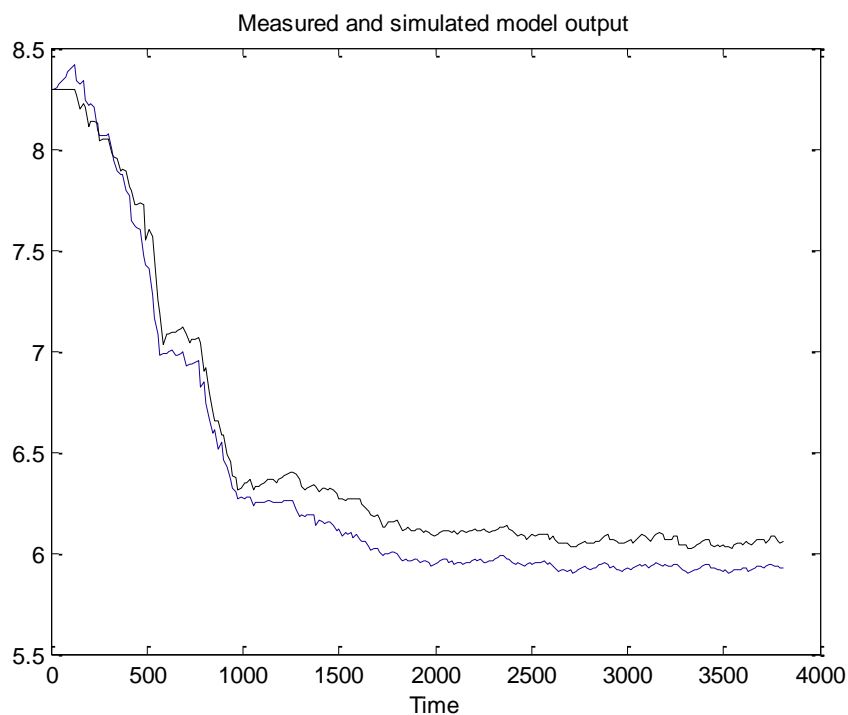


Figura 3.24 - Modelo de não linearidade *Sigmoid Network* com 8 *units* e 2 termos Input/Output

Cujos parâmetros são:

- N° de unidades do bloco não linear: 8
- N° de termos de entrada/saída: 2/2
- Intervalo de amostragem: 15 segundos
- Ordem dos regressores: $n_a = 2$, $n_b = 2$, $n_k = 1$
- *Fit%* dos dados de estimação: 85.93%
- *Best Fit%* dos dados de validação: 95.31%

Uma vez escolhido o modelo, foi exportado para o *workspace* e passou-se a implementar um diagrama de blocos em Simulink para atestar a sua fiabilidade.

Foi criado um conjunto de dados “Iddata” para cada uma das medições (manhã, tarde e noite). Em seguida verifica-se no *Scope* a sequência de Input, e a comparação entre a saída do modelo quando excitado com o sinal de Input PWM e os dados obtidos experimentalmente (para a manhã, tarde e noite).

Para cada um dos casos, foi criado um vetor de estados inicial baseado nos respetivos dados experimentais (manhã, tarde e noite), com o comando “findstates”; note-se que é necessário fornecer ao bloco do modelo as condições iniciais, dado estas não serem nulas.

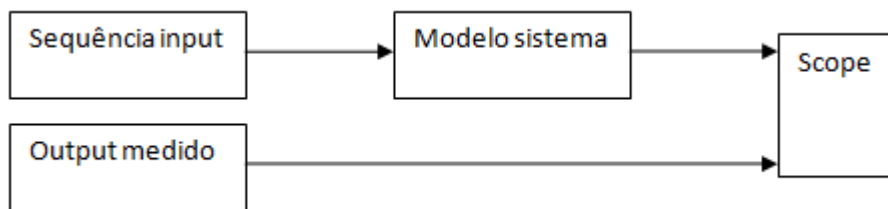


Figura 3.25 - Diagrama de blocos, comparação dos dados experimentais (Output) com os obtidos do modelo determinado

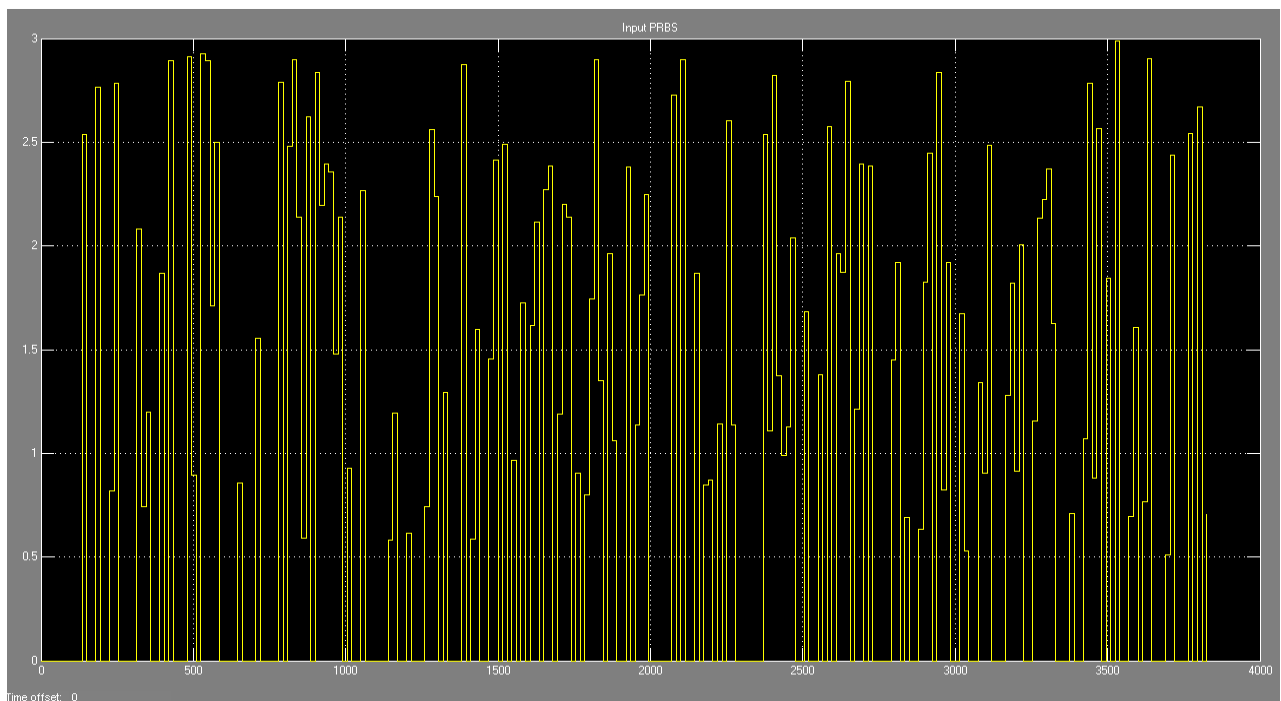


Figura 3.26 - Sequência de entrada, valores de duração (s) do pulso PWM solicitado, em função do tempo

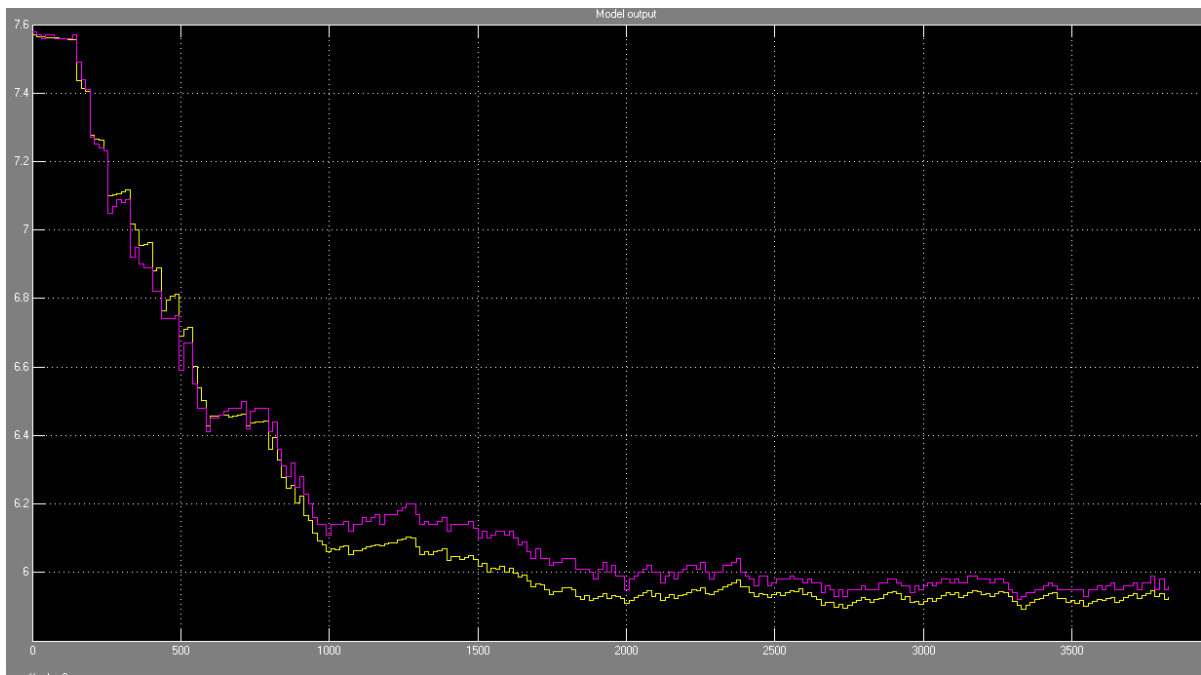


Figura 3.27 - Medições manhã (Output a violeta) VS Saída do modelo (amarelo)

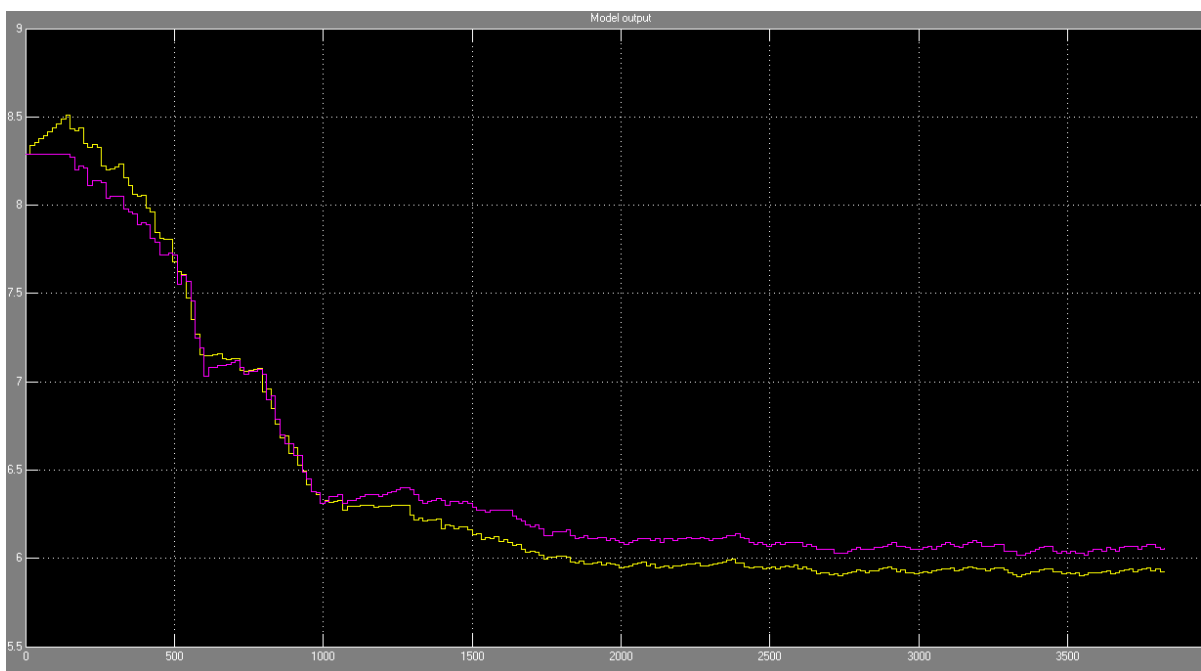


Figura 3.28 - Medições tarde (Output a violeta) VS Saída do modelo (amarelo)

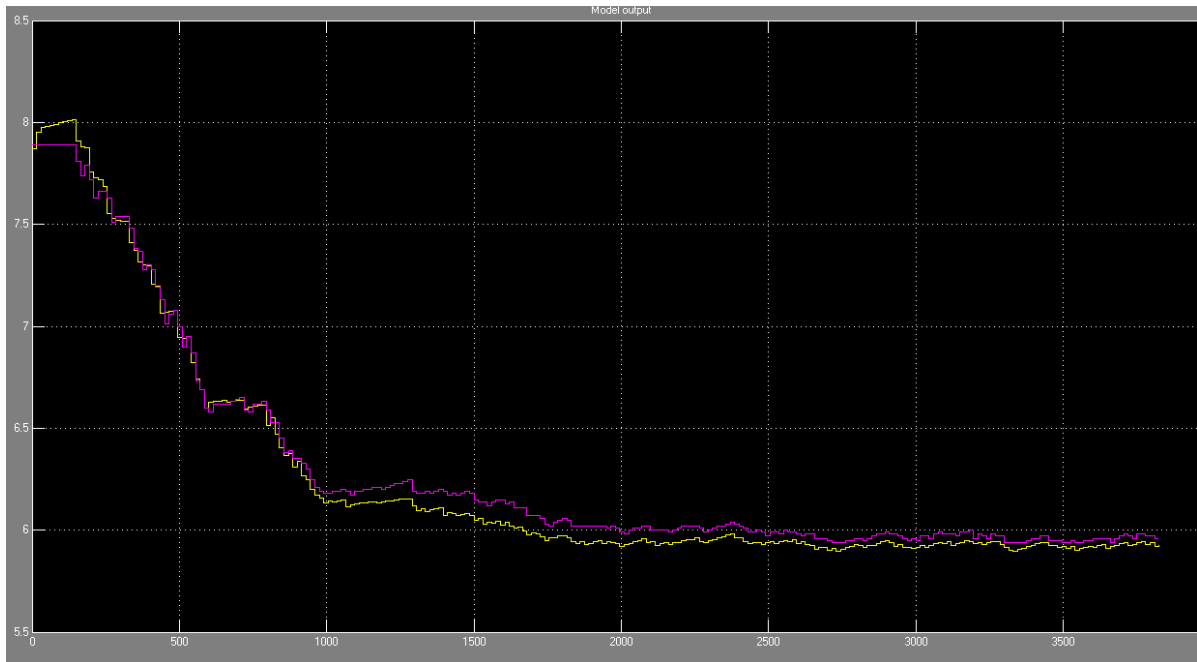


Figura 3.29 - Medições noite (Output a violeta) VS Saída do modelo (amarelo)

Como se pode verificar, a saída do modelo é semelhante aos dados obtidos experimentalmente, e comprova a seleção do modelo feita anteriormente. Há apenas uma discrepância maior entre os dados e o modelo da tarde mas ainda assim satisfatório, principalmente na gama estimada de operação.

A função de transferência de um sistema de neutralização ácido-base de pH é, segundo Kareem [19], Garcia [20] e Putrus [21], caracterizada por um sistema de primeira ordem. Neste caso, o modelo pode ser aproximado (usando os mesmos dados de entrada/saída utilizados para obter o modelo não linear, e com o auxílio da função “tfest” que estima a função de transferência para um conjunto de dados e um número de pólos/zeros) pela função de transferência:

$$G(z) = \frac{0.009565}{z+0.001231} \quad (14)$$

3.4 - Proposta de sistema de controlo PID

Escolhido o modelo, será estudada a implementação de um controlador PID através de simulação no Simulink. O método subjacente de sintonia do controlador neste *software* é um método proprietário desenvolvido pelo fabricante.

Foi testado o melhor modelo (*sigmoid network* 8 units 2/2 termos), com o vetor inicial de estados baseado nos dados recolhidos durante a noite. Foi feita uma simulação com controladores P, PI e PID para comparação. Foi utilizado um sinal de entrada que emula uma sequência de degraus unitários para uma referência de pH 7.5, 8.0 e por fim 7.0. Foi adicionado ao modelo uma componente de ruído Gaussiano de 1.5% de variância para simular condições reais (como perturbações aditivas, ruído de medição, entre outros), já que o sistema real nunca é ideal. Este valor é já significativo, para levar em conta as oscilações que se verificam no local em más condições climáticas. Para todos os casos foi escolhida a sintonia do controlador que oferece melhor relação entre menor tempo de resposta, tempo de estabilização, menor *overshoot*, estabilidade, convergência do sinal e suavidade da curva, escolhido através da avaliação ponderada de todos os parâmetros e de observação do sinal resultante.

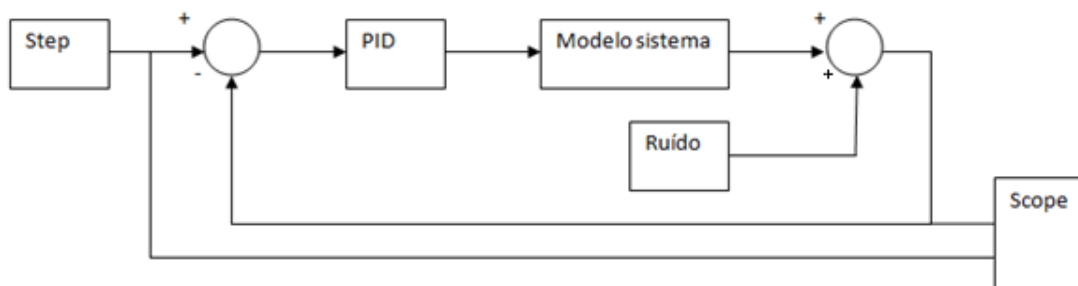


Figura 3.30 - Diagrama de blocos, degrau unitário com implementação de controlador PID e ruído

Modelo: Sigmoid network, 8 units, 2/2 termos I/O

Controlador P

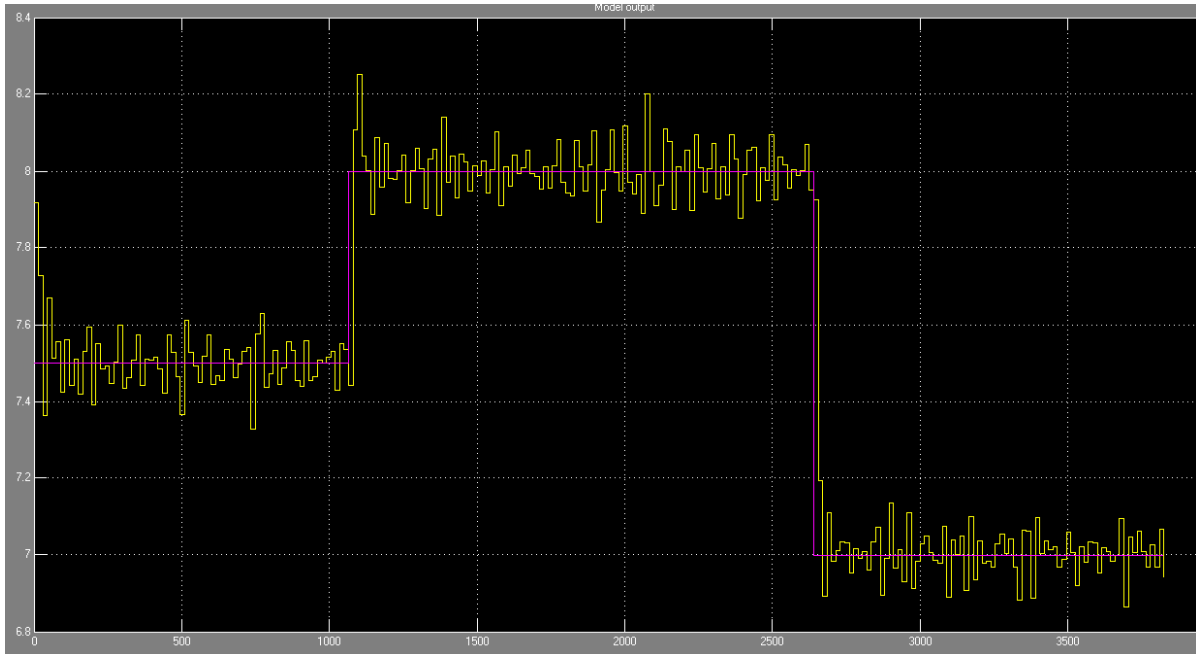


Figura 3.31 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador P

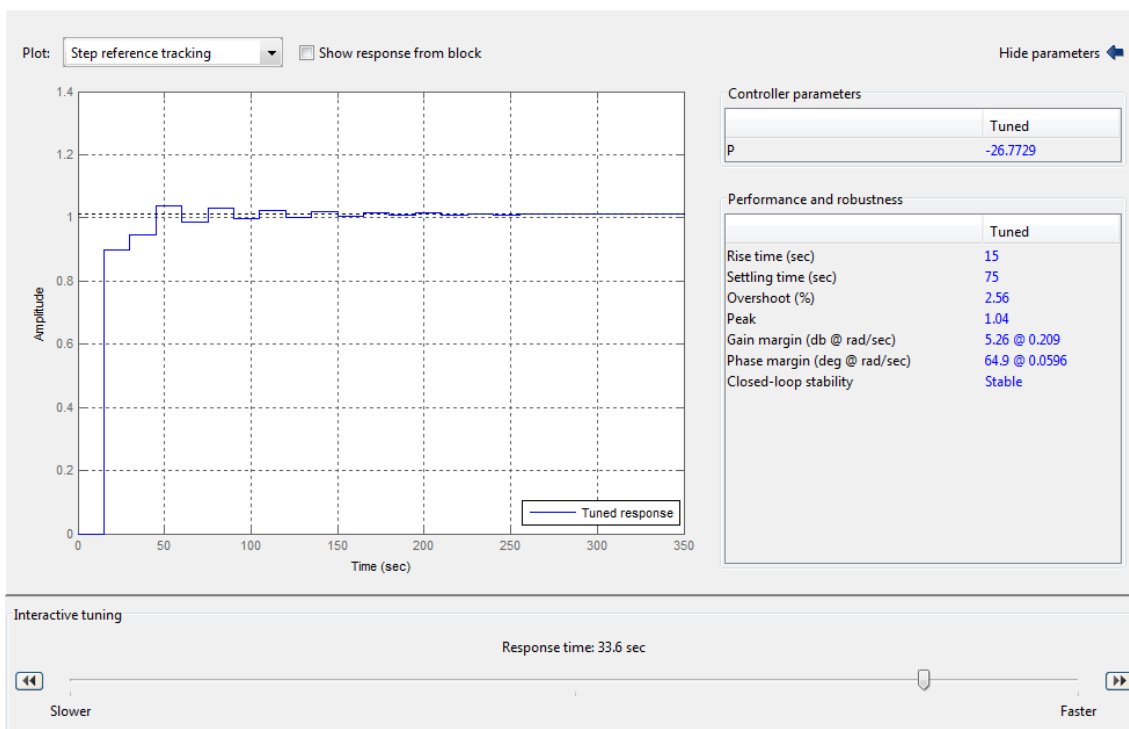


Figura 3.32 - PID tuner e parâmetros de desempenho para o controlador P

Modelo: Sigmoid network, 8 units, 2/2 termos I/O

Controlador PI

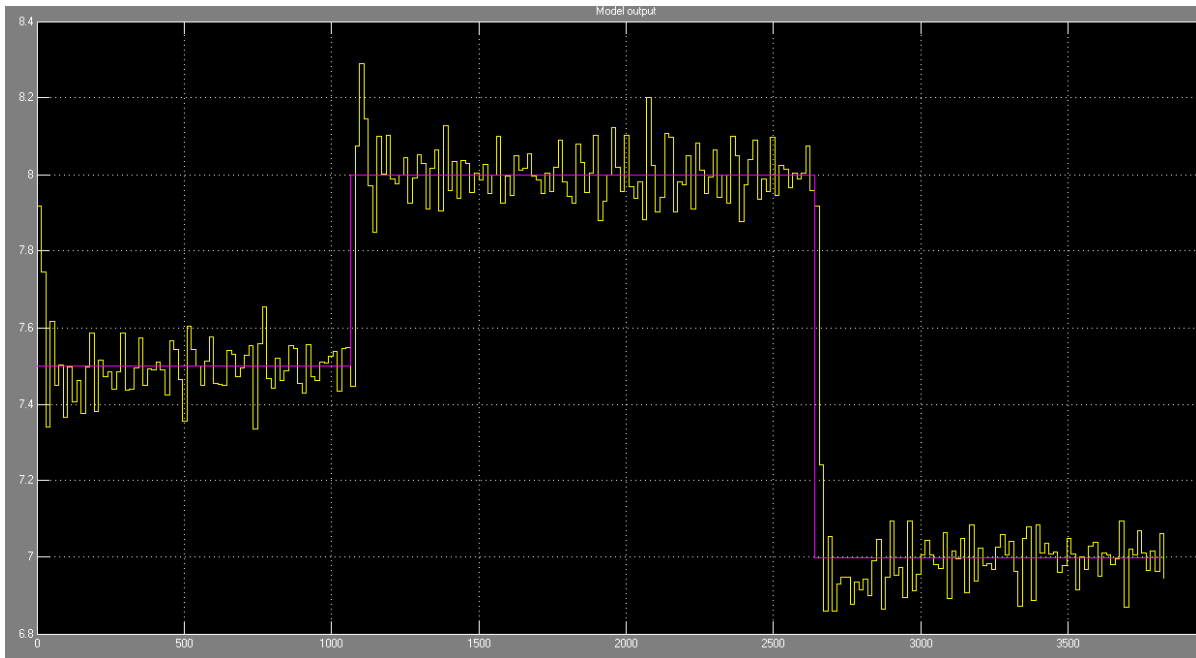


Figura 3.33 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador PI

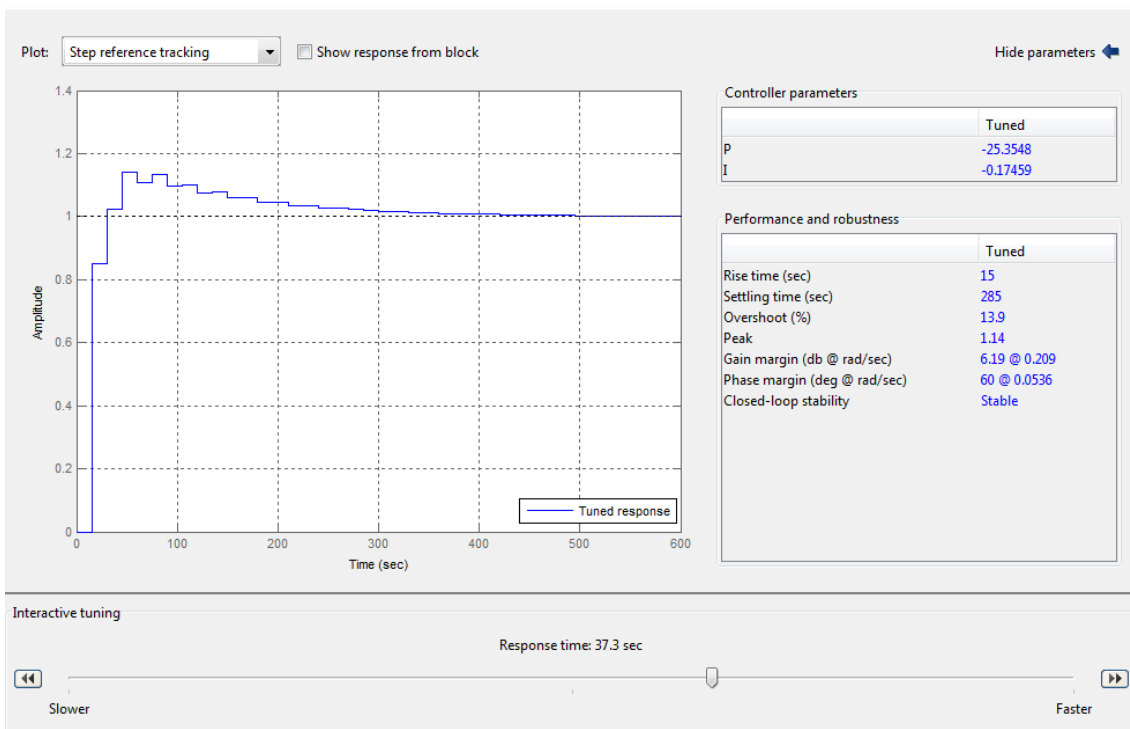


Figura 3.34 - PID tuner e parâmetros de desempenho para o controlador PI

Modelo: Sigmoid network, 8 units, 2/2 termos I/O

Controlador PID

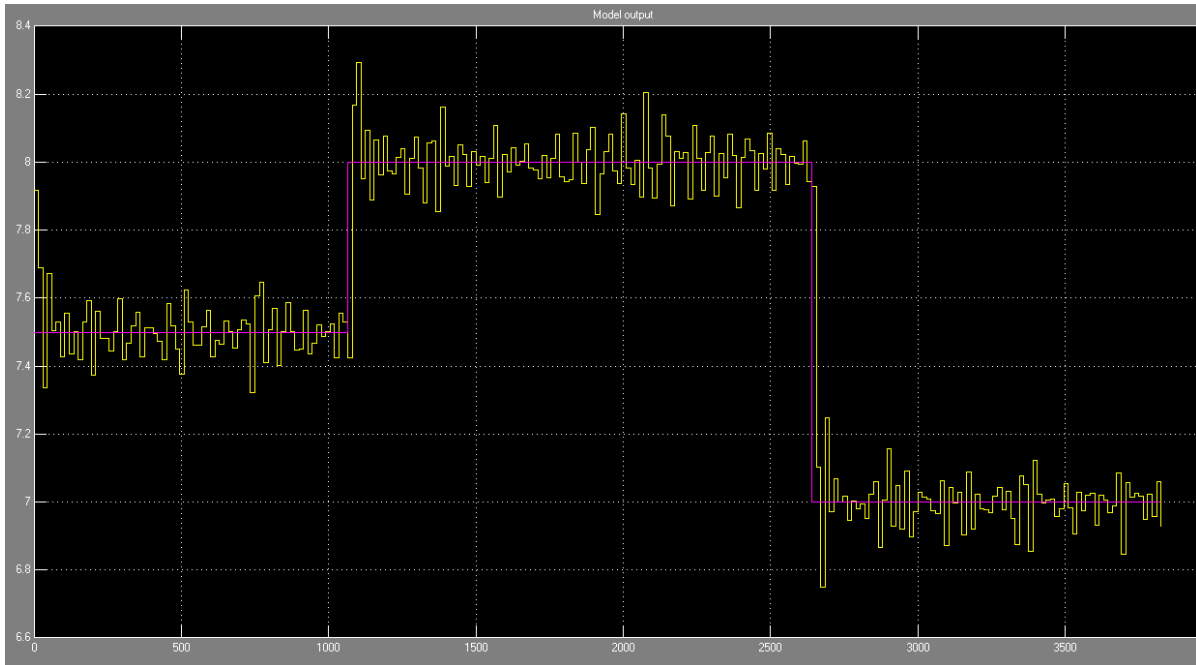


Figura 3.35 – Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador PID

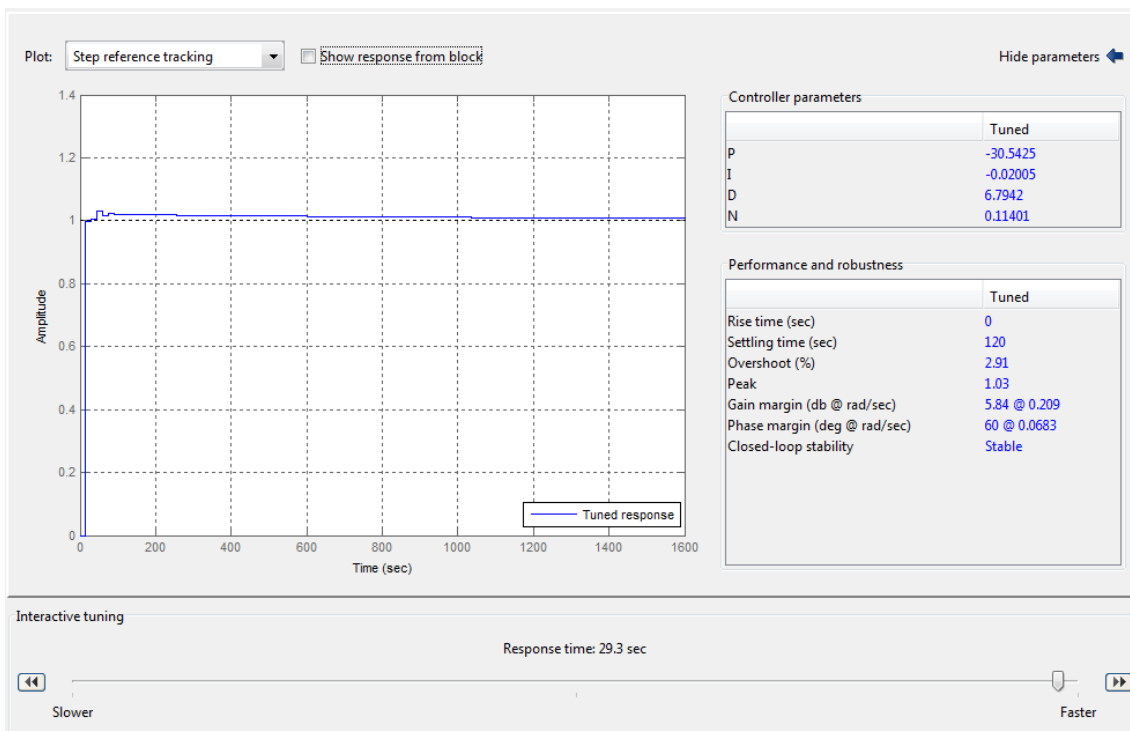


Figura 3.36 - PID tuner e parâmetros de desempenho para o controlador PID

Para referência, aqui está o controlador PID, com a mesma sintonia, sem ruído adicionado (condições ideais):

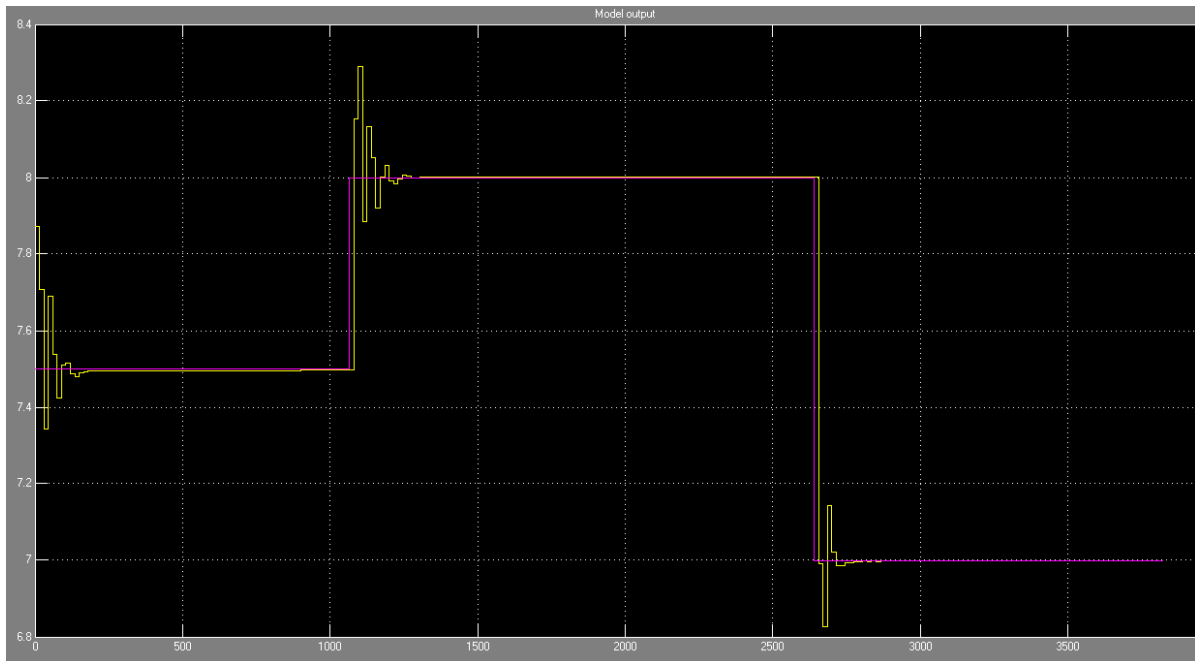


Figura 3.37 - Sequência de degraus (violeta) e resposta do sistema controlado (amarelo) para o controlador PID ideal

Pode-se verificar que o controlador apresenta uma boa performance em todos os casos, apesar do ruído introduzido que induz uma variância que chega aos 0.1 pH em torno do ponto. Para ruído desta magnitude, a oscilação fica majorada e aproxima-se bastante a valores observados em condições meteorológicas de vento forte. No entanto, os tempos de resposta são aceitáveis, o sinal acompanha bem a referência, mas há um *overshoot* inicial de cerca de 0.2 pH antes de estabilizar no valor pretendido (2.91% para o PID). O controlador PID em particular tem um bom desempenho, reduzindo significativamente o tempo de resposta, tempo de estabilização e *overshoot* em relação ao controlador PI (que teve o pior desempenho). A ação derivativa é considerada na indústria como sendo benéfica em processos com *delay*, e estes resultados comprovam-no. O controlador P neste caso também apresenta bons resultados, mas carece das vantagens práticas que o PID oferece em sistemas reais como é o caso da compensação de perturbações externas.

Com vista a minimizar a oscilação imposta pelo ruído adicionado, tentou-se fazer uma sintonia que tivesse em consideração a rejeição a perturbações, selecionando no PID *tuner* o tipo de resposta “Input disturbance rejection”, mas continuando a ter em consideração um equilíbrio aceitável entre tempo de resposta, tempo de estabilização, sobre-elevação, e *tracking* do valor de referência.

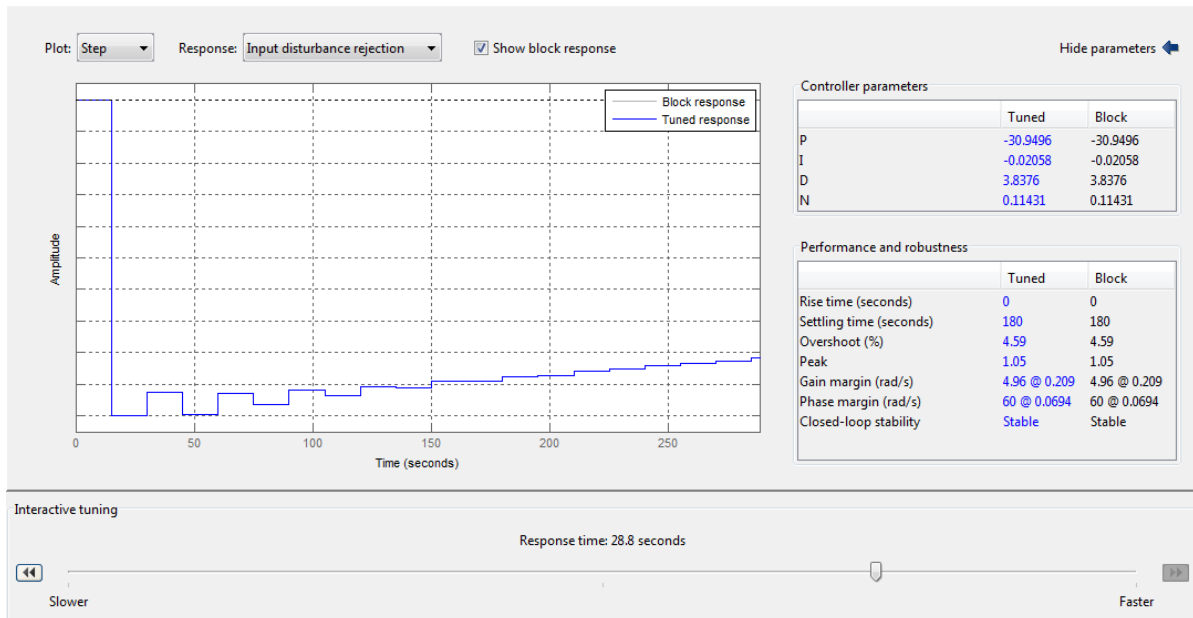


Figura 3.38 – PID *tuner* e parâmetros de desempenho para o controlador PID, com critério de rejeição a perturbações

Contudo, na prática não foram visíveis resultados positivos na resposta do sistema, uma vez que a oscilação continua praticamente igual, para além de ter aumentado a % de sobre-elevação e o tempo de estabilização.

3.5 – Implementação e Resultados com o Sistema de Controle

Utilizando os ganhos de sintonia P, I e D obtidos na simulação, implementou-se no microcontrolador o sistema de controle PID (com recurso à livreria existente para Arduino) e foram feitos novos testes no *setup* experimental, para validar essa simulação. Para isso enviam-se 255 pontos de referência para o aparelho, que perfaz a sequência de entrada simulada de pH 7.5, 8.0 e 7.0. O sistema de controle afinado tentará manter o pH num valor aproximado à referência. Esses valores são enviados de 15 em 15 segundos, e o aparelho responde com uma leitura e envio do valor atual de pH. A cada iteração do *sketch* do Arduino, o PID calcula o erro entre a PV e o SP e abrirá a válvula quando achar necessário fazer uma correção.

Os resultados obtidos, com medições durante o período da tarde do dia 14 de Outubro de 2012 entre as 15h:15m e as 16h:19m, em comparação com os resultados obtidos em simulação, foram os que se apresentam em seguida:

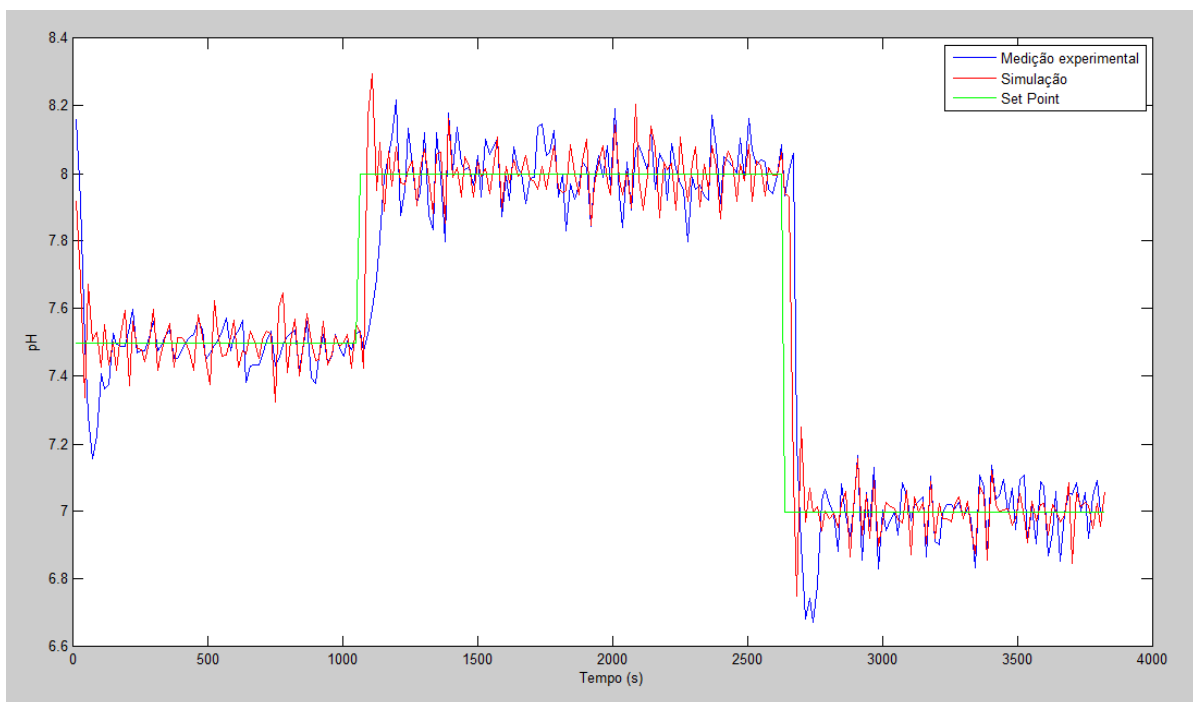


Figura 3.39 – Resultados obtidos com a implementação do sistema de controle

Pode-se verificar que os resultados obtidos são próximos dos simulados (e que o ruído de 1.5% de variância na simulação é realista). O pH acompanha bem a referência, embora com uma oscilação significativa em seu torno, que se deve à presença de vento forte durante o teste. Em condições normais esta variação deveria ser bastante mais reduzida, e talvez uma sintonia diferente dos ganhos P, I e D permitissem também reduzi-la um pouco. No cenário real, a convergência na subida é um pouco mais lenta que na simulação (tornando o tempo de estabilização ligeiramente mais longo), pois a inércia do sistema não permitiu uma subida tão rápida dos valores de pH (que sobem automaticamente com o sistema em repouso por isso não é controlável), mas o *overshoot* também foi ligeiramente mais reduzido (o que confere com o propósito da ação diferencial). Contudo, nas reduções do sinal de referência ele foi um pouco maior do que o modelo tinha previsto, mas a diferença é pequena.

4.1 - Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo de um aparelho para controlar os níveis de pH em tanques de aquacultura, permitindo o seu controlo automático e a monitorização e controlo remotos.

Observando os resultados obtidos com a implementação do sistema de controlo, pode-se considerar que o esforço é bem sucedido, e que o controlador PID é adequado para este tipo de aplicação.

A resposta do sistema e o tempo de estabilização acabam por ser um pouco longos, principalmente quando se aumenta o SP (na ordem dos 1 a 2 minutos desde que é dada a instrução para mudar o SP, até que o pH estabilize neste valor). Por isso não é desejável que a referência sofra muitas alterações num curto espaço de tempo, isso pode levar a que o sistema instabilize e fique em oscilação, e que se perca bastante tempo até ele voltar à estabilidade.

Apesar dos esforços não se conseguiu eliminar a variância nas medições e no controlo do pH. Isto deve-se em grande parte à presença regular de vento forte na zona onde se situa o Centro do Ramalhete, e ao fato verificado de que essas condições meteorológicas introduzem esse comportamento indesejável no sistema. Uma investigação mais aprofundada a nível do sistema hidráulico, das máquinas elétricas que fazem a captação da água e das canalizações decerto resolveriam ou minorariam este problema, permitindo identificar a sua causa para poder desenvolver e implementar uma solução. Poderia também ter-se explorado mais diligentemente um método de sintonia em Simulink que tivesse como critério a rejeição a perturbações para tentar minimizar essa variação.

A comunicação por *sockets* funciona bem nesta aplicação, desde que os dispositivos tenham acesso à internet. A recolha de dados remotamente permite que estes sejam armazenados para monitorização e análise em qualquer suporte pretendido pelo utilizador. No decorrer deste trabalho eles foram armazenados em ficheiros .txt, mas facilmente pode ser construída uma base de dados para o seu arquivo.

Não foi possível comparar o comportamento do sistema controlado com o do sistema original por este já ter sido desmontado, por necessidade do centro, à altura dos testes.

4.2 - Viabilidade

Após os ensaios realizados, e comparando os resultados obtidos que atestam à sua fiabilidade, as suas funcionalidades e o seu custo, frente ao produto comercial, pode-se concluir que o protótipo foi bem sucedido.

O produto comercial tem um PVP que ronda os 400€. O protótipo foi construído por um custo aproximado de 200€, sendo possível com alguma otimização fazê-lo por volta de 150€. Para uma construção em série, comprando componentes em grandes quantidades, o valor (verificando nos retalhistas os preços de alguns componentes para compras superiores a 100 unidades) seria cerca de 10 a 15% mais barato.

Relativamente a funcionalidades, o protótipo tem as vantagens de poder também medir temperatura, de possibilitar a implementação de algoritmos de controlo complexos, e de permitir a monitorização e controlo remoto via Internet através de uma aplicação baseada num *script* em Python. Para além disso, sendo uma solução *open source*, permite que de futuro sejam implementadas ainda mais funcionalidades para se adaptar à aplicação pretendida nesse momento.

Quanto à fiabilidade nas medições, os resultados foram satisfatórios, diferindo apenas um pouco dos valores esperados em relação à solução comercial (assumindo que este tem um erro nulo, o que pode não ser o caso). A capacidade de regular o pH também é adequada, apesar das limitações verificadas. A sensibilidade ao ruído do sistema perante as condições atmosféricas é um ponto negativo, e seria importante arranjar uma solução.

4.3 - Trabalhos futuros

Tomando este projeto como base, é possível construir sobre ela para continuar a desenvolver um sistema maior e melhor. Algumas sugestões são:

- Adicionar suporte para medir outros parâmetros de água (condutividade, turbidez, ou outros que sejam relevantes).
- Adicionar suporte para atuar sobre outras variáveis (bomba de nível, aquecedor, aumento do pH...)
- Construir mais aparelhos similares baseados neste protótipo para integrar numa rede de controlo distribuída.
- Desenvolver a aplicação cliente para conferir um maior grau de controlo e de monitorização sobre o controlador.
- Otimizar o *design* do aparelho atual, em termos de construção, *software*, componentes utilizados e desenho da PCB.
- Estudo e implementação de novas estratégias de controlo mais eficientes, ou otimização do algoritmo do controlador PID existente.
- Identificar a causa e eliminar as oscilações no sistema na presença de vento, através de um novo filtro de sinal, de uma sintonia do PID que consiga compensar as perturbações, ou de alterações no sistema hidráulico.

5 - Referências bibliográficas

- [1] ISRS “*Coral Reefs and Ocean Acidification*”, Briefing Paper 5, International Society for Reef Studies, 9 pp (2008)
- [2] De’ath G., Lough J., Fabricius K. “*Declining coral calcification on the Great Barrier Reef*”, Science magazine (2009)
- [3] Feely R.A., Sabine C.L., Fabry V.J., “*Carbon Dioxide and our Ocean Legacy*” (2006)
- [4] Turley, C.M., J.M. Roberts, J.M. Guinotte, “*Corals in deep water: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold water ecosystems?*” Coral Reefs 26: 445-448 (2007)
- [5] Gattuso, J.P., L. Hansson, and the EPOCA Consortium. “*European Project on Ocean Acidification (EPOCA): Objectives, products, and scientific highlights*”, Oceanography 22(4):190–201 (2009)
- [6] Doney S.C., Fabry V.J., Feely R.A., Kleypas J.A., “*Ocean acidification: The other CO₂ problem*”, (2009)
- [7] Hopley D., “*Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process*”, Springer, (2011)
- [8] National Academy of Sciences, “*Ocean Acidification: A National Strategy to Meet the Challenges of a Changing Ocean*”, National Academies Press, (2010)
- [9] Alwan G.M., “*pH-Control Problems of Wastewater Treatment Plants*”, Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol.4, No.2, PP 37-45 (2008)
- [10] Beck J.C.P., da Silva I.N.L., Guerra K., Messias D.E., “*Automação e controle de tanque para Piscicultura*”, Anais do XXXIV COBENGE (2006)
- [11] Zhu X., Li D., He D., Wang J., Ma D., Li F. “*A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture*”, Computers and Electronics in Agriculture 71S (2010) S3-S9 (2008)
- [12] Neelamegam P., Kumaravel S., Raghunatnah R. “*Microcontroller based distributed monitoring system for fresh water fish aquaculture*”, Instrumentation Science and Technology, 36: 515-524 (2008)
- [13] Lee P.G. “*Process control and artificial intelligence software for aquaculture*”, Aquacultural Engineering 23 (2000) 13-36 (2000)
- [14] Glasgow H.B., Burkholder J.M., Reed R.E., Lewitus A.J., Kleinman J.E., “*Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensors, telemetry, and computing technologies*”, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 300 (2004) 409-448 (2004)

- [15] Gouveia B.A.T., “*Dispositivos de monitorização e controlo automático de fatores climáticos em museus*”, Universidade da Madeira (2009)
- [16] Calil B.M., “*Automação de piscicultura em tanques artificiais*”, Universidade de Taubaté – SP (2005)
- [17] Rahmat M.F., Mohd Subha N.A., Ishaq Kashif M., Wahab N. Abdul, “*Modeling and controller design for the VVS-400 pilot scale heating and ventilation system*”, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Vol.2, N.4, December 2009
- [18] Neves M.G.S, “*Auto-tuning de controladores PID pelo método Relay*”, Instituto Superior Técnico (2009)
- [19] Garcia C., De Godoy R.J, “*Modeling and simulation of pH neutralization plant including the process instrumentation*”, Universidade de São Paulo (2011)
- [20] Al Kareem D.I.A, “*Implementation of Neural control for neutralization process*”, University of Technology (2009)
- [21] Putrus K.M., Zihwar Z.F, “*Adaptive control of a pH process*”, University of Technology (n.d)
- [22] <http://www.controlguru.com>
- [23] <http://www.pidtuning.net>
- [24] <http://phduino.blogspot.pt/>
- [25] <http://www.ni.com>
- [26] <http://www.mathworks.com>
- [27] <http://www.arduino.cc>
- [28] <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/booklets/OA1.pdf>
- [29] http://www.66pacific.com/ph/ph_4.htm
- [30] <http://www.nt.ntnu.no/scale/pHelectrode.html>
- [31] <http://www.emesystems.com/OL2ph.htm>
- [32] http://www.noaanews.noaa.gov/stories2008/20081121_coralacidification.html
- [33] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7933589.stm>
- [34] <http://chriscolose.wordpress.com/2007/12/22/corals-in-peril/>
- [35] <http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/param.htm>
- [36] <http://wupcenter.mtu.edu/education/stream/pHecologydatainfo.htm>